



Р.Е.КОВАЛЕВСКИЙ
А.А.ЧЕКМАРЕВ

**КОНСТРУИРОВАНИЕ
И ТЕХНОЛОГИЯ
ВАКУУМНОПЛОТНЫХ
ПАЯНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ**



Р. Е. КОВАЛЕВСКИЙ, А. А. ЧЕКМАРЕВ

КОНСТРУИРОВАНИЕ
И ТЕХНОЛОГИЯ
ВАКУУМНОПЛОТНЫХ
ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Серия «Электронное материаловедение»



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1968

6П2.15
К 56
УДК 621.52

Ковалевский Р. Е., Чекмарев А. А.

К 56 **Конструирование и технология вакуумноплотных паяных соединений, М., «Энергия», 1968.**
208 с. с илл.

В книге рассмотрены физические основы процесса пайки и особенности получения вакуумноплотных паяных соединений, металлов в электровакуумных приборах, применяемые для этой цели припой, а также вопросы конструирования вакуумноплотных деталей и узлов. Приведены сведения об используемых защитно-восстановительных средах и методах их контроля, применяемом оборудовании для очистки газовых сред, нагрева и контроля паяных соединений, а также сведения по конструированию оснастки для высокотемпературной пайки. Даны таблицы размеров и весов нормализованных колец припоя. Книга предназначена для широких кругов инженерно-технических работников, занимающихся конструированием и производством вакуумноплотных паяных соединений, а также может быть полезной для студентов соответствующих специальностей.

3-3-12

6П2.15

279-67

**КОВАЛЕВСКИЙ РЮРИК ЕЛИЗАРОВИЧ, ЧЕКМАРЕВ АЛЬБЕРТ
АНАТОЛЬЕВИЧ**

**Конструирование и технология вакуумноплотных паяных
соединений**

Редактор *М. Л. Любимов*

Обложка художника *В. М. Аладьева*

Технический редактор *Л. М. Кузнецова* Корректор *Г. Г. Желтоза*

Сдано в набор 19/VI 1967 г.

Подписано к печати 7/III 1968 г.

T-00270

Формат 84×108^{1/2}

Бумага типографская № 3

Усл. печ. л. 10,92

Уч.-изд. л. 11,47

Тираж 7000 экз.

Цена 75 коп.

Зак. 416

Издательство „Энергия“, Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Быстрое развитие радиовещания, радиорелейных линий связи, радиолокации и некоторых областей измерительной техники связано с успехами в конструировании и производстве металлостеклянных и металлокерамических электровакуумных приборов, особенно мощных генераторных радиоламп и приборов сверхвысоких частот. В Советском Союзе непрерывно разрабатываются новые типы электровакуумных приборов, имеющих сложные вакуумноплотные паяные соединения. Расширяются действующие и создаются новые виды производства. Все это увеличивает круг работников, которым в своей практической деятельности приходится знакомиться с технологией вакуумноплотной пайки, участвовать в конструировании и производстве новых приборов с вакуумноплотными паяными соединениями.

Существует ряд книг по пайке как отечественных, так и зарубежных, но до сих пор нет ни одной книги, которая бы в должной мере освещала вопросы технологии производства и конструирования паяных изделий с учетом особенностей получения вакуумноплотных соединений, включая вопросы конструирования, технологии и специальной оснастки для пайки. Предлагаемая книга является попыткой в какой-то мере восполнить этот пробел. Чтобы сделать книгу доступной широкому кругу читателей, материал излагается достаточно просто.

Авторы выражают свою признательность чл.-корр. Академии наук СССР, проф. Н. Д. Девяткову, канд. техн. наук М. Л. Любимову, канд. техн. наук С. Н. Лоцманову и инж. А. В. Балицкому за ценные советы и замечания, сделанные при просмотре и редактировании рукописи.

Авторы с благодарностью примут все пожелания и замечания, направленные на улучшение книги.

Введение

Развитие современной радиолокации, радионавигации, систем управления беспилотными объектами, радиовещания, телевидения, а также ряда других отраслей теснейшим образом связано с повышением качества и надежности электровакуумных приборов сверхвысоких частот.

В качестве генераторов и усилителей сверхвысокочастотных электромагнитных колебаний в настоящее время широко используется ряд электровакуумных приборов: магнетронов, клистронов, платинотронов, амплитронов, ламп бегущей и обратной волн и др. Все эти электровакуумные приборы представляют собой сложные металлостеклянные или металлокерамические конструкции с большим числом соединений самых различных материалов. Для осуществления таких соединений применяются различные виды сварки и пайки. Если в электровакуумных приборах со стеклянной оболочкой (в приемно-усилительных лампах, электроннолучевых трубках, осветительных лампах, ионных приборах и т. п.) основным видом соединений является точечная сварка, то в указанных приборах сверхвысоких частот основным способом соединения является пайка. Так, например, в приборах средней сложности насчитывается до 100 соединений, из которых 70—80 приходится на паяные. В отдельных сложных приборах число паяных соединений доходит до 120—150.

Пайка — один из древнейших способов соединения деталей — в настоящее время применяется во многих отраслях новой техники: в самолето- и ракетостроении, в производстве газовых турбин, в атомной технике. Паяные соединения в изделиях этих отраслей техники должны быть в основном высокопрочными или герметичными для охлаждающих жидкостей. Вопросы технологии та-

ких соединений достаточно полно освещены в литературе.

Основным требованием к паяным соединениям в электровакуумном приборостроении является сохранение вакуумной плотности в процессе производства при прогревах до $480\text{--}700^\circ\text{C}$, а также в условиях эксплуатации при температурах от -60 до $+200^\circ\text{C}$, при воздействии тропического климата, в атмосфере морского тумана, в условиях длительного (до 8—10 лет) хранения. Получение высоконадежных соединений, работающих в таких тяжелых условиях, осложняется еще рядом конструктивных и технологических требований, которым должны удовлетворять электровакуумные приборы, как, например, необходимость разнородности спаиваемых материалов, высокие электропроводность и теплопроводность швов, низкое давление насыщенных паров припоев и спаиваемых материалов при высоких температурах, многоступенчатость паек, высокая точность паяных узлов, окалиностойкость и др.

Трудности комплексного учета всех особенностей при проектировании и осуществлении паяных соединений в электровакуумных приборах усугубляются отсутствием научно-обоснованных рекомендаций по их конструированию и технологии. В результате этого в производстве имеет место большой брак из-за натекания воздуха по паяным швам, доходящий до 20% при освоении новых приборов и до 3—8% в серийном производстве.

В настоящей работе сделана попытка обобщить имеющиеся отечественные и иностранные материалы по пайке, а также производственный опыт ряда предприятий применительно к задачам электровакуумного приборостроения.

Это особенно необходимо в связи с приходом в бурно развивающуюся электровакуумную промышленность специалистов, имеющих серьезную подготовку в области физики, электроники, радиотехники при совершенно недостаточной подготовке по конструированию и технологии производства сложных металлических устройств, какими являются электровакуумные сверхвысокочастотные приборы.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПАЙКА И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

1-1. Виды пайки

Пайкой называется процесс соединения твердых материалов с помощью расплавленного металла или сплава (припоя), который, проникая в зазор между нагретыми поверхностями спаиваемых материалов, смачивает их и при затвердевании образует неразъемное соединение. От сварки пайка отличается тем, что соединяемые материалы при пайке находятся в твердом состоянии, при сварке же они доводятся до пластического или жидкого состояния.

Исторически принято все виды пайки подразделять на мягкую и твердую, подразумевая под этим главным образом температуру плавления припоя.

Под мягкой пайкой обычно понимается пайка припоями, температура плавления которых не превышает 300—400°С. При твердой пайке температура плавления припоя превышает 400—450°С.

Следует отметить, что в последнее время наметилась тенденция классифицировать виды пайки не по температуре плавления припоя, а по физико-химическому взаимодействию между припоем и спаиваемыми материалами. В связи с этим различают пайку адгезионную и реактивную.

При адгезионной пайке соединение осуществляется за счет атомарных сил сцепления между припоем и основными материалами.

При реактивной пайке имеет место химико-физическое взаимодействие между припоем и основным материалом с образованием новых промежуточных сплавов и взаимной диффузией частиц материала и припоя.

Такая классификация видов пайки, отражая физическую сущность протекающих процессов, является более прогрессивной, хотя еще и не нашла повсеместного признания.

Пайка легкоплавкими припоями на основе алюминия, свинца, олова и кадмия в электровакуумном приборостроении применяется в основном для соединения многочисленных деталей внешней арматуры. Пайка же тугоплавкими припоями на основе меди, серебра, золота, никеля и т. п. применяется значительно более широко. В производстве металлических электровакуумных приборов типа магнетронов, клистронов, мощных генераторных ламп, ламп обратной волны и др. на паяные такими припоями соединения приходится около 80—90% от общего числа соединений.

1-2. Особенности пайки в производстве электровакуумных приборов

Вакуумная плотность спаев. Вакуумная плотность паяного шва является одним из основных критериев надежности электровакуумных приборов. Для получения вакуумноплотного шва необходимо соблюдение ряда условий. Наиболее существенными из них являются:

- а) химическая чистота спаиваемых поверхностей;
- б) отсутствие пористости, раковин, сквозных капилляров и микротрещин в припое, а также в материале соединяемых деталей в зоне шва;
- в) отсутствие значительных внутренних напряжений в спаиваемых деталях, которые могли бы привести к появлению микротрещин;
- г) отсутствие диффузионных процессов в шве, которые могли бы привести к образованию сквозных пор в процессе прогрева соединений;
- д) подбор оптимальной посадки соединения, обеспечивающей необходимое заполнение припоем шва при температуре пайки, а также вакуумную плотность соединения при охлаждении изделия, технологических нагревах и последующем длительном хранении.

Таким образом, необходимость одновременного соблюдения этих условий требует особо внимательного подхода к вакуумным спаям в отличие от спаев механических, где несоблюдение каких-либо из вышеперечисленных условий далеко не всегда отражается на механической прочности соединения. Элементы электровакуумных приборов обычно не несут больших силовых нагрузок, в связи с чем запас прочности вакуумных спаев

настолько велик, что брака в производстве по этой причине практически не встречается.

Наличие же в соединяемых деталях внутренних напряжений, возникающих по разным причинам (разнородность спаиваемых материалов, неравномерность нагрева и т. п.), оказывает существенное влияние на вакуумную плотность спаев, так как в напряженных системах гораздо активнее развиваются все процессы (диффузия, появление и развитие микротрещин и т. п.), которые могут привести к нарушению вакуумной плотности соединения.

Разнородность спаиваемых материалов. При выборе материалов для нового электровакуумного прибора конструктор обычно не свободен, так как материалы, как правило, задаются условиями работы прибора, что в какой-то мере уже определяет конструкцию спая. Например, на спай разнородных металлов в приборах сверхвысоких частот приходится около 70% от общего количества спаев. Так как в соединениях разнородных материалов, которые часто резко различаются по коэффициентам линейного расширения, всегда имеются остаточные напряжения, то вопрос о том, насколько они опасны, решается конструкцией шва и условиями его работы. Кроме того, различия в растекаемости припоя и в других физико-химических свойствах материалов также накладывают свой отпечаток на конструкцию паяных соединений.

Электропроводность и теплопроводность швов. В приборах сверхвысоких частот очень часто швы соединяют стенки полости (например, объемного резонатора), по которым текут значительные токи. В связи с этим во избежание излишних потерь на электрическое сопротивление швов они должны обладать достаточной электропроводностью.

В других случаях спай не должен ухудшать теплоотвода от сильно разогревающихся элементов прибора. Это важно в спаях ламелей с корпусом, у магнетронов, у паяных коллекторов, в спаях сеток клистрона с корпусом и т. п. Этим требованиям обычно удовлетворяют широко применяемые серебряные припои. Большей частью для этой цели пайка предпочтительнее сварки, так как сварка (за исключением диффузионной) не обеспечивает в большинстве случаев хорошего контакта по всей площади стыка.

Вакуумные свойства спаиваемых материалов и припоев. При конструировании соединений с пайкой деталей вакуумной полости необходимо учитывать, что внутренние детали ламп работают при высоких температурах и вакууме порядка 10^{-6} — 10^{-8} мм рт. ст.

По этой причине материалы и припой для электровакуумных приборов не должны иметь упругости паров, превышающей 10^{-6} — 10^{-8} мм рт. ст. при температурах обезгаживания и эксплуатации приборов. По той же причине при вакуумной пайке недопустимо применение каких-либо флюсов в виде паст и жидкостей, которые оставляли бы после себя летучие загрязнения.

В настоящее время в связи с созданием нового откачного оборудования (ионные насосы) и повышением температуры обезгаживания металло-керамических ламп появляется возможность достигать в приборах вакуум порядка 10^{-8} — 10^{-9} мм рт. ст., что резко улучшает их качество и надежность. Это, в свою очередь, обязывает более строго подходить к применяемому в настоящее время припою и материалам.

Многократность паяек. В большинстве случаев паяные узлы вследствие технологических особенностей неоднократно нагреваются повторно для последующих паяек. Для осуществления этих последовательных паяек используются следующие приемы:

- а) применение различных припоев с последовательно уменьшающейся температурой плавления;
- б) применение диффузионно твердеющих припоев (пайка меди припоем ПСр72 В);
- в) принятие мер, препятствующих разогреву паяного ранее шва (экранировка, установка холодильников, помещение в менее нагретую зону печи и т. д.).

Окалиностойкость. В технологический цикл производства электровакуумных приборов входит нагрев их до температуры 450 — 500°C (а иногда и до 700°C) в течение 20 — 30 ч на воздухе. Иногда такие прогревы необходимы и в процессе эксплуатации приборов (мощные разборные клистроны). Естественно, что и после прогревов швы не должны терять вакуумную плотность.

С целью уменьшения окисления в настоящее время распространяется прогрев приборов при обезгаживании во время откачки в вакууме или инертной среде. Это уменьшает опасность нарушения вакуумной плотности

швов. Однако происходящие при нагреве диффузионные процессы и изменение напряженного состояния в спаях разнородных материалов могут нарушить их вакуумную плотность.

Точность паяных узлов. Часто в производстве электровакуумных приборов необходимо спаивать узлы с получением определенных размеров в пределах 2—3 классов точности или же сохранять эту точность при последующих пайках. Это вполне возможно и осуществляется с помощью специальной оснастки, учитывающей тепловые деформации деталей.

Вакуумная гигиена. Операция пайки является обычно одной из заключительных операций при сборке приборов, после которой какая-либо очистка внутренней полости невозможна. Поэтому пайка должна проходить в условиях повышенных требований вакуумной гигиены. Это особенно важно при производстве виброустойчивых приборов; попадание внутрь вакуумной полости прибора мельчайших частиц приводит к потере его работоспособности.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ПАЙКЕ

2-1. Основные стадии процесса пайки

Процесс образования паяного соединения условно можно разделить на следующие стадии:

1) нагрев спаиваемых деталей в зоне шва до температуры пайки, при этом обычно одновременно прогревается и припой, заранее уложенный в место пайки;

2) расплавление припоя;

3) растекание расплавленного припоя по поверхностям спаиваемых материалов и заполнение зазоров в соединении;

4) взаимодействие спаиваемых материалов и припоя в соединении (взаимная диффузия, образование новых сплавов и т. д.);

5) охлаждение изделия и затвердевание припоя в зазоре.

В действительности эти стадии пайки перекрывают друг друга и сопровождаются, кроме того, рядом других процессов (восста-

новление или разрушение пленки оксидов, поглощение и выделение газов материалом и припоем, отжиг и рекристаллизация спаиваемых материалов, химическое взаимодействие материалов с окружающей средой, возникновение или снятие внутренних напряжений в материалах соединяемых деталей и т. д.).

Наиболее важную роль в осуществлении процесса пайки играют следующие физико-химические процессы.

2-2. Смачивание поверхности твердых металлов припоем

После нагрева зоны шва и расплавления припоя последний должен растечься по поверхности спаиваемых металлов, что возможно только тогда, когда расплавленный припой смачивает их.

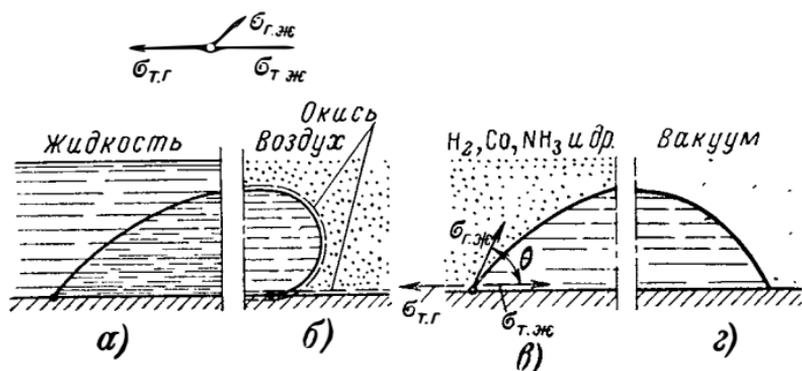


Рис. 1. Форма капли расплавленного припоя на поверхности твердого металла при различной окружающей среде. а — хорошее смачивание под слоем жидкого флюса; б — отсутствие смачивания в атмосфере; в — схема сил, действующих на границе раздела жидкого припоя, твердого тела и защитной газовой среды; г — смачивание в вакууме.

Как известно, смачивание является первой стадией молекулярного или атомарного взаимодействия жидкости с поверхностью твердого тела. Смачивание наблюдается на границе соприкосновения трех фаз, причем одна из них является твердым телом, а две другие несмешивающимися жидкостями (расплавленный припой и флюс на рис. 1, а) или жидкостью и газом (рис. 1, б и в), который, в частности, может быть разрежен до давления 10^{-3} — 10^{-5} мм рт. ст. (рис. 1, г).

Атом, находящийся на поверхности жидкого металла, взаимодействует, с одной стороны, с атомами, находящимися в нижних слоях расплава, а с другой стороны, с молекулами газовой среды, находящейся над метал-

лом, и атомами металла в парообразном состоянии. Так как упругость паров металлов над его поверхностью в условиях пайки незначительна, а воздействие молекул газа на атомы металла очень мало, то результирующее усилие, действующее на поверхностные атомы расплава, не равно нулю и направлено внутрь металла нормально к его поверхности. Это усилие создает атомное давление, под влиянием которого поверхностные атомы стремятся переместиться с поверхности внутрь, хотя им и препятствуют перемещающиеся навстречу вследствие теплового движения атомы внутренних слоев. Силы притяжения поверхностных атомов внутрь компенсируются силами упругого сжатия внутренних слоев, в связи с чем поверхностный слой находится в упруго-напряженном состоянии, что придает ему особые свойства.

Таким образом, атомы поверхностного слоя обладают большим запасом потенциальной энергии, чем атомы, находящиеся во внутренних слоях. Этот избыток сосредоточенной на поверхности жидкого металла энергии, называется свободной энергией поверхности или просто — поверхностной энергией. Численно удельная поверхностная энергия σ равна работе обратного изотермического образования единицы поверхности жидкого или твердого слоя и измеряется обычно в эрг/см^2 . Общая поверхностная энергия $\sigma_{\text{общ}}$ пропорциональна величине поверхности S

$$\sigma_{\text{общ}} = \sigma S.$$

Для упрощения на практике понятие поверхностной энергии заменяют понятием поверхностного натяжения, которое выражают условно силой, приложенной к единице длины и направленной вдоль поверхности раздела; эту силу измеряют в дин/см ($\text{эрг/см}^2 = \text{дин/см}$) и называют коэффициентом поверхностного натяжения.

Силы межатомного взаимодействия для металлов в твердом состоянии идентичны по своей природе силам, действующим в жидком металле, однако подвижность атомов (или ионов) наружного слоя у жидкости и твердого тела различна.

Таким образом, поверхность твердых металлов, так же как и жидких, обладает запасом свободной поверхностной энергии, однако в этом случае величина ее в разных точках поверхности различна, что объясняется различной ориентировкой кристаллов, образующих наруж-

ную поверхность. Так, например, у наиболее распространенной в металлах кубической гранцентрированной решетки каждый атом будет иметь внутри чистого кристалла 12 связей с соседними атомами.

У атомов, лежащих на поверхности металлов, часть связей освобождена. Число этих свободных связей различно и зависит от их положения в решетке (на грани или в углу). Свободные силы связи и образуют поверхностную энергию твердого тела.

Для осуществления пайки необходимо прежде всего, чтобы атомы расплавленного припоя вступили в непосредственный контакт с поверхностными атомами твердого металла, т. е. чтобы произошло смачивание. Однако смачивание возможно лишь в том случае, если при этом происходит уменьшение свободной энергии системы металл — жидкий припой, которое осуществляется за счет изменения их поверхностных энергий. Факт выделения тепла при смачивании, свидетельствующий о происходящем при этом уменьшении свободной энергии системы металл — жидкий припой, был обнаружен еще в прошлом столетии.

Растекание капли жидкого металла по твердой поверхности приводит к изменению формы капли, перемещению ее центра тяжести и главное к увеличению смоченной поверхности. Все эти процессы могут быть условно представлены в виде равновесия векторов поверхностного натяжения в точке на границе трех фаз, как это показано на рис. 1, д.

Условие равновесия выражается уравнением

$$\sigma_{г.ж} \cos \theta + \sigma_{т.ж} - \sigma_{т.г} = 0,$$

где $\sigma_{г.ж}$, $\sigma_{т.ж}$ и $\sigma_{т.г}$ — векторы поверхностных натяжений на границах раздела соответствующих сред;

θ — краевой угол или угол смачивания.

Как теоретические вычисления, так и экспериментальные определения значений поверхностных натяжений твердых металлов представляют большие трудности даже при обычных температурах. Поэтому каких-либо конкретных данных о величинах поверхностных натяжений металлов, применяемых в электровакуумном производстве, нет. Следует отметить, что величина поверхностной энергии твердого тела существенно зависит от методов обработки этих поверхностей. Так, например, лучшая растекаемость припоя по матированным чугуной или стальной дробью поверхностям

Металлов может быть объяснена увеличением энергии поверхностного слоя металла за счет наклепа. И, наоборот, припой хуже растекается по полированным поверхностям вследствие уменьшения поверхностной энергии под воздействием поверхностно-активных химических веществ, применяемых при полировке.

Определение истинных значений поверхностного натяжения между расплавленным и твердым металлами в настоящее время вообще невозможно из-за отсутствия соответствующей методики. Предпринимаются лишь попытки косвенного определения этой величины.

Данным же по поверхностному натяжению на границе раздела между расплавленным металлом и газом совершенно недостаточно для анализа смачиваемости материалов, применяемых в электровакуумной промышленности. Поэтому практически критерием смачиваемости является краевой угол θ , который нетрудно определить экспериментально.

Следует отметить, что величина краевого угла у некоторых расплавов может изменяться в процессе охлаждения, увеличиваясь от значений θ , характерных для хорошего смачивания ($10-20^\circ$) до 90° и более, характерных для плохого смачивания или его отсутствия вообще. Материалы с такими свойствами непригодны для использования в качестве припоя.

Для практики высокотемпературной пайки имеет значение краевой угол в момент затвердевания припоя и считается приемлемым, если он не превышает 30° .

В настоящее время явления смачивания в области металлических систем изучены очень мало. На характер смачивания оказывает влияние ряд условий, из которых наиболее существенными являются следующие:

- 1) состояние металлической поверхности (вид предварительной обработки, отсутствие пленок окиси, жировых загрязнений и т. п.);
- 2) наличие химической связи между металлами и их взаимной растворимости;
- 3) наличие флюса и состав окружающей среды (водород, вакуум и т. п.).

Отсутствие растворимости в системе спаиваемых металлов почти всегда ведет к отсутствию смачивания. Так, например, серебро на стали теряет смачиваемость, т. е. краевой угол θ , равный при 1100°C примерно 30° , при охлаждении до точки затвердевания серебра 961°C возрастает до 70° (капля стягивается), так как серебро с железом не обладают взаимной растворимостью.

При добавке к серебру палладия (до 5%) краевой угол падает до 20° , что объясняется наличием непрерывного ряда твердых растворов в системе палладий — железо. Подобно палладию действуют другие присадки к серебру.

На рис. 2 показано влияние олова на угол смачивания железа свинцом. Добавка олова в количестве 1—1,5% уменьшает угол смачивания θ с 70 до 30°, так что дальнейшее увеличение его концентрации уже существенно не влияет на процесс растекания расплава.

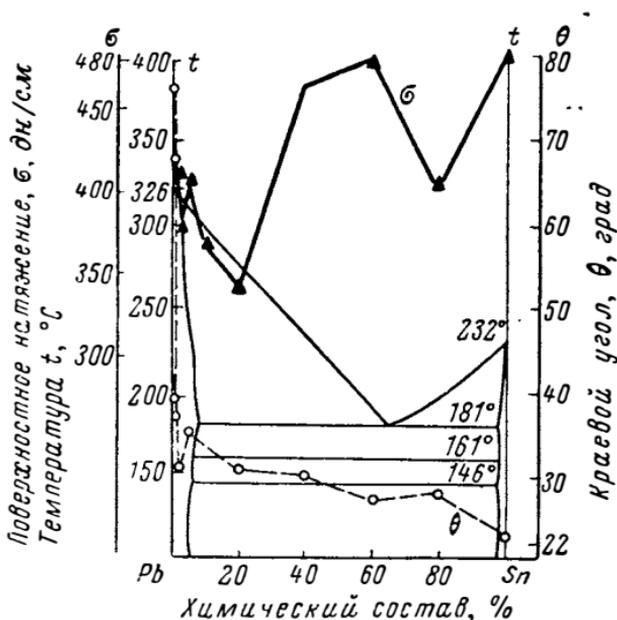


Рис. 2. Влияние олова на краевой угол смачивания θ свинцом железа и поверхностное натяжение σ (кривые σ и θ наложены на диаграмму системы Pb—Sn для наглядности).

Действие флюсов, кроме предохранения от окисления и удаления окисной пленки, заключается так же и в том, что находящиеся в нем отдельные вещества даже в небольших количествах, адсорбируясь в поверхностном слое, резко изменяют свободную энергию поверхности на границе раздела твердое тело — жидкость и тем самым способствуют значительному улучшению смачиваемости.

2-3. Растекаемость припоя на металлической поверхности

Для получения качественного паяного соединения необходимо, чтобы припой хорошо растекался по поверхности спаиваемых металлов.

В реальных условиях на процесс распространения жидкого припоя по поверхности твердых металлов наряду со смачиваемостью влияет ряд факторов, таких как шероховатость и напряженное состояние поверхностей, жидкотекучесть припоя, скорость процессов физико-химического взаимодействия между припоем и металлом, поверхностное натяжение жидкого припоя, капиллярные силы, состав среды, в которой осуществляется пайка, и др.

Для оценки комплексного воздействия всех этих факторов введено понятие растекаемости.

Под растекаемостью понимается свойство жидких металлов или сплавов распространяться по поверхности других металлов или сплавов, находящихся в твердом состоянии, или в зазоре между ними.

Существенное влияние на растекаемость припоев оказывает их жидкотекучесть. Жидкотекучесть является свойством кристаллизующейся жидкости протекать в наклонных или вертикальных каналах с твердыми стенками под действием сил тяжести. Жидкотекучесть имеет значение главным образом при пайке припоями с широким интервалом кристаллизации, где она, как известно, наименьшая. Жидкотекучесть, таким образом, зависит от характера и формы кристаллизации сплава. Бóльшая жидкотекучесть наблюдается при образовании округленных кристаллов, растущих в виде сплошного фронта, наименьшая — при дендритной кристаллизации.

Вязкость жидкого припоя, которая определяется подвижностью атомов лишь внутри жидкости, не оказывая прямого влияния на растекаемость, определяет скорость распространения припоя.

Растекаемость жидких сплавов зависит от температуры. Например, растекаемость свинцово-оловянных припоев по меди с повышением их температуры заметно уменьшается. Такое своеобразное поведение растекаемости жидких сплавов связано, по-видимому, с особенностями изменения их структуры и состояния поверхности твердого тела в зависимости от температуры. В результате взаимодействия жидкого припоя с основным металлом изменяется его состав, вязкость, поверхностное натяжение, что также оказывает большое влияние на растекаемость, как правило уменьшая ее. Для нормального заполнения зазора при сильном взаимодействии между

припоем и основным металлом зазор в соединении должен быть большим, чем при слабом взаимодействии между ними.

Качество поверхности. При рассмотрении влияния качества поверхности на растекание припоя необходимо учитывать как ее шероховатость, так и напряженное состояние.

Известно, что по шероховатым поверхностям припой растекается гораздо лучше, чем по гладким вследствие капиллярного воздействия впадин микропрофиля.

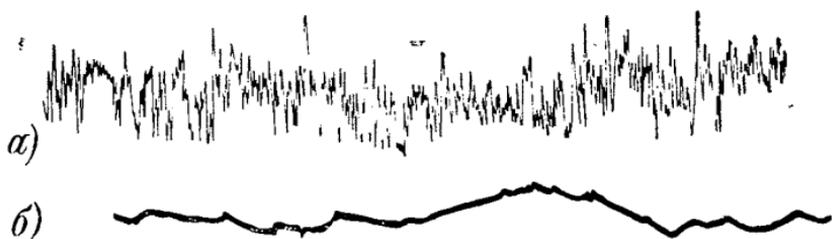


Рис. 3. Шероховатость шлифованной поверхности закаленной стали У10 поперек (а) и вдоль (б) направления движения режущих зерен круга. Вертикальное увеличение $\times 1000$.

При обработке поверхности металла резанием (точением, фрезерованием, шлифовкой и т. п.) возникает различная шероховатость вдоль и поперек направления движения инструмента (рис. 3).

В результате этого расплавленный припой быстрее распространяется вдоль впадин, так как, помимо капиллярного воздействия, в этом направлении ему оказывается меньшее гидравлическое сопротивление.

Капиллярное воздействие может влиять на способность растеканию припоя также при наличии на поверхности металла грубых углублений (накатка, рифление), которые выводят эту поверхность из пределов класса чистоты при обычных методах обработки.

Подробно зависимость растекаемости припоя от шероховатости поверхности металла не изучена. Наблюдающаяся в практике лучшая растекаемость припоя по матированным поверхностям объясняется, вероятнее всего, большим запасом энергии нагартованной поверхности, что улучшает ее взаимодействие с расплавленным припоем.

Влияние химической чистоты поверхности спаиваемых металлов. Припой хорошо смачивает и растекается в соединении, когда соединяемые поверхности совершенно чисты, свободны от окислов, жира и грязи.

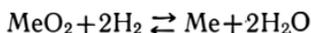
Известно, что окисленные поверхности твердых металлов имеют в несколько раз меньшую по сравнению с неокисленными поверхностьную энергию, что ухудшает смачиваемость.

Надо сказать, что одной из особенностей окислов является снижение их устойчивости при нагревании. При достижении определенной температуры окислы начинают разлагаться с выделением кислорода. В табл. 1 представлены значения теоретически необходимого вакуума для разложения окислов некоторых металлов при температурах пайки.

Таблица 1
Теоретически необходимый вакуум для диссоциации окислов при заданной температуре

Окись металла	Температура, °C	Равновесное давление, мм рт. ст.
Закись железа FeO . . .	1 150	10 ⁻¹⁰
Окись хрома Cr ₂ O ₃ . . .	1 150	10 ⁻¹⁵
Окись хрома Cr ₂ O ₃ . . .	850	10 ⁻²³
Окись марганца MnO ₂ . . .	1 150	10 ⁻¹⁸
Двуокись кремния SiO ₂	1 150	10 ⁻¹⁹
Окись титана TiO ₂ . . .	1 150	10 ⁻²¹
Окись алюминия Al ₂ O ₃	1 150	10 ⁻²⁷

Как видно из табл. 1, разложение окислов большинства наиболее употребительных металлов происходит при весьма высоких температурах, превышающих часто точку плавления металлов. Поэтому при пайке основным процессом удаления окислов является процесс восстановления по реакциям



или



Очевидно, что восстановление окиси будет происходить более интенсивно, если содержание водорода (или CO) значительно превышает содержание водяного пара (или CO₂). Процесс восстановления будет продолжаться до тех пор, пока процентное содержание водяного пара не возрастет до такого значения, что отношение H₂O/H₂ (или CO₂/CO) будет в равновесии для данного металла при определенной температуре. Причем, чем выше температура, тем легче восстанавливается окись.

Жировые загрязнения разлагаются при нагреве до температуры пайки, оставаясь на поверхности твердого металла, и препятствуют взаимодействию его с припоём.

Поэтому наличие на спаиваемых поверхностях жирных загрязнений недопустимо.

С пленками окислов на поверхности металла и припоя дело обстоит несколько иначе. При пайке металлов в газовых средах приходится иметь дело с двумя типами окислов:

1) с окислами, взаимодействующими с расплавленным припоем;

2) с окислами, не взаимодействующими с расплавленным припоем.

В первом случае пайка может и произойти, но окисел, растворяющийся в жидком припое, увеличивает опасность получения невакуумноплотного шва. Для устранения второго вида окислов в электровакуумной промышленности используются при пайке защитно-восстановительные атмосферы.

В условиях производства наилучшим показателем качества водородной атмосферы является ее точка росы, т. е. температура, до которой должен охладиться при неизменном давлении газ для того, чтобы содержащийся в нем водяной пар достиг насыщения. Точка росы легко определяется экспериментально в производственных условиях с помощью конденсационного гигрометра.

На рис. 4 показана зависимость между содержанием водяного пара в водороде и точкой росы.

На рис. 5 представлены зависимости между температурой и точкой росы для условий равновесия реакций восстановления некоторых окислов. Область значений точек росы и температур вправо от кривых обратимых реакций отвечает условиям распада окислов и восстановления металла, влево от кривых — условиям интенсивного окисления металла.

Как видно из рис. 5, практически невозможно паять в водороде алюминий, бериллий и сплавы на их основе из-за очень низкой точки росы, необходимой в этом случае.

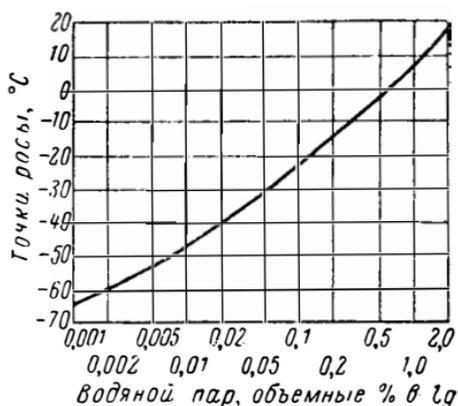


Рис. 4. Зависимость между содержанием водяного пара в водороде и точкой росы.

Техническая восстановительная атмосфера для пайки, кроме водяного пара, содержит обычно свободный кислород, который не может быть обнаружен обычными измерениями точки росы, но при температуре пайки может вызывать окисление изделий, так что атмосфера вместо восстановительной фактически будет окислительной, несмотря на «хорошую» точку росы. Поэтому содержание кислорода в восстановительной атмосфере не должно быть выше 0,01 %.

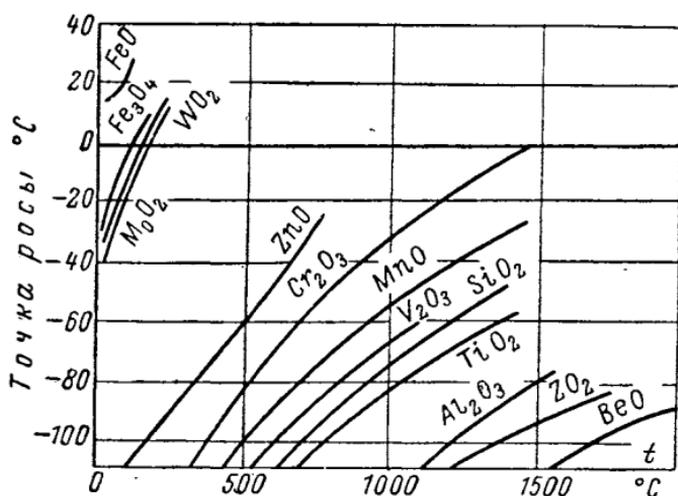


Рис. 5. Зависимость между температурой t и точкой росы для условий равновесия реакций восстановления некоторых окислов.

На основании данных об устойчивости окислов чистых металлов в том случае, когда продукты окисления сложных сплавов состоят из простых окислов, можно сделать предварительное заключение о возможности пайки этих сплавов в восстановительных средах. В случаях же образования окислов на легированных сплавах, где они обычно имеют более сложный состав, условия обратной реакции между ними и восстановителями будут иными, чем для окислов чистых металлов. Так, например, нержавеющие стали типа 1X18H9T, при окислении которых образуется смесь окислов хрома и железа, поддаются пайке в среде водорода, если из газа удалены следы кислорода и точка росы не превышает -60°C . При температуре ниже 1200°C окислы, образующиеся на стали, содержащей хром, кремний и марганец в сумме более 2%, не восстанавливаются в водороде. Стали, со-

державшие более 2% Ti, также не удается запаять в этой среде.

При использовании восстановительных сред следует иметь в виду, что состояние атмосферы, требуемой для восстановления окислов, должно быть обеспечено в непосредственной близости от места пайки. Это не всегда удается обеспечивать из-за:

- 1) загрязнений газа кислородом и водяным паром на пути прохождения его от основного источника к печи (в стыках трубопроводов, в вентилях, кранах и т. п.);
- 2) подсосов и течей в камере печи;
- 3) внесения в камеру печи газов, адсорбированных поверхностями изделий, оснастки, внутренней поверхностью камеры;
- 4) увеличения влажности атмосферы вследствие процесса восстановления окислов на изделиях и оснастке.

Все это необходимо учитывать при оценке точки росы газов.

Влияние вакуума на состояние поверхности с точки зрения пайки. С поверхности паяемых в вакууме металлов происходит удаление окислов, жиров, масел, грязи и газов. Удаление жировых, масляных и других загрязнений с поверхности нагретого в вакууме металла осуществляется вследствие их разложения и испарения¹.

Механизм удаления окиси в вакууме неясен, так как имеющиеся теоретические расчеты показывают, что для обеспечения диссоциации окислов при температурах пайки потребовались бы очень низкие давления (см. табл. 1).

Предполагается, что при повышенных температурах в вакууме металл абсорбирует кислород из окислов, находящихся на поверхности металла. Наиболее вероятно это предположение для металлов, имеющих большое сродство к кислороду, например для титана.

Практические данные по растекаемости. Для практики пайки важно знать растекаемость припоев, так как она наиболее полно отражает влияние всех рассмотренных выше факторов.

Такие исчерпывающие данные по растекаемости, которые могли бы служить технологической характеристикой, в настоящее время отсутствуют. Нет также единой методики для ее определения.

¹ Это, разумеется, не означает, что для пайки в вакууме можно применять грязные, не обезжиренные или неподготовленные детали.

В практике за основу определения растекаемости припоя принимается площадь растекшегося припоя при прочих равных условиях.

В табл. 2 приведены такие данные по растекаемости припоев в водороде по наиболее употребительным материалам в электровакуумном приборостроении.

Таблица 2

Растекаемость припоев по различным материалам в водороде

Материал	Растекаемость припоев		
	ПСр72*	Меди*	Серебра*
Медь	100	—	Разъедает, образуя эвтектику
Ковар	6	70	4
Сталь 08	30	100	4
Никель	40	4	50
Молибден	—	6	Не смачивается
Фени 42	20	20	9
Фени 46	4	4	Не смачивается
Фени 49	7	Не смачивается	" "
Сплав Н47Д5	10	7	4

* Температура выдержки при расплавлении припоя ПСр72 820° С, меди 1093° С, серебра 993° С.

Растекаемость припоя ПСр72 по меди принята за 100.

Как видно из таблицы, растекаемость припоев по различным материалам колеблется в широких пределах, что необходимо учитывать, выбирая место расположения припоя при пайке узлов из разнородных материалов. Иногда встречается необходимость ограничивать растекание припоя по поверхности одного материала. Для этого применяют ограничивающие канавки (рис. 6), барьеры из несмачиваемого в данных условиях материала, препятствующие стеканию припоя вниз под действием силы тяжести (рис. 7 — так называемый «потолочный» шов), нанесение паст из тугоплавких окислов (глинозем, окись магния, гидроокись магния, окись хрома), замешанных на спирте или воде, или аквадага.

Особым приемом ограничения растекаемости является насыщение поверхности металла тугоплавкими окис-

лами путем обработки ее струей глиноземного песка, который, в отличие от карборундового песка и чугунной дробы, менее прочен, что создает возможность для внедрения мелких откалывающихся частичек глинозема в поверхность металла.

Заполнение припоем зазора в соединении. Для получения качественного паяного соединения необходимо, чтобы расплавленный припой хорошо за-

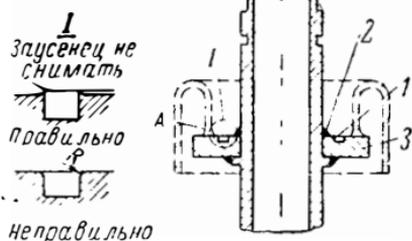


Рис. 6. Ограничение растекаемости припая 2 по плоскости детали 3 специальной канавкой 1.

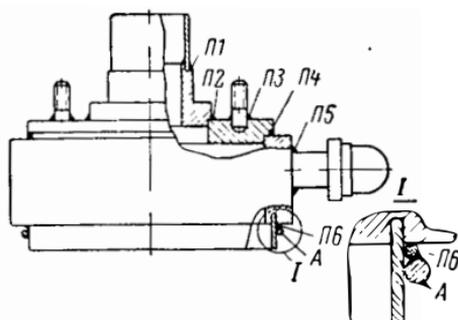


Рис. 7. Ограничение растекаемости (стекания вниз) припоя П6 нихромовой проволокой А.

полнял зазор соединения. Качество заполнения зазора во многом зависит от капиллярных свойств припоя в данном зазоре.

Из теории капиллярных явлений известно, что высота поднятия смачивающей жидкости в капиллярах, образованных параллельными стенками, определяется выражением

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\Delta \gamma g},$$

где σ — поверхностное натяжение жидкости, *дин/см*;
 θ — краевой угол смачивания;
 Δ — величина зазора, *см*;
 γ — плотность припоя в жидком состоянии, *г/см³*;
 g — ускорение силы тяжести, *см/сек²*.

Приведенные на рис. 8 экспериментальные данные хорошо совпадают с данными, вычисленными по этой формуле.

Время заполнения t припоем горизонтального зазора длиной l при условиях, соответствующих течению вязких

жидкостей, определяются по законам гидродинамики из выражения

$$t = \frac{3\eta}{\Delta\sigma \cos \theta} l^2,$$

где η — вязкость расплавленного припоя, в пузах¹ (остальные обозначения указаны выше).

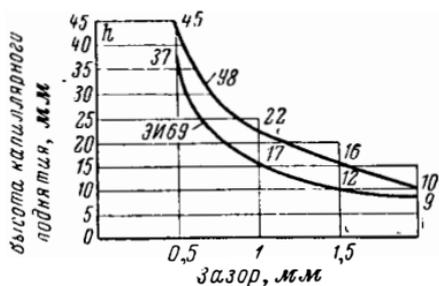


Рис. 8. График капиллярного поднятия медного припоя при температуре 1200°С по сталям марок ЭИ69 и У8.

превосходящую высоту реальных паяных соединений. Так, например, при зазоре 0,1 мм расплавленная медь поднимается на высоту 200—300 мм, а при зазорах 0,6—1,0 мм — на 40—20 мм.

Обычно основным требованием к высокотемпературной пайке является требование обеспечения высокой прочности паяного соединения. Экспериментально установлено, что наибольшая прочность паяных соединений из различных материалов и припоев достигается при зазорах порядка 0,02—0,1 мм (рис. 9). Применять

Приведенные на рис. 8 экспериментальные данные хорошо совпадают с данными, вычисленными по этой формуле.

Величины поверхностного натяжения σ расплавов наиболее ходовых материалов и припоев даны в табл. 3.

Таким образом, капиллярность обеспечивает подъем жидкого припоя на высоту, значительно

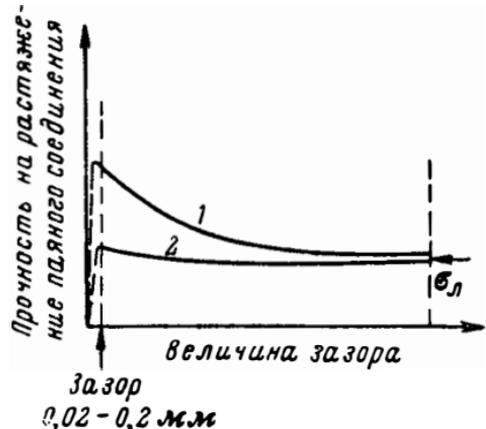


Рис. 9. Зависимость прочности паяного соединения от величины зазора.

1 — кривая для материала, прочность которого выше, чем прочность припоя в литом состоянии; 2 — кривая для материала, прочность которого равна или немного выше прочности припоя в литом состоянии; σ_l — прочность припоя в литом состоянии.

¹ 1 пз = 1 дин/сек/см² = 1 г/см · сек.

Значения плотности, поверхностного натяжения и вязкости некоторых металлов и сплавов в жидком состоянии

Металл или сплав	Температура, плав-ления, °С	Плотность в жидком состоянии, г/см ³	Поверх-ностное натяжение дин/см	Вязкость при температуре плавления, пз
Алюминий	658	2,38	520	—
Вольфрам	3 370	—	—	—
Железо	1 530	6,9	581	—
Золото	1 063	17	612—1 018	—
Индий	161	—	—	—
Кадмий	321	8	815	0,24
Кобальт	1 049	—	—	—
Медь	1 083	8,3	1 148	0,035
Молибден	2 620	—	—	—
Никель	1 452	—	1 350	—
Олово	232	7	480	0,02
Палладий	1 555	—	—	—
Платина	1 773	19	1 819	—
Свинец	327,3	10,3	424	0,03
Серебро	961	9,4	858	—
Тантал	2 350	—	—	—
Титан	1 813	—	—	—
Цирконий	1 700	—	—	—
Сплав ПСр72	780	—	962	—

малые зазоры для соединений целесообразно, так как:

а) обеспечивается более высокая точность паяных узлов;

б) расход припоя минимален, что особенно важно при использовании дорогостоящих припоев, содержащих серебро, золото, индий, палладий и др.;

в) отсутствует большая неравномерность зазора в соединении, которая может привести к незаполнению отдельных участков шва вследствие зависимости скорости распространения припоя от величины зазора.

В реальных условиях ввиду неравномерности нагрева, контакта припоя лишь с одной из спаиваемых деталей, различной растекаемости припоя по материалам деталей и других причин, расплавляющийся припой может тонким слоем растечься по поверхности одной из деталей, так что при этом не возникает условий для капиллярности, если зазор будет превышать толщину слоя растекающегося припоя.

Следует отметить также, что надежность вакуумноплотных швов с большими зазорами снижается, так как в них возрастает число внутренних дефектов (поры, раковины, инородные включения и т. п.).

2-4. Образование паяного шва

При пайке металлов качество паяного шва зависит от характера связи между припоем и основным материалом. Как было уже показано, смачивание твердой металлической поверхности расплавленным припоем обусловлено энергетическим взаимодействием между атомами припоя и атомами паяемого материала, т. е. возникающими между ними межатомными связями. Для образования качественного паяного шва необходимо, чтобы эти связи сохранились и после кристаллизации припоя.

В основе физико-химического взаимодействия между твердым металлом и растекающимся припоем, характер которого весьма сложен, лежат следующие основные процессы:

- 1) диффузия металла основы в расплавленный припой с образованием жидкого раствора;
- 2) диффузия составляющих припой элементов в металл основы с образованием твердого раствора;
- 3) химическая реакция между припоем и основным материалом с образованием на границе интерметаллических соединений (реактивная пайка);
- 4) возникновение металлических связей за счет сближения атомов металлического расплава с атомами кристаллической решетки поверхности твердого металла (адгезия).

Эти процессы протекают, как правило, одновременно, и преобладание какого-либо из них над другими определяется соотношением значений температур плавления спаиваемых материалов и припоя, длительностью и температурой процесса пайки и главным образом характером поведения систем элементов, входящих в состав припоя и паяемого материала согласно диаграммам состояния.

Если наиболее легко и быстро идет процесс растворения металла основы в расплавленном припое, то при пайке припой постепенно насыщается растворяющимся в нем металлом. Температура начала кристаллизации

припой при этом может значительно повиситься, а при температуре пайки в расплавленном припое может образоваться твердая фаза, представляющая собою какое-либо соединение между элементами, входящими в состав паяемого металла и припоя.

При охлаждении припоя начинается кристаллизация наиболее тугоплавких соединений, образованных металлом основы и припоем. Так как охлаждение паяного шва чаще всего идет от основного металла, то кристаллизирующиеся первыми соединения выпадают у границы между припоем и основой. Состав выпадающей при этом фазы определяется по диаграмме состояния и будет зависеть от температуры, при которой ведется пайка, и степени насыщения припоя металлом основы. Зная диаграмму состояния взаимодействующих металлов и температуру, при которой произошло насыщение припоя металлом основы, можно легко установить как количество растворившегося металла, так и состав выпадающих при кристаллизации фаз.

В случае, когда металл припоя хорошо растворим в металле основы в твердом состоянии, при пайке обычно преобладает процесс диффузии одного или нескольких элементов припоя в металл основы. В этом случае в слое металла основы, непосредственно контактирующем с расплавленным припоем, возникает зона твердого раствора припоя в основе, толщина которой будет определяться законами диффузии. Состав этого твердого раствора будет лежать на диаграмме состояния наиболее близко к металлу основы.

В случае, когда металлы, входящие в состав припоя и основы, образуют между собою химические соединения, в результате возникающей между этими металлами химической реакции образуются продукты, которые располагаются на границе раздела в некотором переходном слое. Химические соединения могут возникать также в процессе диффузии (реактивная диффузия) и при охлаждении пересыщенного раствора, образовавшегося при диффузии, с выделением из него химических соединений. Казалось бы, что для обеспечения хорошей связи припоя с основой необходимо наличие этого промежуточного слоя, но тщательные исследования показали, что прочное сцепление припоя с основой возможно и в том случае, когда между ними не происходит заметной диффузии и не образуется каких-либо химических соедине-

ний. Так, при пайке стали медью или медносеребряными припоями нельзя ожидать диффузии, исходя из анализа их способности к растворению. Незаметна диффузия также и при рассмотрении соответствующих микрошлифов при помощи обычных металлографических микроскопов (рис. 10). Однако прочность и вакуумная плот-

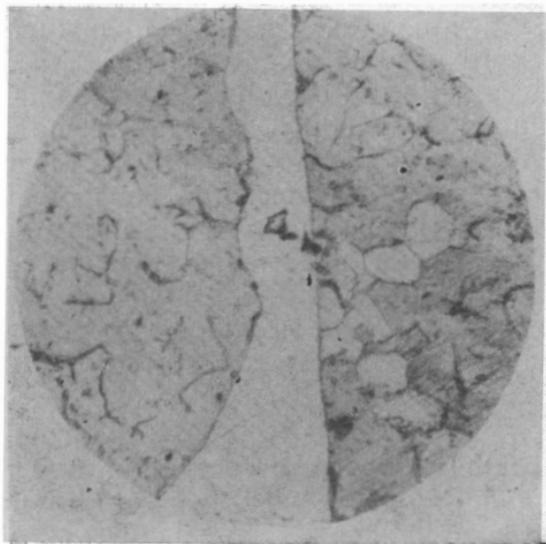


Рис. 10. Микроструктура шва стали марки Э, паяного медью. Взаимной диффузии стали и меди не видно ($\times 200$).

ность таких соединений весьма высока. Таким образом, при возникновении металлических связей немалую роль, по-видимому, играют также атомные и молекулярные силы (адгезия). Однако и в этом случае нельзя утверждать, что диффузия полностью отсутствует, вследствие того, что она может происходить на глубине всего нескольких параметров решетки. Таким образом, при твердой пайке металлов диффузия и адгезия дополняют друг друга, причем в различное время пайки преобладает один из этих процессов. При этом можно установить оптимальное время растекания («выдержки»), в течение которого жидкий припой должен сохранять температуру пайки после окончания заполнения шва. При отклонениях от этого оптимального времени в большую или меньшую сторону качество соединения снижается.

Реактивная диффузия часто приводит к образованию хрупких интерметаллических соединений, что вызывает

ослабление связи. Диффузия не всегда протекает во всех точках поверхности детали содинаковой скоростью. В некоторых случаях составные части припоя диффундируют по границам зерен много быстрее, чем в глубину зерна. Это приводит при известных обстоятельствах к разрушению материала основы и к нарушению вакуумной плотности соединения. Разрушения наблюдаются обычно в местах, где возникали растягивающие напряжения при одновременном смачивании этих мест жидким припоем. Растягивающие напряжения возникают при жестком закреплении паяемых деталей, при быстром и неравномерном нагреве, образующем неоднородное поле напряжений, при приложении внешних усилий во время пайки. Сжимающие усилия в деталях не вызывают подобного рода разрушений. Наиболее чувствительны к таким явлениям детали из нержавеющей хромистых сталей и нихрома при пайке латунными припоями, из монель-металла и ковара при пайке серебряными припоями и некоторые другие. Все эти сплавы обладают малой теплопроводностью, поэтому в них под влиянием неравномерного нагрева довольно легко создаются термические напряжения, способствующие проявлению «разъедающего» действия жидких припоев. Образованию трещин способствует также нагартованное исходное состояние материала. На рис. 11 показан пример подобного разрушения ковара при пайке его с медью припоем ПСр72.

При пайке коваровый стаканчик испытывал радиальные растягивающие усилия, так как медь находилась внутри ковара. Хорошо заметно проникновение припоя по границам зерен, где в результате стыка различно ориентированных решеток металл должен находиться в напряженном состоянии, что значительно ускоряет все диффузионные процессы.

Для границ зерен многих сплавов характерно также обогащение их некоторыми легирующими элементами. Так, в латунях границы зерен обогащены цинком, в некоторых никелевых сплавах по границам зерен обнаружена большая концентрация никеля, чем внутри зерна, и т. д. Такое неравномерное распределение легирующих элементов по зерну в сплавах облегчает в некоторых случаях избирательное растворение границ зерен в жидких припоях. Для предупреждения разрушения паяемых деталей, а также разрушений, связанных с развитием

мелких трещин, возникающих при пайке, должны быть устранены источники растягивающих макро- и микро напряжений в паяемых деталях.

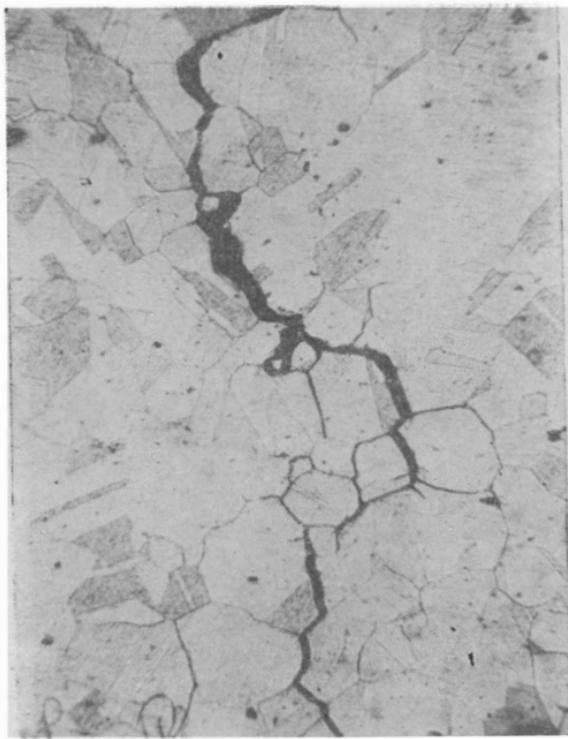


Рис. 11. Микроструктура спая медного ковара с медью припоем ПСр72 ($\times 200$). Ковар снаружи меди. Диаметр соединения 16 мм. Видна трещина в коваре. Внешний вид треснувшего коварового стаканчика показан на рис. 94.

Устранение макронапряжений может быть достигнуто:

- 1) отжигом нагартованного металла;
- 2) уменьшением жесткости соединения;
- 3) рациональным режимом разогрева, устраняющим возможность появления термических напряжений (медленный разогрев, тепловые экраны, регулирующие равномерность нагрева отдельных элементов паяемого узла, и т. п.).

Макронапряжения возникают в результате неравновесных процессов, связанных с некоторыми структурными превращениями:

1) полиморфными превращениями мартенситного типа, когда в результате охлаждения возникает неравновесная модификация низкотемпературной фазы, между отдельными блоками которой (чаще всего в виде пластин или игл) образуются упругие напряжения;

2) распадом пересыщенного твердого раствора, при котором выделяются фазы с иным удельным объемом, чем у твердого раствора, что приводит к образованию упругих микронапряжений между двумя фазами.

Приведение в равновесие сплавов при помощи соответствующей термообработки устраняет источники образования структурных микронапряжений.

Кроме указанных мер, предотвратить хрупкое разрушение часто удается при помощи предварительного покрытия паяемых деталей металлами, не подверженными хрупкому разрушению под воздействием жидких припоев. Именно для этого ковар в случае пайки припоем ПСр72 целесообразно покрывать никелем¹.

2-5. Влияние газов и вакуума на процессы пайки и качество паяного шва

Помимо влияния газовой среды или вакуума на растекаемость припоев по поверхности спаиваемых металлов, имеет место еще ряд процессов взаимодействия между газовой средой и спаиваемыми материалами, обусловленных высокой температурой процесса пайки.

Основной средой для пайки, применяемой в электровакуумном приборостроении, является водород. При температурах пайки водород поглощается всеми металлами без исключения, а в таких, как Fe, Mn, Co, Pt, Mo и др., водород растворяется в атомарном состоянии и образует твердые растворы. При этом возможно также образование хрупких гидридов, что особенно характерно для Ti, Ta, Zr и Nb, поэтому пайка их в водороде недопустима.

При равновесных условиях растворимость водорода в различных металлах показана на рис. 12.

При пайке характер происходящих процессов несколько отличается от процессов, протекающих при равновесных условиях, но приведенные данные могут быть

¹ Следует отметить, что часто применяемое гальваническое меднение ковара в этих целях неэффективно, так как не предохраняет от проникновения припоя ПСр72 по границам зерен.

использованы для ориентировочной оценки способности материалов к поглощению водорода. Характерно, что поглощение водорода увеличивается с повышением температуры и изменяется скачкообразно при температурных превращениях и при изменении агрегатного состояния. При «наводороживании» некоторых металлов и сплавов

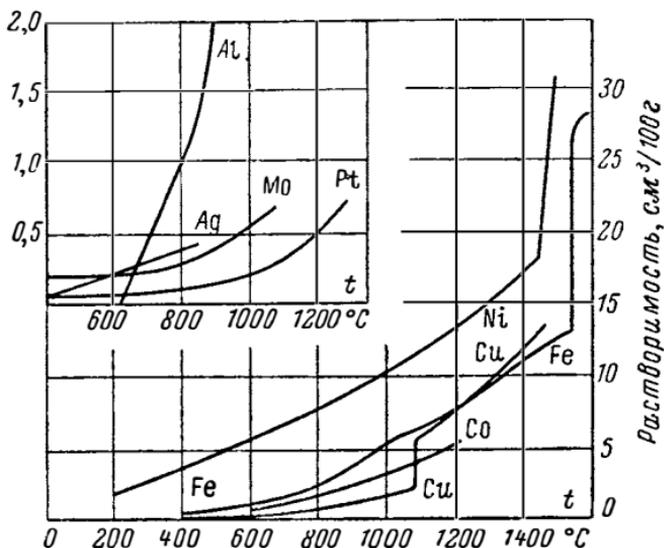


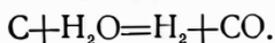
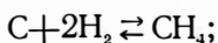
Рис. 12. Изменение растворимости водорода в алюминии, серебре, платине, никеле, железе, меди и кобальте в зависимости от температуры.

сильно изменяются их свойства, так, например, резко возрастает хрупкость материалов (рис. 13). Это явление известно под названием «водородной болезни». Возникновение водородной болезни характерно для меди и объясняется следующим: водород, проникающий при высокой температуре в толщу металла, восстанавливает закись меди, присутствующую по границам ее зерен в случае содержания кислорода более 0,01%, а образовавшиеся при этом пары воды, расширяясь, разрушают связь между кристаллами металла. Разрушение стали после наводороживания также происходит по границам зерен.

Особенно интенсивно растворяется водород в никеле (рис. 12). Однако в условиях пайки при температурах порядка 950—1200 °C и кратковременном нагреве в течение 10—15 мин конструкционные стали и даже жаро-

прочные сплавы с большим содержанием никеля не получают заметной хрупкости.

Заметное влияние оказывает водород на содержание углерода в поверхностном слое некоторых сплавов (углеродистые стали, ковар). При нагреве в водородной печи между углеродом, находящимся в свободном состоянии (графитовые подставки, покрытия аквадагом) или в связанном виде (в сплавах), и окружающей атмосферой могут протекать следующие реакции:



В зависимости от концентрации взаимодействующих компонентов реакции могут протекать в обоих направлениях. Если реакция идет слева направо, то имеет место обезуглероживание поверхности сплава. Установ-

лено, что наиболее активно обезуглероживание происходит при наличии в восстановительной среде паров воды.

Возможность науглероживания поверхности необходимо учитывать при пайке коваровых деталей, подлежащих в дальнейшем спаиванию со стеклом, так как наличие углерода в коваре приводит к появлению пузырей в спае со стеклом.

Среды для пайки. Восстановительных и нейтральных сред, применяемых для пайки с целью защиты поверхности от окисления и улучшения растекаемости припоя, в промышленности известно очень много. Однако при выборе среды для пайки узлов вакуумной полости электровакуумных приборов приходится учитывать следующие обстоятельства:

1) максимальное сокращение цикла обезгаживания приборов при их последующей откачке;

2) отсутствие вредного воздействия («отравления») на катод.

Наиболее подходящим и широко распространенным газом для пайки в электровакуумном приборостроении является водород, так как во время пайки он интенсивно

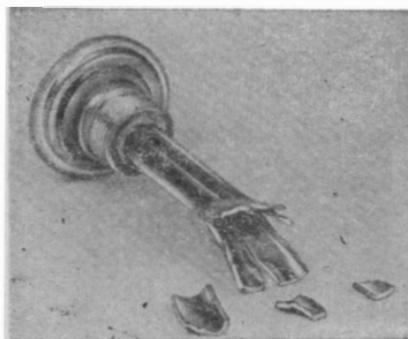


Рис. 13. Медный штапель, пораженный «водородной болезнью».

поглощается металлом, вытесняя другие находящиеся в металле газы, и сравнительно легко удаляется сам при обезгаживании приборов, не оказывая при этом вредного воздействия на катод.

Крупным недостатком водорода является его взрывоопасность. Поэтому в печах с большим объемом используется обычно взрывобезопасная смесь водорода с азотом (формиргаз).

В качестве восстановительной среды при пайке приборов с катодом применяется СО в смеси с азотом с целью предотвращения разрушения эмиттирующего покрытия или деталей катодного узла, для которых часто используется тантал.

Весьма перспективной средой для пайки является вакуум (порядка 10^{-4} — 10^{-6} мм рт. ст.). При пайке в вакууме одновременно осуществляется некоторое обезгаживание деталей. Однако необходимо иметь в виду, что при последующем хранении на воздухе детали быстро поглощают газы вновь (рис. 14), поэтому хранение паяных узлов должно осуществляться в вакууме. Типовые требования к газам приведены в табл. 4.

На электровакуумных предприятиях вследствие сильной разветвленности и большой протяженности газовых магистралей имеет-

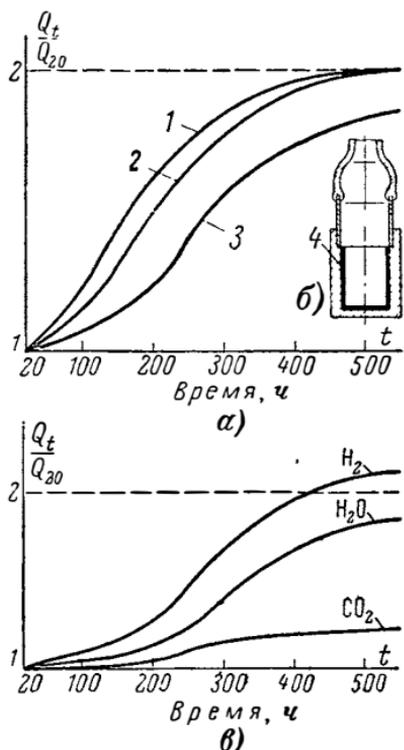


Рис. 14. Кривые зависимости $Q_t/Q_{20}=f(t)$ (по данным И. А. Калябиной).

Q_t — количество газов, выделяющихся из опытного образца, предварительно обезгаженного в вакууме, после последующего пребывания на воздухе в течение времени t ; Q_{20} — то же после пребывания образца на воздухе в течение 20 ч; а — кривые суммарного газовойделения для образца из стали марки Э; б — конструкция опытного образца; в — кривые выделения отдельных газов из медного образца; 1 — образец без покрытия; 2 — образец электролитически омеднен; 3 — образец, расточенный после заливки внутренней полости медью; 4 — слой меди.

ся опасность значительных утечек газов или их загрязнения из-за подсосов. Эти опасности еще более усиливаются в случае выхода из строя техно-

Требования к газам, используемым для пайки или при сборке узлов

Газы	Показатели качества				Примечание
	Содержание по объему, не более, %		Точка росы, не выше, °С	Содержание механических загрязнений и масел, мг/л ³	
	кислорода	водорода			
Водород					
а) сетевой ¹	0,005	—	—30	Отсутствуют	Пайка неответственных узлов, исходный материал для получения очищенного и осушенного водорода
б) очищенный и осушенный	0,003	—	—40	То же	
Азот					
а) сетевой ¹	0,01	0,5	—25	" "	Продувка печей, заварка приборов Исходный материал для получения очищенного и осушенного азота
б) в баллонах ²	0,1	—	—	—	
в) очищенный и осушенный	0,005	Отсутствует	—35	Отсутствуют	Для пайки узлов

¹ Давление в сети не менее: для водорода — 400, азота — 600 мм вод. ст., воздуха — 0,4 ат;

² Технические требования по ГОСТ 9293-59; содержание влаги может соответствовать полному насыщению водяным паром при температуре газа в баллоне.

логического или тем более газового оборудования. Поэтому на предприятиях установлены строгие правила контроля показателей качества газов как на местах их получения, так и у потребителя. Типовые правила и методы испытания и контроля газов, соответствующие приборы и оборудование для очистки, даны в приложениях 1-4.

3-1. Основные группы припоев

Металл или сплав, заполняющий после расплавления зазоры между твердыми телами при соединении их методом пайки, называется припоем.

За время существования пайки было разработано большое количество самых разнообразных припоев. Очень многие из них уже давно забыты, но и в настоящее время число применяемых на практике припоев весьма велико.

Исторически было принято припои подразделять на два класса:

а) мягкие (главным образом — свинцово-оловянные);

б) твердые (преимущественно на медной, серебряной и золотой основах применительно к пайке электровакуумных приборов).

В настоящее время в связи с появлением большого количества совершенно новых припоев на цинковой, алюминиевой, никелевой и других основах, а также припоев с самыми разнообразными добавками такая классификация уже не отвечает современному уровню техники.

Действительно, относить цинково-оловянные припои, например, к мягким припоям (как это иногда еще делается) нет оснований; вместе с тем ни по своему назначению, ни по способу применения эти припои никак не могут быть объединены в один класс с твердыми припоями. Поэтому в настоящее время за основу классификации припоев принимается одна из его главнейших характеристик — температура плавления, в соответствии с которой припои разделяются на два класса:

легкоплавкие, имеющие температуру плавления ниже 400—450°С (сюда входят сплавы на оловянной, свинцовой, кадмиевой и т. п. основах), и тугоплавкие, имеющие температуру плавления выше 450°С, к которым относятся припой на медной, серебряной, золотой, никелевой и т. п. основах.

Припои должны обладать следующими особыми свойствами, без которых невозможно получение надежного соединения:

1) температура плавления припоя обязательно должна быть ниже температуры плавления паяемых металлов;

2) расплавленный припой должен хорошо смачивать паяемые металлы и легко растекаться по их поверхностям;

3) прочность и пластичность припоя должны быть достаточно высокими;

4) припой, применяемые для паяния токопроводящих изделий, должны иметь высокую электропроводность.

Как уже указывалось, основной характеристикой припоя является его температура плавления. Только чистые металлы и эвтектические сплавы имеют единственную точку плавления. Гораздо чаще припой имеют интервал температур, в котором нижняя точка, или точка солидуса, является температурой, при которой припой начинает плавиться, а верхняя точка, или точка ликвидуса, это температура, при которой припой становится полностью жидким. Если интервал температур плавления очень мал, то такой сплав рассматривается часто как сплав эвтектического типа. Иногда точка солидуса рассматривается как точка плавления, а точка ликвидуса как точка растекания.

Конечно, знание точек солидуса и ликвидуса еще не позволяет судить о пригодности того или иного припоя для пайки в каждом конкретном случае.

При применении припоя с большим интервалом температур плавления существенно, какая его часть будет расплавлена вблизи точки солидуса. Если количество жидкой составляющей очень мало, то способность припоя формировать соединение, пока не превышена температура ликвидуса, очень плохая. В случае же значительного количества жидкой составляющей вблизи точки солидуса удовлетворительное соединение может быть получено без превышения температуры ликвидуса, т. е. температуры полного расплавления припоя.

Из всего многообразия припоев, применяемых в технике, для производства электровакуумных приборов, подходящими оказываются сравнительно немногие. Основными требованиями, кроме указанных выше, которым должны удовлетворять припои для вакуумной пайки, являются следующие:

1. В состав припоя не должны входить легко испаряющиеся компоненты, способные ухудшить вакуум в приборе или повредить («отравить») его катод при нагревании прибора.

2. Припой не должен обладать красноломкостью или хладноломкостью во избежание трещин в паяном шве в процессе нагревания или охлаждения паяного соединения.

3. В результате взаимодействия припоя и основного материала не должно образоваться соединений хрупких, коррозионнонеустойчивых или склонных к межкристаллитной коррозии.

4. Припой не должен иметь склонности к пористости в условиях пайки.

5. Смачивающая способность и растекаемость припоев по спаиваемым материалам должны обеспечивать заполнение зазора без каких-либо флюсов.

Для вакуумноплотной пайки узлов электровакуумных приборов, а также для получения швов, находящихся внутри вакуумной полости, в качестве припоев используется медь, серебро, золото, их сплавы между собой и сплавы с добавками олова, никеля, палладия, индия и др.

Оловянно-свинцовые, медно-фосфорные, серебряно-кадмиевые и другие припои в электровакуумной промышленности используются редко и только лишь для пайки внешней арматуры приборов.

Медь применяется для пайки в восстановительной атмосфере сталей малоуглеродистой и нержавеющей марки 1X18H9T (при соответствующих условиях пайки), кобальта, никеля, молибдена, монель-металла и др.

Из-за опасности возникновения трещин в паяном шве вследствие «водородной болезни» для припоя можно использовать только бескислородную или вакуумную медь. Вследствие большой жидкотекучести медь способна проникать в очень малые зазоры и даже в соединения с натягами. Паянный медью шов получается весьма прочным и пластичным.

Серебро в чистом виде в качестве припоя используется редко и в основном для спаев железо-никелевых сплавов с металлизированной керамикой.

В качестве припоя серебро часто используется также в виде гальванического покрытия слоем толщиной 6—8 мк на деталях из меди и медных сплавов. В контакте между такими серебрянными деталями при нагреве изделия до температуры выше 780°С образуется эвтектический сплав серебро — медь (примерно 72% Ag, 28% Cu), который и создает после охлаждения прочное паяное соединение.

Гальваническое серебрение деталей применяется также при получении паяных соединений методом сопротивления на сварочной машине.

Золото в качестве припоя достаточно широко применяется в производстве электровакуумных приборов. Применение его в чистом виде ограничивается, главным образом, диффузионной пайкой, основанной на способности золота диффундировать в медь уже при температуре 400—500° С.

Серебряно-медные сплавы являются пока основными припоями в производстве электровакуумных приборов. Из них наибольшее распространение имеет эвтектический сплав.

На рис. 15 изображена диаграмма состояния системы серебро — медь. Точка *C* соответствует эвтектике с составом примерно — 72% Ag и 28% Cu с точкой плавления 780° С. Любой другой сплав этой системы будет плавиться в области температур, ограниченной линиями солидуса и ликвидуса. Ординаты диаграммы соответствуют постоянным составам сплавов. Наклонные кривые *AD*, *DF* и *BE*, *EG* определяют зависимости растворимости компонентов Cu в Ag и Ag в Cu в твердом состоянии соответственно. Следовательно, площади, обозначенные α и β , представляют собой соответственно твердый раствор меди в серебре и серебра в меди. Площадь *ADEB*, обозначенная $\alpha + \beta$, соответствует смешанному твердому раствору.

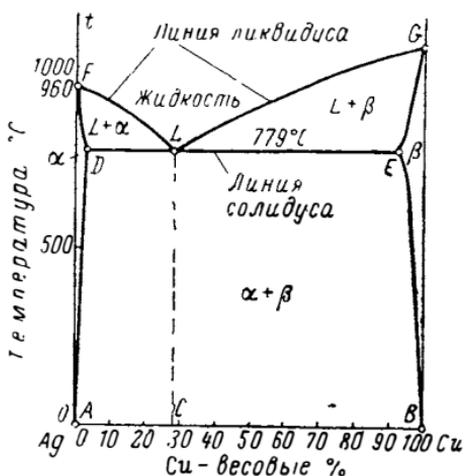


Рис. 15. Диаграмма состояния системы серебро—медь.

α — твердый раствор меди в серебре;
 β — твердый раствор серебра в меди.

Во время пайки в составе медно-серебряных припоев могут наблюдаться сдвиги вследствие стремления соединяемых металлов раствориться в одной или обеих составляющих припоя, или наоборот. Это особенно сказывается при пайке медных деталей. При повышенных температурах медь диффундирует в припой и образует твердый раствор, соответствующий линии *DF*, а серебро — из припоя диффундирует в медь в соответствии с линией *EG*, что в итоге дает обогащение припоя медью, повышающее температуру его плавления. Поэтому выдержку при температуре пайки (примерно на 30—50° С выше 780° С) необходимо сводить до минимума после растекания припоя.

Вредным является также избыток припоя, так как это может привести к повреждению медной детали из-за растворения меди в припое, поэтому необходимое количество его следует дозировать.

Добавки к медно-серебряным припоям некоторых элементов сообщают им новые свойства, которые расширяют область применения этих сплавов. Некоторые из них следует отметить особо.

Небольшие добавки (порядка 0,5—1,5%) в серебряные припои лития заметно улучшают их жидкотекучесть и смачиваемость, что позволяет применять их для пайки нержавеющей стали в атмосфере сухого водорода или аргона без флюсов. Эти припои находят также применение для пайки никелевых и титановых сплавов.

Серебряно-медно-фосфорный сплав состава 80% Cu, 15% Ag и 5% P (сильфос) является одним из припоев, который очень широко распространен в отечественной и зарубежной промышленности. Этот припой является одним из немногих припоев в интервале температуры 500—700°С, в которых так нуждается электровакуумная промышленность. Наличие фосфора делает этот припой самофлюсующимся, что позволяет производить им пайку меди на воздухе без применения каких-либо флюсов.

При пайке же в водороде он склонен к газонасыщению и пористости, плохо растекается по меди.

За неимением более подходящего припоя «сильфос» все же широко применяется для припаивания к приборам металло-стеклянных узлов, что выполняется в водородных печах. В шов в этом случае припой закладывается в избыточном количестве. Применять его для пайки стали, никеля, кобальта без меднения поверхности этих металлов нельзя, так как входящий в его состав фосфор образует с Fe и Ni очень хрупкие химические соединения, что отрицательно сказывается на качестве шва.

Индиевые припои относятся к этой же области температур, но вследствие их хрупкости и дефицитности индия большого распространения не имеют.

Медно-золотые припои различного состава вследствие своей тугоплавкости находят в последнее время все более широкое применение в связи с тенденцией повышения температуры обезгаживания приборов до 700—750°С, что позволяет улучшить конечный вакуум в приборах.

Припои с низкой упругостью паров для пайки электровакуумных приборов

№	Марка или название припоя	Состав, % вес						Интервал плавления, °С		Физико-механические свойства при температуре, 20° С				Паяемые материалы	
		Cu	Au	Ag	Pd	Ni	Ge	Остальное	Начало	Конец	$\sigma_B, \text{кг/мм}^2$	$H_B, \text{кг/мм}^2$	$\delta, \%$		$\gamma, \text{г/см}^3$
1	Платина						Pt100	1 773,5		16	50	50	21,4	Для пайки деталей из молибдена и вольфрама, работающих при высокой температуре (катодные узлы)	
2	Палладий				100			1 555		21	61	55	12,1	Молибден, вольфрам, металло-керамические узлы особого назначения	
3	Нимо					53,5	Mo46,5	1 320		—	—	—	—	Молибден, железо, никель.	
4	ПЗл91П9		91		9			1 200—1 240		—	—	—	—	Хрупок Неокисляющийся, хорошо смачивает молибден, вольфрам, никель, нержавеющей сталь	
5	ПП64К636		64				Co36	1 217		—	—	—	—	Молибден, вольфрам, ковар, сталь Э, металлизированная керамика	
6	ПМН25	75				25		1 150—1 210		—	—	—	—	Молибден, вольфрам, сталь Э, никель, нержавеющей сталь	
7	ПМН15	85				15		1 120—1 180		—	—	—	—	То же	
8	ПМН10	90				10		1 100—1 140		—	—	—	—	То же	
9	Медь МВ	100						1 083		20	37	50	8,95	Ковар, сталь Э, никель, молибден, мельхиор, монель-металл, Fe—Ni-сплавы, металлизированная керамика	
10	Золото		100					1 063		12,2	18,5	50	19,3	Вольфрам, молибден, используется для низкотемпературной диффузионной пайки меди с медью	
11	ПЗл35МН	62	35			3		1 000—1 030		—	—	—	—	Хорошо растекается по ковару, меди, никелю, стали, молибдену	

№	Марка или название припоя	Состав, % вес						Интервал плавления, °С		Физико-механические свойства при температуре, °С				Паяемые материалы	
		Cu	Au	Ag	Pd	Ni	Ge	Остальное	Начало	Конец	$\sigma_B, \text{кг/мм}^2$	$H_B, \text{кг/мм}^2$	$\delta, \%$		$\gamma, \text{г/см}^3$
12	ПЗл35М	65	35						990—1 010		49	74	24	10,5	Медь (толстостенные детали), ковар, никель, мельхиор, константан
13	ПМГ10П2	88			2	10			900—990		40	81	39	8,4	Медь, ковар, сталь Э, никель, молибден, металлизированная керамика. В большинстве случаев успешно заменяет меднозолотые припои на эту температуру
14	ПЗл50М	50	50						955—970		52	96	36	12,2	Медь, ковар, никель
15	Серебро			100					960		14	25	48	10,5	В качестве припоя используется главным образом в виде гальванического покрытия. Иногда применяется для пайки металла с керамикой
16	ПЗл82Н	82				18			950		88	216	7	15,4	Молибден, вольфрам, ковар, никель, нержавеющая сталь, медь
17	ПЗл42Ср3М	55	42	3					940—960		—	—	—	—	Медь, ковар, никель, медноникелевые сплавы
18	ПЗл81, 5МНЗ	15,5	81,5			3			910—925		63	156	28	15,4	То же
19	ПЗл75СрМ	12,5	75	12,5					880—910		59	170	26	15,5	

№	Марка или название припоя	Состав, % вес						Интервал плавления, °С		Физико-механические свойства при температуре 20° С				Паяемые материалы	
		Cu	Au	Ag	Pd	Ni	Ge	Остальное	Начало	Конец	$\sigma_B, \text{кг/мм}^2$	$H_B, \text{кг/мм}^2$	$\delta, \%$		$\tau, \text{е/см}^2$
20	ПСр65П15	20		65	15					850—900	50	—	24	10,4	Медь, ковар, Со-сплавы, никель и его сплавы, титан, цирконий, молибден, вольфрам
21	ПСр58П10	31,5		58,5	10					825—850	52	—	22	10,1	То же
22	ПЗл60СрМ	20	60	20						835—845	—	65	—	12,25	Медь, ковар, никель
23	ПСр68П5	26,6		68,4	5					805—810	48	—	23	10,1	То же, что и для припоев ПСр65П15 и ПСр58П10
24	ПСр72В	28		72						779	31	85	21	9,8	Медь, никель, Cu — Ni-сплавы, ковар, (с покрытиями), сталь Э (с покрытиями)
25	ПСр63Ип10	27		63					Ип10	685—710	38	159		9,6	То же
26	ПСр15	80		15					Р5	640—704				9,6	Медь. Самофлюсующийся на воздухе. Пайка Fe — Ni-сплавов недопустима
27	ПСр49Ип31	20		49					Ип31	540—575				9,6	Медь. Хрупок, поддается только выдавливанию в горячем состоянии

Золото-индиевые припои, хотя и находят применение, но очень хрупки и могут применяться только в виде порошка или в виде жгутиков из проволок индия и золота в расчете на их взаимодействие в шве при температуре пайки. Применяется также золоченая проволока из индия, у которой весовое соотношение между сердцевинной и покрытием устанавливается таким образом, чтобы получить при расплавлении эвтектический состав.

Весьма перспективно введение в золотые и серебряные припои палладия, который повышает их коррозионную стойкость, температуру плавления, прочность и способность смачивать сплавы на основе железа и никеля. Кроме того, палладий имеет значительно меньшую упругость паров чем медь.

В табл. 5 приведены некоторые припои, имеющие употребление в отечественной и зарубежной практике электровакуумного приборостроения. Указаны также вид припоя и примерная область применения.

3-2. Виды припоев

В зависимости от назначения припои изготавливают в виде слитков, прутков, проволоки, фольги, прутков с флюсом, биметалла, зерен и пасты (рис. 16).

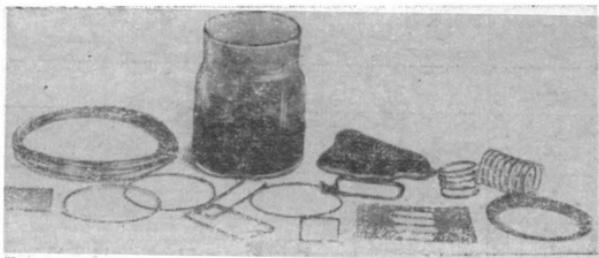


Рис. 16. Виды припоев.

Слитки применяют главным образом для лужения и пайки погружением. В виде прутков припой применяется чаще всего при пайке паяльником (оловянно-свинцовые припои) и горелкой (припой «сильфос»).

Наиболее распространена при пайке в печах с восстановительной атмосферой проволока различного диаметра, из которой изготавливаются кольца припоя. Размеры и вес колец нормализованы (см. приложения 5—10),

что значительно облегчает расчеты расхода припоя. Из фольги штампуют пластинки или кольца, которые перед пайкой укладываются внутри шва или вблизи него.

Хрупкие припои изготавливаются в виде порошка и зерен величиной 0,2—0,5 мм. Обычные пластичные припои (медь, серебряно-медная эвтектика, серебро) также иногда употребляются в виде пасты из порошка этого припоя, замешанного на спирте или на биндере.

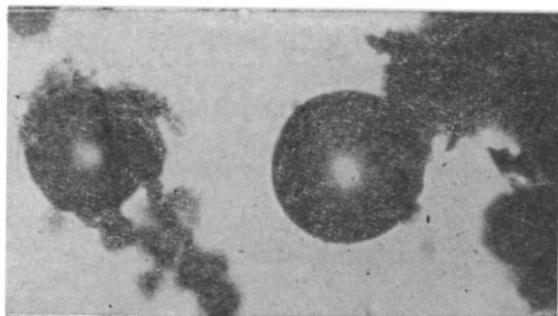


Рис. 17. Частицы темного налета на поверхности затвердевшего припоя, выделившиеся из него при расплавлении ($\times 600$).

Выпускаемые промышленностью медно-серебряные припои, особенно припои общего назначения по ГОСТ 48190-56, содержат большое количество примесей, которые выделяются во время пайки и после затвердевания припоя образуют темный налет на его поверхности.

При значительном увеличении этот темный налет представляется в виде скоплений отдельных сферических частиц различного размера, которые хорошо видны на рис. 17.

Включение таких частиц в вакуумноплотные швы может привести к нарушению герметичности спая. Частицы, находящиеся на поверхности затвердевшего припоя, как правило, очень слабо с ней связаны и легко отделяются при вибрациях, толчках и ударах. Попадание таких частиц на катод вызывает резкое газовыделение, приводящее иногда к отравлению катода. Кроме того, эти частицы могут попадать в межэлектродные зазоры, вызывая недопустимые изменения емкости или короткие замыкания. Особенно чувствительны к таким частицам виброустойчивые приборы.

Опыт показал, что различные способы очистки поверхности припоя (обезжиривание, протирка тканью, смоченной в бензине или спирте, ультразвуковая очистка в спирте, отжиг в водороде и вакууме, травление и др.) не обеспечивают удаления этих включений. Очевидно, что улучшение качества припоев для пайки вакуумных швов связано с необходимостью улучшения технологии их изготовления: плавка, вытягивание непосредственно из расплава, прокатка в вакууме.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ОСНОВНЫЕ СООБРАЖЕНИЯ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ ПАЯНЫХ УЗЛОВ

4-1. Особенности конструкции паяных узлов электровакуумных приборов

Разнородность соединяемых материалов со значительной разницей коэффициентов линейного расширения и необходимость сохранения вакуумной плотности швов при многократных высокотемпературных прогревах в защитной среде и в воздухе являются основными обстоятельствами, которые определяют конструкцию вакуумноплотных узлов. Пайка большинства вакуумных швов осуществляется в закрытых печах с восстановительной атмосферой, которые в процессе пайки недоступны для оператора. Поэтому качество пайки будет определяться в основном конструкцией шва.

Взаимное расположение деталей с разными коэффициентами линейного расширения не может быть определено однозначно для всех возникающих на практике случаев.

В случае пайки легкоплавкими припоями при охлаждении припой должен сжиматься охватываемой деталью. Это вполне справедливо при указанном виде пайки, так как легкоплавкие припои имеют низкую механическую прочность (плохо работают на растяжение), и паяные таким припоем соединения обычно не работают при высоких температурах.

Однако утверждение, что припой должен сжиматься охватываемой деталью при охлаждении, трудно признать убедительным при вакуумноплотной пайке тугоплавкими припоями ввиду того, что вслед за остыва-

нием после пайки прибор вновь нагревается при откатке или при последующей пайке. Припой в этом случае будет растягиваться, и неизвестно, что будет лучше в каждом конкретном случае.

Анализ применяемых конструкций для вакуумноплотных спаев показывает, что используются как соединения, в которых после пайки припой сжимается за счет большего коэффициента термического расширения (КТР) охватываемой детали, так и соединения, в которых припой растягивается. Каких-либо цифровых данных о прочности и тем более вакуумной плотности паяных металлических соединений электровакуумных приборов при высоких температурах не имеется. Отсутствуют также прочностные характеристики паяемых материалов и припоев при высоких температурах, без которых невозможен анализ напряженного состояния шва в процессе его изготовления и работы. Таким образом, вопросы о наиболее целесообразной конструкции соединения (взаимное расположение деталей, толщины стенок, высота шва и др.) решается сейчас главным образом опытным путем. Для получения при температуре пайки оптимального зазора в соединении целесообразно деталь из материала с большим коэффициентом термического расширения располагать внутри, что позволяет избежать посадок с натягом. При этом для уменьшения напряжений в шве должна быть предусмотрена возможность легкой, местной деформации одной из деталей. Обычно местные ослабления делают на деталях из более пластичного материала.

Этот технологический прием нельзя применять, не учитывая особенностей конструкции в целом и технологии ее изготовления. Каждое изделие из разнородных материалов нужно рассматривать особо, учитывая в первую очередь условия его нагрева. Многие узлы представляют собой сложные паяные конструкции. В этом случае правильными следует считать такие конструкции узлов, которые позволяют паять все швы или большинство из них за один прием, не изменяя общего положения изделия.

Количество припоя, его форма и расположение играют большую роль в получении доброкачественного шва. Припой всегда желательно располагать над паяемым швом, максимально используя не только капиллярность, но и проникновение припоя в зазор под действием силы

тяжести. При горизонтальном положении оси цилиндрического шва необходимо принимать меры, препятствующие стеканию припоя вниз под действием сил тяжести, что особенно опасно при диаметрах шва более 50 мм. В этом случае припой рекомендуется располагать в специальных канавках (рис. 18).

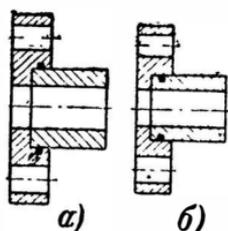


Рис. 18. Конструкция узла со специальными канавками для припоя в спаиваемых деталях.

a — нежелательное расположение канавки, так как затруднена укладка припоя; *б* — предпочтительный вариант.

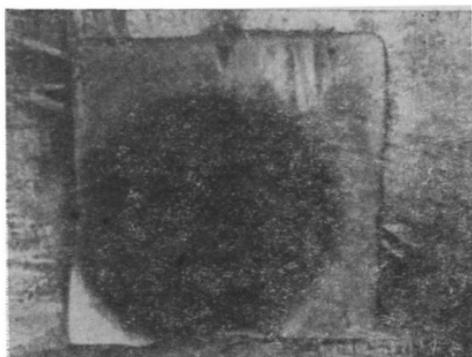


Рис. 19. Глухая полость в шве на месте канавки, из которой вытек припой ($\times 70$).

Следует заметить, что применения канавок надо избегать, так как после вытекания из них припоя они заполняются газом, который может явиться источником газовой выделению в приборе и в отдельных случаях дать эффект «ложной течи» (рис. 19).

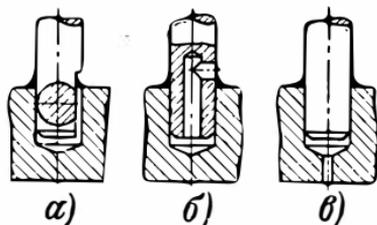
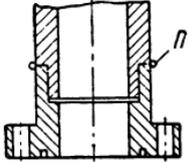
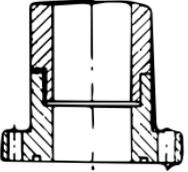
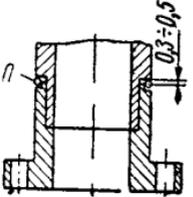
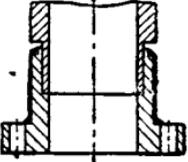


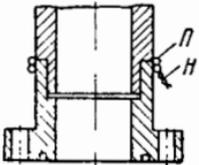
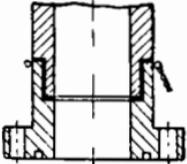
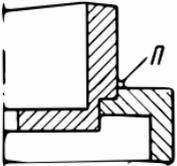
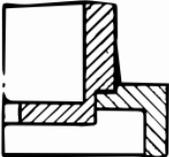
Рис. 20. Конструкции глухих паяных соединений, обеспечивающие выход газов из замкнутой полости.

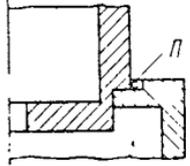
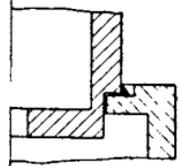
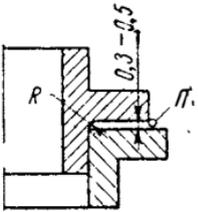
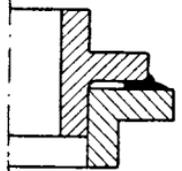
При сборке узлов между деталями нередко остаются замкнутые объемы, которые при пайке плохо заполняются защитной атмосферой. После пайки они могут оказаться источниками газовой выделению, так как качество шва в этом случае проверить практически невозможно. Примеры технологических приемов предотвращения «ложных течей» показаны на рис. 20.

Припой в виде фольги применяется для пайки встык по плоскости. В этом случае во время пайки необходимо

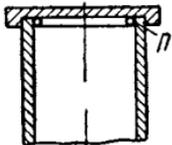
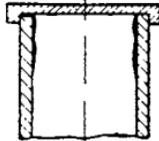
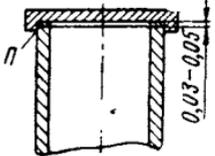
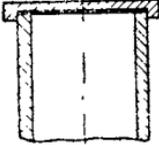
Примеры конструирования соединений деталей и расположения припоя при пайке

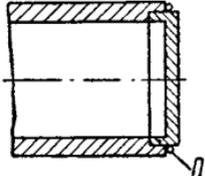
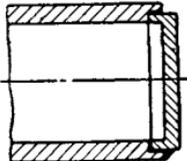
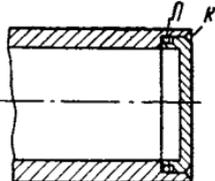
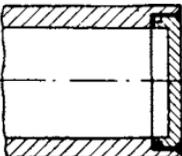
№ п/п	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
1	—			<p>Телескопическое соединение двух труб.</p> <p>При таком расположении припой неизбежно стечет вниз под действием силы тяжести, или же кольцо спадет до расплавления. Припоя в соединении не будет</p>
2	—			<p>Припой может не проникнуть в соединение из-за большой величины входного зазора.</p> <p>Под действием силы тяжести припой быстро стечет по деталям вниз</p>

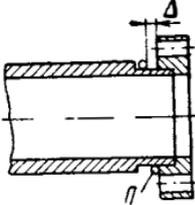
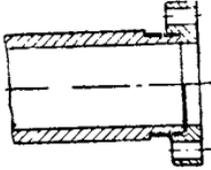
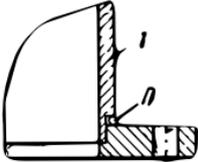
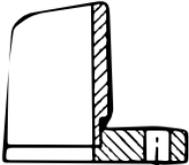
№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
3		—		<p>При недопустимости канавки кольцо припоя можно поддержать кольцом и из окисленной нихромовой проволоки (припой не смачивается).</p> <p>После пайки кольцо из нихрома снимается</p>
4	—			<p>Нельзя делать несколько уступов в соединении по ходу течения припоя, так как везде припой проходит через них или из-за перекрытия зазора, или из-за местного расширения (прекращение капиллярности)</p>

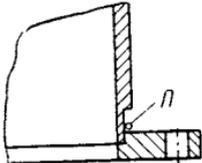
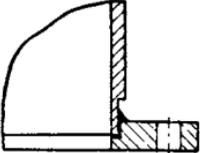
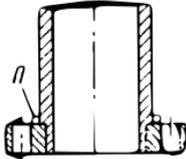
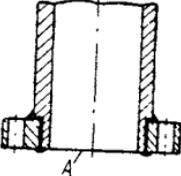
№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
5		—		Припой полностью заполняет соединение при условии отсутствия нарушения капиллярности в углу стыка
6	—			Радиус R в углу соединения не позволяет плотно стыковать спаиваемые плоскости. Заполнение соединения может быть неудовлетворительным особенно при спайке разнородных материалов

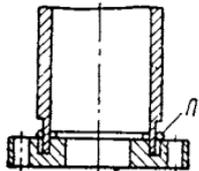
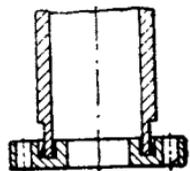
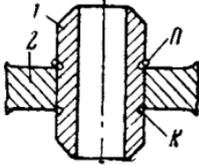
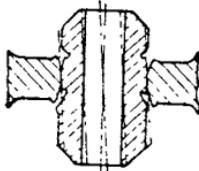
№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
7	—			<p>При плотном стыковании под действием силы P спаиваемых поверхностей, имеющих шероховатость порядка $\nabla 8 - \nabla 9$, припой может не проникнуть в соединение вследствие очень малого контактного зазора. Чаще это случается при пайке разнородных материалов</p>
8		—		<p>Расположение припоя в виде фольги непосредственно в шве гарантирует надежное соединение даже в случае пайки разнородных материалов, по которым данный припой плохо растекается. Необходим прижим силой P</p>

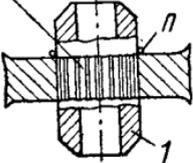
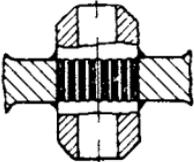
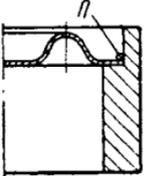
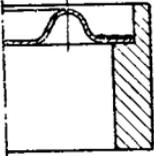
№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
9	—			<p>Во время пайки значительная часть припоя может стечь вниз под действием силы тяжести.</p> <p>Результат пайки неопределенный</p>
10		—		<p>Расположение припоя в виде фольги непосредственно в зоне спая гарантирует его хорошее качество</p>

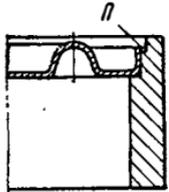
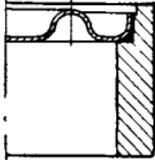
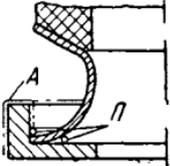
№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
11	—			<p>При вертикальном расположении шва диаметром более 50 мм припой стекает вниз в избыточном количестве, что может привести к разъеданию основного материала, особенно в тонких сечениях</p>
12		—		<p>При вертикальном расположении шва и недопустимости натеков припоя на внешней поверхности припой следует расположить в специальной канавке. Крышку следует прикернить в нескольких точках</p>

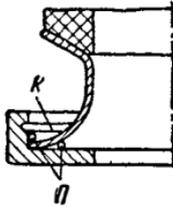
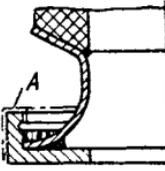
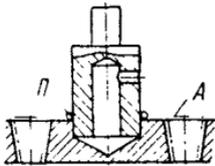
№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
13	—			<p>В вертикальном шве неплотное прилегание припоя к обеим спаиваемым поверхностям (зазор Δ) может привести к его быстрому стеканию вниз.</p> <p>Результат пайки неопределенный</p>
14	—			<p>Если припой касается уступчика в канавке, то при расплавлении значительная часть его может растечься по детали 1, особенно если она тонкостенная и быстро нагревается</p>

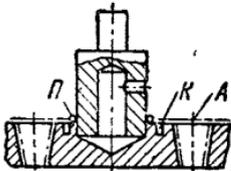
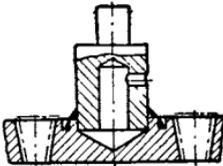
№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
15		—		Весь припой проникает в соединение, образуя качественный шов
16	—			<p>На торце А при такой конструкции соединения образуются наплавы припоя. Необходима последующая торцовка этой плоскости, что не всегда допустимо</p>

№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
17		—		Шов получается очень надежным, хорошо заполняется припоем
18	—			Прикернивание (к) трубы 1 к стенке 2 не гарантирует отсутствие ее смещения при пайке, особенно если труба 1 изготавливается из материала с меньшим КТР. Возможен также перекос трубы

№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
19	<p>Накатка прямая</p> 	—		<p>Запрессовка трубы с накаткой обеспечивает ее надежное закрепление и создает хорошие условия для проникновения припоя в соединение.</p> <p>Посадка или перекося детали 1 во время пайки исключены</p>
20	—			<p>Припой хорошо проникает в соединение, но возможны также наплывы на поверхности мембраны, что ухудшает ее упругие свойства и снижает долговечность</p>

№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
21		—		<p>Припой хорошо проникает в соединение. Наплывы припоя на поверхности мембраны исключены, что благоприятно сказывается на ее долговечности</p>
22	—		 <p><i>Поверхностная диффузия по стенке</i></p>	<p>Наплывы припоя на поверхности А недопустимы, так как вредны для последующей сварки. При такой конструкции их отсутствие никак не гарантируется</p>

№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
23		—		<p>Канавка <i>K</i> служит барьером для растекающегося припоя. Поверхность <i>A</i> остается чистой</p>
24	—			<p>Попадание припоя на поверхности <i>A</i>, которые впоследствии свариваются со стеклом, недопустимо. В данной конструкции этого не избежать, так как натеки припоя и поверхностная диффузия ничем не ограничиваются</p>

№ п/п.	Конструкция соединения и расположения припоя		Результат пайки	Описание
	Правильно	Неправильно		
25		—		<p>Канавка К предохраняет поверхности А от загрязнения припоем, так как является барьером для растекающегося припоя и удлиняет путь поверхностной диффузии</p>

прижимать плоскости друг к другу. Припой может наноситься на соединяемые детали также в виде гальванического покрытия или пасты.

Следует иметь в виду, что галтели и выточки в местах сопряжений недопустимы, так как вызывают местные увеличения зазора, что приводит к ослаблению или прекращению капиллярности расплавленного припоя.

В табл. 6 приведены примеры правильного и неправильного расположения деталей и припоя с необходимыми конструктивными рекомендациями с учетом положения узла в печи при пайке.

4-2. Вакуумная плотность металлов

При изготовлении электровакуумных приборов со стеклянной, вакуумной оболочкой — приемно-усилительных ламп, электроннолучевых трубок, ламп бегущей волны и других, вопросы вакуумной плотности полуфабрикатов из металлов обычно не играют существенного значения, так как лишь штырьки вводов изготавливаются из металла.

Однако для конструирования современных электровакуумных приборов характерна тенденция к совмещению функций вакуумноплотной оболочки прибора с рядом конструктивных элементов, выполняемых из металла. Значительная часть приборов, например, магнетроны, мощные, средние усилительные и даже маломощные генераторные клистроны, лампы обратной волны, платинотроны, мощные лампы бегущей волны, мощные генераторные лампы и др., почти полностью выполняется из металла. Функции вакуумной оболочки в таких приборах часто выполняют аноды, резонансные высокочастотные контуры, коллекторы, полюсы магнитных систем, гибкие мембраны, сильфоны, металлические детали изоляторов и другие конструктивные элементы.

Развитие электровакуумного и электронного приборостроения и машиностроения привело к тому, что для элементов оболочки приборов в настоящее время, наряду с такими традиционными материалами электровакуумного приборостроения, как бескислородная медь, никель, сплавы железа, никеля и кобальта, малоуглеродистая сталь марки Э (железо типа Армко), используется значительное число материалов (например, немагнитная нержавеющая сталь марки 1X18N9T, стали 10, 45,

мельхиор, константан, монель-металл, латунь-полуметалл и др.), заимствованных из других отраслей промышленности.

Вакуумная плотность полуфабрикатов (ленты, трубы, прутки, сифоны), из которых изготавливаются указанные детали, определяет основные параметры приборов — долговечность и надежность. Однако вакуумная плотность этих металлов, несмотря на их широкое применение, обеспечивается далеко не всегда, многие из них являются невакуумноплотными и могут быть использованы лишь при условии применения специальных конструктивных и технологических мер.

Опыт производства показывает, что брак по натеканию электровакуумных приборов сверхвысоких частот с металлическими корпусами составляет от 10 до 30% от общего брака. При этом немалая доля брака (до 80% при неудачной конструкции) вызывается вакуумной неплотностью материалов.

Опасность натекания по материалам особенно велика еще и потому, что течи по материалу, как правило, очень невелики и могут обнаружиться лишь через длительный период. Это особенно опасно для приборов, установленных в объектах, недоступных для повседневного осмотра и замены вышедших из строя элементов.

Брак по натеканию приборов с металлическими оболочками по месту возникновения течей и технологическим особенностям можно классифицировать следующим образом:

- а) натекание по металлам;
- б) натекание по соединениям металлов;
- в) натекание по диэлектрикам (стекло, керамика) и их срям с металлами.

Ниже рассматриваются причины натекания по металлам и основные пути его предотвращения конструктивными мерами, а также методы и схемы контроля вакуумной плотности полуфабрикатов и узлов.

Основные металлургические дефекты полуфабрикатов, приводящие к вакуумной неплотности, и их причины, классифицированы в табл. 7. Этими металлургическими дефектами в основном являются пороки исходных слитков. Наряду с ними нарушение режимов нагрева при обработке пластическим деформированием (прокаткой, ковкой), неправильный выбор степеней обжатия и неудовлетвори-

Основные металлургические дефекты проката, приводящие к вакуумной неплотности

Дефекты полуфабриката	Исходный металлургический дефект слитка или причина дефекта полуфабриката	Направление дефекта	Зона поражения слитка	
			по сечению	по высоте
Сильно вытянутые полости, щели или расслои Мелкие бесформенные произвольно расположенные дырки, удлиненные в направлении проката	Усадочная раковина	Вдоль и поперек волокна	Осевая	Головная (верх)
	Осевая пористость	Вдоль волокна	Осевая	Средняя
Расслоения и каналы	Завороты корочки	Вдоль и поперек волокна	Любая	Любая, но больше нижняя
Волосовины	Газовые пузыри подкорковые	Вдоль волокна	Периферийная	Любая
	Газовые пузыри внутренние	То же	Любая	Средняя и нижняя
Незаварившиеся трещины	Корочки	„ „	„	Любая, но больше нижняя
	Межкристаллитные трещины	Вдоль и поперек волокна	Средняя	Верхняя и средняя
Флокены	То же	То же	То же	„ „ „
	Скворечники	Вдоль волокна	Ближе к осевой	Любая
Закаты	Внутренние термические трещины	То же	То же	„
	Нарушения технологии прокатки	„ „	Поверхностная	„

тельное состояние валков прокатных станов могут также привести к вакуумной неплотности.

Сильно вытянутые полости, щели или расслои (рис. 21, *а*, *б*) со стороны торца прокатанного материала, получаемого из головной части слитка, возникают вследствие усадочной раковины, которая образуется при затвердевании жидкого металла. Большая концентрация неметаллических включений в этой зоне затрудняет заваривание дефекта при прокатке и этот дефект затем обнаруживается в заготовке в виде расслоений и шлаковых включений.

Усадочные раковины обычно удаляются перед ковкой или прокаткой слитков. Объем отрезаемого металла составляет от 17 до 21% от объема слитка. Так как этот отход достаточно велик, то количество отрезаемого металла строго нормируется. Поэтому не исключено, что некоторая часть металла, содержащая малозаметные дефекты от усадки, даже при 100%-ном контроле слитков может попасть в сортовой прокат. Эта опасность особенно увеличивается ввиду влияния на размеры усадочной раковины большого числа факторов (химического состава, газонасыщенности, степени раскисления, температуры металла, скорости наполнения изложницы и надставки и др.).

Мелкие бесформенные дырки, произвольно расположенные в осевой зоне заготовки (рис. 22, *а*), вызываются центральной пористостью слитка (рис. 22, *б*, *в*, *г*), которая располагается между низом слитка и так называемым «мостом» — зоной более плотного металла под усадочной раковиной. Иногда центральная пористость распространяется и на низ слитка.

Нижняя часть слитка кристаллизуется раньше и имеет обычно плотную макроструктуру вследствие интенсивного охлаждения. Перегрев и повышенная газонасыщенность приводят к тому, что металл, кристаллизирующийся в последнюю очередь, занимает объем по всей высоте слитка. В этом случае осевой пористостью бывает поражена как верхняя, так и нижняя части слитка.

Верхняя часть слитка («мост») имеет плотную структуру, так

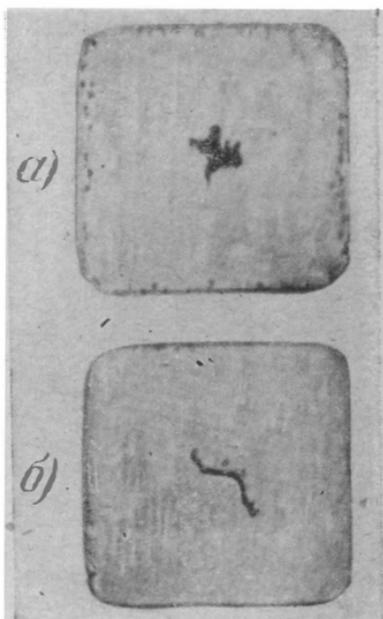


Рис. 21. Дефект, вызываемый усадкой.

а — подусадочная ликвация и подкорковые пузыри; *б* — трещина, сопровождающаяся пористостью.

как кристаллизуется в условиях непрерывного питания из прибыльной части. В наиболее неблагоприятных условиях кристаллизуется металл, расположенный между мостом и нижней частью слитка. Усадка его не компенсируется поступлением металла. При кристаллизации этой зоны в центральной части слитка фиксируется все, что имеется к этому времени в жидком металле: ликвационные примеси, газы, неметаллические включения.

Осевая пористость иногда, например, при защите слитков во время нагрева от влияния окисляющей атмо-

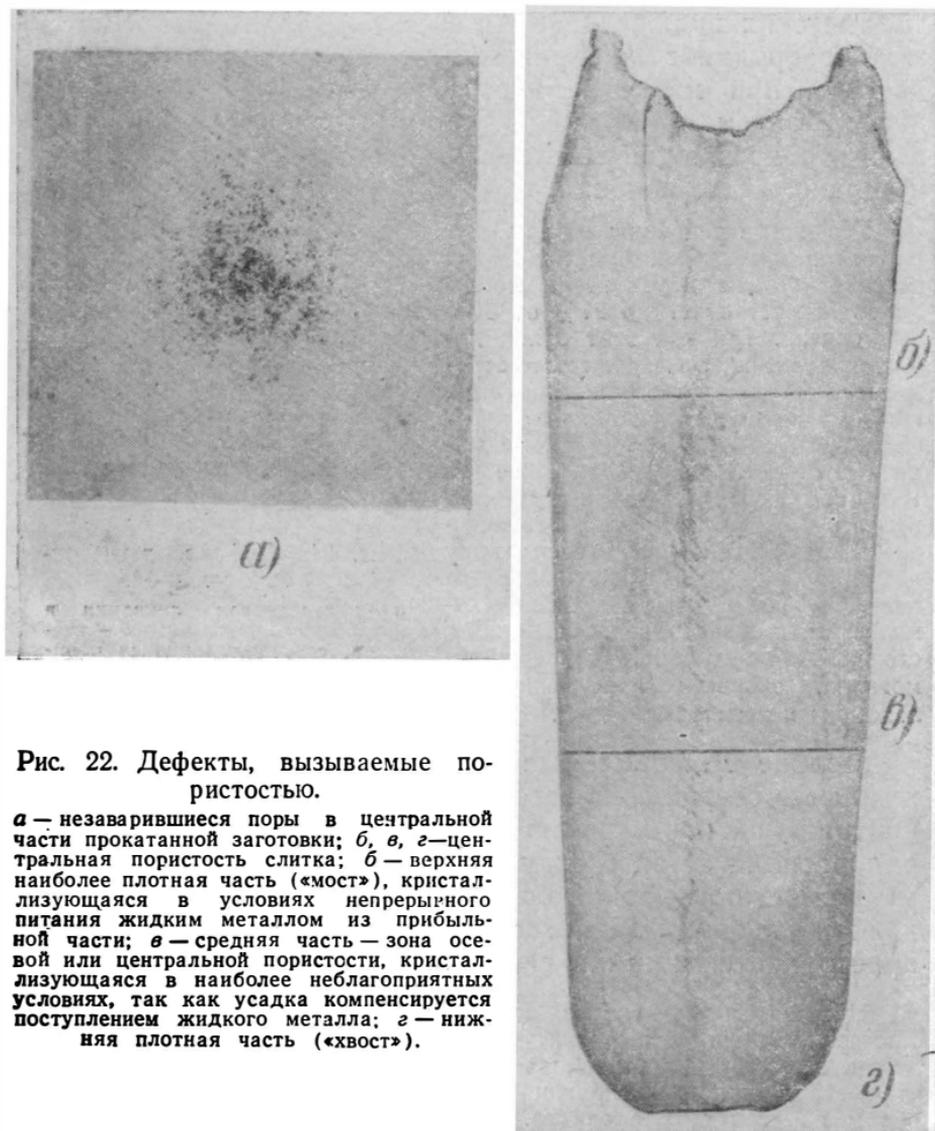


Рис. 22. Дефекты, вызываемые пористостью.

а — незаварившиеся поры в центральной части прокатанной заготовки; *б, в, з* — центральная пористость слитка; *б* — верхняя наиболее плотная часть («мост»), кристаллизующаяся в условиях непрерывного питания жидким металлом из прибыльной части; *в* — средняя часть — зона осевой или центральной пористости, кристаллизующаяся в наиболее неблагоприятных условиях, так как усадка компенсируется поступлением жидкого металла; *з* — нижняя плотная часть («хвост»).

сферы и при значительных обжатиях (более 5 кратных), заваривается. Однако при окислении и меньших обжатиях отдельные поры остаются незаварившимися и выявляются в виде произвольно расположенных мелких дырок. Таким образом, осевая пористость связана с условиями кристаллизации слитка, на которые существенное влияние оказывает конструкция изложниц, особенно отношение высоты к диаметру и конусность, а также

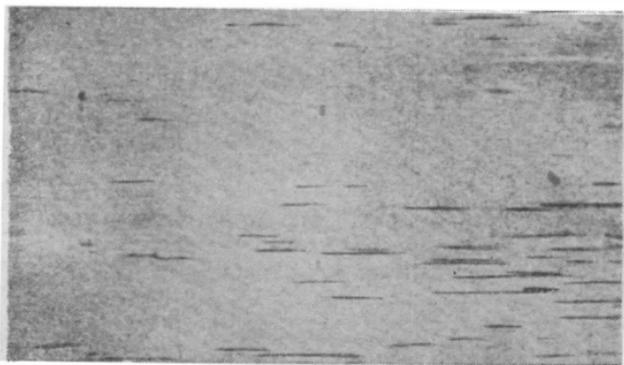


Рис. 23. Волосовины на поверхности шлифованной заготовки после травления.

правильность температурного режима разливки и кристаллизации металла.

Особенно опасны для вакуумных приборов и машин волосовины (рис. 23) — дефекты в виде тонких каналов различной длины, нарушающих сплошность металла. Волосовины располагаются всегда параллельно волокну и обычно обнаруживаются на готовом прокате или на деталях. Волосовины часто встречаются в прокате и особенно опасны тем, что бывают как в наружных слоях металла, так и во внутренних.

Образование волосовины объясняется многими причинами и прежде всего наличием газовых пузырей в слитке. При нагреве слитков под прокатку стенки пузырей, расположенных близко к поверхности, окисляются и прокатке не свариваются даже при очень больших обжатиях. Мешают свариванию и неметаллические включения, всегда сопутствующие пузырям. Волосовины образуются также из «заворотов корочек». Волосовины в большом количестве встречаются на поверхности прутков, изготовленных из нижней части слитка. Особенно

загрязненной бывает закругленная донная (хвостовая) часть слитка, чистка и обдирка которой затруднена. Прутки металлов и сплавов, вязких в жидком состоянии, поражаются волосовинами по высоте всего слитка примерно одинаково.

Образование внутренних газовых пузырей, являющихся причинами появления волосовин, связано с выделением газов — водорода, азота, окиси углерода, поглощенных жидким металлом при кристаллизации. Пузыри, не загрязненные включениями и ликватами, образуются, вероятно, в результате накапливания газа в отдельных участках слитка в последние моменты его кристаллизации. Пузыри газа, всплывающие в более ранний период, оставляют после себя след — «ниточку» включений и неоднородного металла. Часть включения успевает всплыть вслед за пузырьрем.

На металлургических заводах поверхностные волосовины обычно удаляют различными способами: обдиркой на токарном и фрезерном станках, выжиганием в струе кислорода, шлифовкой и т. д. Прокат из таких заготовок для вакуумных изделий использовать нельзя, так как всегда имеется опасность попадания части металла с волосовинами.

Установлено, что для деталей ответственного назначения для удаления поверхностных волосовин припуск на сторону при обработке должен быть не менее (мм):

Диаметр заготовки	150	100	500	20	10
Припуск	6	4	3	1,5	1

Некоторая часть волосовин, особенно внутренних, образуется в результате такого металлургического дефекта, как завороты корочки (рассматривается ниже). Расслоения и внутренние каналы в прокате образуются при обработке пластическим деформированием слитков, имеющих корочки. Корочки или пленки (рис. 24) окисленного и загрязненного неметаллическими включениями металла образуются на поверхности металла и достигают значительных размеров при наполнении верхней части изложниц. Если при разливке у стенок изложницы сохраняется слой жидкого металла, то образовавшиеся корочки свободно поднимаются, попадают в прибыльную часть слитка и удаляются вместе с нею. В этом случае образование корочки не отражается на качестве заготовок.

Однако часто образующиеся корочки прилипают к поверхности изложницы и подворачиваются. Вновь поступивший металл заливает такие корочки и тогда они целиком остаются в слитке, или размывает их и частично уносит в прибыль. Дефекты, образующиеся при этом, на-

зывают «заворотом корочки», а иногда и просто корочками. Анализ состава корочек показывает, что у конструкционных сталей в корочках встречаются включения алюминатов, глинозема, силикатов, частиц огнеупоров. Корочки встречаются в различных частях слитка, и обнаружение их очень сложно.

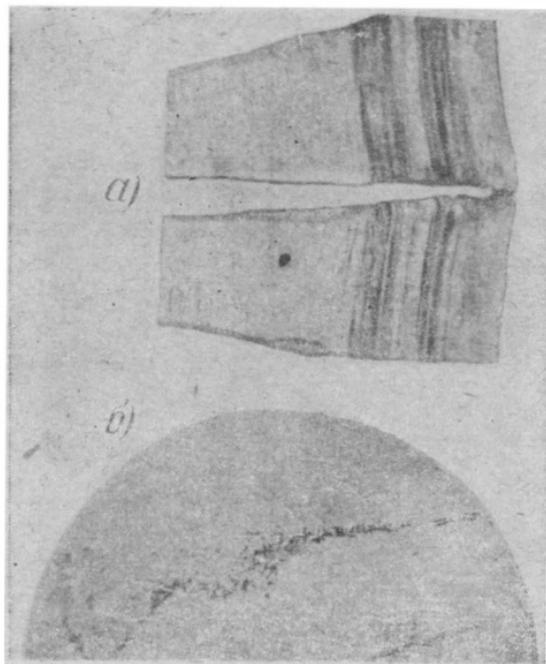


Рис. 24. Излом (а) по месту залегания краевой корочки и корочка в макротемплете (б).

Незаварившиеся межкристаллитные трещины (рис. 25) и флокены (рис. 26) приводят к нарушению вакуумной плотности проката в направлении как вдоль, так и поперек волокна. Межкристаллитные трещины образуются в некоторых сталях и сложных сплавах в осевой части и распространяются в стороны. Наибольшее развитие межкристаллитные трещины получают в верхней трети слитка. В средней трети они значительно тоньше и занимают меньшую зону, а в нижней — обычно не возникают. Межкристаллитные трещины в процессе прокатки (иликовки) завариваются только при достаточно больших обжатиях и при отсутствии неметаллических включений на гранях кристаллов.

Осевые межкristаллитные трещины в слитке вызываются напряжениями, возникающими в процессе кристаллизации, причем, чем больше вес слитка, тем больше напряжения, возникающие в осевой зоне. Образование трещин облегчается тем, что границы первичных кристаллов, особенно осевой зоны слитка, ослаблены отложениями неметаллической фазы с пониженной температурой кристаллизации. Опрокидывание изложниц для удаления слитков,

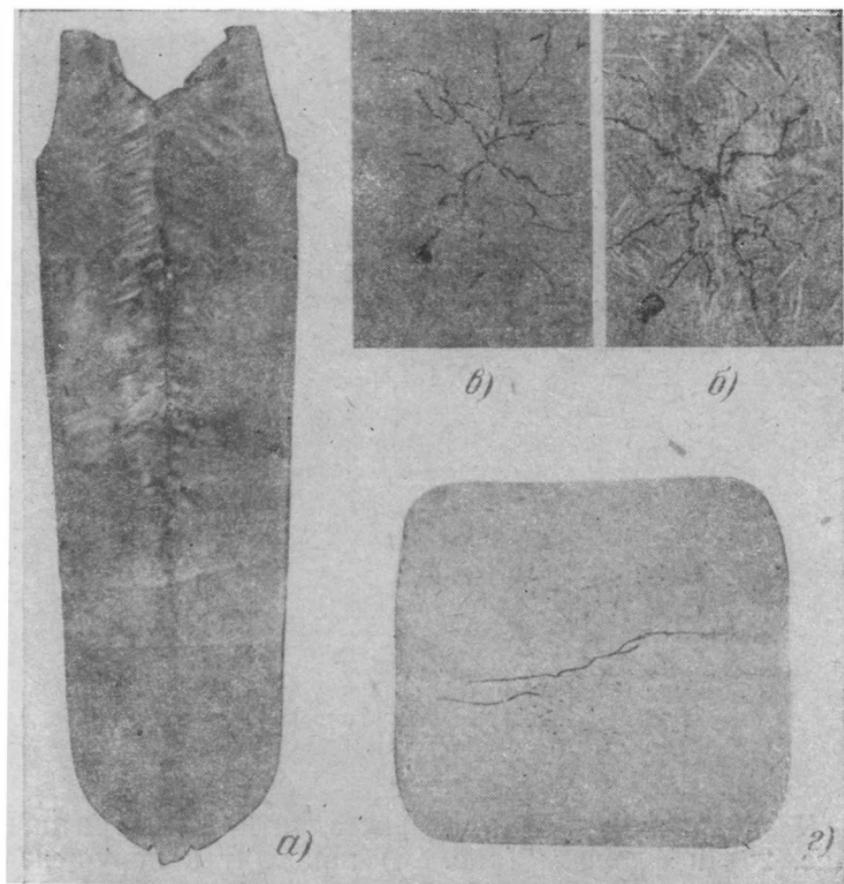


Рис. 25. Межкristаллитные трещины:

а — в слитке стали 18ХНВА весом 2,6 т; *б, в* — грубые и тонкие на поперечном макрошлифе заготовки крупного сечения стали 18ХНВА; *г* — в слитке стали 45 от раннего опрокидывания изложницы.

имеющих небольшой объем незакристаллизованного металла, вследствие удара увеличивает опасность образования межкristаллитных трещин, поражающих большую зону.

Флокены (рис. 26) представляют собой тонкие трещины, поражающие обычно центральную зону заготовок или поковок. По поводу причин образования флокенов

существует несколько точек зрения. Так, например, считается, что основной причиной образования флокенов является водород и предполагается следующий механизм их возникновения: растворимость водорода в жидкой стали значительно больше, чем в твердой (0,0025% в чистом железе при 1550°С и 0,0002—0,0005% в твердой стали). Скорость выделения водорода на различных ста-

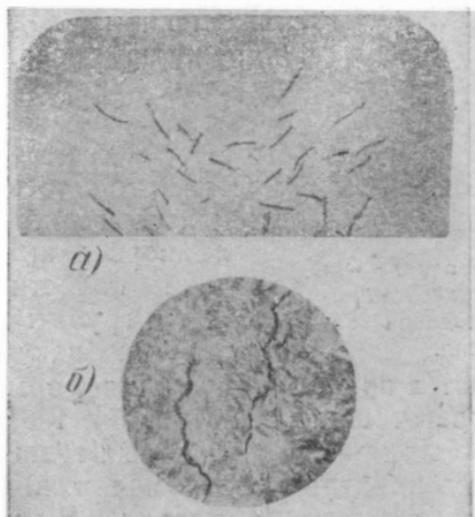


Рис. 26. Флокены на макрошлифе (а) и микроструктуре (б, $\times 100$).

диях тепловой обработки различна и резко увеличивается при аллотропических превращениях. Кроме того, водород выделяется и при лежании остывшего металла. Оставшийся в центральных частях заготовки или слитка атомарный водород, диффундируя и превращаясь в молекулярный, накапливается в отдельных порах и микроскопических неплотностях. В этом случае давление атомарного водорода в полостях накопления равно нулю и диффузия приобретает направленный характер. Накапливающийся молекулярный водород развивает большие давления, приводящие к местному хрупкому разрушению металла, т. е. образованию флокенов. Количество образующихся флокенов увеличивается в случае развитой дендритной ликвидации, возникновения напряжения первого рода из-за ускоренного охлаждения.

Указанные процессы идут в сталях перлитного, перлитно-мартенситного и мартенситного классов, имеющих сумму легирующих элементов в пределах 8%.

Флокены обычно не образуются в сталях с очень медленной диффузией водорода — высоколегированных типа 1X18H9T, аустенитного и ферритного классов, а также в металлах с очень быстрым выделением водорода через наружную поверхность. В результате этого отсутствуют условия его накопления, например, в железе, малоуглеродистой стали без легирующих элементов и примесей.

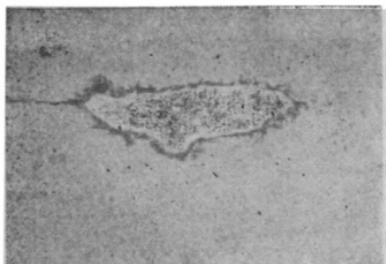


Рис. 27. «Скворочник» на поперечном макротемплете при малой степени заваривания.

«Скворечники» — или внутренние полости (рис. 27), один из грубых дефектов, нарушающих вакуумную плотность, образуются во время горячей деформации слитков или крупных заготовок из внутренних термических трещин или развитых межкристаллитных трещин (рис. 25,г) в случае неблагоприятного их расположения к направлению усилий, обжимающих металл. В ряде случаев к образованию скворечников приводят флокены, не заварившиеся во время прокатки иликовки.

«Закат» — поверхностный дефект в виде тонкой прямолинейной трещины, расположенной по всей длине раската и образовавшийся в результате появления морщины или складки на поверхности заготовки. Закат при зачистке зубилом расщепляется, а при осадке контрольных образцов раскрывается и отличается от волосовин окисленными стенками и большой глубиной.

На поверхности проката, кроме того, нередко образуются царапины, вмятины, морщины различной степени развития. Заготовки с такими дефектами не пригодны для холодного волочения.

Основные методы контроля качества слитков и проката и надежность обеспечения ими вакуумной плотности. Основные методы контроля качества слитков и проката, которые применяются или могут быть использованы для контроля с целью обеспечения вакуумной плотности, приведены в табл. 8.

Способы контроля слитков и полуфабриката, которые используются или могут быть использованы для оценки их качества по вакуумной плотности

Способы контроля	Критерии оценки	Контролируемые дефекты
Макрошлифы продольных и поперечных темплетов (срезов)	Заводские шкалы с баллами дефектов	Все виды в зоне макрошлифа
* Микроструктурный анализ (микротвердости, включений, металлографический и т. п.)	То же	Все виды в зоне микрошлифа
Осадка контрольных образцов (горячая и холодная)	Состояние поверхности (по раскрытию дефектов)	Поверхностные волосовины и закаты
Ступенчатая обточка образцов	Состояние поверхности и переломы стружки при точении	Волосовины
Магнитная дефектоскопия	Внешний вид	Волосовины на глубине до 1 мм, трещины
Шлифовка и травление поверхности	Сравнение с заводскими эталонами	Волосовины поверхностные
Индукционный	Изменение тока по сравнению с эталоном	Трещины и волосовины
Компрессионный	Появление газовых пузырей в жидкости	Сквозные волосовины и трещины на длине образца
Масс-спектрометрический на гелиевых течеискателях	Показания прибора	Все виды вакуумной неплотности, если длина дефектов не меньше длины деталей или образцов
Масс-спектрометрический с контролем образцов, деформированных растяжением, на гелиевом течеискателе	Показания прибора	Все виды вакуумной неплотности, если длина не меньше толщины деформированного образца
Люминесцентный	Свечение проникшего состава в ультрафиолетовых лучах	Сквозные дефекты на длине образца, детали

Из всех приведенных видов контроля только индукционный, компрессионный, течеискательный (масс-спектрометрический) и люминесцентный не связаны с разрушением образцов. Все виды контроля, кроме компрессионного, течеискательного и люминесцентного, являются косвенными, часто субъективными методами, совершенно не соответствующими требованиями надежного обеспечения вакуумной плотности. Компрессионный метод очень груб.

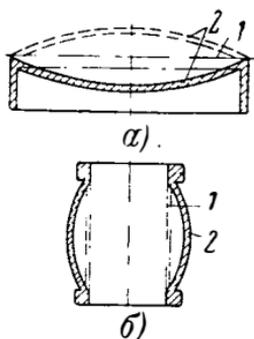


Рис. 28. Схемы подготовки образцов материала для испытания на вакуумную плотность при помощи гелевого течеискателя путем усиления внутренних дефектов деформацией в холодном состоянии.

а — среза пруткового материала или листа; *б* — трубы; 1 — исходный образец; 2 — деформированный образец.

Единственный объективный метод — течеискиание — практически почти не применяется для контроля материалов на электровакуумных предприятиях и используется лишь для контроля деталей и узлов. Не используется он и металлургическими предприятиями, хотя его применение могло бы резко повысить контроль вакуумной плотности материалов.

Чувствительность масс-спектрометрического течеискиания предложено повысить путем использования для проверки специальных образцов (рис. 28).

Для усиления внутренних дефектов по вакуумной неплотности образцы материала 1 деформируются в холодном или горячем состоянии в пределах, допускаемых прочностными характеристиками. При этом под воздействием внутренних напряжений растяжения при наличии дефектов произойдет их увеличение — «раскрытие» и на контроль поступят образцы 2. Предполагается, что использование таких образцов перспективно для обнаружения дефектов, дающих медленное натекание.

Для выявления металлургической природы обнаруженных дефектов масс-спектрометрическое течеискиание следует сочетать с люминесцентным методом, который указывает место дефекта и тем самым позволяет провести анализ причин его возникновения.

4-3. Типовые элементы конструкций вакуумноплотных оболочек

Основное правило конструирования вакуумноплотных элементов оболочек приборов из существующих материалов может быть сформулировано следующим образом: *недопустимо окончание*

одних и тех же неплотненных волокон пруткового и толстолистового материалов оболочки со стороны вакуумной полости и со стороны атмосферы. Это правило диктуется основным дефектом современных полуфабрикатов — недостаточной надежной вакуумной плотностью вдоль волокна.

Характерный пример нарушения этого правила показан на рис. 29,а. Корпус прибора выполнен из медного прутка диаметром 90—100 мм. Дно корпуса толщиной 2—4 мм расположено поперек волокон материала, в результате чего брак по натеканию был очень велик. Кроме того, материал для изготовления корпуса расходуется нерационально, так как примерно 70% заготовки удаляется в виде стружки.

На рис. 29,б показана сборная конструкция этой детали из цилиндра и дна, изготовленных соответственно из трубы, листа и спаянных между собой. Брак по натеканию прекратился. На рис. 29,в приведен другой вариант выполнения этой детали. Заготовка детали изготавливается штамповкой-вытяжкой из листового материала и подвергается затем механической обработке.

На рис. 30,в показана крышка мощной генераторной лампы. Крышка изготовлена из листа Ст. 10 толщиной

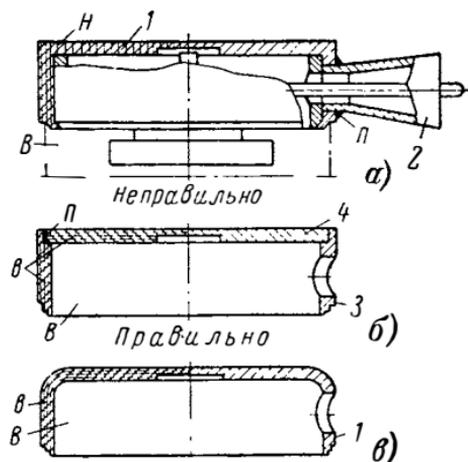


Рис. 29. Корпус элемента настройки магнетрона.

а — точеный из прутка диаметром 100 мм; б — паяный; в — штампованный из листа; 1 — корпус; 2 — элемент настройки; 3 — цилиндр, выточенный из тонкостенной трубы; 4 — дно, выточенное из листа; В — вакуумная полость изделия; в — направление волокон в материале; Н — участки деталей с волокнами, соединяющими вакуумную полость с атмосферой; П — вакуумноплотная пайка.

15—20 мм для жесткости. Вакуумная плотность в направлении, перпендикулярном торцу, т. е. поперек волокна, в основном обеспечивается. Однако, как это видно из нижней проекции, многочисленные

отверстия большого диаметра в крышке перерезают волокна вдоль листа и создают опасность натекания вдоль торца крышки.

Достаточно изменить конструкцию, как показано на рис. 30, а — в зоне соединения крышки 1 с кольцом 2 корпуса или хотя бы перенести швы стаканчиков 4 в плоскость буртика в (рис. 30, б), как вакуумная плотность будет надежно обеспечена. Перерезаемые отверстиями волокна будут выходить в вакуумноплотный шов стаканчиков 4 с крышкой и, следовательно, надежно уплотняться припоем при сохранении необходимой толщины крышки для обеспечения жесткости.

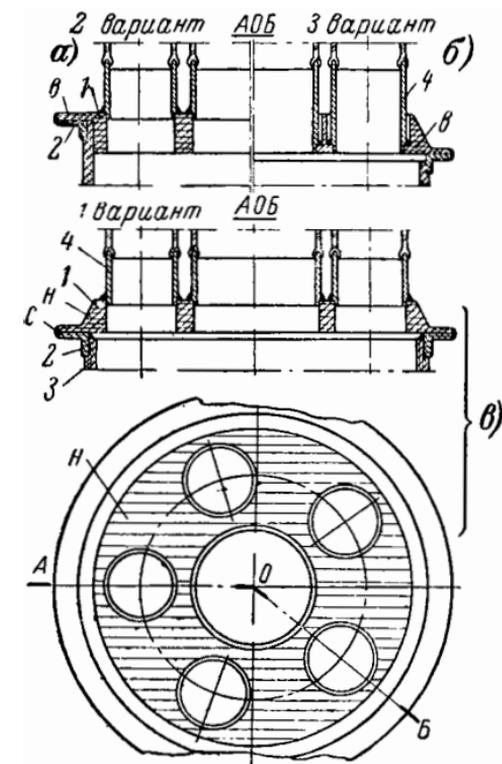


Рис. 30. Крышка генераторной лампы. а и б — надежные конструкции с полностью перекрытыми волокнами; в — ненадежная конструкция, допускающая натекание вдоль волокон крышки при выходе их в отверстия. 1 — крышка (лист, сталь 10); 2 — кольцо (лист, сталь 10); 3 — корпус (труба, сталь 10); 4 — стакан.

В пакетированных конструкциях приборов последовательно вдоль оси соединяется несколько деталей. В этом случае размеры деталей и положение вакуумноплотных соединений целесообразно выбирать, как показано на рис. 31. При конструировании прибора в качестве границы вакуумной полости выбран условный цилиндр, ограниченный образующими 5—5. Все вакуумноплотные соединения деталей: два сварных шва С стаканчиков 4 с полюсами магнитной системы 2 и 3, два

спая Π с этими же полюсами корпуса 1 расположены на линиях 5 . Благодаря этому все перерезанные волокна в деталях 1 , 2 и 3 начинаются и заканчиваются внутри вакуумной полости, и опасность натекания по ним исключена.

Анализ большого числа конструкций электровакуумных приборов позволяет сформулировать следующие основные правила конструирования вакуумноплотных оболочек из существующих полуфабрикатов:

1. Формовка деталей сложной конфигурации должна выполняться при помощи пластической деформации без перерезки волокон — штамповкой, холодным выдавливанием и т. п.

2. Концы перерезанных волокон должны закрываться листовым материалом или заплавляться слоем более легкоплавкого металла или стеклом.

3. Торцы стержневых деталей, обычно вводов, должны быть оплавлены сварочной дугой или припоем или стыковой сваркой с другой частью ввода.

4. Рекомендуется также нанесение и специальная обработка уплотняющих покрытий.

Рассмотрим каждый из способов на конкретных примерах.

Формовка деталей, сохраняющая волокнистую структуру. Если деталь сложной формы изготавливается методами пластической деформации, то волокна располагаются примерно вдоль контура детали, но не перерезаются им. Сохранение волокнистой структуры при обработке давлением наглядно видно на рис. 32.

В качестве примера применения формовки на рис. 29, в показан штампованный корпус вместо точеного.

На рис. 33 показаны конструкции коварового стаканчика, изготавливаемого из прутка (а) с целью получения жесткого уступа 4 и давленного (б) из ленты или трубы с напаянным кольцом жесткости 3 из стали. Во второй конструкции выход перерезанных волокон из вакуумной полости в атмосферу полностью устранен.

На рис. 34 показан пример толстостенной детали — крышки,

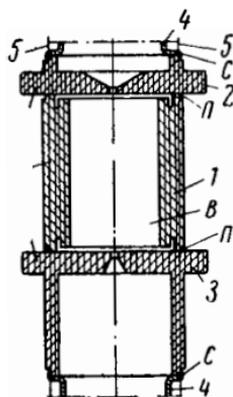


Рис. 31. Конструкция с надежно перекрытыми волокнами.

1 — корпус (медь);
2, 3 — полюсы
(сталь Э); 4 — стакан (ковар); 5 — граница вакуумной полости внутри металла.

изготавливаемой из листа меди толщиной 10 мм, в которой замена обычно применяющихся точеных тонкостенных буртиков для дуговой сварки (а) на отбортованный буртик (б) устранила около 10% брака заваренных приборов только из-за натекания по волокнам тонкостенного буртика.

Перекрытие ленточным материалом перерезанных волокон — один из наиболее ранних способов устранения опасности натекания вдоль во-

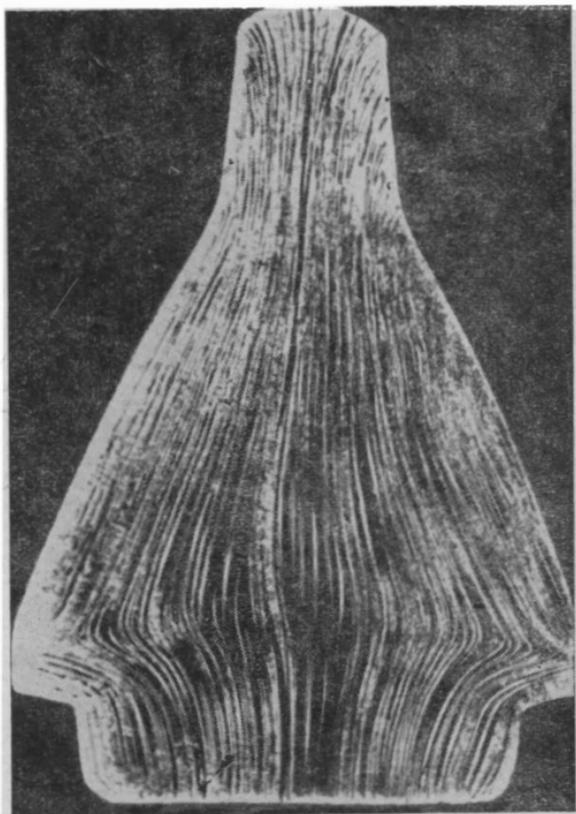


Рис. 32. Волокнистая структура детали, обработанной давлением.

локна. Классическим примером использования этого способа является конструкция вводов мощных приборов, показанная на рис. 35,а. Находящийся в вакуумной полости ввод 2 отделен от наружного ввода 3 торцом стаканчика 1. Другие варианты выполнения таких вводов показаны на рис. 35,б, в.

Другим примером перекрытия волокон лентой или другим более вакуумноплотным материалом служит конструкция узла настройки, показанная на рис. 36. Торцы направляющей 1 и коль-

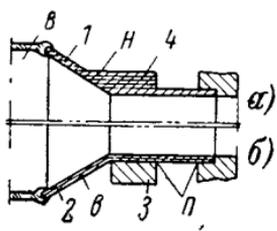


Рис. 33. Неправильная (а) и правильная (б) конструкция стакана из ковара.

1 — точеный из прутка;
2 — давленный из ленты;
3 — кольцо жесткости;
4 — жесткий уступ.

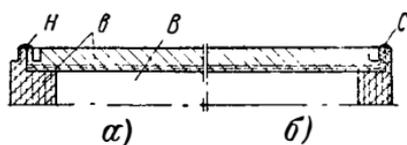


Рис. 34. Правильная (б) и неправильная (а) конструкция крышки из листового материала.

а — буртик выточен; б — буртик отбортован.

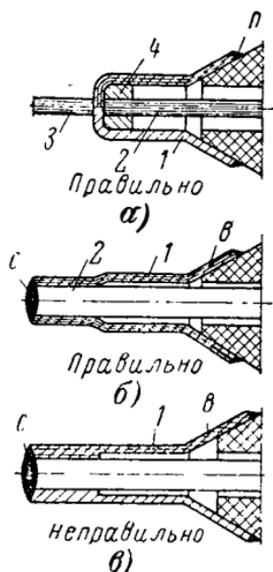


Рис. 35. Правильные (а) и (б) и неправильная (в) конструкции выводов.

1 — стаканчик (а и б — давленный из ленты; в — точеный из прутка); 2 — точеный из прутка; 2 — внутренний ввод; 3 — наружный ввод; 4 — втулка; с — наплавка слоя припоя во время пайки узла или оплавление сварочной дугой после пайки.

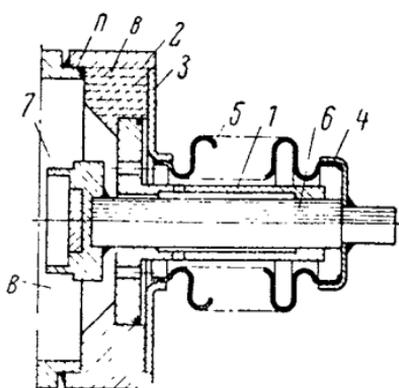


Рис. 36. Перекрытие волокон в деталях 1 и 2 деталью 3 из ленты и в детали 6 медной втулкой 7.

1 — направляющая (сталь Э, пруток); 2 — кольцо (медь, толстостенная труба); 3 и 4 — тарелочка (никель, лента); 5 — сильфон; 6 — шток (ст. Э, пруток); 7 — втулка (медь, пруток).

ца 2 закрыты тарелочками 4 и 3 из никеля, а торец стального штока 6 — перемычкой медной втулки 7.

На рис. 37 показано перекрытие волокон детали 1 тарелочкой 3 из ленты. Одновременно на рис. 37 показан правильный выбор диаметра тарелочки 5 и шва втулки 6 с корпусом 4, лежащих на линии 7—7, в результате чего волокна втулки 6 перекрыты внутри условного цилиндра 7—7 тарелочкой 5 снаружи и торцевым швом с корпусом 4.

На рис. 38 показан прием закрывания части волокон детали 1 специально отбортованной частью стаканчика 2.

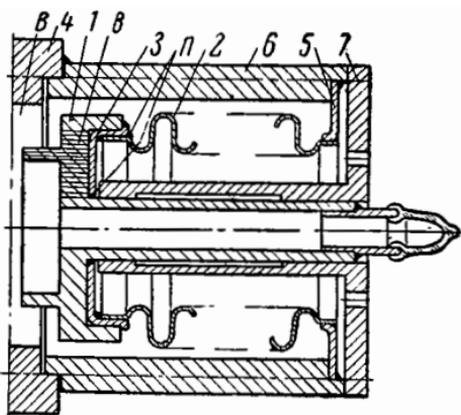


Рис. 37. Механизм настройки с сифоном 2; волокна в штоке 1 перекрыты тарелочкой 3, правильно выбраны диаметры соединения корпуса 4 и тарелочки 5 с втулкой 6, лежащие на линии 7—7.

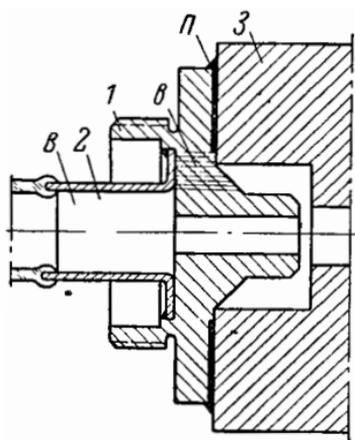


Рис. 38. Перекрытие волокон в полюсе 1 отбортовкой стаканчика 2.

Заплавление волокон более легкоплавким материалом обычно применяется для уплотнения торцов деталей, изготовляемых точением из пружинного материала.

На рис. 39 показана конструкция блока резонаторов 1, спаянного по торцам с полюсами магнитной системы 2 и 3. На нижней проекции условно показаны места выхода волокон из вакуумной полости в атмосферу и видно, что они размещены на значительной части площади сечения полюсов. Наплавка слоя *E* меди позволяет повысить вакуумную плотность деталей 2 и 3.

Подобное же положение возникает при переходе с круглого сечения волновода на прямоугольное. На рис. 40 показана конструкция такого перехода. На площадке *H* волокна фланца имеют выход из вакуумной полости в атмосферу. Наплавка слоя меди *E* повышает вакуумную плотность детали 1.

Нередко в деталях приходится делать различные отверстия. В результате этого часть волокон, например детали 1 (рис. 41), ранее перекрытых кольцом 4, оказывается выходящей из вакуумной полости в атмосферу. Наплавка слоя *E*, совмещенная с пайкой стаканчика 2,

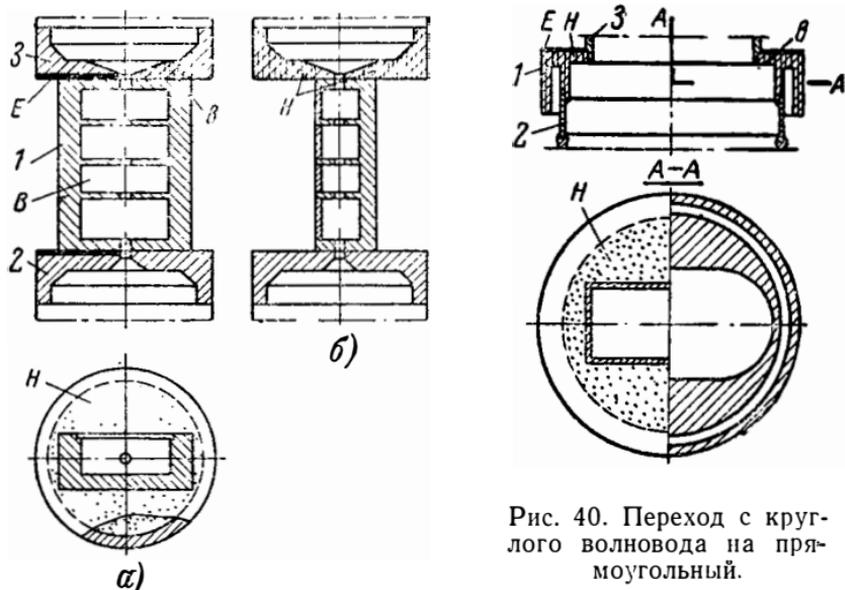


Рис. 39. Соединение прямоугольного корпуса с полюсами магнитной системы.

a — правильное; *б* — неправильное;
1 — корпус (медь); 2, 3 — полюсы (сталь Э); *E* — наплавка меди.

Рис. 40. Переход с круглого волновода на прямоугольный.

1 — фланец (сталь 45); 2 — стакан (ковар); 3 — волновод (медь).

позволяет надежно уплотнить торец.

Примеры уплотнения выходов волокон на торце ввода путем оплавления во время сварки *C* узла показаны на рис. 35, *б*, *в*.

На рис. 42 показаны характерные примеры уплотнения торцов молибденовых вводов стеклом (средний ввод) и припоем *C* — (боковые).

Оплавление торцов часто применяется для уплотнения стержневых деталей, например, вводов вместо наплавания слоя припоя. В этом случае оплавление обеспечивается или стыковой сваркой ввода 1, спаивающегося со стеклом, с наружной частью ввода 3 (рис. 42), или сварочной дугой в среде аргона (см. рис. 35, *б*, *в*).

Нанесение и специальная обработка уплотняющих покрытий также позволяет увеличить вакуумную плотность деталей. Так, например,

для предотвращения возможных неплотностей стенок корпусов вакуумных приборов или узлов диаметром порядка 300 мм и больше, изготовляемых точением из стальных труб, часто применяют оплавление медной пасты во время пайки узла. Медная паста готовится замешиванием медного порошка на биндере или ацетоне

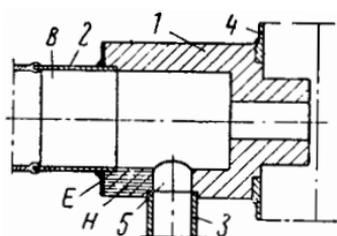


Рис. 41. Полюс с боковым отверстием.

1 — полюс (сталь Э); 2 — стакан (ковар); 3 — штенгель для откочки; 4 — кольцо для сварки; E — уплотняющая наплавка припоя.

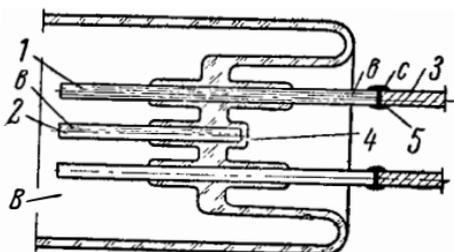


Рис. 42. Уплотнение торца стержневого ввода 1 стыковой сваркой С или пайкой.

Торец стержневого держателя — 2 уплотняется оплавленным стеклом — 4; 3 — гибкий ввод; 5 — никелевая обоймочка (для сварки).

до консистенции масляной краски и наносится на соответствующие поверхности деталей кистью («окрашивание медью»).

Для уплотнения поверхности полюсов магнитных систем из стали Э применяется многослойное покрытие из никеля и меди, которое наносится также в виде паст на предварительно подготовленную поверхность. Подготовка состоит в матировании детали на пескоструйном аппарате, обезжиривании и травлении. Нанесенные покрытия поочередно спекаются в водородной печи.

4-4. Требования вакуумной плотности в чертежах и соответствующие схемы контроля

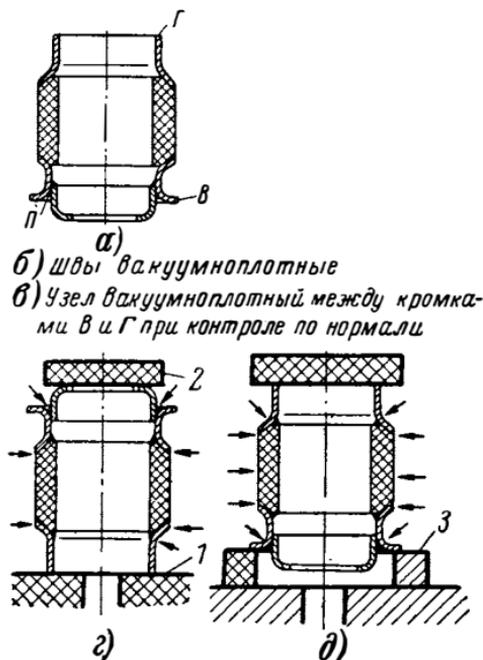
С усложнением конструкций приборов разработка отдельных функциональных узлов все чаще проводится узко специализированными подразделениями. Соответственно на специализированных производственных участках и даже предприятиях организовано серийное производство деталей и узлов электровакуумных приборов. Так, например, специализируется разработка и производство металлокерамических узлов, узлов с новыми ви-

дами соединений, например, диффузионной сваркой, сваркой электронным лучом и др.

В этих условиях особо важное значение приобретает правильная формулировка эксплуатационных требований к детали, узлу, в том числе требований функциональной взаимозаменяемости по вакуумной плотности. При этом оказывается совершенно недостаточно общих

Рис. 43. Высоковольтный изолятор (а) с неправильной (б) и правильной (в) формулировками требований к вакуумной плотности узла и соответствующие схемы (г) и (д) контроля вакуумной плотности на гелиевом теческателье (стрелками указано направление обдува гелием).

1 — резиновая опора теческателья; 2 — заглушка; 3 — промежуточное резиновое кольцо.



представлений о необходимой вакуумной плотности узла, вытекающей из его названия.

С точки зрения требований вакуумной плотности детали и узлы электровакуумных приборов можно разделить на две основные группы:

а) вакуумноплотные элементы деталей, детали и соединения, образующие оболочку прибора;

б) детали или их элементы, для которых вакуумная плотность необязательна.

В зависимости от этого должны быть четко сформулированы требования к ним.

Рассмотрим некоторые характерные примеры.

На рис. 43 показан пример неправильной (б) и правильной (в) формулировок технических требований на чертеже. При контроле узла по схеме (г) он может быть неправильно забракован по натеканию в шве П, кото-

рый может быть неплотным, что исключено при правильной формулировке технических требований и соответствующем контроле по схеме (д).

При требовании вакуумной плотности швов П1, П2 или обоих одновременно в узле а на рис. 44 в зависимости от того, по каким кромкам в дальнейшем должны осуществляться вакуумноплотные соединения, следует

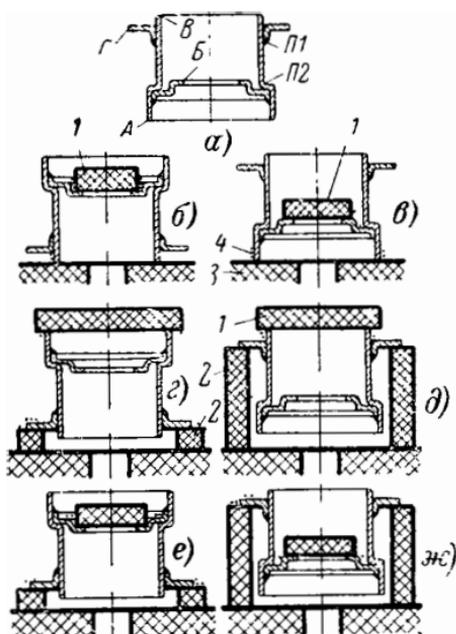


Рис. 44. Различные схемы контроля швов П1 и П2 узла (а) на теченскателе при требовании вакуумной плотности.

б, в — между кромками А—Б или В—Б; г, д — между кромками А—Г или В—Г; е, ж — между кромками Б—Г;

1 — резиновая заглушка; 2 — резиновое прокладочное кольцо; 3 — резиновая опора теченскателя; 4 — смачивающая герметизирующая жидкость.

в, д и ж — менее надежные схемы из-за опасности попадания жидкости в зону швов.

использовать различные схемы контроля. Так, при требовании вакуумной плотности между кромками А—Б или В—Б (шва П2) контроль вакуумной плотности следует вести по схемам (б) или (в), из которых схема (б) предпочтительнее, так как опасность затекания уплотняющей жидкости¹ в шов в этом случае значительно меньше, чем при контроле по схеме (в).

Соответственно при требовании вакуумной плотности между кромками В—Г или А—Г (шва П1) контроль вакуумной плотности следует вести по схемам (г) или (д), из которых схема (г) предпочтительнее по той же причине.

Наконец, при требовании вакуумной плотности меж-

¹ Контроль на теченскателе обычно сопровождается смачиванием кромки испытуемого узла, прижимающейся к резиновым уплотнителям, герметизирующей жидкостью (раствором спирта или реже вакуумным маслом) для уплотнения неровностей поверхности контакта.

ду кромками Б—Г (швы П1 и П2 одновременно) следует использовать схему (е), предпочтительную перед схемой (ж) и схемами (б), (в), (г), (д) поэлементного контроля.

Таким образом, четкое указание в технических требованиях на чертеже вакуумноплотного участка узла не-

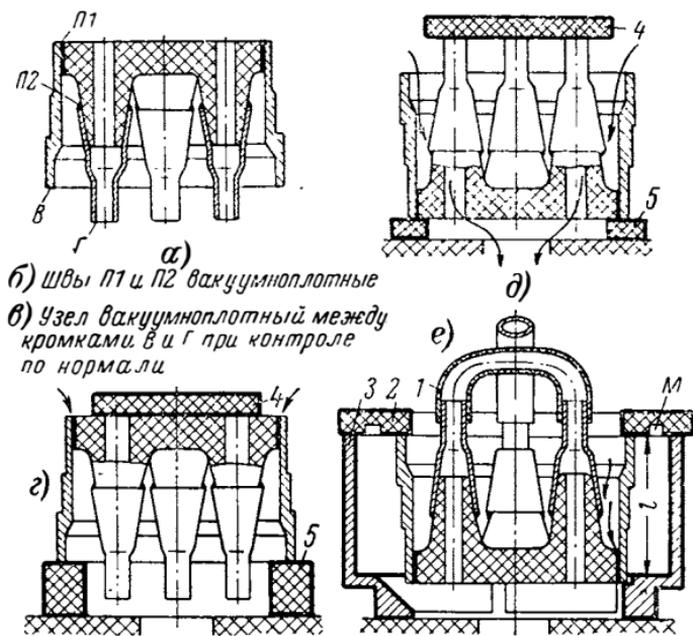


Рис. 45. Неточная (б) и точная (в) формулировки требований вакуумной плотности и соответственно ненадежные (г) и (д) и надежная (е) схемы контроля.

1 — резиновые трубки (при диаметрах вводов 2—2,5 мм — велосипедная ниппельная резинка); 2 — заглушка кольцевая с пазом, обеспечивающим гибкость заглушки для компенсации несопадения высот узла и подставки; 3, 4 — резиновые заглушки; 5 — кольцевые резиновые прокладки.

обходимо для исключения неправильных схем контроля вакуумной плотности.

Четкая формулировка требований к вакуумной плотности элементов узлов особенно необходима в сложных конструкциях современных приборов, когда использование обычных элементарных приемов и заглушек для контроля вакуумной плотности на течеискателе невозможно. Характерный пример такой конструкции — металлокерамическая катодная ножка — показан на рис. 45,а. Неточная формулировка технических требо-

вавший (б) позволяет использовать две ненадежные схемы контроля (г) и (д). Формулировка технических требований (в) допускает контроль только по более надежной схеме (е). При этом, естественно, приходится использовать специальную оправку 3 с внутренней опорой

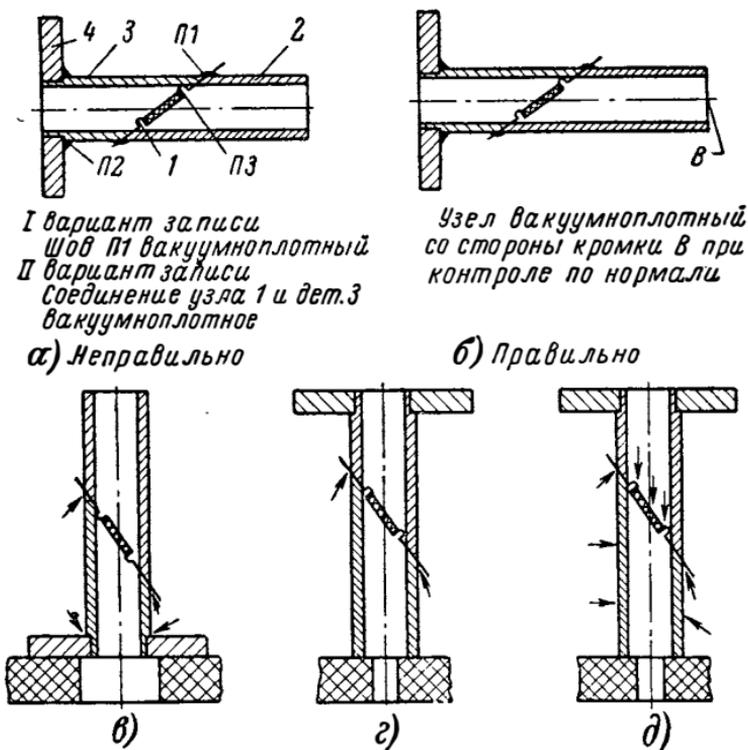


Рис. 46. Волноводный узел с вакуумноплотным металло-керамическим окном и схемы контроля вакуумной плотности в и г — при неправильной (а) и д — при правильной (б) формулировке технических требований.

1 — диафрагма с керамическим окном; 2 и 3 — волноводы; 4 — фланец; П1, П2 и П3 — паяные швы.

для испытания узла и кольцевую заглушку 2 с гибким участком м, позволяющим компенсировать погрешность разности размеров l из-за допусков на размер узла и оправки и тем самым обеспечить надежное уплотнение. При четырех вводах (диаметром 2—2,5 мм) целесообразно использовать для их герметизации при контроле резиновые трубки (велосипедную ниппельную резинку) вместо заглушек, так как на заглушку при малом диа-

метре ввода действует очень малое усилие прижима атмосферным давлением.

Еще один пример возможной неопределенности при выборе схемы контроля вакуумной плотности волноводного вывода энергии с керамическим окном показан на рис. 46. Формулировка технических требований в виде «Шов *П1* вакуумноплотный» приводит к необходимости последовательного применения двух схем (*в*) и (*г*) контроля. По схеме (*в*) контролируется вакуумная плотность шва *П2* и соединение узла *1* с деталью *3*, что может привести к забракованию годных узлов. При контроле по схеме (*г*) может не провериться вакуумная плотность ранее полученного шва *П3* и вакуумная плотность керамического окна, что приведет к пропуску брака.

Правильная формулировка технических требований по рис. 46,б допускает использование только одной схемы (*д*) контроля, которая гарантирует надежный контроль всех элементов, образующих вакуумную полость и не приведет к ошибочному забракованию годных узлов по вакуумной неплотности шва *П2* и соединения узла *1* с волноводом *3*.

4-5. Посадки, обеспечивающие вакуумноплотные спаи

На выбор посадок, обеспечивающих вакуумноплотные спаи, существенное влияние оказывает ряд факторов, рассмотренных выше: капиллярный эффект, жидкотекучесть припоев, смачиваемость, характер заполнения зазора и др.

Кроме того, в электровакуумном приборостроении к числу решающих факторов относится разница коэффициентов термического расширения (КТР) материалов.

Вследствие разности КТР при нагревании посадки в соединениях изменяются (увеличиваются или уменьшаются зазоры) и могут возникнуть усилия, приводящие к деформациям отдельных деталей вплоть до их разрушения. Для предотвращения вредных последствий этих явлений или, наоборот, для использования их (пайка со сжимающими усилиями) необходимо знать КТР материалов деталей при нагреве от температуры сборки до температуры пайки.

На рис. 47 показана зависимость КТР различных материалов от температуры.

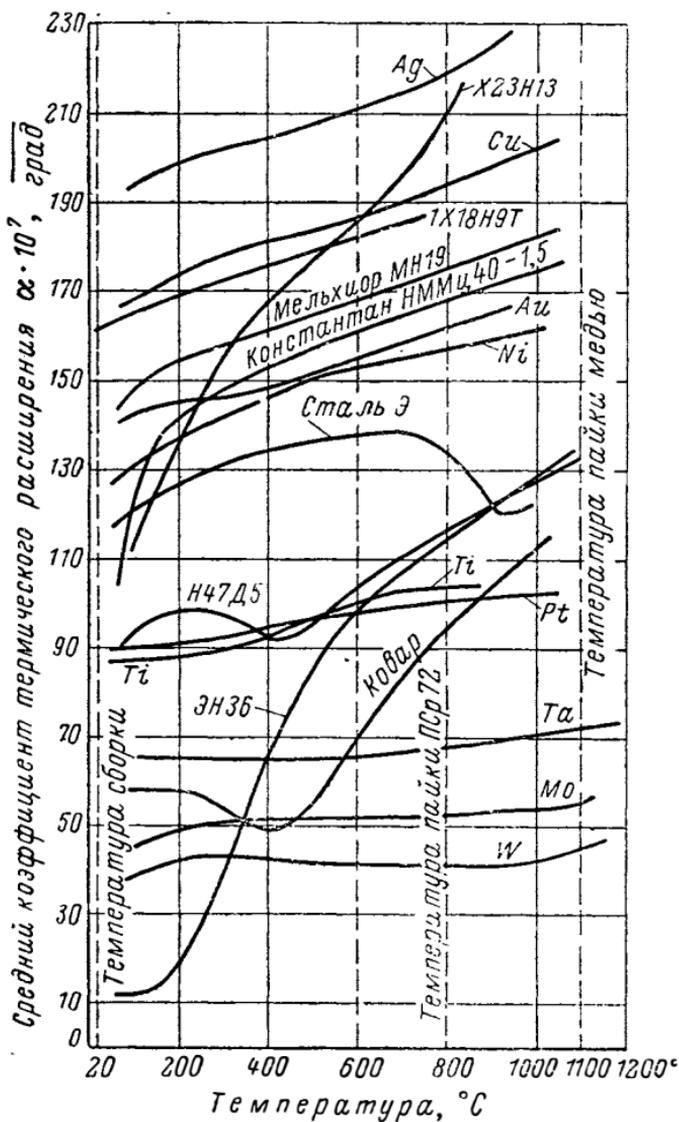


Рис. 47. Зависимость средних коэффициентов термического расширения различных металлов от температуры.

При нагреве изменение зазора (натяга) S выражается зависимостью:

$$S = D(\alpha_{\text{отв}} - \alpha_{\text{вала}})(t_{\text{пайки}} - t_{\text{сб}}),$$

где D — диаметр соединения;
 $\alpha_{\text{отв}}$ и $\alpha_{\text{вала}}$ — КТР материалов отверстия и вала в интервале температур сборки — пайки соответственно;

$t_{\text{пайки}}$ и $t_{\text{сб}}$ — температура пайки и сборки, °С.

При $\alpha_{\text{вала}} > \alpha_{\text{отв}}$ сборочный зазор $S_{\text{сб}}$ при нагреве уменьшается и может возникнуть натяг, равный:

$$S = D(\alpha_{\text{вала}} - \alpha_{\text{отв}})(t_{\text{пайки}} - t_{\text{сб}}) - S_{\text{сб}}.$$

При $\alpha_{\text{вала}} < \alpha_{\text{отв}}$ сборочный зазор $S_{\text{сб}}$ увеличивается и становится равным:

$$S = D(\alpha_{\text{отв}} - \alpha_{\text{вала}})(t_{\text{пайки}} - t_{\text{сб}}) + S_{\text{сб}}.$$

Для упрощения расчетов на рис. 48 дана номограмма¹.

В электровакуумных приборах наиболее широко используются припой ПСр72В и чистая медь.

Разность температур пайки и сборки для них равны 780 и 1 080°С соответственно².

На основе этих соображений и данных рис. 47 рассчитаны и построены графики изменения посадок некоторых материалов относительно меди при пайке припоем ПСр72В (рис. 49) и относительно Ст. 3 при пайке медью (рис. 50). По вертикали отложена величина изменения разности размеров в миллиметрах. Принято, что медь и сталь являются материалами вала (охватываемая деталь). Вверх от горизонтальной оси отложены возникающие зазоры, вниз — натяги; если медь и сталь будут материалами отверстия (охватываемая деталь), то зазоры и натяги поменяются местами. При расчете было принято, что сборочный зазор равен нулю. На фоне графиков изменения посадок показаны поля допусков

¹ Номограмма рассчитана и построена Д. М. Петровым и В. П. Яковлевой.

² Температура сборки принята равной 20°С, а температура пайки примерно на 20—30°С превышает температуру плавления припоя. Исходя из этого, приняты указанные перепады температур ($t_{\text{пайки}} - t_{\text{сб}}$).

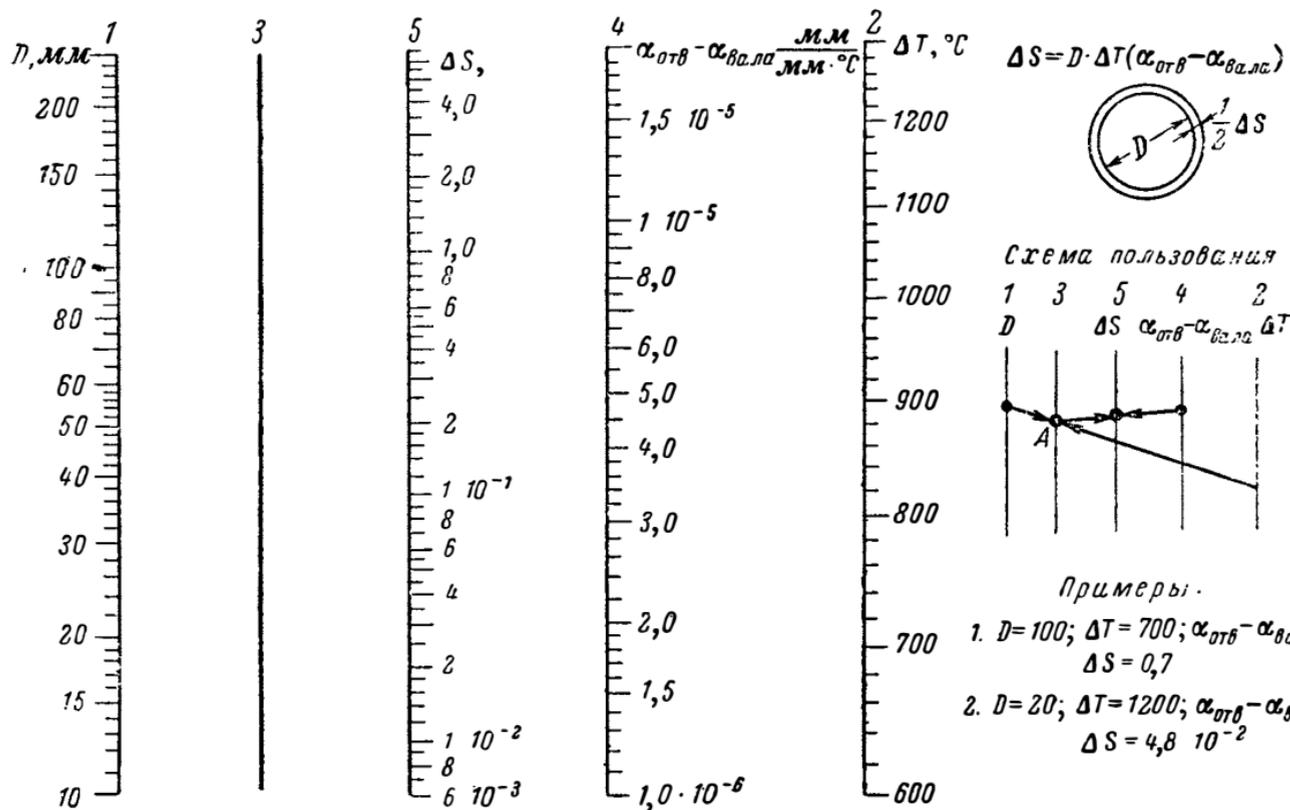


Рис. 48. Номограмма для определения изменения зазора по диаметру при пайке материалов с различными коэффициентами термического расширения.

скользящих посадок классов точности 3, 3а, 4 и частично 5. Графики могут быть использованы для сравнения изменения размеров деталей из указанных на них материалов при температурах пайки медью и припоем ПСр72.

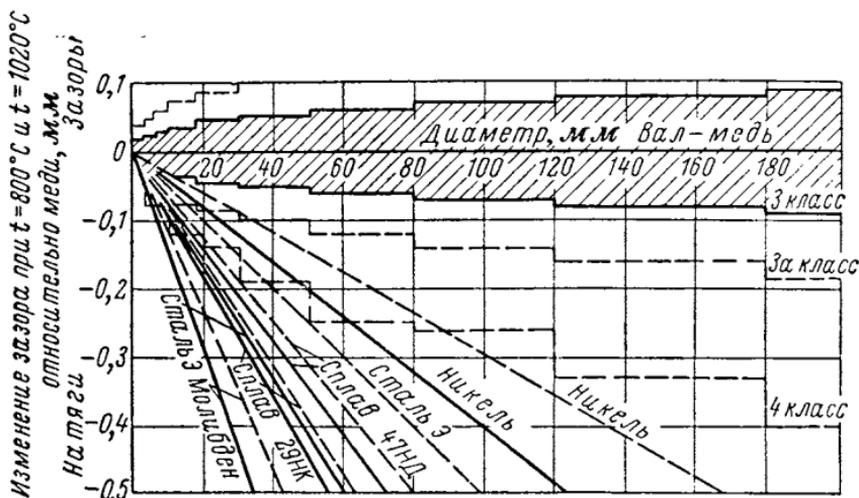


Рис. 49. Изменение посадок в швах различных материалов относительно меди при нагреве до 800°С (пунктирные линии), 1020°С (сплошные линии) и поля допусков скользящей посадки.

На рис. 50 показан пример изменения посадки в соединении вала из стали Э диаметром 110 мм с коваровым стаканом (отверстие) при пайке медью. При температуре сборки зазор $S_{сб}$ был равен 0,1 мм. При нагреве до температуры плавления меди зазор $S_{сб}$ уменьшился до нуля, затем в соединении возник натяг S , равный разнице между расчетным натягом (рис. 49, точка а) и первоначальным зазором $S_{сб}$, т. е. $S = 0,26 \text{ мм} - 0,1 \text{ мм} = 0,16 \text{ мм}$.

На этом же рисунке приведен пример изменения посадки в соединении коварового вала диаметром 70 мм с никелевым кольцом. При температуре сборки $S_{сб}$ был равен 0,15 мм. При температуре плавления меди зазор $S_{сб}$ увеличился примерно на (0,13+0,16) мм (точки б, в) и стал равен 0,13 мм + 0,16 мм + 0,15 мм = 0,44 мм.

Сравнение полей допусков широко применяемого для вакуумных сопряжений 3 класса точности с возникающими тепловыми изменениями зазоров показывает, что последние в несколько раз превышают допуски 3 класса при диаметрах более 10 мм. При диаметре 150 мм в соединении ковара с медью тепловое изменение посадки при нагреве до 800°С примерно в 12 раз превышает сумму допусков на вал и отверстие 3 класса точности.

В качестве иллюстрации этого обстоятельства на рис. 51 показан шлиф паянного соединения медной трубы (вал) с коваровым кольцом (отверстие). Диаметр шва равен 100 мм, а зазор $S_{сб} = 0,8$ мм. На практике такие зазоры считаются недопустимыми, однако шов получился качественным, так как зазор к моменту расплавления припоя уменьшился до 0,1 мм, что можно считать вполне приемлемым для данного шва.

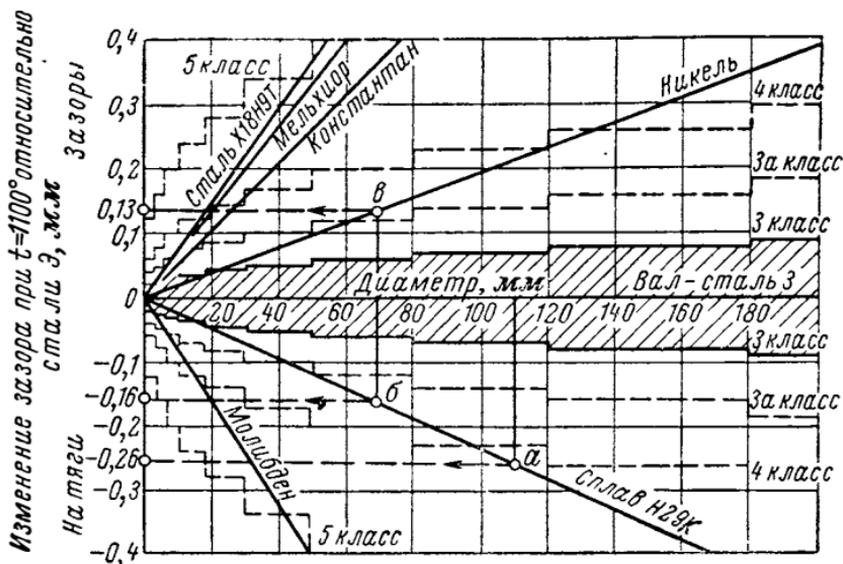


Рис. 50. Изменение посадок в швах различных материалов относительно стали Э при нагреве до температуры 100°C и поля допусков скользящей посадки.

При конструировании паяных соединений в первую очередь должны учитываться деформации деталей, неизбежно возникающие при пайке разнородных материалов, и напряжения, возникающие в таких швах, что особенно важно при диаметрах шва более 30 мм.

В настоящее время наиболее полно изучены паяные соединения однородных металлов и влияние величины зазора между паяемыми деталями (т. е. посадки) на прочность соединения. Известно, что для каждого паяного соединения имеется своя оптимальная толщина прослойки припоя, выше и ниже которой прочность соединения падает (см. рис. 9). При слишком малом зазоре припой может не заполнить шов, и тем самым будет ослаблена прочность соединения; при большом зазоре величина капиллярных сил может быть недостаточной для втягивания нужного количества припоя в шов, и прочность шва также понизится.

Следует отметить, что в литературе под зазорами понимается зазор между деталями при соединении встык или внахлестку.

В телескопическом же соединении типа вал — отверстие всегда подразумевается симметричное расположение деталей и не уточняется, имеется ли в виду зазор

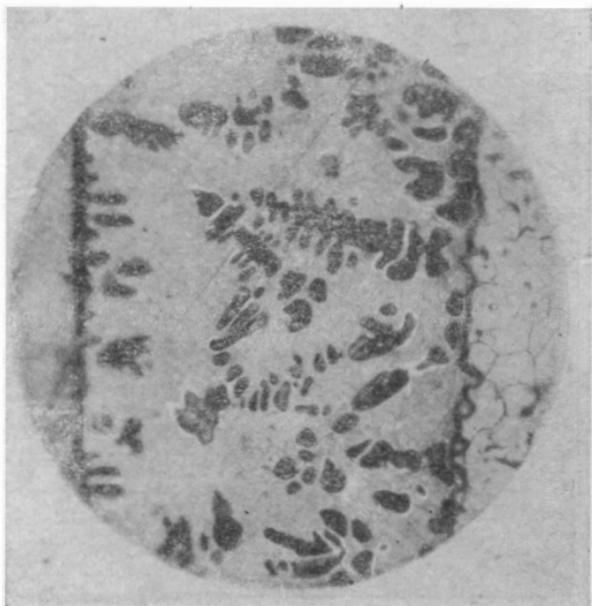


Рис. 51. Микрошлиф шва медной трубы (вал) с коваровым кольцом (отверстие), паяным припоем ПСр72 с зазором, равным 0,8 мм при температуре сборки ($\times 200$).

на сторону или зазор, равный разности диаметров. Однако на практике равномерного зазора обычно не наблюдается, так как в условиях сборки детали всегда смещаются друг относительно друга. При этом в соединении получается переменный зазор, который может колебаться от нуля до наибольшей возможной величины, равной разности диаметров. Кроме того, зазор не может быть равномерным вследствие погрешностей формы соединяемых поверхностей, имеющих место до пайки, а также погрешностей, возникающих в процессе нагрева соединения при пайке (перераспределение внутренних напряжений, неравномерность нагрева, деформация от сборочного инструмента, структурные превращения и т. п.).

На рис. 52 показан пример такого неравномерного радиального зазора в соединениях ковара и никеля со сталью при пайке медью. Измерения зазора производились в восьми радиальных сечениях на микрошлифах паяного образца с помощью металлографического микроскопа, что позволило определить изменение зазора в реальных условиях пайки (неравномерность, нагрева, разная масса деталей и т. п.). Этот способ позволяет оценить правильность выбранных посадок для пайки и откорректировать их.

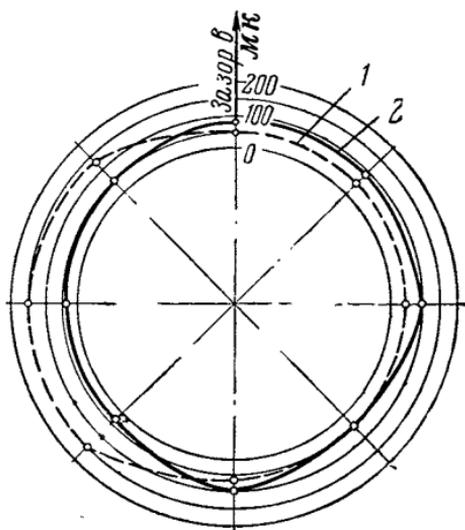


Рис. 52. Круговая диаграмма радиальных зазоров.

1 — в шве кольца из стали 45 с кольцом из никеля (рис. 53 детали 2 и 3); 2 — в шве коварового стакана с кольцом из стали 45 (рис. 53 детали 1 и 2).

Величина оптимальной толщины слоя припоя зависит от природы паяемых металлов, типа припоя, температуры пайки, длительности процесса и других факторов.

Разноречивые литературные данные о величине зазоров привели к тому, что в производственной практике даже для однотипных швов из однородных материалов применяются самые разнообразные посадки.

Это, с одной стороны, неудобно для производства, так как связано с увеличением числа необходимых калибров, режущего инструмента и другой оснастки. С другой стороны, и это главное, применение неоптимальных зазоров при пайке приводит к появлению дефектов в шве и, следовательно, ухудшает качество, надежность изделий.

Это, с одной стороны, неудобно для производства, так как связано с увеличением числа необходимых калибров, режущего инструмента и другой оснастки. С другой стороны, и это главное, применение неоптимальных зазоров при пайке приводит к появлению дефектов в шве и, следовательно, ухудшает качество, надежность изделий.

В последнее время проведены рентгенографические исследования качества паяных швов, методика которых изложена в гл. 8. Ими установлено, что при неоптимальной величине зазора при пайке в шве возникают такие дефекты, как многочисленные поры, раковины. Эти дефекты в свою очередь могут вызвать потерю соедине-

нием вакуумной плотности. В ряде случаев они не обнаруживаются применяемыми способами контроля и могут быть причиной медленного натекания газа в готовые приборы в процессе эксплуатации или складского хранения.

Проведенными экспериментами, исходя из условия обеспечения важнейшего функционального назначения паяных швов — их вакуумной плотности установлены величины оптимальных капиллярных зазоров при температуре пайки. Для различных паяемых материалов и припоев величины зазоров приведены в табл. 9.

Таблица 9

Оптимальные капиллярные зазоры для вакуумноплотных швов при температуре пайки

Припой	Паяемые материалы			
	Медь — Медь	Медь — — Сплав 29НК	Медь — Сталь Э	Сплав 29НК — — Сталь Э
Медь	* * *	* * *	* * *	0,02—0,10
ПЗл35М	0,01—0,10	0,02—0,15	0,02—0,15	* * *
ПМГ-12	0,00—0,05	0 0 0	0,00—0,10	* * *
ПЗл75СрМ	0,00—0,10	0,02—0,08	0,00—0,10	* * *
ПСр52П20	* * *	0,01—0,08	0 0 0	* * *
ПСр68П5	0 0 0	0 0 0	0,02—0,10	* * *
ПСр72В	0,01—0,08	0,02—0,08	0 0 0	* * *

$\begin{matrix} * & * \\ * & * \end{matrix}$ — нерекомендуемые или нереальные сочетания,

$\begin{matrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{matrix}$ — не обследовано.

Рассмотренные выше изменения величины зазоров между паяемыми деталями при нагреве вследствие разницы в коэффициентах термического расширения и установленные оптимальные величины зазоров при пайке позволили определить верхние и нижние допускаемые отклонения размеров деталей цилиндрических паяных соединений для различных сочетаний материалов.

Специфические условия производства, например тре-

бования точной центровки или самозакрепления при сборке, могут потребовать уточнения допускаемых отклонений на отдельные размеры, с которыми детали должны изготавливаться и поступать на сборку. Определенные отклонения округлены до ближайших значений из числа стандартных. Результаты расчетов приведены в удобной для использования форме в приложениях

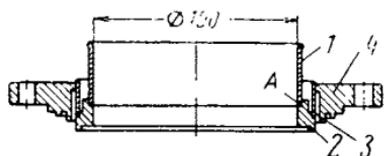


Рис. 53. Конструкция узла с резко отличающимися массами паяемых деталей и условиями их нагрева (внутренние детали экранируются).

1 — коваровый стакан; 2 — кольцо из стали 45; 3 — кольцо из никеля; 4 — фланец из стали 45.

11—24, в которых индекс 1 относится к отверстию, индекс 2 — к валу. С целью максимального использования стандартных проходных и непроходных калибров для контроля верхних и нижних отклонений при невозможности выбрать их из одной посадки верхние и нижние отклонения комбинировались от различных посадок.

Неравномерность нагрева, некоторые конструктивные требования могут вызвать необходимость применения других посадок, отличающихся от рекомендованных.

Следует особо подчеркнуть необходимость учета условий нагрева деталей, так как в зависимости от конструкции детали могут нагреваться неравномерно и посадка может значительно отличаться от расчетной для равномерного нагрева. В качестве примера на рис. 53 приведена одна из реальных конструкций, в которой резко различны между собой масса нагреваемых деталей и условия их нагрева (внутренние детали экранируются).

В спае между коваровым стаканом 1 и стальным кольцом 2 при пайке медью должен возникнуть при равномерном нагреве зазор на сторону, равный 0,13 мм, при условии нулевого зазора при температуре сборки. Действительный зазор, заполненный припоем, показан на рис. 52 (линия 2) и составляет в среднем 0,08 мм. Разница между расчетным и фактическим зазорами составляет примерно 0,05 мм, что соответствует разности температур между коваром и сталью около 40° С при КТР ковара, равном $12 \cdot 10^{-6}$.

Таким образом, определение посадки расчетным путем с последующей в случае необходимости эксперимен-

тальной проверкой обеспечивает получение качественных паяных швов без необоснованно завышенных требований к точности деталей.

4-6. Покрытия соединяемых материалов

Перед пайкой на детали электровакуумных приборов часто наносятся различные гальванические покрытия обычными способами, широко освещенными в специальной литературе.

Чаще всего покрытия наносятся на детали с целью:

придания поверхности деталей соответствующих электрических свойств (электропроводность, повышение электрической прочности, подавление авто- или вторичной эмиссии и т. п.);

повышения рассеивающей и поглощающей способности поверхности деталей;

защиты деталей и узлов от коррозии и окисления, а также для декоративных целей.

Кроме того, в технике пайки электровакуумных приборов широко распространено применение покрытий, обусловленное особенностями пайки некоторых материалов. К таким случаям можно отнести следующие:

улучшение смачиваемости паяемого материала выбранным припоем и повышение растекаемости его;

осуществление пайки металлов и сплавов, на поверхности которых при пайке в плохом вакууме или влажном водороде образуется стойкая окисная пленка, совершенно несмачиваемая припоем; к таким материалам относятся нержавеющие стали типа 29НК, бериллиевые бронзы, специальные сплавы, типа инконель X, К-монель, содержащие алюминий, и т. п.;

предотвращение диффузии жидкого припоя по границам зерен основного металла, приводящей к нарушению вакуумной плотности. Такое явление имеет место, например, при пайке сплава H29K18 и монель-металла серебряными припоями, из-за чего их перед пайкой обычно меднят электролитически или покрывают медной пастой с последующим спеканием в водороде, хотя предпочтительнее никелирование;

получение паяного соединения за счет расплавления гальванического покрытия, обычно золота, серебра или меди;

ограничение растекаемости припоя по поверхности детали, с этой целью хромирует участки деталей, на которые недопустимо попадание припоя;

предотвращение испарения некоторых летучих составляющих паяемых материалов при нагреве, благодаря чему предотвращается загрязнение атмосферы печи и конденсация испарившегося материала на поверхностях нагревательной камеры и паяемых деталей. Так, например, латунь при пайке в печах припоем ПСр72 никелируется, чем улучшается смачиваемость и предотвращается испарение цинка.

Независимо от назначения покрытия, все они должны удовлетворять следующим требованиям:

Виды покрытий материалов, необходимых для качественной пайки

Материал	Типы деталей и вид их механической обработки	Вид пайки (припой, среда, метод нагрева)	Предварительная обработка материала перед покрытием (матирование, отжиг и т. п.)	Вид покрытия, толщина и условные обозначения по ГОСТ 9791-61	Обработка материала после покрытия перед пайкой (спекание, сплавнение)
Сплав 29НК (покрывается только место спая)	Тонкостенные стаканы и кольца давленные и штампованные для пайки со стеклом и керамикой	Пайка в водороде и в вакууме медносеребряными припоями типа ПСр72В	Обезгаживающий отжиг во влажном водороде при температуре 1 050°—1 100° С в течение 10—15 мин	М6 (меднение 6—9 мкм) или Н6 (никелирование 6—8 мкм)	Контрольное спекание в водороде нескольких деталей от партии при температуре 800—900° С в течение 10—15 мин
	Сравнительно массивные точеные и фрезерованные детали с чистой поверхностью $\nabla 5$ — $\nabla 6$	То же	То же	То же	То же
Нержавеющая сталь 1Х18Н9Т	Тонкостенные ажурные мелкие детали типа сифонов, мембран с точными размерами и определенными упругими свойствами	Пайка в водороде с точкой росы 30—40° С. Все припои, рекомендуемые для пайки электровакуумных приборов	Для создания шероховатости производится электролитическое травление в растворе: H ₃ PO ₄ (удельный вес 1,7), H ₂ SO ₄ (1,84), H ₂ O в соотношении 2:1:1	Н24 (никелирование матовое 24—30 мкм)	" "

7* То же	Детали сравнительно массивные после токарной и фрезерной обработки. С шероховатостью поверхности не ниже $\nabla 4$	То же	Матирование карборундовым песком	То же	То же
Молибден	Детали после токарной и фрезерной обработки с шероховатостью поверхности не ниже $\nabla 4$	Пайка в водороде и вакууме медно-серебряными припоями типа ПСр72В	Отжиг в водороде или вакууме при температуре 1 000—1 100° С в течение 15—20 мин	Н6 (Никелирование 6—9 мкм)	" "
	Детали, изготовленные штамповкой или давлением из листового материала с шероховатостью поверхности не ниже $\nabla 7$	То же	Матирование карборундовым песком, после чего отжиг в водороде или в вакууме при 1 000—1 100° С в течение 15—20 мин	То же	" "
Сталь 3	Все виды деталей, образующих внутривакуумную полость, где возможно протекание токов	" "	То же	М6 (меднение 6—9 мкм)	" "
	Точеные и фрезерованные детали с шероховатостью не ниже $\nabla 4$	Пайка в водороде или вакууме медно-серебряными или медно-золотыми припоями	Отжиг в водороде или вакууме при 1 000—1 100° С в течение 15—20 мин	М6 (меднение 6—9 мкм)	Оплавление в водороде

¹ Покрываемые поверхности, имеющие шероховатость $\nabla 8 \div \nabla 9$ целесообразно предварительно матировать.

² В случае необходимости покрытия только одной какой-либо поверхности детали целесообразно наносить покрытие оплавлением пасты из медного порошка, разведенной на спирте.

упругость пара металлов покрытия не должна превышать $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. при температурах пайки, поэтому в покрытии не должно быть таких легколетучих компонентов, как цинк, кадмий, висмут и т. п.;

для предохранения от загрязнений вакуумной полости прибора на деталях не должно оставаться следов растворов из гальванических ванн. Из этих соображений не рекомендуется применять покрытия для деталей и узлов с узкими глухими полостями и щелями, из которых очень трудно удалить остатки электролитов;



Рис. 54. Вздутие никелевого покрытия на сильфоне из нержавеющей стали под припоем.

вспучивание, отслаивание и шелушение покрытий на всех этапах обработки прибора недопустимы. Покрытие должно иметь прочное сцепление с основным материалом;

покрытия деталей, находящихся вне вакуумной полости прибора, должны удовлетворять климатическим требованиям;

температура плавления металла покрытия должна быть выше температуры пайки (кроме случаев, когда пайка осуществляется

за счет расплавления самого покрытия).

При нарушениях технологии покрытия могут вспучиваться, шелушиться, отслаиваться. Обычно эти пороки наблюдаются при нагреве и при наличии расплавленного припоя (рис. 54). На деталях, изготовленных из пруткового материала, вспучивание покрытия, наблюдается чаще на поверхностях, перпендикулярных направлению волокон. Вероятно, в этом направлении происходит наиболее интенсивное газовыделение из материала. Вспучивания при пайке покрытий, предварительно оплавленных или спеченных в водороде или в вакууме, обычно не наблюдается.

В целях предупреждения вспучивания и шелушения покрытий, помимо тщательного контроля за соблюдением технологии их нанесения, рекомендуется принимать ряд дополнительных специальных мер: матирование и отжиг покрываемых деталей, спекание и оплавление покрытий до пайки и т. п.

Эти приемы несколько усложняют технологию.

Поэтому в тех случаях, когда припой удовлетворительно смачивает поверхность деталей без покрытий и где покрытие не требуется по какой-либо другой причине, для деталей, подвергаемых пайке, желательнее избегать применения гальванических покрытий, тем более многослойных.

Использование гальванопокрытий в качестве припоя носит ограниченный характер, так как

а) требует плотного прижима спаиваемых поверхностей друг к другу во время пайки и

б) не всегда позволяет точно дозировать количество припоя и выдерживать его состав, что часто приводит к браку при пайке мелких узлов (сотовые сетки, замедляющие системы и т. п.).

Однако, несмотря на указанные выше недостатки, применения покрытий для целей пайки в ряде случаев избежать пока не удастся.

В табл. 10 (см. стр. 98) даны рекомендации по покрытиям, необходимым для пайки некоторых материалов.

4-7. Типовые конструкции соединений

Некоторые типовые конструкции вакуумноплотных паяных соединений приведены в табл. 11. В примечаниях к эскизам соединений указаны особенности конструкции и технологии.

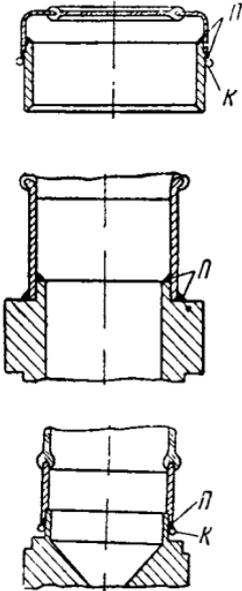
В табл. 12 указаны условия вакуумноплотной пайки некоторых металлов и сплавов, наиболее широко применяемых в электровакуумном приборостроении.

4-8. Определение расхода припоя

Пайка в печах производится с предварительной укладкой припоя в местах соединений или вблизи от них. На качество пайки при этом большое влияние оказывает правильное дозирование припоя. При недостаточном количестве припоя зазор не будет заполнен до конца и соединение спаиваемых деталей будет ненадежным. Нежелателен также избыток припоя, так как это приводит к разъеданию материала или к потечкам по поверхности паяемых деталей, что иногда недопустимо.

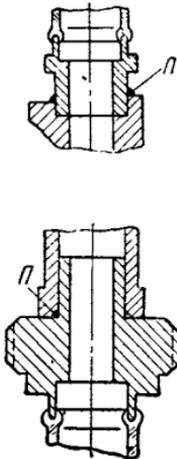
Типовые конструкции паяемых соединений

Вид конструкции	Примечание
-----------------	------------

Медь — ковар (жовар — отверстие)

Такого вида конструкции могут применяться в узлах, паяемых со стеклом. Ковар перед пайкой необходимо меднить или никелировать толщиной 6—9 мк. Припой во время пайки следует располагать так, чтобы он лежал на уступике или поддерживался кольцом *K* проволоки из нихрома. П — место расположения припоя.

Припой ПСр72В.

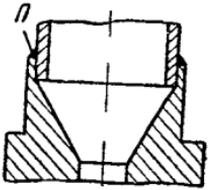
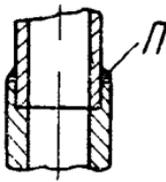
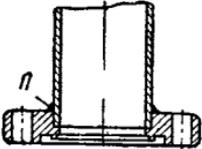
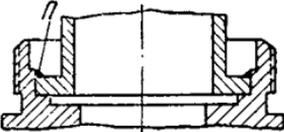
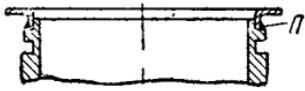
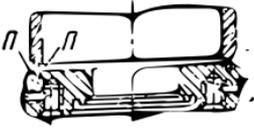
Медь—ковар (жовар—вал)

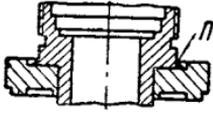
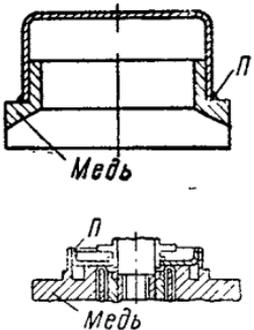
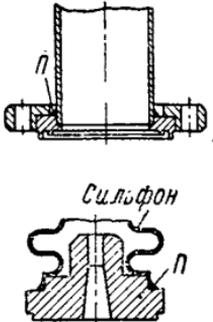
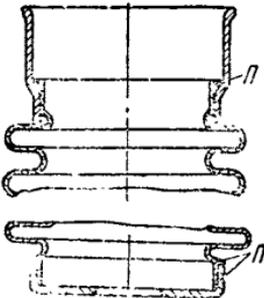
Стаканчик впаян в массивный корпус.

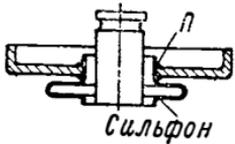
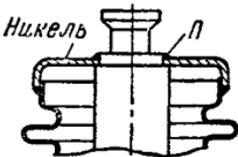
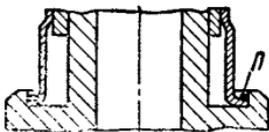
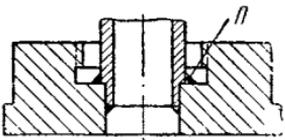
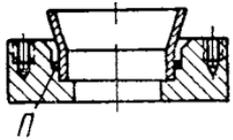
Припой ПСр72В. Кольцо припоя должно плотно прилегать к ковару.

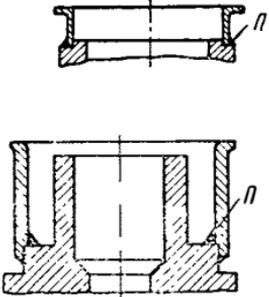
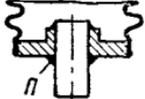
При $D > 10$ мм такой спай не рекомендуется.

Такая конструкция рекомендуется для узлов, которые впаяются остекленными в корпус припоем ПСр15. При выборе посадки необходимо учитывать значительное стравливание меди после отжига остекленного узла, при его очистке

Вид конструкции	Примечание
 	<p>Припой ПСр72В</p>
<p style="text-align: center;"><i>Медь — сталь (сталь — отверстие)</i></p>   	<p>Плоскость шва при пайке желательно располагать горизонтально. Припой ПСр72В. Покрывать стальную деталь специально для пайки не требуется; так как медно-серебряный припой удовлетворительно смачивает сталь в водороде. Покрытие необходимо для защиты стальной детали от коррозии</p>
<p style="text-align: center;"><i>Медь — сталь</i></p> 	<p>Наиболее надежная конструкция спая медного корпуса большого диаметра с фланцем.</p>

Вид конструкции	Примечание
	<p>Во избежание короблений крышка не должна быть очень тонкой. Щель между паяемыми деталями по плоскости не должна превышать 0,08 мм</p> <p><i>Медь — никель</i></p>
	<p>Для таких конструкций целесообразно применять аргоно-дуговую сварку</p> <p><i>Медь — сталь марки 1Х18Н9Т</i></p>
	<p>Пайка должна производиться в водороде с точкой росы не выше -70°C или в вакууме. Если таких условий нет, необходимо принимать меры (покрытия, флюсы) для предотвращения окисления нержавеющей стали</p> <p>Припой ПСр72В</p> <p><i>Сталь марки 1Х18Н9Т — никель</i></p>
	<p>Горловина сильфонов перед пайкой матируется и никелируется.</p>

Вид конструкции	Примечание
 <p>Сильфон</p>	<p>Наиболее успешно пайка осуществляется в водороде под кварцевым колпаком с помощью токов высокой частоты с использованием графитовых нагревателей</p> <p><i>Никель — сталь Э</i></p>
 <p>Никель</p>  <p>Никель</p> 	<p>Пайка в основном по плоскости</p> <p>Никель желательно располагать внутри, так как его КТР больше, чем КТР стали Э. Припой ПСр72В, медь</p>
<p><i>Ковар — сталь (сталь — отверстие)</i></p>  	<p>Как правило, в качестве припоя применяется медь.</p> <p>В покрытии паяемых деталей нет необходимости. Покрытия наносятся для защиты деталей от коррозии</p>

Вид конструкции	Примечание
<i>Ковар — сталь Э (ковар — отверстие)</i>	
	
<i>Медь — молибден</i>	
	<p>Припой ПСр72В. Молибден покрывается слоем никеля толщиной 5–6 мк</p>

Количество припоя, необходимое для получения качественного спая, определяется из соотношения

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

где Q — требуемое количество припоя;
 Δ — наибольший зазор в соединении при температуре пайки, см;
 h — высота или ширина шва в спае, см;
 l — длина шва в спае, см;
 γ — удельный вес припоя, г/см³.

Коэффициент 1,5 учитывает объем галтелей и некоторые неизбежные технологические потери.

В случае пайки с прижимом деталей по плоскости при определении количества припоя, обычно в виде фольги, величину Δ следует принимать равной:

$$\Delta = R_{\text{макс}} + 0,5(\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2),$$

где $R_{\text{макс}}$ — наибольшая высота микронеровностей;
 $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ — суммарное отклонение от плоскостности соответственно первой и второй деталей.

Условия вакуумной пайки в защитной среде или вакууме некоторых металлов и сплавов, наиболее широко применяемых в электровакуумном приборостроении

Материалы	Сплавы железо-никель	Сталь Э	Сталь 20, сталь 45	Никель	Константан	Ковар	Сталь 1Х18Н9Т	Молибден	Бронза хромистая	Медь
11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Медь		Э				Э (м5)	Э (н4)	Э (мнс 3)	Э (мн2)	С** Э
Бронза хромистая		Э (м2)*				Э (м5) Э (мн2)	Э (мн2) Э (н4)	Э (мн2) Э (мнс3)		
Молибден		М Э (мнс 3)***					М (н4) Э (н4) Э (мнс 3)	М, Н Э (мнс3)		
Сталь 1Х18Н9Т		М (н4)*** Э (м4)				М (н4) Э (н4), (м5)	М (н4) Э (н4)			
Ковар		М Э (м5)								
Константан										
Никель		М, Э								
Ст. 20, ст. 45										
Сталь Э										
Сплавы железо-никель										

Условные обозначения припоев:

Э — ПСр72В (эвтектика),

М — медь,

Н — никель,

С — ПСр15 (сильфос)

Условные обозначения покрытий (в скобках)

(м) — меднение.

(н) — никелирование,

(с) — серебрение.

* Цифра после условного обозначения покрытия обозначает порядковый номер материала (этот номер указан в заголовках строк и столбцов данной таблицы), на который наносится это покрытие.

** Возможна пайка на воздухе, так как сильфос — припой самофлюсующийся.

*** При пайке в вакууме или в водороде с точкой росы —50 ÷ —60° С сталь 1Х18Н9Т не покрывается.

**** Несколько букв в покрытии обозначает многослойное покрытие, порядок букв соответствует порядку наносимых слоев.

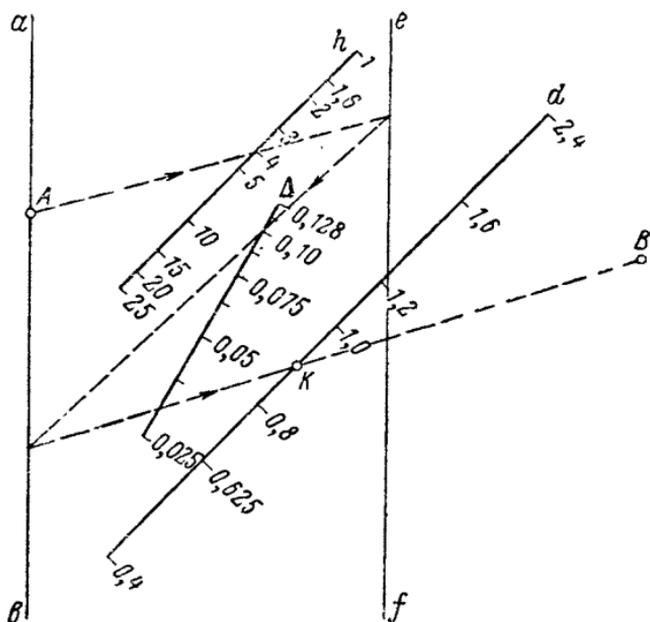


Рис. 55. Номограмма для определения диаметра проволоки припоя. Для определения диаметра проволоки припоя d из точки A через точку на шкале h , соответствующую высоте или ширине сая, проводится прямая до пересечения с линией ef . Из полученной точки пересечения через точку на шкале Δ , соответствующую наибольшему зазору, проводится прямая до пересечения с линией ab . Полученная на ней точка соединяется прямой с точкой B . Точка пересечения этой линии со шкалой d указывает диаметр проволоки припоя. Полученное значение округляется до ближайшего большего стандартного значения диаметра проволоки припоя. Окончательные размеры и вес берут по таблицам в приложениях 5—10. При построении номограммы учтены неизбежные технологические потери припоя. Для пересчета диаметра проволоки при использовании проволоки меньшего диаметра можно воспользоваться приложением 14.

Для быстрого ориентировочного определения диаметра проволоки припоя можно пользоваться номограммой, изображенной на рис. 55.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ОСНАСТКА ДЛЯ ПАЙКИ

Важнейшие эксплуатационные параметры современных электровакуумных приборов (особенно мощных приборов сверхвысоких частот) как, например, мощность, длина волны генерируемых или усиливаемых электромагнитных колебаний, к. п. д. и другие, определяются

точностью геометрических размеров узлов. Допуски на них у многих приборов не превышают 0,01—0,02 мм и должны обеспечиваться пайкой.

Крупносерийный и массовый характер производства многих электровакуумных приборов, простота и технологичность их узлов зачастую могут быть обеспечены только рациональной конструкцией оснастки для сборки и пайки. Приводимые ниже конкретные примеры иллюстрируют применение общих правил конструирования.

5-1. Основные требования к оснастке для пайки и правила ее конструирования

Как и всякая оснастка, оснастка для пайки должна обеспечивать: повышение производительности труда и расширение технологических возможностей оборудования; снижение брака; снижение себестоимости изделий; удобство работы и быстроедействие.

Поэтому оснастка должна удовлетворять следующим требованиям: быть удобной для установки в печь или на станке индукционной пайки; простотой и дешевой в изготовлении; удобной при поддержании чистоты, контроля, регулировки и ремонта изношенных или деформированных деталей; высокой формоустойчивостью при многократных нагревах до температуры 800—1300°С в защитно-восстановительной газовой среде.

Эти эксплуатационные условия существенно затрудняют сохранение высокой точности оснастки и обеспечение ее быстрогодействия из-за опасности заедания разъемных соединений.

Конструирование оснастки для пайки осложняется также тем, что большинство спаиваемых деталей электровакуумных приборов выполняется из материалов с различными КТР. При этом тепловые расширения при нагреве имеют величину, в несколько раз превышающую допуски на узлы. В этих условиях очень большое значение приобретает выбор принципиальной схемы приспособлений для пайки и особенно материалов для их деталей.

Правила конструирования оснастки для пайки в основном одинаковы для всех ее видов и сводятся к следующему:

1. Масса оснастки должна быть минимальной, чтобы не вызывать излишнего расхода энергии на ее нагрев и потерь времени на охлаждение, и составлять не более 20—30% от массы изделия. (Это правило не распространяется на грузы, масса которых подбирается для каждого случая особо.)

2. Площадь контакта оснастки с изделием должна быть минимальной для уменьшения теплоотвода от него и уменьшения опасности заедания разъемных соединений при демонтаже после пайки.

3. Форма деталей оснастки не должна препятствовать быстрому и равномерному нагреву изделия и вызывать его деформацию. Однако первая часть этого правила не распространяется на экраны и холодильники.

4. Конструкция оснастки не должна препятствовать свободной циркуляции газов в полости спаиваемого узла в случае пайки в защитной среде или их быстрой откачке в случае пайки в вакууме.

5. Конструкция оснастки не должна препятствовать расположению припоя и наблюдению за его расплавлением (в случае визуального наблюдения за процессом плавления).

6. Особое внимание должно быть обращено на согласование изменений размеров деталей оснастки и изделия при нагреве и охлаждении. Это достигается или за счет подбора материалов с соответствующими коэффициентами линейного расширения, или за счет легко деформируемых деталей оснастки, или же за счет обеспечения свободного перемещения изделия внутри оснастки.

7. Шероховатость поверхности должна быть не ниже $\nabla 7$ у разъемных соединений оснастки, $\nabla 8$ у точных базовых поверхностей, соприкасающихся с изделием, и $\nabla 5$ на всех поверхностях оснастки в случае особо высоких требований к чистоте паяемых узлов.

8. Все переходные кромки, особенно ограничивающие точные базовые поверхности или поверхности разъемных соединений, должны иметь плавные закругления максимально допустимого радиуса.

9. Сопряжения деталей оснастки с паяемыми узлами и между собой должны иметь посадки с гарантированными зазорами (ходовые, широкоходовые). В резьбовых сопряжениях целесообразно уменьшать средний диаметр резьбы винта на 0,1—0,2 мм и наружный диаметр на 0,3 мм высоты профиля. Это необходимо из-за возможности повреждения острых вершин профиля резьбы, что приводит к заеданию. Последние требования вызваны необходимостью уменьшить опасность возникновения местных (точечных) больших контактных усилий, сопровождающихся схватыванием металлов, что сильно затрудняет разборку приспособлений, приводит к повреждению сопрягаемых поверхностей и резко сокращает их долговечность.

Приложение указанных правил к реальным конструкциям дается ниже.

5-2. Классификация и типовые примеры конструкций оснастки

По функциональному назначению различные виды или элементы оснастки могут быть классифицированы следующим образом:

- а) подставки;
- б) скрепляющие или сжимающие приспособления и грузы;
- в) приспособления, фиксирующие взаимное положение деталей с заданной точностью;
- г) тепловые экраны и холодильники;
- д) приспособления, препятствующие деформациям.

Очень часто при пайке сложных узлов используются комплексные приспособления, у которых различные функции оснастки могут совмещаться в одной детали или узле.

Подставки служат для нескольких целей:

для размещения паяемых изделий в соответствующей тепловой зоне печи;

для рационального использования объема печи при пайке изделий, размеры которых значительно меньше размеров рабочего пространства печи;

для придания устойчивости паяемым узлам;

для уменьшения затрат времени на перемещение и установку деталей в рабочую зону печи из тары и обратно.

На рис. 56 приведена конструкция универсальной подставки для колпаковой водородной печи, обеспечивающей расположение изделий в нормальной тепловой зоне. Подставка одновременно выполняет роль тепловых экранов пода печи, поэтому она выполнена из трех слоев

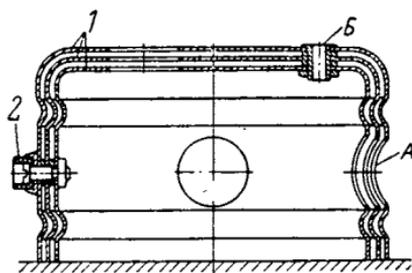


Рис. 56. Универсальная подставка для колпаковой водородной печи.

1 — многослойные подставки — экраны пода печи; 2 — изолятор между экранами и электрододержатель печи. А — отверстия для циркуляции газов; Б — гнезда для приспособлений.

ленточного материала 1. Для устранения возможности короткого замыкания электрододержателей с корпусом печи через подставку она снабжена тремя центрирующими керамическими изоляторами 2.

Для свободной циркуляции печной атмосферы подставка снабжается большими отверстиями А, которые желательно размещать в слоях экрана в шахматном порядке. Три-четыре гнезда Б, расположенные на площадке подставки, предназначены для вставления ножек приспособления.

На рис. 57 показана многоместная подставка для печей, имеющих большую высоту рабочей зоны. Такая подставка позволяет полностью использовать объем печи за счет размещения изделий на полках 1, укрепленных на стойке 2. Основание 4 экранируется тепловыми экранами 3. Отверстия в них и в основании служат для циркуляции газов.

Часто встречающийся недостаток в таких подстав-

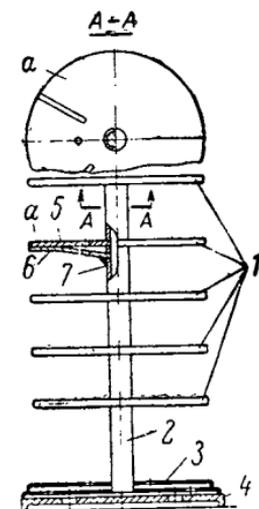


Рис. 57. Подставка для печей с большой высотой рабочей зоны.

1 — полки; 2 — стойка; 3 — тепловые экраны; 4 — основание из жаропрочной стали; 5 — опорная плоская и 6 — силовая коническая часть; 7 — втулки; а — рациональная конструкция полки большой жесткости.

ках — плоская недостаточно формоустойчивая конструкция полок *1*. Для обеспечения жесткости их делают обычно толщиной 3—4 мм. Однако неравномерность нагрева и охлаждения больших дисков и сложное напряженное состояние быстро вызывают большие коробления. Выправить деформации в случае сварной конструкции и большой толщины очень трудно.

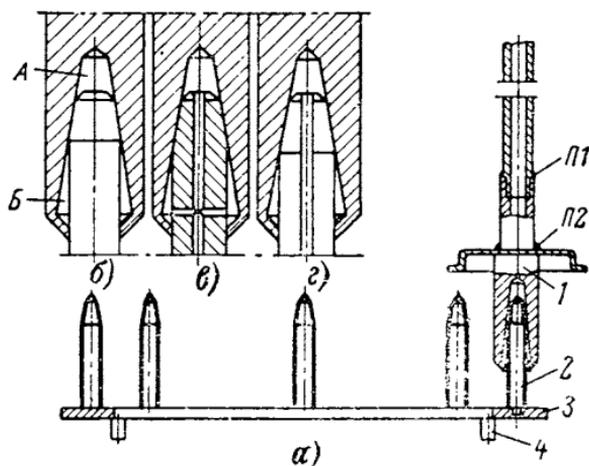


Рис. 58. Подставка (*a*) для неустойчивых изделий;
б, в, г — варианты наконечников подставки.
1 — изделие; *2* — стойка; *3* — диск; *4* — штырь для установки в гнезда подставки; *П1* и *П2* — швы.

Слева показана более рациональная конструкция полки *a*, где функции горизонтальной подставки и силовой несущей конструкции переданы разным деталям. Диск *5* служит только горизонтальной опорой. Радиальные пазы в нем устраняют сложное напряженное состояние, приводящее к короблению. Опорный конический диск *6* имеет большую жесткость при малой толщине и направленную деформацию при нагреве. Обработкой его торца и посадочного диаметра после сварки со втулкой *7* и отжига обеспечивается хорошая перпендикулярность к оси и теплостойкость. В этом случае толщина дисков «*a*» может быть взята небольшой, чем обеспечивается их равномерный прогрев. При разборной конструкции облегчается ремонт приспособления.

Подставка для пайки неустойчивых изделий показана на рис. 58, *a*. Изделия *1* устанавливаются на штыри *2*, закрепленные в кольце *3*. Штырями-стойками *4* приспособ-

собленне устанавливается в гнезде *Б* универсальной подставки (рис. 56). На рис. 58, *б*, *в*, *г* в увеличенном масштабе показаны возможные варианты сопряжения изделия и штыря 2 подставки.

В случае (*б*) остаются замкнутые объемы *А* и *Б*, что может приводить к окислению деталей. В случаях (*в*) и (*г*) эти объемы легко продуваются через отверстия или шлиц.

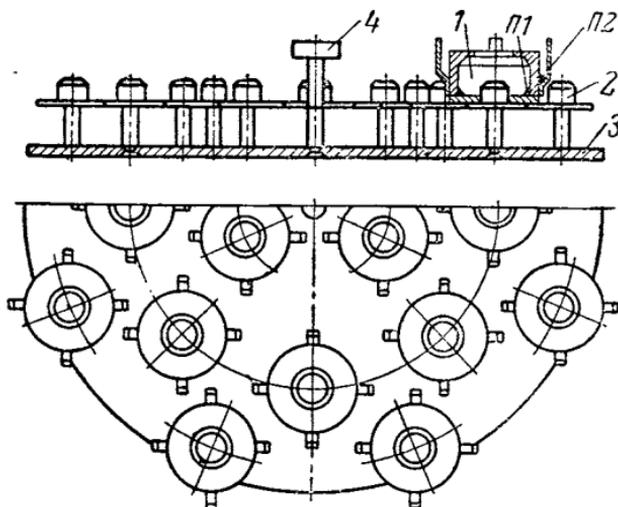


Рис. 59. Многоместная подставка для пайки простых узлов.

1 — изделие; 2 — опорная стойка; 3 — основание; 4 — ручка для удобства установки и вынимания подставки; П1 и П2 — швы.

Многоместная подставка для пайки простых узлов показана на рис. 59. Такая подставка позволяет расположить на ней детали в процессе сборки, транспортировать в универсальной таре, быстро устанавливать изделия в печь и вынимать из нее.

Подставка 7, сконструированная с учетом малой жесткости изделия, показана на рис. 60. Винт 8 предохраняет деталь от прогиба.

Скрепляющие или сжимающие приспособления и грузы широко используются для взаимной фиксации деталей при сборке и во время пайки. Скрепление деталей с помощью приспособлений в условиях нагрева при пайке достигается в основном тремя путями:

подбором коэффициентов линейного расширения деталей приспособления и изделия;

использованием пружинящих при температуре пайки деталей;

использованием силы тяжести.

Подбор коэффициентов линейного расширения деталей приспособления ведется по двум схемам.

В одном случае подбором материалов, размеров и формы деталей приспособления термическое удлинение деталей приспособления делают равным термическому удлинению деталей изделия. В этом случае закрепляющие усилия создаются обычными для машино- и приборостроения способами, чаще всего винтами.

Приспособление, представленное на рис. 61, используется для пайки волноводного металлокерамического вывода энергии с косым стыком (см. рис. 46). Перед пайкой фланец 1, волноводные секции 2 и 3, металлокерамическая диафрагма 4 с рамками припоя 10 собираются в единый узел в корпусе 5 и сжимаются болтами 9 через фасонные вкладыши 7 и 8. Конструкция вкладышей такова, что усилие зажима P распределяется равномерно между волноводом и фланцем. Это позволяет выдержать соосность волноводов и перпендикулярность их плоскости фланца. Сжатие волноводов по стыку осуществляется верхним болтом 9 через прокладку 6.

Приспособление довольно массивно и способствует замедлению скорости нагрева и охлаждения, что в данном случае необходимо для избежания опасных напряжений в металлокерамической диафрагме 4. Кроме того, массивный корпус при наличии значительных усилий зажима обеспечивает сохранение формы и точности при многократных прогревах.

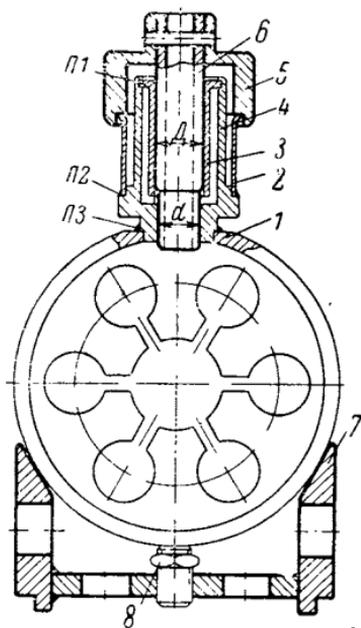


Рис. 60. Приспособление для центровки D и d стаканчиков 2, 3 и 4 при пайке с анодным блоком 1 магнетрона (спай П1, П2, П3). 5 и 6 — центрирующий грузоправка; 7 — подставки; 8 — опорный винт.

В прокладке 6 и корпусе 5 имеются отверстия для циркуляции газов.

Все детали приспособления изготовлены из нержавеющей стали 1X18H9T, КТР которой почти равен КТР меди — материала паяемого узла, поэтому тепловое расширение приспособления не влияет на ход пайки.

Два варианта — правильного и неудачного многоместного приспособления для пайки диска 1 с двумя на-

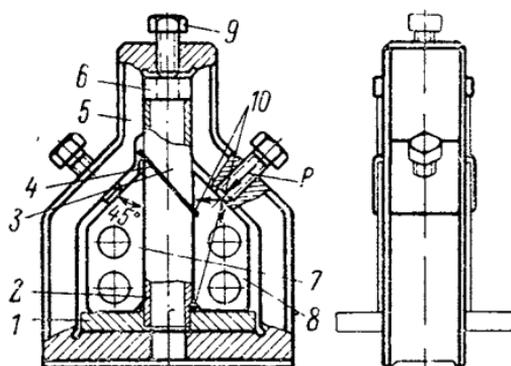


Рис. 61. Приспособление для пайки металлокерамического вывода энергии с косым стыком (см. рис. 46,а).

1 — фланец; 2, 3 — волноводные секции; 4 — металлокерамическая диафрагма; 5 — корпус; 6 — прокладка; 7, 8 — фасонные вкладыши; 9 — прижимной болт; 10 — припой.

конечниками 2 показаны на рис. 62. Наконечники должны быть припаяны соосно к выступам диска. Для этого после укладки между ними припоя в виде диска из фольги детали центрируются керамическими втулками 3 и 4.

Неудачный вариант имеет два принципиальных недостатка. Во-первых, несмотря на то, что детали 11 и 14 изготавливаются из нержавеющей стали и окисляются, часто возникает схватывание спаиваемых деталей с приспособлением вследствие непосредственного контакта между деталями приспособления и жидким припоем. Этот недостаток устранен введением керамических втулок 3 и 4. Во-вторых, вследствие неравномерности усилий зажима и неравномерности нагрева корпус 13 подвержен значительной деформации при пайке, что приводит к перекосам в стыках спаиваемых деталей и непаям. Введение индивидуальных рычажных прижимов 6 позволяет полностью устранить второй недостаток.

Кроме того, примененная конструкция опоры оси 7 коромысла 6 в виде паза позволяет после ослабления винта 8 сдвинуть коромысло к центру и тем самым создать удобные условия для вынимания спаянного узла и установки новых деталей.

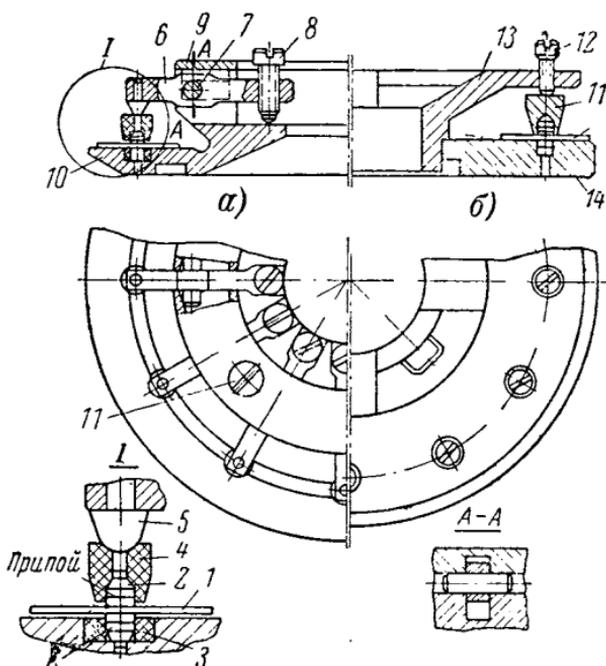


Рис. 62. Приспособление для торцевой пайки дисков с наконечниками.

а — правильный; *б* — неправильный варианты; 1 — диск; 2 — наконечник; 3, 4 — керамические втулки; 5 — штифт; 6 — коромысло; 7 — ось; 8 — винт; 9 — кольцо; 10, 14 — основание; 11 — втулка; 12 — винт; 13 — корпус.

В другом случае сжимающие усилия создаются за счет разности термических удлинений деталей приспособления и изделия. В этом случае возникают обычно значительные силы, поэтому принимаются меры, предохраняющие изделия от недопустимых деформаций и обеспечивающие поступление припоя в зону пайки. Для устранения деформаций одно из звеньев силовой цепи приспособления, обычно планки или пластины, делают значительно менее жестким, чем изделие. В случае применения винтовых зажимов уменьшение усилий сжатия при нагреве обеспечивается за счет слабой затяжки

резьбы при сборке и применением гаек из менее прочного материала, например из меди. Применение фольги или проволоки для скрепления деталей также позволяет значительно уменьшить усилия сжатия при пайке ввиду их легкой деформации. Поступление припоя в зону шва

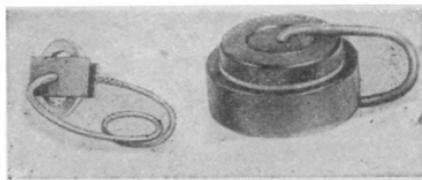


Рис. 63. Струбцины из молибденовой проволоки.

легко обеспечивается использованием припоя в виде фольги, укладываемой между торцами спаиваемых деталей.

Кроме использования разности коэффициентов линейного расширения, сжимающие усилия могут достигаться за счет регулирования скорости нагрева изделий и оснастки, изготовленных даже из одинаковых материалов. В этом случае необходимо принимать меры к замедлению скорости нагрева соответствующих элементов оснастки (экранировка, сведение поверхности, подвергающейся нагреву, к минимуму и т. п.).

Пример использования пружинящих свойств материала показан на рис. 63, где представлены два пружинящих зажима, создающих осевое сжатие. Однако упругие свойства при температуре пайки сохраняет практически только молибден. В тех случаях, когда приспособление не нагревается, например при токовой пайке, или когда нагреваются лишь его отдельные участки, например при индукционной пайке, в качестве пружинящих элементов используются детали из обычных упругих материалов.

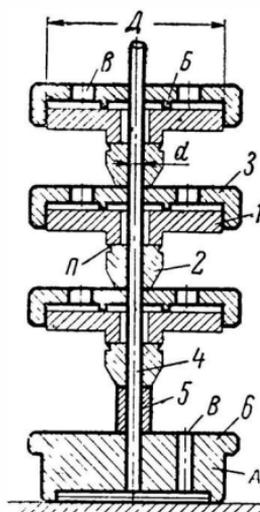


Рис. 64. Приспособление для точной центровки диаметров D и d спаиваемых деталей.

1 и 2 — спаиваемые детали; 3 — центрирующий груз; 4 — стержень; 5 — втулка, обеспечивающая положение деталей в более равномерной температурной зоне; А — буртик для удобства поднятия узла; В — отверстия для циркуляции газов; Б — буртик для уменьшения теплового контакта с грузом.

Наиболее часто для скрепления деталей во время пайки используется сила тяжести. Массивные детали удерживаются на месте своим весом, а легкие детали легко всплывают в расплавленном припое, что приводит к браку. На рис. 60 и 64 показаны примеры использования простейших грузов, сжимающих детали по торцам. На рис. 65 показано более сложное приспособление,

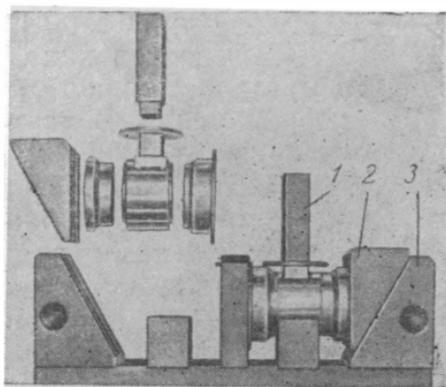


Рис. 65. Скрепляющее приспособление с клиновым зажимом.
1 — груз; 2 — скользящий клиновидный груз-прижим; 3 — неподвижная опора со скосом.

в котором легкий фла-нец волновода прижимается обычным грузом 1, а скрепление деталей по торцам в горизонтальном направлении осуществляется за счет скольжения подвижного груза 2 по скосу относительно неподвижной опоры 3.

Тепловые экраны широко применяются при пайке узлов электровакуумных приборов для:

предохранения от размягчения стеклянных деталей узлов или отдельных деталей от недопустимого перегрева, особенно если они расположены в наиболее горячей зоне печи;

обеспечения более равномерного нагрева изделий за счет выравнивания температурного поля около спаиваемого узла.

Известно, что если между двумя плоскими параллельными поверхностями поместить тонкостенный экран (рис. 66), то количество переданного тепла путем лучеиспускания от тела 1 телу 2 при одинаковой степени черноты поверхностей и экрана уменьшается в 2 раза. При наличии двух экранов количество переданного теп-

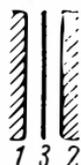


Рис. 66. Схема расположения теплового экрана 3 между излучающим телом 1 и нагреваемым телом 2.

в котором легкий фла-нец волновода прижимается обычным грузом 1, а скрепление деталей по торцам в го-

ла уменьшается в 3 раза и при наличии n экранов — в $(n+1)$ раз.

Таким образом, путем применения большого числа экранов теплоотдачу лучеиспусканием можно снизить как угодно сильно.

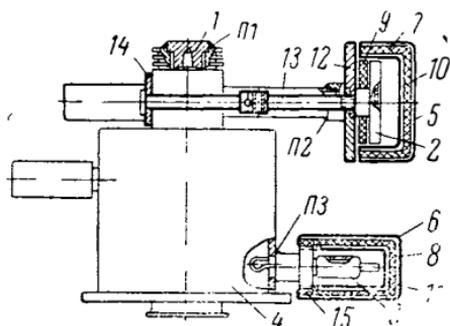


Рис. 67. Тепловые экраны для металлостеклянных узлов при пайке в печах.

1 — коллектор; 2 — волноводный вывод; 3 — коаксиальный ввод энергии; 4 — корпус изделия; 5 и 6 — наружные никелевые экраны; 7, 8 — теплоизолирующие слои; 9 — керамический экран; 10, 11 — внутренние никелевые экраны; 12 — прижим-экран; 13—15 — детали приспособления; П1, П2 и П3 — швы.

На рис. 67 показаны тепловые экраны стеклянных вывода 2 и ввода 3 энергии. Экраны обычно состоят из нескольких слоев металла, хорошо отражающих тепло. В данном случае внутренние 10, 11 и наружные 5 и 6 слои экрана сделаны из никеля. Между ними проложены теплоизолирующие слои 7 и 8 из керамики. Керамический экран 9 предохраняет от нагрева со стороны прижима 12. Втулка 15 приварена к наружному экрану 6 и служит для его крепления на вводе энергии.

Замедление нагрева отдельных элементов изделий может достигаться также с помощью хорошо контактирующих с ними массивных деталей оснастки, играющих, таким образом, роль холодильников.

Приспособления, препятствующие деформациям. В случае пайки узлов, имеющих детали из материалов с разными коэффициентами линейного расширения, при некоторых формах деталей могут возникать недопустимые коробления. В этих случаях применяют обоймы и вкладыши, препятствующие таким короблениям. На рис. 68 показан пример использования вкладыша при

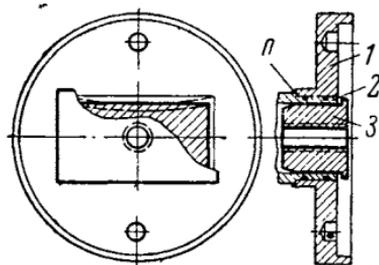


Рис. 68. Вкладыш 3, препятствующий короблению стенок медного волновода 2 при пайке со стальным фланцем 1. П — шов; пунктиром показана форма волновода при отсутствии вкладыша.

пайке прямоугольного медного волновода со стальным фланцем 1, успешно использующийся для пайки волноводов сечением 34×72 мм.

Для облегчения вынимания после пайки волноводов большого сечения приходится использовать более сложные приспособления (рис. 69).

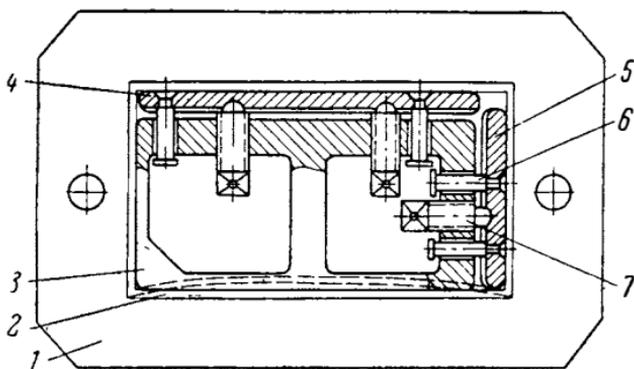


Рис. 69. Распорная рамка.

1 — фланец; 2 — волновод; 3 — базовая рамка; 4, 5 — распорные вкладыши; 6 — направляющие штифты; 7 — винт.

Внутри волновода 2, собранного с фланцем 1, свободно вставляется базовая рама 3, на которой при помощи направляющих штифтов 6 свободно закреплены распорные вкладыши 4 и 5. После установки приспособления в волноводах при помощи винта 7 вкладыши 4 и 5 устанавливаются враспор в волноводе, чем предохраняют его стенки от выпучивания. Все детали приспособления изготовлены из стали 1Х18Н9Т.

Кроме того, деформации могут возникать вследствие снятия внутренних напряжений (особенно в деталях тонкостенных), а также из-за неравномерного нагрева отдельных деталей паяемого узла. В таких случаях наряду с принятием мер, препятствующих неравномерному на-

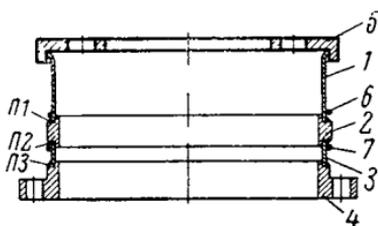


Рис. 70. Фиксатор 5, препятствующий возникновению эллипсности коварового стакана 1 при пайке; 2 — стальное кольцо; 3 — никелевое кольцо; 4 — фланец; 5 и 7 — никромовая проволока, препятствующая растеканию припоя; П1, П2 и П3 — швы.

греву (экраны, холодильники и т. п.), используются также фиксаторы, которые позволяют сохранять форму деталей. На рис. 70 показан пример применения такого рода фиксатора, который препятствует возникновению эллипсности коварового стакана из-за снятия внутренних напряжений. Без таких фиксаторов при диаметрах 140—150 мм эллипсность достигает 1,5—2 мм.

Точные приспособления. Высокую точность размеров паяных узлов обеспечивают двумя путями:

точным изготовлением деталей и последующим их самозакреплением при сборке или креплением друг относительно друга с помощью скрепляющих приспособлений;

фиксацией взаимного положения деталей невысокой точности с помощью точных приспособлений.

Получающиеся в этих случаях погрешности размеров узла имеют принципиально различные исходные составляющие погрешности. Рассмотрим типичные схемы.

На рис. 71,а показана размерная цепь изделия, приведенного на рис. 64, но с другой схемой крепления при пайке. В этом случае сжимающие усилия P приложены к фланцам 1 в точках на оси изделия через прокладки 3. Фланцы 1 самоустанавливаются по всей плоскости торца корпуса 2. Наибольшая погрешность замыкающего звена B' равна:

$$\delta B' = \delta A_1 + \delta A_2 + \delta A_3 = \Sigma \delta A_i, \quad (1)$$

где δA_1 , δA_2 , δA_3 и δA_i — погрешности исходных составляющих звеньев размерной цепи.

При схеме крепления, соответствующей рис. 64 и показанной на рис. 70,б, фланец 1 устанавливается по плоскости M клина 4. Наибольшая погрешность замыкающего звена B'' равна:

$$\delta B'' = \delta A_1 + \delta A_2 + \delta A_3 + \Delta P' = \Sigma \delta A_i + \Delta P', \quad (2)$$

где $\Delta P'$ — погрешность приспособления, вызываемая погрешностью угла α .

На рис. 70,в показана схема крепления, в которой фланцы 1 и 2 с помощью специальных захватов силами P прижимаются к плоскостям M основания 4 и фланца 5. В свою очередь фланец 5 прижимается к плоскости буртика N силой Q . Размеры A_1 , A_2 и A_3 выбраны так,

что между ними образуется зазор Δ , величина которого должна отвечать условию

$$\Delta > \delta A_1 + \delta A_2 + \delta A_3. \quad (3)$$

При данной схеме наибольшая погрешность замыкающего звена равна:

$$\delta B'' = \Delta \Pi'', \quad (4)$$

где $\Delta \Pi''$ — погрешность размера B'' основания 4 приспособления.

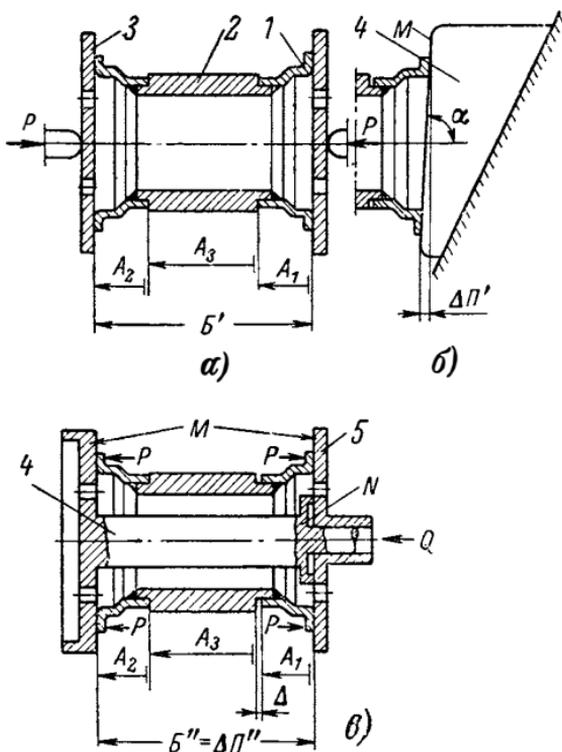


Рис. 71. Размерная цепь изделия (рис. 65) при различных схемах сборки для пайки.

Из сравнения выражений (1), (2) и (4) видно их принципиальное различие.

При выборе схемы, соответствующей выражению (1), малую погрешность замыкающего звена обеспечивают за счет резкого уменьшения погрешностей составляющих звеньев. Это приводит к значительному увеличению трудоемкости деталей.

Схема, соответствующая выражению (2), широко применяется в машиностроении. По ней изготавливается основная масса приспособлений для механической обработки. Однако при механической обработке число составляющих звеньев A_i сводится к минимуму — обычно к одному звену. Поэтому на допустимую погрешность приспособления $\Delta P'$ остается технологически приемлемая величина. Выбор же схемы, соответствующей выражению (2), при пайке приводит к чрезвычайно малой погрешности приспособления $\Delta P'$ и еще сильнее уменьшает допуски на составляющие звенья A_i .

Все преимущества пайки для получения точных размеров реализуются при использовании схемы, соответствующей выражению (4). В этом случае зазоры в соединениях, заполняемые припоем или специально предусмотренные в конструкции, служат компенсаторами погрешностей изготовления δA_i составляющих звеньев. Погрешность замыкающего звена $\delta B''$ определяется погрешностью приспособления.

Однако сложность процесса пайки, физико-химических превращений при нагреве и охлаждении в материалах деталей узлов и приспособлений, неулавливаемые изменения температурного поля, разность КТР материалов деталей узла и приспособления, неизбежные постепенные коробления деталей оснастки, погрешности, вносимые монтажом и демонтажем, приводят к тому, что в действительности вместо выражения (4) имеет место выражение

$$\delta B'' = \Delta P'' + \delta T, \quad (5)$$

где δT — дополнительная погрешность, свойственная данному технологическому процессу и названная «технологической погрешностью».

Влияние всех вышеперечисленных факторов обычно заранее оценить точно не удастся, в связи с чем размеры оснастки приходится контролировать после проведения экспериментальных паяк в конкретных условиях. Опыт показывает, что технологическая погрешность δT может быть значительно больше погрешности приспособления $\Delta P''$, т. е.

$$\delta T \gg \Delta P''$$

и, соответственно,

$$\delta B'' \approx \delta T. \quad (6)$$

Характерный пример такой технологической погрешности приведен на рис. 72.

В пролетном клистроне зазоры B между торцами дисков 1 при пайке их с корпусом 2 образуются дистанционными прокладками 3 , имеющими толщину B_n . После пайки прокладки удаляются через боковые отверстия в корпусе. Схема получения размера B в этом случае соответствует выражению (4). Для получения мини-

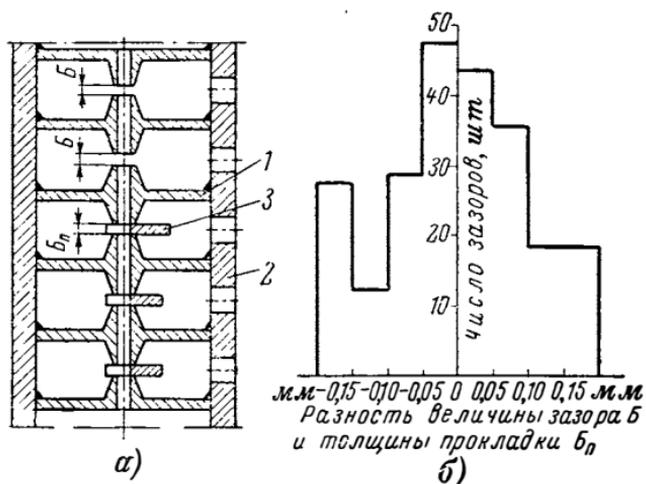


Рис. 72. Схема (а) получения зазора B при помощи прокладок 3 и гистограмма (б) разности окончательной величины зазора и толщины прокладки.

мальной погрешности зазора B на толщину прокладок B_n был установлен допуск $\delta B_n = \pm 0,01$ мм. Однако тщательные измерения разницы между получающейся величиной зазора и толщиной образующей его прокладки показали, что эта разность в несколько раз превышает установленный допуск δB_n на прокладку. Это наглядно видно из гистограммы, приведенной на рис. 72,б. Для данного конкретного случая оказалось, что $\delta T \approx \approx 20 \delta B_n$, т. е. технологическая погрешность в 20 раз превышает допуск на приспособление.

Многолетний опыт практики пайки показывает, что приведенные выше выражения (1) и (2) должны содержать технологическую погрешность δT . Следовательно, после корректирования формул получим:

для схемы на рис. 70,а

$$\delta B' = \Sigma \delta A_i + \delta T; \quad (7)$$

для схемы на рис. 70,б

$$\delta B' = \Sigma \delta A_i + \Delta P' + \delta T. \quad (8)$$

Так как в каждое выражение погрешности замыкающего звена входит своя технологическая погрешность δT , а в выражения (5) и (8) и погрешность $\Delta P'$, то лишь по внешнему виду уравнений становится невозможным заключить, какая из схем более рациональна. Этот вопрос приходится решать только после тщательного анализа действительных величин технологических погрешностей. К сожалению, в настоящее время отсутствуют нормативные данные по технологическим погрешностям, поэтому для каждого конкретного случая их приходится находить экспериментальным путем. Пример, приведенный на рис. 71, убедительно показывает, что не всегда простейшая геометрическая схема сборки обеспечивает требуемую точность. Наоборот, в некоторых случаях технологические погрешности при простейшей схеме могут быть столь значительными, что сложная схема окажется более рациональной.

На рис. 73 представлено приспособление для точной пайки блока магнетрона 1 с ламелями 2. Блок магнетрона 1 устанавливается на подставку 3, в которой закреплена звездочка 4, имеющая пазы, точность шага которых соответствует точности шага ламелей ($\pm 10-15'$). Ламели 2 вдвигаются в пазы блока, а точность их установки по диаметру $\pm 0,02$ определяется точностью этого диаметра на звездочке 4, что очень трудно обеспечить фрезеровкой. В связи с этим на выноске 1 показан более технологический вариант звездочки, где точность установки ламелей по диаметру определяется не глубиной фрезеровки пазов на звездочке, а двумя цилиндрическими поясками А, диаметр которых может быть точно выдержан обычной токарной обработкой с последующей шлифовкой.

Шаг ламелей устанавливается теми же фрезерованными пазами, глубина которых теперь уже не критична. Такое разделение функций элементов оснастки позволяет в ряде случаев значительно упростить ее изготовление, повысив при этом точность пайки узлов.

При изготовлении точных приспособлений необходимо перед окончательной чистовой обработкой проводить многократные (3—4 раза) отжиги деталей в условиях, соответствующих условиям пайки. Такая термическая

обработка обеспечивает максимальную стабильность размеров оснастки.

Из-за тяжелых условий работы, несмотря на указанные меры, оснастка перестает обеспечивать требуемую точность (изнашивается и деформируется), поэтому подлежит периодическому контролю, ремонту или замене.

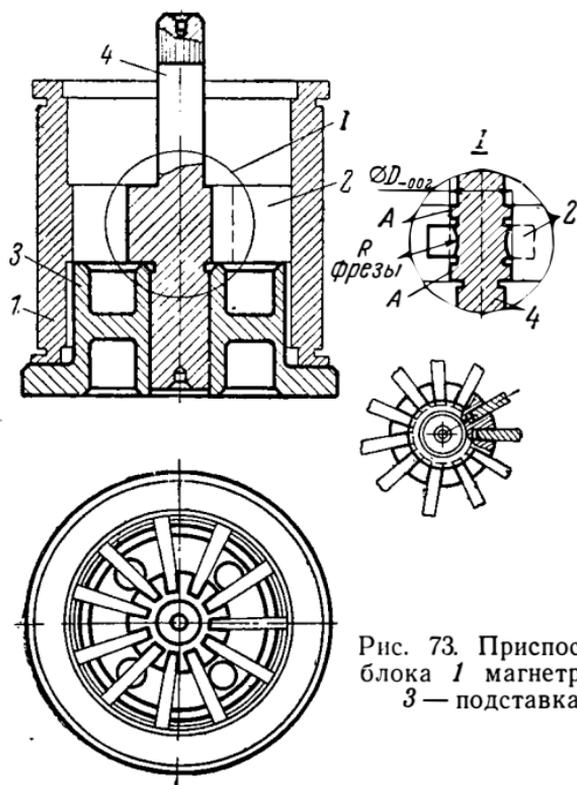


Рис. 73. Приспособление для пайки блока 1 магнетрона с ламелями 2; 3 — подставка; 4 — звездочка.

Для осуществления быстрого ремонта должны быть предусмотрены соответствующие припуски или сменные детали.

5-3. Материалы для оснастки

Одним из определяющих факторов успешного получения паяного соединения является правильно выбранный и обработанный материал приспособлений для пайки. В связи со специфическими условиями его работы к материалу оснастки для пайки предъявляются особые требования:

а) материал деталей оснастки, несущих силовую нагрузку, должен иметь такие механические свойства при

температуре пайки, которые обеспечивали бы выполнение требований, предъявляемых к данному виду приспособления;

б) материал оснастки не должен смачиваться припоем в процессе пайки;

в) материал оснастки должен допускать механическую обработку с хорошим качеством поверхности и высокой точностью;

г) материал оснастки не должен давать вредных газовыделений в атмосферу печи, а также загрязнять камеру печи какими-либо осыпающимися частицами или волокнами;

д) материал оснастки должен позволять механическую обработку для ремонта деталей оснастки после ряда прогревов в процессе пайки;

е) материал оснастки не должен реагировать с атмосферой печи с образованием соединений, ухудшающих его механические свойства. Так, например, титан при пайке в водороде может буквально рассыпаться вследствие образования очень хрупких гидридов титана.

Эти требования ограничивают список пригодных материалов сравнительно немногими сплавами, металлами и керамиками.

Подбор наилучшего материала для приспособлений часто является основной задачей при их конструировании.

Для элементов оснастки используют следующие материалы: жаропрочная нержавеющая сталь типа 1X18H9T, среднеуглеродистая сталь 45, нихром, молибден, никель, ковар, керамика различных марок.

Нержавеющая сталь 1X18H9T при нагреве в атмосфере, содержащей незначительное количество кислорода (более 0,005%) или паров воды (точка росы выше -30°C), покрывается плотной прочной пленкой окиси хрома, которая не смачивается припоями. Эта сталь имеет коэффициент линейного расширения, близкий к меди, что позволяет делать из нее сложные точные приспособления, фиксирующие взаимное положение медных деталей.

Большие перспективы для использования имеет нержавеющая сталь марки X23H13, у которой при температурах выше 500°C КТР больше, чем у меди, что может быть использовано при конструировании деталей оснастки, работающих «враспор».

Нихром, так же как и сталь 1X18H9T, покрывается пленкой окиси хрома. Используется он главным образом в виде ленты и проволоки. Коэффициент линейного расширения его меньше, чем у меди.

Сталь 45 может быть использована для различных деталей оснастки, однако в том случае, когда она должна быть предохранена от припаивания, поверхность ее хромируется, слой хрома после первого же нагрева в техническом водороде окисляется.

Молибден является удобным материалом для паячных приспособлений главным образом из-за своего малого коэффициента термического расширения и высокой прочности при высоких температурах. С помощью приспособлений из молибдена легко обеспечивается сжатие паяемых деталей. В тех же целях используется иногда ковар. Несмотря на плохое смачивание молибдена медно-серебряными припоями имеется опасность припаивания его в случае контакта с припоем. Для предохранения от припаивания иногда молибден хромируют, но это покрытие на нем держится очень плохо и быстро отслаивается после нескольких паяк. Лучшие результаты получаются при принятии мер, препятствующих попаданию расплавленного припоя на молибденовую деталь.

При применении в приспособлениях сжимающих шпилек из ковара и молибдена, имеющих малые КТР, необходимо учитывать, что резьбовые соединения у таких материалов недолговечны. У ковара наблюдается частое заедание резьбы: молибден после прогревов рекристаллизуется и становится хрупким, что приводит к быстрому износу резьбы.

Никель имеет хорошую отражательную способность, хорошо очищается и поэтому используется главным образом в виде ленты для тепловых экранов.

Керамика является весьма полезным материалом для приспособлений для пайки. Она может выдерживать практически любую атмосферу печи без заметного изменения своих свойств, не смачивается припоями в обычных условиях пайки, не обладает склонностью к припеканию, хорошо сопротивляется истиранию. Керамика не коробится и не деформируется при высоких температурах пайки, как большинство металлов и сплавов.

К недостаткам керамических материалов следует отнести их склонность к растрескиванию при термоударах и трудность механической обработки. То, что керамика

допускает механическую обработку только шлифовкой, ограничивает ее применение для приспособлений только в виде простых цилиндров, пластинок, стержней, которые, однако, способны обеспечить высокую точность спаиваемых узлов.

Применяющиеся иногда в производстве графит для разного рода подставок и асбест для экранировки отдельных участков изделия, чаще всего стекла, нельзя считать материалами, пригодными для оснастки. Присутствие графита в водородной печи приводит к образованию углеводородов, которые вызывают науглероживание материалов спаиваемых деталей, что в ряде случаев недопустимо, например, для ковара в зоне спая со стеклом.

Асбест очень непрочен, легко разрушается при нагревах и сильно загрязняет камеру печи. Как правило, эти материалы могут быть заменены другими, и их применение не рекомендуется.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ И ПРИПОЯ К ПАЙКЕ, ИХ ХРАНЕНИЕ И СБОРКА УЗЛОВ

Как уже указывалось, одним из основных условий получения вакуумноплотных спаев является очистка спаиваемых поверхностей от грязи, невозстановливаемых в условиях пайки окислов, жиров и т. п. Очистка деталей осуществляется главным образом путем обезжиривания и травления в соответствующих растворах. Следует заметить, что при травлении деталей происходит стравливание слоя металла с поверхности, которое может заметно изменить имеющиеся размеры. В табл. 13 приведены значения толщины стравливаемого материала для некоторых металлов и сплавов.

Источником загрязнений шва может являться и сам припой. Поэтому перед пайкой поверхность припоя должна быть тщательно очищена. Для этого припой обезжиривается и протирается тканью, смоченной в спирте. Припой-сплавы травить не рекомендуется, так как при этом вследствие неравномерного вытравливания составляющих припоя поверхность его становится шероховатой и легко загрязняется. Для удобства сборки, а также для устранения короблений при нагреве (из-за снятия внутренних напряжений), которые могут привести к недо-

Толщина слоя материала, растворяющегося при травлении (по данным В. Н. Мельниковой)

Материал	Предварительная обработка поверхности	Растворы для травления	Режим травления		Толщина слоя стравливаемого материала, мм
			°С	Время	
Медь и ее сплавы	Механическая	1 объем H_2SO_4 $d = 1,84$, 1 объем HNO_3 $d = 1,4$, 1 объем H_2O	18—25	5—10 сек	0,005—0,008
Медь и ее сплавы	Прогрев на воздухе. Тонкая пленка окислов	Концентр. HNO_3 $d = 1,4$	18—25	1—3 сек	0,012—0,015
Константан	Механическая	1 объем H_2SO_4 $d = 1,84$, 1 объем HNO_3 $d = 1,4$, 1 объем H_2O	18—25	1—3 сек	0,007—0,010
Ковар	С окалинной, после спайвания со стеклом	20%-ный раствор HCl	50—80	10—15 мин	0,015—0,020
Никель, сталь молибден, ковар	Механическая	20%-ный раствор HCl	50—80	0,5—5 мин	Практически может не учитываться

пустимому смещению припоя, перед сборкой он отжигается. Если припою необходимо придать определенную форму в виде фигурных колец и рамок, то они после гибки отжигаются вместе со специальными оправками.

Специфика химических операций очистки требует специально оборудованных помещений, которые обычно территориально удалены от участков сборки и пайки. Поэтому детали приходится транспортировать после очистки через вспомогательные помещения. Для предупреждения возможных загрязнений очищенных деталей (пыль, влага и т. п.) их необходимо транспортировать в закрытой таре. Конструкция тары особенно для транспортировки деталей, образующих вакуумную полость и находящихся внутри нее, должна удовлетворять ряду условий:

1) Материал тары должен быть твердым и прочным, не должен расслаиваться, шелушиться, легко скоблиться, крошиться при соприкосновении с деталями.

2) Форма и качество поверхности должны допускать легкую промывку и протирку.

3) Тара для очищенных и неочищенных деталей во избежание их перепутывания должна легко различаться по цвету или форме.

4) Желательно, чтобы тара имела прозрачные стенки или крышку.

Совершенно недопустимо применение картонной и деревянной тары.

Указанные меры по очистке и транспортировке деталей могут оказаться совершенно неэффективными, если не будут обеспечены условия для межоперационного хранения деталей и узлов.

Наиболее целесообразно хранить детали и узлы в специальных шкафах — вакуумных¹ или заполненных нейтральным очищенным газом. Промышленные типы этих шкафов приведены в приложении 25. Для кратковременного хранения запаса деталей на рабочих местах используются стеклянные эксикаторы.

Сборка узлов на пайку и пайка должны осуществляться в помещениях, удовлетворяющих требованиям ва-

¹ Вакуумные шкафы, откачиваемые механическими насосами, следует применять с известной осторожностью, так как эти насосы являются источниками паров масла, уплотняющего их роторы. Поэтому в камеру шкафа попадают пары масла, которые затем конденсируются на стенках камеры и хранящихся деталях.

куумной гигиены, так как на этих участках окончательно закрывается вакуумная полость прибора, и удаление загрязнений, попавших в нее, практически невозможно.

Во избежание излишних транспортировок и межоперационного пролеживания целесообразно сборочные рабочие места располагать в непосредственной близости к оборудованию для пайки. При этом иногда целесообразно сборку узлов вести рядом с печью. В производстве узлов приборов с высокими требованиями по виброустойчивости недопустимо использование при сборке какого-либо режущего инструмента (надфили, напильники, шаберы, наждачная бумага и пр.). Приспособления и инструмент для сборки, так же как и детали, подлежат регулярной (ежесменной) очистке.

Несмотря на применяемые меры по обеспечению чистоты при сборке целесообразно полости приборов перед окончательной сборкой продувать очищенным от масла, паров воды и пыли воздухом высокого давления (4—6 ат), подаваемым через узкое сопло ($\varnothing 2—4$ мм) с ручным клапаном.

На качество пайки оказывает отрицательное влияние пот, попадающий с рук на спаиваемые поверхности, так как в состав пота входят вещества, препятствующие смачиванию припоем паяемых поверхностей, а также вызывающие коррозию и повышенное газоотделение внутри полости прибора.

Количество выделяющегося пота и его состав зависят от индивидуальных особенностей человека, а также от его физического и психического состояния, рабочей нагрузки и ряда других факторов. Поэтому к сборке узлов для пайки не должны допускаться лица с повышенной потливостью рук, а сборку следует проводить в резиновых напальчниках или в специальных безворсных перчатках. Помимо этого, в процессе работы необходимо часто мыть руки и протирать их спиртом.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

СПОСОБЫ НАГРЕВА И ПРИМЕНЯЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Различные способы нагрева при пайке, применяемые в настоящее время в промышленности, представлены на рис. 74. В электровакуумном приборостроении для вакуумной пайки чаще всего применяется нагрев электрическим током обычной частоты (контактная пайка, нагрев излучением) и токами высокой частоты (индукционная пайка). Нагрев изделий за счет теплопроводности

в жидкой и газовой среде (пайка окунанием в жидкий припой, пайка на горелках) и паяльником применяется только для пайки наружных деталей приборов.

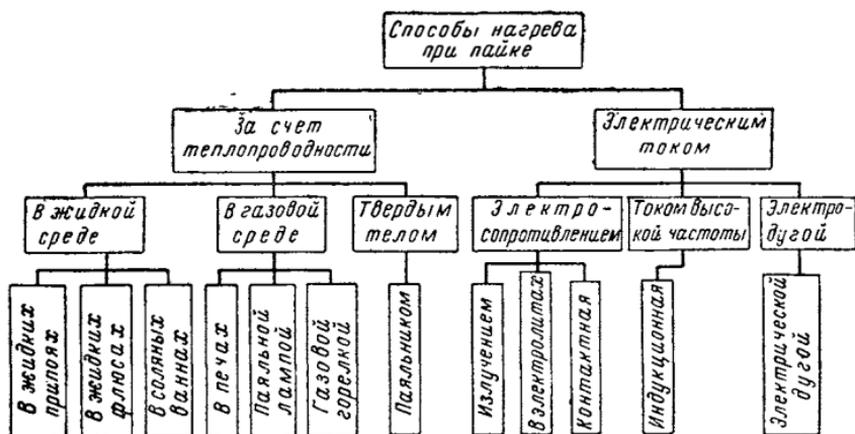


Рис. 74. Способы нагрева при пайке, применяемые в промышленности.

7-1. Пайка с нагревом излучением

Этот способ нагрева для пайки изделия наиболее распространен в производстве электровакуумных приборов. Осуществляется такая пайка в вакуумных печах и в печах с защитной атмосферой.

Рабочая зона нагревательной камеры одного из наиболее ранних вариантов такой печи, до сих пор применяющейся в промышленности (типа ЦЭП-241), представлена на рис. 75. Печи с такой рабочей зоной, хотя и распространены довольно широко в промышленности, обладают рядом недостатков:

1) расположение петлеобразных нагревательных элементов из молибденовой проволоки неудачно — половина каждого элемента значительно удалена от центра рабочей зоны печи, это снижает эффективность нагрева;

2) нагревательные элементы закреплены с одной стороны. При работе печи они сильно деформируются, и попытки поправить их приводят к поломке вследствие хрупкости рекристаллизованного молибдена;

3) удельная тепловая нагрузка нагревателей очень велика (до 20 вт/см^2), что ведет к их сильному перегреву и малому сроку службы.

Значительно улучшенный вариант конструкции нагревателей той же печи представляют собой пластинчатые нагреватели из листового молибдена, которые имеют при той же излучаемой мощности несравненно меньшую тепловую удельную нагрузку. Срок службы таких нагревателей выше примерно в 5 раз.

Внешний вид печи с такими нагревателями представлен на рис. 76.

Указанные выше недостатки устранены в печи (рис. 77) с нагревателями, закрепленными в неподвижном охлаждаемом водой колпаке и расположенными в один ряд. Удельная тепловая нагрузка нагревателей в этих печах снижена до 2—3 $вт/см^2$, что позволило резко увеличить срок их службы. Сплавляемое изделие на оправке в подставке устанавливается на подвижный охлаждаемый водой под, который защищается от прямого нагрева излучением шамотным экраном. Наблюдение за ходом пайки осуществляется через окно, защищенное кварцевым стеклом.

Для лучшего наблюдения за изделием во время пайки у некоторых моделей печей (рис. 78) смотровые окна имеют также на боковой поверхности колпака.

Для уменьшения тепловых потерь между нагревателями и колпаком установлены тепловые экраны. Подвод тока к нагревателям и воды для охлаждения держателей осуществляется через патрубки. Для герметизации стыка между подом и основанием колпака служит резиновая прокладка.

Связь пода с винтом подъемного механизма осуществляется через конусное кольцо, что устраняет влияние перекосов механизма на положение пода. При движении под направляется роликами.

На рис. 79 показан типичный график цикла пайки в водородной печи, из которого видно, что период охлаждения изделий после пайки (вместе с печью) примерно в 3—4 раза превышает время нагрева. Это обстоятель-

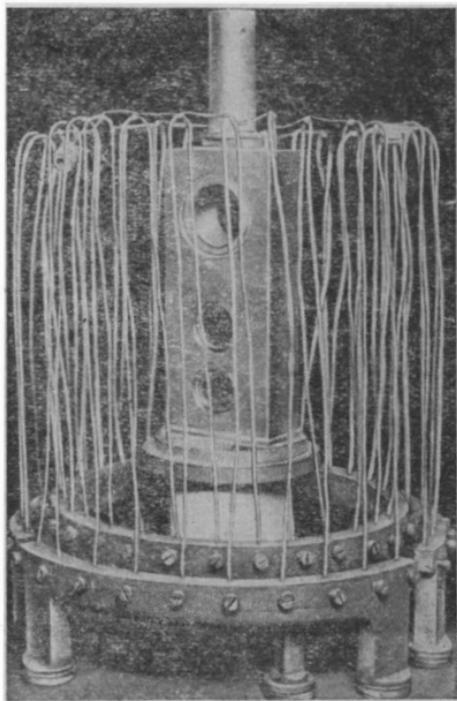


Рис. 75. Рабочая зона нагревательной камеры колпаковой водородной печи с проволочными нагревателями, расположенными в два ряда и закрепленными одним концом (снизу). В центре печи видно паяемое изделие.

ство является существенной особенностью колпаковых водородных печей и объясняется их конструкцией, которая выбрана с таким расчетом, чтобы обеспечить максимальную возможную производительность печи, т. е. минимальный цикл пайки. Эта задача решена путем полного отказа от тепловой изоляции стенок печи, так ха-

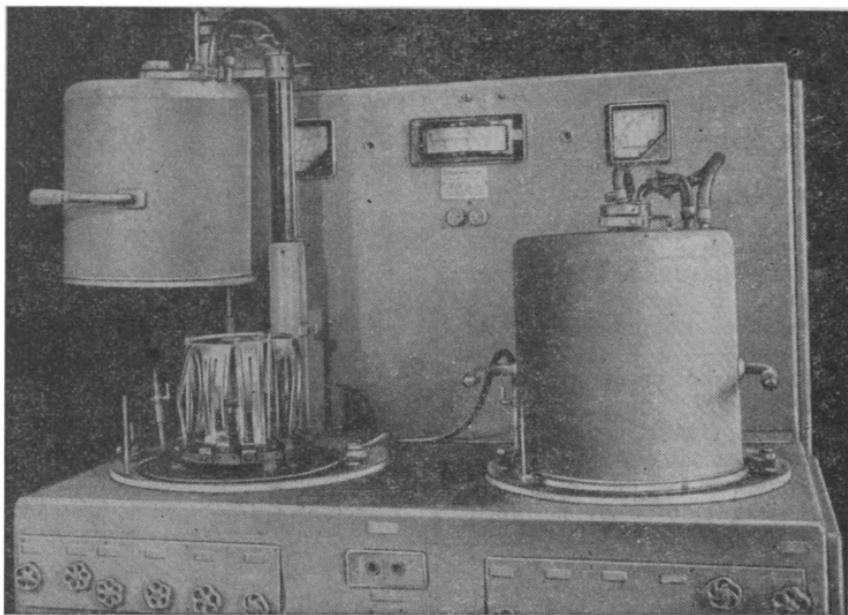


Рис. 76. Внешний вид водородной колпаковой печи мощностью 40 кВт с пластинчатыми молибденовыми нагревателями.

рактерной для всевозможных промышленных печей. Вместо тепловой изоляции стенки нагревательной камеры обильно охлаждаются проточной водой, чем и объясняется быстрое охлаждение печи. В период нагрева значительное количество тепла отражается многослойными тепловыми экранами к центру печи. К охлаждаемым стенкам из-за этого доходит относительно небольшое количество тепла, благодаря чему нагревание объекта пайки интенсифицируется и период нагрева короток.

Однако к моменту расплавления припоя тепловые экраны постепенно также нагреваются. После расплавления и растекания припоя в начале периода охлаждения содержимое нагревательной камеры — объект пайки, приспособления и тепловые экраны, оказываются

нагретыми до температуры, близкой к температуре пайки. Часть тепла передается стенкам нагревательной камеры, омываемым водой, и этой водой уносится.

В водородных печах имеют место все виды теплопередачи — излучение, конвекция и теплопроводность, тем

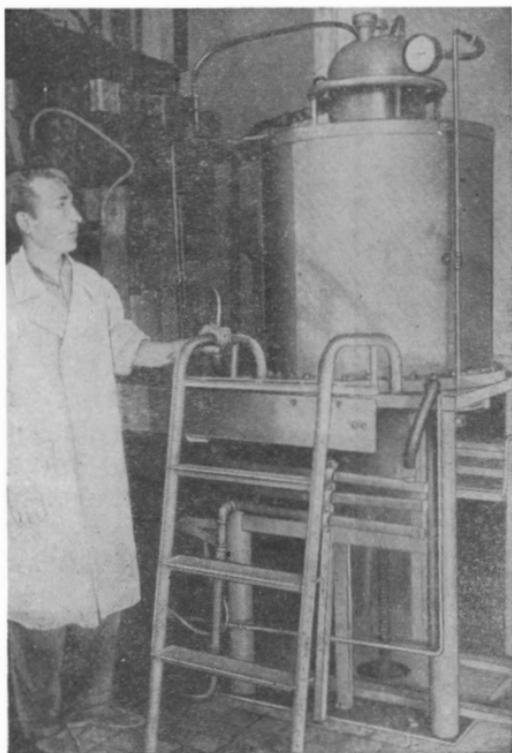


Рис. 77. Электрическая водородная печь мощностью 100 кВт с подвижным подом.

не менее тепловые экраны эффективно выполняют свое назначение и заметно задерживают теплопередачу.

При пайке больших объектов сложной формы, содержащих детали разных масс и особенно металлокерамические узлы, такое замедление остывания является благоприятным фактором, так как способствует выравниванию температуры во всех точках изделия и сохранению равномерного постепенного охлаждения. Таким образом предотвращается возникновение внутренних напряжений в паяемом изделии и коробление его. Все же с целью уменьшения периода остывания изделий в настоящее

время разработаны печи с подвижными тепловыми экранами, которые после расплавления и растекания припоя опускаются, что увеличивает теплоотдачу от изделия к охлаждаемым стенкам.

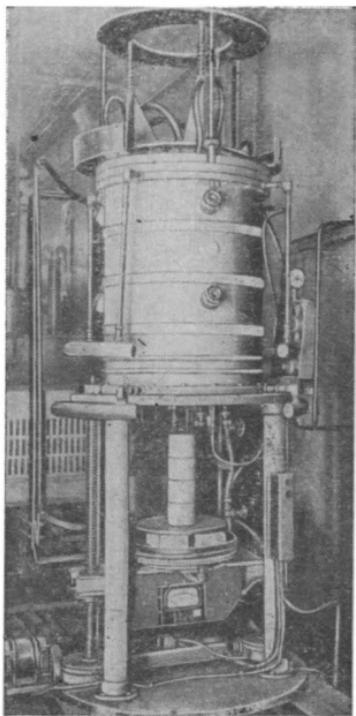


Рис. 78. Электрическая водородная печь мощностью 140 квт типа И.059.004 с подвижным подом и смотровыми окнами, расположенными на боковой поверхности колпака.

Тот факт, что водородные печи охлаждаются проточной водой, означает, что большая часть тепла, развиваемого в нагревательной камере, уносится водой, а на пайку расходуется только небольшая ее часть. Коэффициент полезного действия колпаковых печей крайне низок, но этим достигается кратковременность цикла пайки. Именно поэтому печи этого типа называются безынерционными. Из рис. 79 видно, что во время большей части периода охлаждения камеры питающее напряжение выключено. Для того чтобы сделать более рациональным использование электрооборудования колпаковых печей, их иногда выполняют двухколпаковыми (см. рис. 75). У таких печей на две нагревательных камеры предусмотрен один комплект электрооборудования с переключательным устройством. Поэтому, пока происходит охлаждение

и повторная загрузка одной камеры, во второй камере в это время объект пайки нагревается.

Необходимость обеспечения высокого вакуума в приборах, имеющих большие металлические поверхности и массы, а также необходимость пайки таких материалов, как титан, цирконий, нержавеющей стали, вызывают необходимость пайки в вакууме.

Для этого разработаны специальные вакуумные печи, одна из которых представлена на рис. 80.

Это двухпозиционная вакуумная печь типа ЦЭП-273 с размерами рабочей камеры $\varnothing 300 \times 600$. Вакуумная система печи состоит из форвакуумного насоса типа

ВН-1, диффузионного насоса типа Н-5С и вымораживающей ловушки.

Предельный вакуум в рабочей камере $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Нагрев осуществляется излучением от молибденовых ленточных нагревателей, обеспечивающих нагрев до 1100°C .

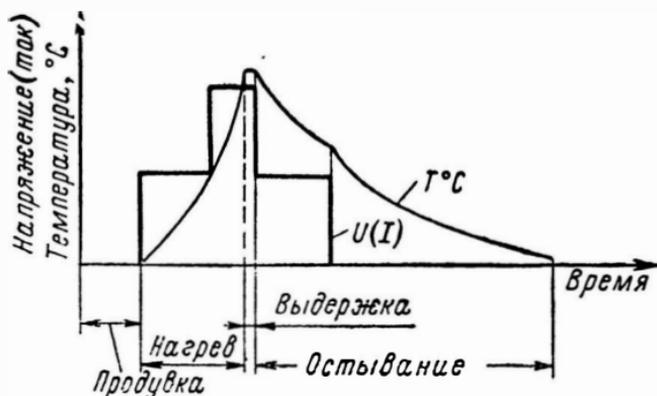


Рис. 79. Типовой график нагрева и охлаждения колпаковой электрической водородной печи.

Для ускорения охлаждения нагретых узлов в печь может подаваться азот. Кожух рабочей камеры и фланцы с резиновыми уплотнителями охлаждаются водой.

Конструкция печи обеспечивает непрерывную работу: пока одна камера нагревается, в другой параллельно

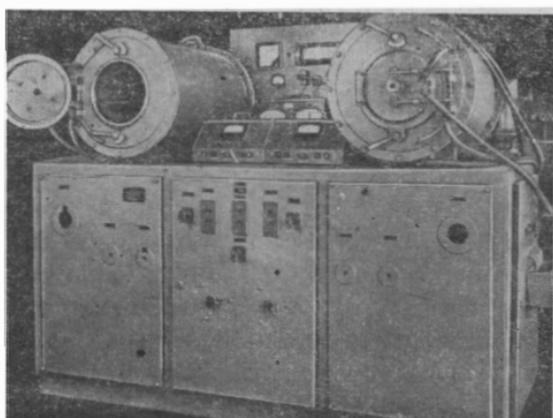


Рис. 80. Вакуумная двухкамерная электрическая печь типа ЦЭП-273.

с этим идет откачка, затем первая камера охлаждается, а вторая нагревается и т. д.

Современное направление конструирования электрических печей для электровакуумного приборостроения характеризуется тенденцией к использованию одной и той же нагревательной камеры как вакуумной, так и

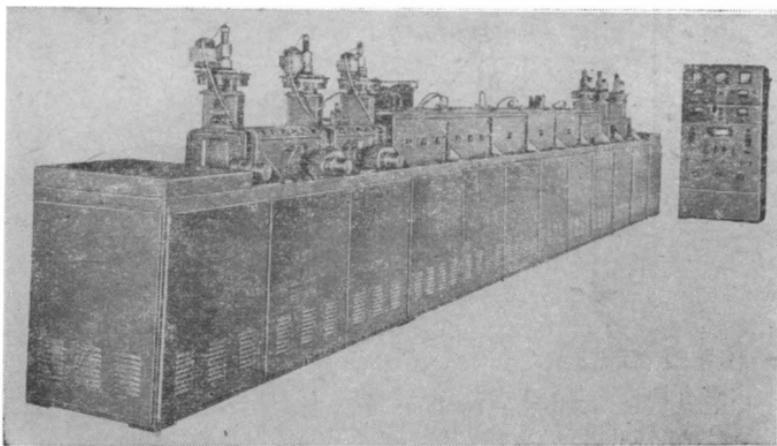


Рис. 81. Опытный образец конвейерной шлюзовой вакуумно-водородной печи типа И.059.12.

заполняемой водородом. Для этого камера печи оформляется в виде отдельного независимого блока, который при необходимости может быть сочленен с унифицированным откачным агрегатом.

Вакуумный агрегат (у мощных печей) или насос (у печей средней мощности) позволяют, кроме того, сократить рабочий цикл пайки за счет быстрой откачки воздуха из рабочей зоны взамен довольно длительной продувки ее азотом и водородом.

Основные характеристики вакуумных и вакуумно-водородных печей приведены в приложении 26.

С целью повышения производительности для условий серийного производства разработаны вакуумные и водородные печи непрерывного действия. Так, например, шлюзовая вакуумная печь (рис. 81) мощностью 70 квт типа И.059.012 позволяет паять до 20 изделий в 1 ч.

Естественно, что работа таких сложных печей, как конвейерные и особенно вакуумные, рабочий цикл которых практически непрерывен, невозможна без автомати-

ческого управления технологическим процессом и его контроля. К числу важнейших контролируемых параметров относятся скорости нагрева, охлаждения, время выдержки, а в вакуумных печах и степень вакуума.

В разработанных схемах автоматизации процессов пайки чувствительным элементом (датчиком) служит термопара, помещаемая в рабочей зоне печи. Программное устройство задает величину указанных параметров, обеспечивает их регулировку, а фактический режим пайки фиксируется самопишущим прибором.

7-2. Токовая пайка (пайка джоулевым теплом)

Нагрев деталей под пайку может осуществляться также за счет тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока через паяемое изделие или через электроды, соприкасающиеся с ним (джоулево тепло). Если употребляются медные токоподводящие электроды, то тепло развивается главным образом за счет потерь энергии при прохождении большого электрического тока низкого напряжения непосредственно через спаиваемое изделие. Так как наибольшее переходное сопротивление имеет место между припоем и паяемыми поверхностями, то на этом участке выделяется основное количество тепла.

Однако если паяются медные детали, то переходное сопротивление бывает слишком мало. Поэтому для нагрева изделий используются графитовые электроды, сопротивление которых более чем в 1 000 раз превосходит сопротивление между токопроводящими электродами и паяемыми деталями.

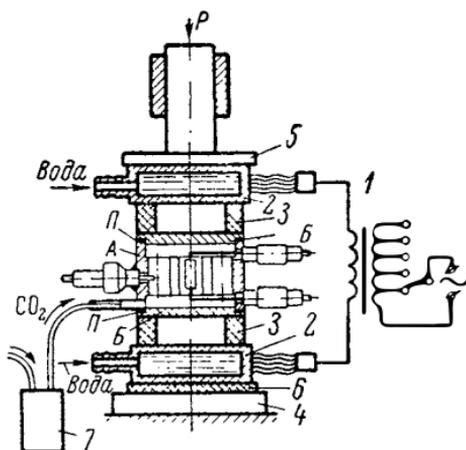


Рис. 82. Принципиальная схема установки токовой пайки для блока магнетрона А с крышками Б.

1 — трансформатор; 2 — медные, охлаждаемые водой электроды; 3 — графитовые нагреватели; 4 — нижняя неподвижная и 5 — верхняя подвижная опоры; 6 — изолирующая прокладка; 7 — резервуар для обогащения CO_2 парами спирта; P — усилитель для осадки деталей при расплавлении припоя; П — припой.

Поэтому для нагрева изделий используются графитовые электроды, сопротивление которых более чем в 1 000 раз превосходит сопротивление между токопроводящими электродами и паяемыми деталями.

Из формулы закона Джоуля — Ленца

$$Q = 0,24 I^2 R t,$$

где I — ток, *а*;
 R — сопротивление, *ом*;
 t — время, *сек*,

видно, что при сравнительно малых значениях сопротивления R и времени нагрева t для получения доста-

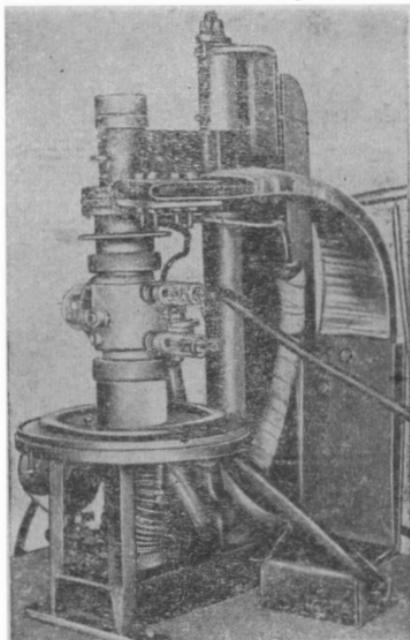


Рис. 83. Установка токовой пайки на воздухе блока магнетрона с крышками.

точного для пайки количества тепла необходимо применять большой ток, поэтому для пайки джоулевым теплом применяются сварочные трансформаторы или специальные машины. Электрические контактные машины обеспечивают получение тока от сотен до десятков тысяч ампер при низких напряжениях (от 1,0 до 20 в).

На рис. 82 изображена принципиальная схема устройства для токовой пайки блока магнетрона A с крышками B . Понижающий сварочный трансформатор I имеет секционированную первичную обмотку, а вторичную — обычно из одного витка. Напряжение между электродами 2 регулируется

трансформатором. Паяемый узел с двумя графитовыми нагревателями 3 по обе его стороны вставляется между электродами 2 , и в таком виде «пакет» устанавливается на неподвижном основании 4 с изолирующей прокладкой 6 . Сверху «пакет» сжимается подвижным штоком 5 , под действием которого происходит осадка паяемых деталей при плавлении припоя. Для предотвращения окисления внутренней полости прибора в нее подается углекислый газ с парами спирта, поступающий через резервуар 7 .

Внешний вид одной из наиболее ранних конструкций приспособления для токовой пайки с размещенным между электродами магнетроном показан на рис. 83.

Пайка джоулевым теплом имеет ряд преимуществ по сравнению с пайкой в водородных печах:

а) высокий к. п. д. и минимальное время нагрева изделия (10—30 сек);

б) быстрое охлаждение изделия вследствие плотного контактирования его с охлаждаемыми водой электродами;

в) слабый нагрев стекла и его спаев с металлом.

Эти преимущества токовой пайки превращали ее до внедрения дуговой сварки в единственный способ завершающей герметизации приборов магнетронного типа с металлической оболочкой. Для такой пайки в серийном производстве разработаны специальные полуавтоматические установки, на которых пайка осуществляется в атмосфере формирующего газа под колпаком, из которого предварительно откачивается воздух. В условиях серийного производства применяются также многоместные автоматизированные высокопроизводительные установки для токовой пайки (рис. 84).

Существенными недостатками токовой пайки являются ограниченность конфигураций узлов, для которых возможен этот способ, и применение графитовых электродов, что не соответствует высоким требованиям вакуумной гигиены.

7-3. Пайка с индукционным нагревом

При высокочастотной индукционной пайке металл, помещенный в магнитное поле контура, по которому

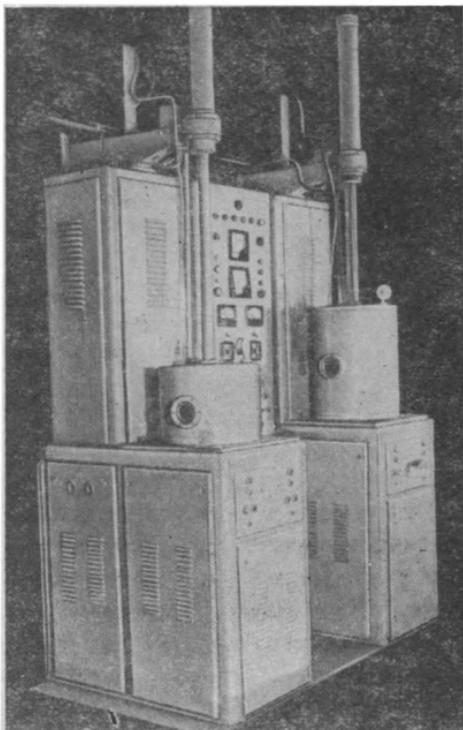


Рис. 84. Многоместная двухколпаковая автоматизированная установка для токовой пайки в защитной среде.

протекает переменный электрический ток, нагревается индуктированными вихревыми токами (токами Фуко).

Тепловая энергия, выделяющаяся в металлическом изделии в результате действия токов Фуко, распределяется по сечению изделия неравномерно.

Наибольшее количество тепла выделяется на поверхности цилиндра. При работе на радиочастотах имеет место резко выраженный поверхностный эффект

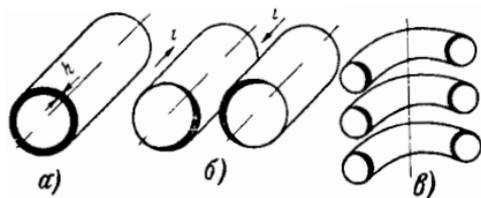


Рис. 85. Проявление скин-эффекта (а), эффекта близости (б) и кольцевого (или катушечного) (в) при прохождении тока высокой частоты по проводнику.

(скин-эффект), который свойствен любым переменным токам и заключается в том, что плотность любого переменного тока распределяется по сечению проводника неравномерно, увеличиваясь к поверхности проводника. Глубина h проникновения переменного тока внутрь проводника (рис. 85,а), иногда называемая «толщиной скин-слоя», определяется следующим уравнением:

$$h = \frac{C}{2\pi\sqrt{\mu\sigma f}},$$

где $C = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек — электродинамическая постоянная (скорость света в пустоте);

μ — магнитная проницаемость;

σ — удельная электрическая проводимость;

f — частота тока.

Для практических расчетов более удобно выражение

$$h = \frac{K}{\sqrt{f}} \text{ [мм]},$$

где K — коэффициент, зависящий от материала и его температуры.

Значение коэффициентов K в формуле $h = K, \sqrt{f}$ в зависимости от материала:

	K
Сталь малоуглеродистая при температуре более 780° С (выше точки Кюри)	600
Сталь малоуглеродистая при температуре 20° С	20
Медь	70
Алюминий	80

Глубина проникновения тока в холодной стали почти в 30 раз меньше глубины проникновения тока в горячей (σ горячей стали уменьшается в 10—12 раз, а μ — падает до единицы).

В табл. 14 приведены значения глубины проникновения тока в зависимости от частот. Следует заметить, что при радиочастотах свыше 90% энергии токов Фуко приходится на скин-слой.

Таблица 14

Глубина проникновения тока высокой частоты в зависимости от частоты

Частота, <i>ец</i>	Глубина проникновения тока в металлы, мм			
	Сталь		Медь	Алюминий
	До точки Кюри	После точки Кюри		
50	2,4	92	9,5	1,4
2 · 10 ³	0,5	14	1,5	1,8
10 ⁴	0,2	6	0,67	0,8
10 ⁵	0,07	2	0,21	0,25
10 ⁶	0,02	0,6	0,07	0,08
10 ⁸	0,002	0,06	0,007	0,008

Расчеты и экспериментальные данные показывают, что при одной и той же частоте немагнитные материалы нагреваются значительно медленнее, чем ферромагнитные, что объясняется тем, что μ для немагнитных тел равна, примерно, единице и в них не наблюдается резко выраженного скин-эффекта. В результате этого в стали, например, удельная поглощаемая мощность почти в 8 раз больше, чем в меди. Кроме поверхностного эффекта, в проводниках, по которым протекает переменный ток, в результате взаимодействия магнитных полей могут иметь место эффекты близости и кольцевой (катушеч-

ный), который необходимо учитывать при нагреве токами высокой частоты (т. в. ч.). Неравномерная плотность тока по сечению проводника, обусловленная действием этих эффектов, приводит к неоднородному нагреву проводника (рис. 85,б и в).

Эффект близости заключается в том, что неравномерное распределение плотности тока по сечению близко расположенных проводников зависит от направленности тока в них. При одинаковой направленности переменного тока наибольшая его плотность на-

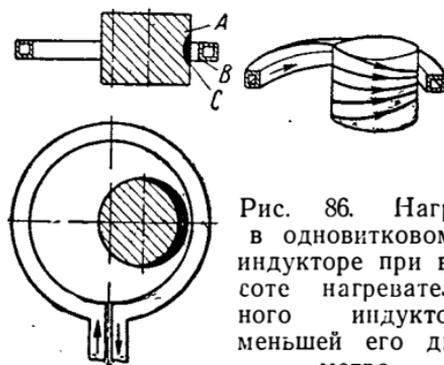


Рис. 86. Нагрев в одновитковом индукторе при высоте нагревательного индуктора меньшей его диаметра.

A — нагреваемая деталь; *B* — индуктор; *C* — нагретый слой (при эксцентричном положении нагреваемого стального цилиндра линии вихревых токов сгущаются на приближенных к индуктору участках цилиндра; нагрев неравномерный. Для устранения неравномерного нагрева деталь необходимо вращать в индукторе).

блюдается на противоположных сторонах, а при разной направленности тока — на обращенных друг к другу сторонах проводников (рис. 85,б). При одинаковой направленности тока магнитные линии обеих полей между проводниками направлены противоположно и взаимно ослабляют друг друга. При разной направленности переменного тока, протекающего по близко расположенным проводникам, направление магнитных линий полей между ними совпадает, что приводит к увеличению плотности магнитного поля между проводниками. Эффект близости проявляется тем сильнее, чем меньше расстояние между проводниками.

На рис. 86 показан пример проявления эффекта близости в случае эксцентрического расположения детали в одновитковом индукторе. Индуцируемые в детали вихревые токи, имеющие обратное направление токам в индукторе, стягиваются к близлежащей поверхности индуктора. В этом случае выделение тепла происходит неравномерно. Более интенсивный нагрев будет происходить на участках деталей, приближенных к индуктору.

Внутри многовиткового индуктора напряженность магнитного поля по сравнению с одновитковым увели-

чивается, действие эффекта близости уменьшается и при высоте индуктора более 2 диаметров оказывается незначительным. При зазоре между индуктором и изделием $1/4$ диаметра индуктора нагрев происходит практически равномерно по всей длине и поверхности детали, несмотря на ее эксцентричное расположение в индукторе (рис. 87).

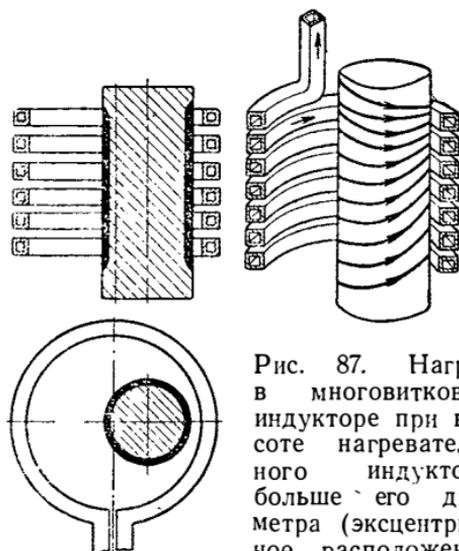


Рис. 87. Нагрев в многовитковом индукторе при высоте нагревательного индуктора больше его диаметра (эксцентричное расположение нагреваемого стального цилиндра мало нарушает равномерность распределения линий вихревых токов; нагрев равномерный).

Поэтому в многовитковых индукторах нагрев осуществляется, как правило, при неподвижном положении детали в индукторе. Наоборот, для достижения равномерного нагрева детали по окружности ее необходимо вращать в индукторе, если применяются маловитковые индукторы, особенно при большом отношении диаметра индуктора к его высоте, а также индукторы одновитковые. С другой стороны, такие индукторы можно использовать как паяльники, быстро и последовательно прогревая нужные зоны.

Кольцевой или катушечный эффект возникает в результате несимметричности электромагнитного поля проводника при свертывании его в кольцо; линии поля сгущаются у внутренней поверхности кольца и разрежены с внешней стороны (см. рис. 85,в). Если

нагревается наружная цилиндрическая поверхность, то этот эффект благоприятствует нагреву и облегчает его.

В производстве электровакуумных приборов пайка металлов с нагревом током высокой частоты составляет сравнительно небольшую часть от общего объема паяных металлических соединений, что объясняется следующими причинами:

1) трудностью разогрева деталей из меди, которая является основным материалом приборов СВЧ.

2) необходимостью сложной разработки технологического процесса индукционной пайки в каждом конкретном случае, особенно если паяемый узел содержит много швов и состоит из деталей сложной формы с резко отличающимися массами, изготовленными из разнородных металлов, и т. д. Эта разработка состоит в конструировании и изготовлении приспособлений, подборе индуктора или индукторов, подборе последовательности и режима нагрева, создании защитной атмосферы, настройке генератора токов высокой частоты и др.

Но зато неоспоримы преимущества индукционной пайки:

быстрота протекания процесса;

локализованный нагрев места пайки;

возможность пайки тугоплавкими припоями, например, никелем (1450°C), платиной (1770°C), родием (1970°C) и т. д.;

весьма высокий к. п. д. процесса и отсюда дешевизна его.

Поэтому индукционную пайку целесообразно применять либо в массовом и крупносерийном производствах, где экономически оправдывается разработка технологии и окупаются затраченные усилия, либо для отдельных узлов простой формы, пайка которых в печах вызывает какие-либо трудности (недопустимость прогрева всех деталей узла, ограниченность наибольшей температуры печей и т. п.), а также для напаивания отдельных узлов на изделие сложной формы.

На рис. 88 показан пример пайки двух молибденовых деталей катодного узла магнетрона высокотемпературным припоем.

При нагреве током высокой частоты тонкостенных деталей, особенно сложной формы, возникает опасность быстрого перегрева и проплавления (рис. 89) отдельных участков этих деталей.

В связи с этим при пайке узлов с такими деталями непосредственного их нагрева индуктором избегают, а нагрев места пайки осуществляется за счет теплопередачи от специальной массивной детали (нагревателя),

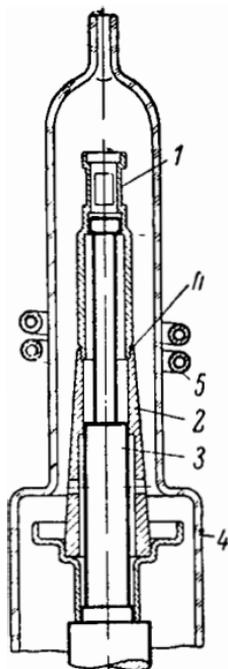


Рис. 88. Пример индукционной пайки деталей катодного узла магнетрона.

1 и 2 — паяемые детали; 3 — центрирующая молибденовая оправка; 4 — стеклянный баллон; 5 — индуктор; П — молибденово-никелевый припой.



Рис. 89. Проплавление тонкостенного силфона при неправильном нагреве током высокой частоты.

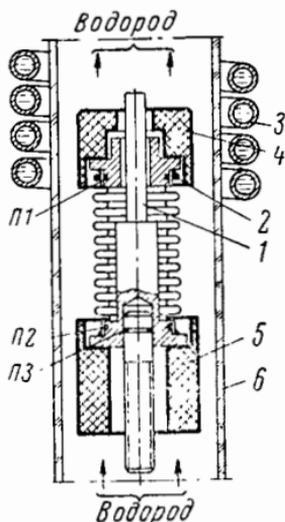


Рис. 90. Пайка силфонного узла 1 током высокой частоты с нагревом от графитовых нагревателей 4 и 5; 2 — кольцо из никрома; 3 — индуктор; 6 — баллон; П1, П2, П3 — припоя.

которая располагается вблизи зоны пайки и нагревается индуктором. На рис. 90 показан пример такой пайки силфонного узла механизма настройки.

Материалом для нагревателей чаще всего служит графит. При недопустимости науглероживания деталей

или опасности засорения объекта пайки частицами графита целесообразно применение нержавеющей хромистой стали (марки 1X18H9T) или других металлов, не смачиваемых припоем.

Для предотвращения окисления пайка подобных узлов осуществляется в кварцевой колбе с продувкой азота, водорода, их смеси и т. п.

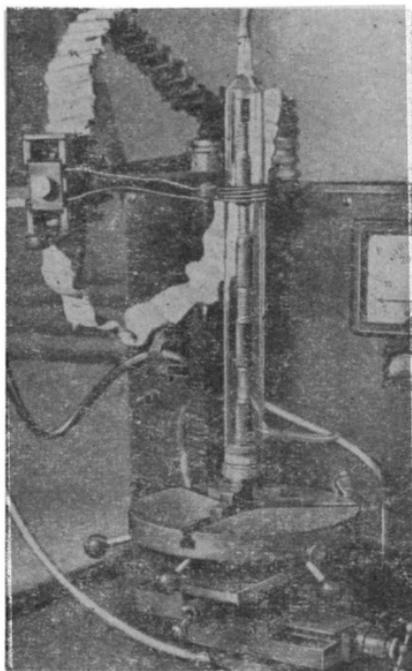


Рис. 91. Установка узлов в колбе «стопкой» для повышения производительности при пайке током высокой частоты.

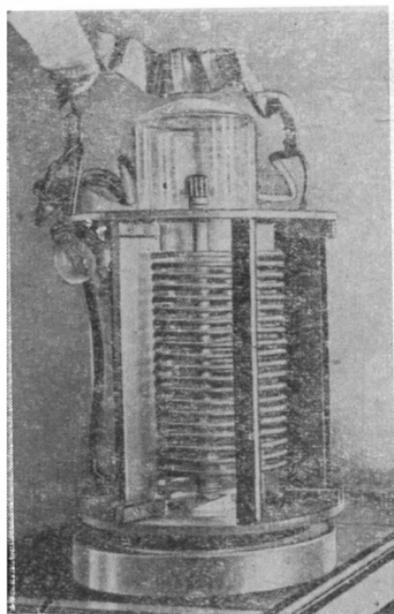


Рис. 92. Индукционная пайка нескольких швов одновременно многовитковым индуктором.

С целью повышения производительности труда при индукционной пайке применяются установка узлов в колбе «стопкой» (рис. 91) или карусельные приспособления.

На рис. 92 показан пример пайки нескольких швов одновременно на крупном узле из медных деталей небольшой толщины (3—5 мм) с помощью многовиткового индуктора под стеклянным колпаком в вакууме.

ВИДЫ БРАКА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ИХ КОНТРОЛЬ

На качество паяных соединений и особенно на их вакуумную плотность, помимо конструкции, влияет большое количество технологических факторов. Отклонение хотя бы некоторых из них от установленных оптимальных пределов приводит к появлению видимых или скрытых дефектов, часто неисправимых.

Ниже рассматриваются конкретные виды брака, наиболее часто встречающиеся в производстве, причины, его вызывающие, и методы его исследования и контроля.

8-1. Виды брака паяных соединений

А. Внешний брак

К данному виду брака следует отнести те явные нарушения геометрии узла и внешнего вида паяного шва, которые могут быть обнаружены визуально или с помощью универсальных измерительных инструментов и приборов без разрушения паяного узла.

Плохое растекание припоя вследствие:

а) недостаточного нагрева узла («недогрев»);

б) недостаточной выдержки при температуре пайки («недодержка»);

в) окисления паяемых поверхностей из-за нарушения состава защитной атмосферы печи (повышенное содержание кислорода и паров воды, плохой вакуум и т. п.);

г) плохой предварительной очистки паяемых поверхностей (наличие жировой пленки и невосстанавливаемых в условиях пайки окислов);

д) неправильного выбора припоя (плохая смачиваемость);

е) повышения температуры плавления припоя в результате взаимодействия с паяемым материалом («припой замерзает»).

Незаполнение капиллярного зазора припоем вследствие:

а) плохого растекания припоя по причинам, рассмотренным выше;

б) неправильно выбранной величины сборочного зазора или резких изменений в нем (фаски, радиусы, канавки, стыковые перекрытия и т. п.);

в) неправильного расположения припоя относительно шва в пространстве при сборке;

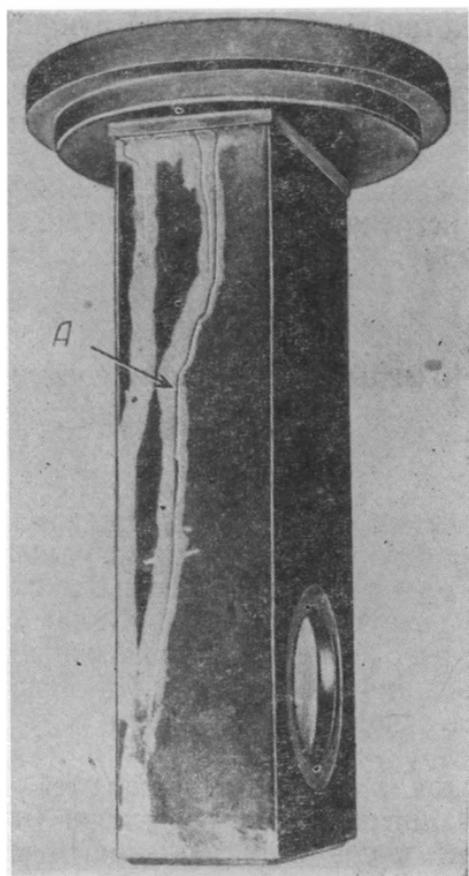


Рис. 93. Пример разъедания (канавка А) припоем ПСр72 медного волновода при «передержке» узла в печи.

г) смещения припоя относительно шва при пайке из-за тепловых деформаций;

д) неправильной конструкции соединения, препятствующей выходу газов, вытесняемых из зазора припоем;

е) неравномерного нагрева, когда одна из деталей (обычно тонкостенная) нагревается быстрее и как бы «стягивает» на себя припой.

Разъедание паяемых материалов припоем («передержка») вследствие перегрева в случа-

ях, когда в результате взаимодействия припоя с материалом в шве образуются сплавы, имеющие более низкую температуру плавления по сравнению с припоем (пайка меди серебром), или когда материал активно растворяется в припое (рис. 93).

Наплывы припоя вследствие его избытка.

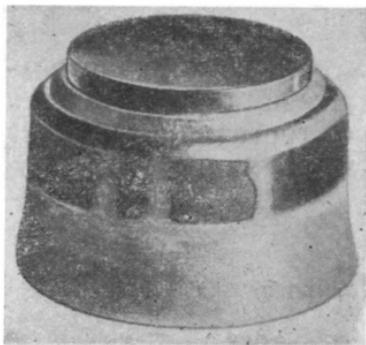


Рис. 94. Трещины в коваровом стакане, возникшие при пайке припоем ПСр72 вследствие неправильной конструкции соединения (массивная медная деталь внутри ковара).

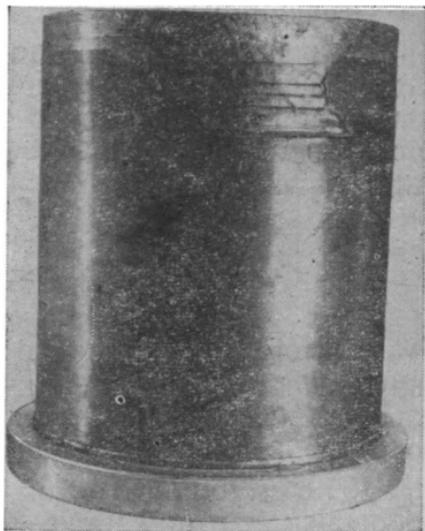


Рис. 95. Оплавление медной трубы вследствие местного перегрева.

Трещины и разрывы в паяемых деталях вследствие:

- а) неправильной конструкции соединения (рис. 94);
- б) неправильной конструкции оснастки;
- в) больших остаточных растягивающих напряжений в материале паяемых деталей, которые способствуют разрушению материала, находящегося в контакте с некоторыми расплавленными припоями (см. рис. 11).

Вздутие и шелушение гальванических покрытий на деталях (см. рис. 54) вследствие:

- а) нарушения технологического режима нанесения покрытия и предварительной обработки детали перед покрытием;
- б) неправильного назначения толщины покрытия;
- в) нарушения состава газовой атмосферы в печи и режима нагрева.

Оплавление материала паяемых деталей вследствие местных перегревов (рис. 95).

Нарушения взаимного расположения деталей в узле вследствие:

- а) неправильной сборки;
- б) отсутствия или плохого качества оснастки (неправильная конструкция или изношенность);
- в) коробления деталей из-за неравномерного нагрева, снятия внутренних напряжений или неправильной конструкции узла.

Из перечисленных видов внешнего брака сравнительно немногие поддаются исправлению повторной пайкой, зачисткой или правкой в холодном состоянии. Поэтому основным средством борьбы с браком являются меры, предупреждающие его появление.

Б. Дефекты сплошности паяного шва

К этому виду брака относятся все макро- и микронарушения сплошных паяных швов, которые не могут быть обнаружены в изделии при внешнем визуальном осмотре и выявляются специальными методами.

Дело в том, что если материал деталей вакуумной оболочки изготавливается, как правило, из отобранных с минимальными дефектами заготовок, прошедших к тому же обработку давлением после литья (прокатка, ковка, волочение, протяжка и т. п.), что, естественно, уплотняет его структуру, то паяный шов представляет собой узкую прослойку литого металла со всеми присущими литью дефектами (газовые и усадочные раковины, поры, трещины, ликвации и т. п.).

Кроме того, особые условия распространения и кристаллизации припоя в капиллярных зазорах порождают дефекты, специфичные для пайки (замкнутые полости, образовавшиеся вследствие неравномерности распространения потока припоя в капиллярном зазоре из-за непостоянства величины зазора, шероховатости его стенок и т. п.).

Основные виды макродефектов сплошности паяных швов и причины, их вызывающие, представлены на рис. 96.

Макродефекты такого рода в том случае, если они сквозные, будут причиной грубых нарушений вакуумной плотности, которые удастся обнаружить при контроле с помощью теченскателя.

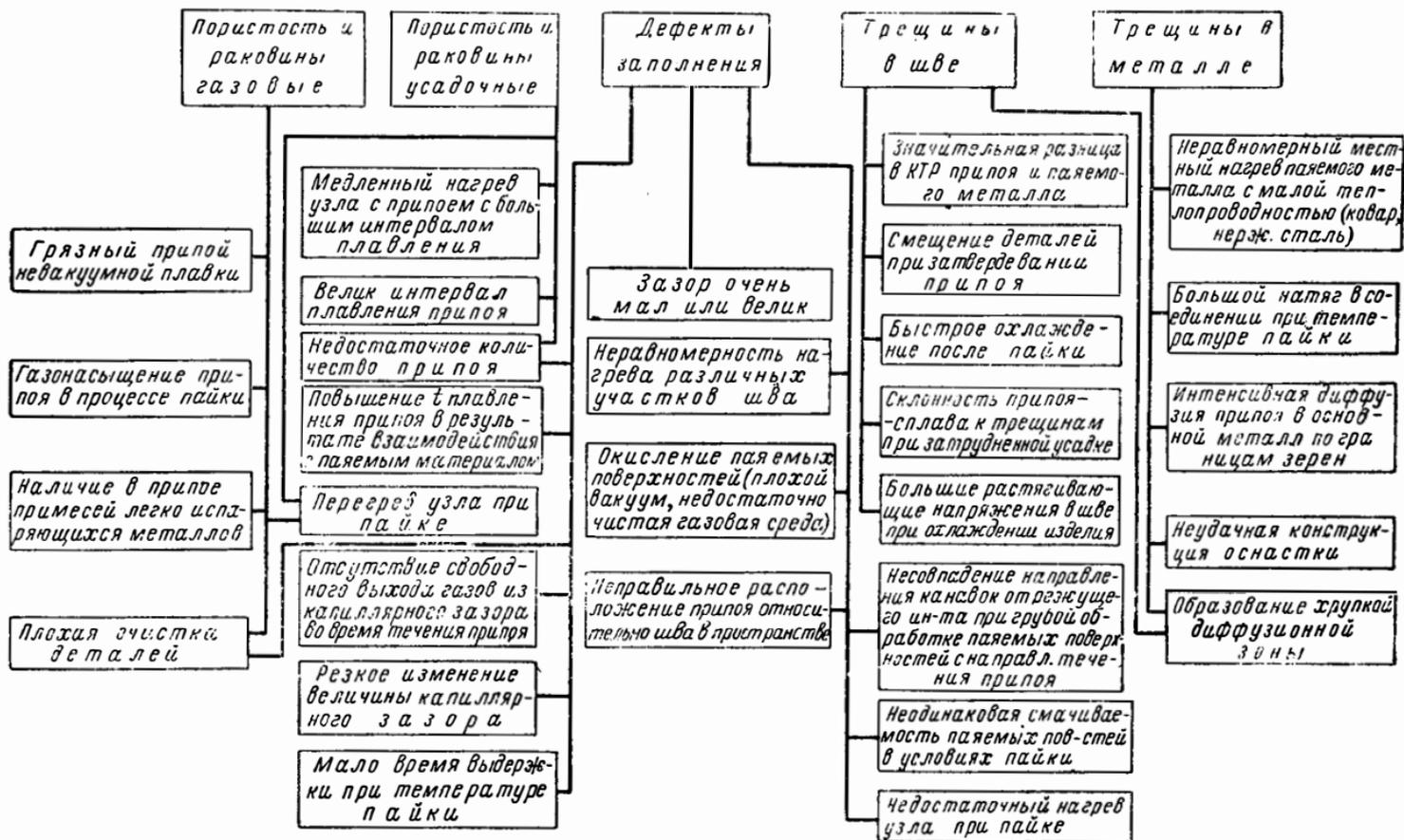


Рис. 96. Виды макродефектов сплошности паяных швов электровакуумных приборов и причины их возникновения.

Однако уже эти макродефекты приводят к систематическому браку по отдельным паяным узлам, достигающему до 20—30%.

Что же касается различного рода макро- и микродефектов, которые не приводят к появлению течей, обнаруживаемых непосредственно после изготовления узла, то в настоящее время нет пока никаких данных, вскрывающих их роль в браке приборов по течам на последующих технологических операциях, а также по медленным натеканиям в процессе эксплуатации и хранения приборов.

8-2. Контроль паяных соединений

Контроль различных этапов технологического процесса является важнейшей мерой по предупреждению брака. Контроль в производстве паяных соединений схематически может быть разделен на три основных части:

- 1) контроль технологических и конструктивных параметров до пайки;
- 2) контроль технологических параметров во время процесса пайки;
- 3) контроль спаянных узлов и анализ брака.

Контролю до пайки подвергаются состав исходных материалов и припоев в соответствии с техническими условиями и ГОСТ, размеры собираемых деталей и качество подготовки их поверхностей для пайки (обезжиривание, травление, качество гальванических покрытий), правильность технологии сборки (соблюдение вакуумной гигиены в помещении и на рабочем месте).

В процессе пайки контролю подвергаются основные параметры этого процесса: режимы пайки (скорость нагрева, температура пайки, время выдержки, скорость охлаждения), состав газовой среды (процент содержания примесей, кислорода и точка росы), расположение узлов относительно нагревающих элементов (спиралей, индуктора), состояние оборудования, чистота рабочей зоны печи, расход газа и т. д.

При контроле режима пайки надо стремиться к автоматической записи его параметров, что исключает влияние субъективного фактора.

Для автоматического регулирования и контроля температуры целесообразно использовать программные регуляторы, например, регулятор типа И.069.0001, кото-

рый обеспечивает точность поддержания температуры на заданном уровне в стационарном режиме $\pm 5^{\circ}\text{C}$, в переходном процессе $\pm 10^{\circ}\text{C}$ и повторяемость заданной программы от цикла к циклу $\pm 10^{\circ}\text{C}$ по диаграмме прибора типа ЭПП-15.

Контроль спаянных узлов осуществляется в первую очередь внешним осмотром. При этом часто используются лупы с 4-х или 6-кратным увеличением, а в ответственных случаях бинокулярные микроскопы типа МБС-1 и МБС-2. При таком контроле о качестве швов судят по сравнению с утвержденными эталонами соответствующих узлов.

Основным производственным методом проверки спаянных узлов на вакуумную плотность является их 100%-ный контроль на гелиевом течеискателе типа ПТИ-6. При этом важное значение имеет правильный выбор схем контроля на вакуумную плотность (рис. 43—46).

В испытаниях механической прочности паяных узлов электровакуумных приборов обычно нет необходимости.

Проверка геометрии узлов осуществляется с помощью универсальных или специальных мерительных инструментов. В ряде случаев вместо контроля размеров узлов целесообразно контролировать соответствующие размеры оснастки, которая автоматически обеспечивает получение этих размеров на узлах. Периодичность контроля оснастки устанавливается специальным графиком, составленным на основе данных по износу или кораблению.

Основной целью анализа брака является установление причины этого брака, что является довольно трудоемким мероприятием и в большинстве случаев проводится с разрушением изделий.

При этом часто приходится прибегать к современным средствам лабораторного анализа: металлографическому, люминесцентному, рентгенографическому, химическому, спектральному и др.

Вышеперечисленные методы контроля позволяют выявлять брак в основном по внешнему виду или же отбраковывать изделия без обнаружения дефектов сплошности паяного шва, что в значительной мере затрудняет анализ брака паяных узлов. В связи с этим большие перспективы имеет новый метод неразрушающего контроля с помощью рентгенотелевизионного микроскопа.

Рентгенотелевизионная микроскопия непрозрачных объектов основана на применении рентгеновидиконов, преобразующих теневые рентгеновские изображения в телевизионные сигналы. Рентгеновидиконы в сочетании с телевизионной системой замкнутого типа позволяют получать видимое изображение внутреннего строения просвечиваемого объекта с увеличением в 10 и более раз при контрастной чувствительности до 2% и регулировать масштаб увеличения, яркость и контраст видимого изображения.

С помощью рентгенотелевизионного микроскопа можно наблюдать дефекты в паяных швах готовых изделий без их разрушения, что позволяет в известных случаях оперативно прогнозировать надежность изделий после установления связи характера и количества дефектов с эксплуатационными характеристиками изделия.

Имеется перспектива применения рентгенотелевизионных микроскопов для контроля изделий не только после, но и в самом процессе изготовления.

О контроле качества сварки во время ее проведения уже сообщалось Мак Мастером.

На рис. 97,а представлена в натуральную величину металлокерамическая паяная ножка со штырьками, а на рис. 97,б — часть ее паяного шва после увеличения на рентгенотелевизионном микроскопе в 7 раз. Очень хорошо просматриваются дефекты заполнения паяного шва.

Таким образом, в связи с появлением широких возможностей по наблюдению дефектов в паяных изделиях без их разрушения естественно встает вопрос о критериях их оценки.

В известных работах по исследованию качества паяных швов имеются попытки качественной или количественной оценки макродефектов шва. Так, в работе Кибулы плотность швов оценивалась по принципу «80 и 100% заполнения шва». Качественными считались швы, заполненные не менее, чем на 80%.

В работах Тэдзуко Кэйдзо и Онитобо Йосиби плотность швов оценивалась по площади проекции газовых крупных пор на рентгеновской киноплёнке.

Кеел при оценке пористости швов в паяных трубах в зависимости от количества и расположения припоев по рентгеновским снимкам также брал отношение площади дефектов в шве к площади проекции всего шва.

При оценке качества швов характер дефектов и вероятность того, что они могут быть сквозными, во всех этих работах никак не учитывались.

Дюмон оценивал качество паяных швов уже с точки зрения вакуумной плотности. Оценка дефектов в паяных швах проводилась им качественно, исходя из характера и количества дефектов в плоскости металлографического шлифа в определенном сечении на специальном

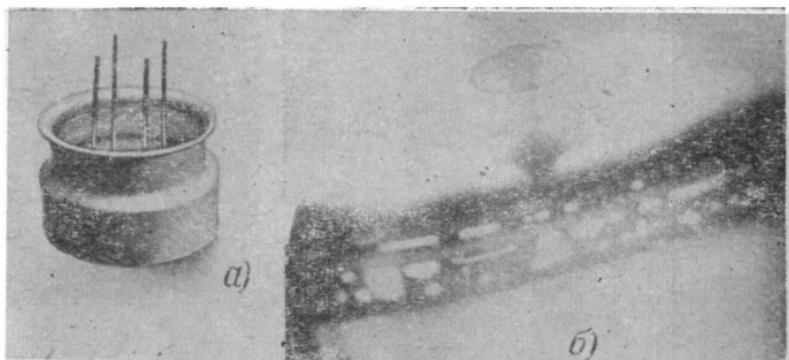


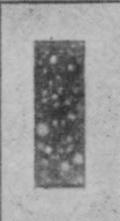
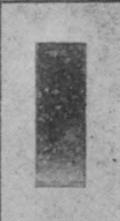
Рис. 97. Металлокерамическая паяная ножка со штырьками (а) и рентгенотелевизионное изображение (б) участка шва между керамическим диском и металлическим стаканом при увеличении в 7 раз (по Н. В. Рабодзею).

образце. Такая методика тоже, однако, не вскрывает всего многообразия макродефектов, которые наблюдаются в паяных швах и не всегда могут попасть в плоскость металлографического шлифа. В связи с этим представляется целесообразным классифицировать все встречающиеся в паяных швах макродефекты по группам, взяв за основу природу их образования, и каждую группу — по баллам, исходя из размеров и частоты расположения этих дефектов.

Аналогичный метод оценки дефектов элементов микроструктуры, примесей и других факторов, трудно поддающихся количественным измерениям, давно принят в металлургии и в ряде случаев доведен до уровня ГОСТ.

Для облегчения классифицирования дефектов и оценки сварных швов в настоящее время Международным институтом сварки составлен сборник эталонных снимков сварных швов с оценкой их дефектов по пятибалльной системе.

Шкала оценки макродефектов сплошности паяных швов

Группы	Характер дефектов	Баллы				
		1	2	3	4	5
I	Мелкие газовые поры					
II	Крупные газовые поры и полости из-за некачественного заполнения припоем					
III	Крупные усадочные раковины и полости из-за недостаточного количества припоя					
IV	Рассеянная газоусадочная пористость					
V	Лабиринтная пористость					

Для разработки подобной классификации был проведен рентгеновский анализ большого количества паяных швов, исходя из которого наиболее характерные дефекты были разбиты на следующие группы, расположенные в порядке возрастания опасности для вакуумной плотности (табл. 15).

I. Мелкие газовые поры.

II. Крупные газовые поры и полости из-за некачественного заполнения припоем.

III. Крупные усадочные раковины и полости из-за недостаточного количества припоя.

IV. Рассеянная газо-усадочная пористость.

V. Лабиринтная пористость.

Трещины являются наиболее опасным дефектом паяного шва, но ввиду того, что встречаются они довольно редко и очень плохо разрешаются на рентгеновских снимках, в классификацию они не входят.

Трещины могут быть как по паяному шву, так и по основному материалу, если он подвержен хрупкости при воздействии на него расплавленного припоя.

Степень развития дефектов каждой группы оценивается по пятибальной системе. Чем крупнее и чаще встречаются дефекты, тем выше балл по пористости паяного шва.

: Степень опасности каждого вида дефектов для вакуумной плотности и для других эксплуатационных характеристик паяных швов будет зависеть от ряда факторов и в первую очередь от конструкции паяного узла, вида и величины напряжений в нем, свойств припоев и паяемых материалов, от назначения и условий эксплуатации паяемого изделия.

В настоящее время, пока не проведена работа по определению надежности паяных швов в зависимости от вида и характера дефектов, трудно разграничить допустимые и недопустимые дефекты для вакуумноплотных паяных швов различных электровакуумных приборов. Однако исходя из имеющегося опыта эксплуатации паяных узлов уже сейчас некоторые виды дефектов можно считать допустимыми для вакуумно-плотных швов, и, наоборот, дефекты 5-го балла I группы (табл. 15), дефекты 4—5-го баллов II, III, IV групп и все дефекты V группы уже сейчас следует признать совершенно недопустимыми.

8-3. Методика исследования качества паяных швов

Методика, необходимая для установления оптимальных пределов отклонений в величине капиллярных зазоров и в режимах пайки, должна обеспечивать:

1) возможность изучения дефектов для всего диапазона капиллярных рабочих зазоров на одном образце;

2) максимальную приближенность к условиям пайки реальных швов (обработка поверхности, среда, оборудование);

3) возможность металлографического исследования паяных швов без искажения структуры и дефектов грубой механической обработки;

4) возможность наблюдения дефектов по всей площади шва без искажений;

5) технологичность образцов, оснастки и сборки.

Методика, удовлетворяющая этим требованиям и позволяющая проводить количественный анализ пористости швов с разными исследуемыми капиллярными зазорами, паяемыми одновременно, заключается в следующем.

Экспериментальный образец паяется из двух пластин (рис. 98), одна из которых плоская, а другая имеет ряд парал-

лельных пазов, глубиной от 0,05 до 0,5 мм, с перемычками между ними шириной 1 мм, что соответствует капиллярным зазорам при температуре пайки для большинства реальных паяных соединений.

Шероховатость паяемых поверхностей на пластинах соответствует обычной обработке деталей для вакуум-

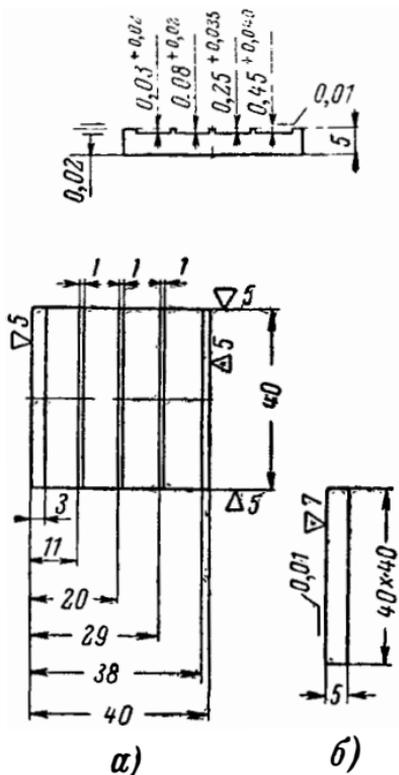


Рис. 98. Детали многоканального образца со ступенчатым изменением капиллярного зазора.

а — пластина ступенчатая; *б* — пластина гладкая.

ных швов, т. е. $\nabla 6$ — $\nabla 7$ по ГОСТ 2789-65. Толщина пластин назначается 4—5 мм, что обеспечивает минимальное их коробление при механической обработке и пайке.

Подготовленные для пайки пластины 1 (рис. 99) складывают друг с другом таким образом, чтобы гладкая пластина закрывала канавки на ступенчатой пластине, вставляются в обойму 2 с молибденовыми скобами и сжимаются винтами. Молибденовые скобы вследствие разности КТР при нагреве обеспечивают плотный прижим пластин друг к другу.

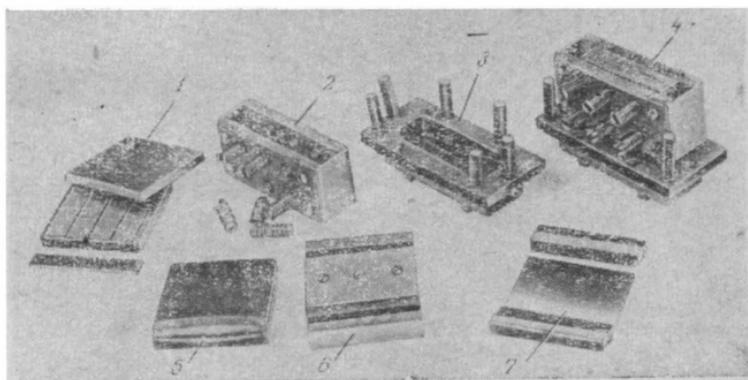


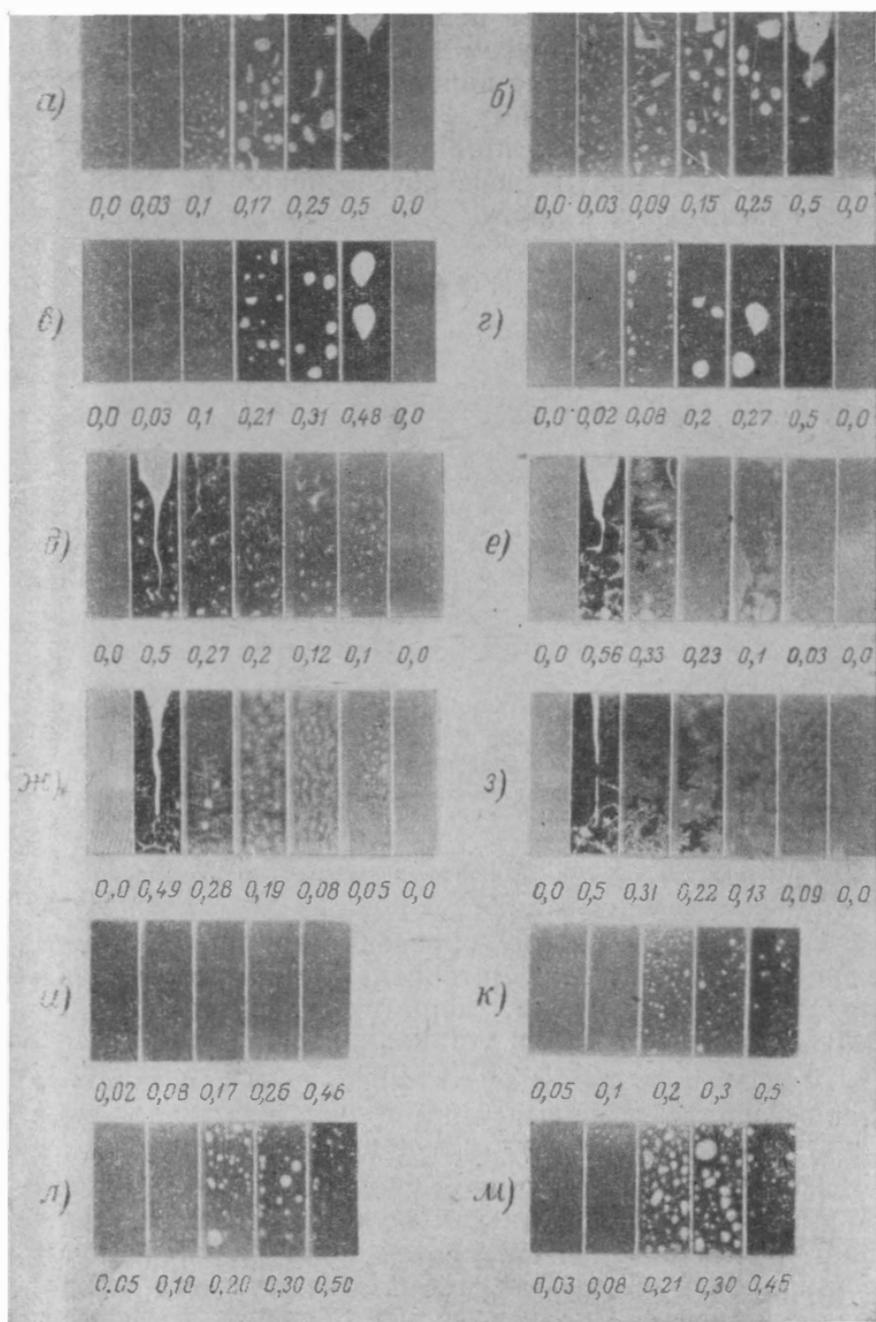
Рис. 99. Многоканальный образец со ступенчатым изменением капиллярного зазора для исследования качества паяных швов.

1 — гладкая и ступенчатая пластины образца и полоска припоя; 2 — обойма; 3 — лодочка; 4 — образец в сборе с обоймой в лодочке; 5 — образец после пайки; 6 — образец после электроискровой резки; 7 — образец после фрезеровки средней части до минимальной толщины для рентгенографического анализа.

Собранный в обойме образец ставится на пластину припоя в лодочку 3 из материала, несмачиваемого в условиях пайки припоем (керамика, нержавеющая хромистая сталь и т. п.), и устанавливается в печь.

При нагреве образца до температуры пайки расплавленный припой под действием капиллярных сил в исследуемые зазоры между пластинами.

После пайки в заданном режиме спаянный образец 5 вынимается из обоймы, и от его верхней и нижней частей электроискровым способом отрезаются полоски 6 шириной 5—6 мм для металлографического макро- и микроанализа. Средняя часть образца подвергается рентгенографированию. С целью получения более четкого



изображения дефектов паяного шва средняя часть образца 7 сфрезеровывается с двух сторон почти до припоя.

На рис. 100 представлены рентгеновские снимки паяных на многоканальном образце швов, изготовленных по описанной методике.

Анализ качества паяного шва производится путем сопоставления рентгеновских снимков с микрошлифами срезов с образцов.

Разрезка электроискровым методом обеспечивает после соответствующей полировки плоскости среза возможность исследования макро- и микроструктуры паяного шва без искажения формы и характера дефектов, что обычно наблюдается при других, более грубых методах обработки.

В приложении 14 даны рабочие чертежи деталей приспособления и образца.



Рис. 100. Рентгеновские снимки швов на многоканальных образцах, паянных различными припоями в разных режимах в водороде.

Материалы образцов и припой: *а-г* — медь-медь, ПСр72В; *д-з* — медь-ковар, ПСр52П20; *и-м* — медь-медь, ПЗл35М;

режимы пайки (температура пайки, °С × время выдержки, мин): *а* — 800° × 0,5; *б* — 820° × 1; *в* и *г* — 820° × 1 (вакуум); *д* — 920° × 1; *е* — 910° × 1; *ж* — 920° × 1; *з* — 950° × 5; *и* — 1 020° × 1; *к* — 1 000° × 1; *л* и *м* — 1 000° × 10.

Скорости охлаждения: *а-и, л* — 75—100° С в 1 мин; *к, м* — 8—12° С в 1 мин.

Цифры под снимками — величина зазоров, мм.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. ПРАВИЛА И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ ГАЗОВ, ИСПОЛЗУЕМЫХ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ¹

1. Содержание кислорода в сетевых водороде и азоте определяется 1 раз в три дня по п. 8 ГОСТ 9293-59 центральной заводской лабораторией.

Вместо предлагаемой в ГОСТ 9293-59 шкалы разрешается пользоваться фотометром типа Пульфриха, фотоэлектрокалориметром или другими равноценными им приборами.

2. Содержание кислорода в очищенных водороде и азоте определяется 1 раз в неделю по методу, указанному в п. 1, центральной заводской лабораторией.

3. Содержание кислорода в азоте, поставляемом в стальных баллонах, определяется поставщиком (сторонней организацией или газовым цехом завода) в соответствии с п. 8 ГОСТ 9293-59 с указанием результатов анализа в этикетке, наклеиваемой на каждый баллон.

4. Содержание влаги в сетевых водороде, азоте, воздухе низкого давления определяется каждую рабочую смену в магистрали газового цеха и 1 раз в сутки в сборочных цехах по методу, изложенному в п. 7 ГОСТ 5583-58, контролером ОТК.

5. Содержание влаги в сетевых водороде, азоте, воздухе определяется ежедневно в местах потребления по п. 7 ГОСТ 5583-58 контролером ОТК.

6. Содержание влаги в воздухе низкого давления определяется 1 раз в две недели по месту потребления цехом-потребителем.

7. Содержание масла и механических примесей в сетевом воздухе контролируется ежедневно на участках перед началом смены по методу, изложенному в приложении 2 цехом-потребителем.

2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ГАЗОВ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ И МАСЛОМ

1. Содержание загрязнений газов определяется путем их отфильтровывания из определенного объема газа на фильтры, последующего измерения привеса фильтра и расчета количества загрязнений в весовых единицах на единицу объема газа ($мг/м^3$).

¹ Разработаны Институтом горного дела им. А. А. Скочинского и проверены в Институте гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР и др.

2. Определение содержания загрязнений проводится в четыре приема:

а) подготовка аппаратуры и фильтров для отбора проб из газа;

б) отбор проб загрязнений на фильтры;

в) определение привеса фильтра после отбора пробы;

г) расчет концентрации загрязнений.

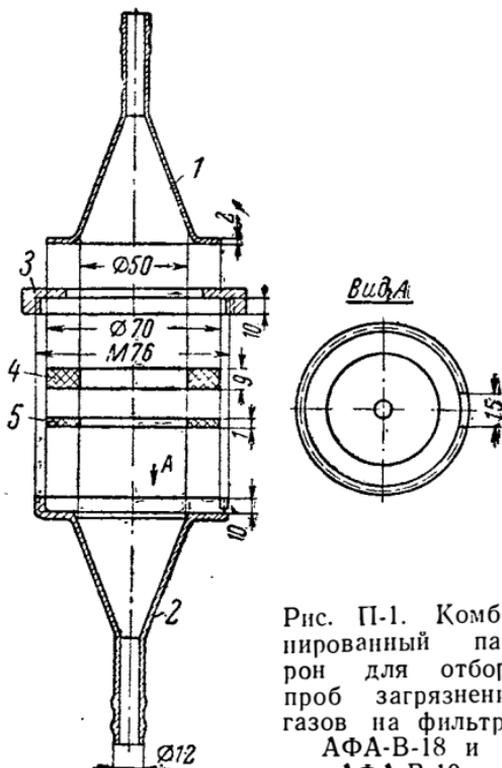


Рис. П-1. Комбинированный патрон для отбора проб загрязнений газов на фильтры АФА-В-18 и АФА-В-10.

1 и 2 — верхняя и нижняя части корпуса патрона (некорродирующий материал);
3 — накидная гайка; 4 и 5 — резиновые прокладки для фильтров; 4 — для АФА-В-18; 5 — для АФА-В-10.

3. Для определения загрязнений газов используются следующие материалы и аппаратура;

а) весы типов АДВ-200 и ВТ-100 или типа ВТ-20;

б) патрон для отбора проб загрязнений на фильтры АФА-В-18 и АФА-В-10 (рис. П-1);

в) ротационный счетчик РС-40;

г) регулятор скорости (кран, всгиль);

д) часы или секундомер;

е) ящик для транспортировки;

ж) экскалатор диаметром 15—25 мм (ГОСТ 6371-52);

з) пинцет анатомический;

и) резиновые трубки;

к) спирт этиловый (для протирки аппаратуры);

л) серная кислота по ГОСТ 2184-59 (для эксикатора);
 м) лабораторный журнал;
 н) фильтры АФА-В-18 (рис. П-2) с площадью рабочей поверхности $18,1 \text{ см}^2$, состоящие из фильтрующей прокладки из ткани ФПП-15 и бумажных защитных колец; края фильтров для удобства обращения спрессовываются; комплекты фильтров упаковываются в бумажную обойму по 10 шт.; каждый фильтр вместе с защитными кольцами в нерабочем состоянии помещается в отдельный пакетик из бумажной кальки;

о) фильтр АФА-В-10 с площадью рабочей поверхности 10 см^2 , состоящий из фильтрующей прокладки и металлической кассеты (рис. П-3), обеспечивающей герметизацию фильтра в патроне; в нерабочем состоянии фильтры хранятся в пакетиках из бумажной кальки; кассеты заряжаются фильтрами в лаборатории.

Для изготовления фильтрующих прокладок используется ткань типа ФПП-15 по ТУ Д-2ГУ-171-58 со стандартным сопротивлением $1,5 \pm 0,2 \text{ мм вод. ст.}$

Фильтры изготавливаются следующим образом. На ткань со стороны, на которой нет марли, укладывают лист кальки и разрезают ее на полоски шириной, равной диаметру фильтра. Из полосок, сложенных в 5—10 раз, вырезают по шаблону (выштамповывают) заготовки фильтров. Края фильтра опрессовывают на приспособлении (рис. П-4), после чего кальку и марлевую прокладку удаляют; фильтры контролируются визуально на просвечивание. Не допуска-

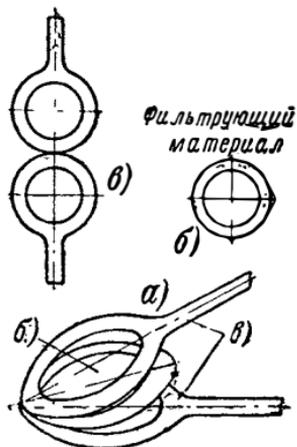


Рис. П-2. Фильтр АФА-В-18.

а — общий вид с полураскрытыми защитными кольцами; б — фильтрующие прокладки; в — защитные кольца.

ются неравномерности фильтрующего слоя, отверстия, проклеенные места и посторонние твердые включения. Каждый готовый фильтр укладывается в пакетик из кальки, на котором проставляется номер партии, дата изготовления и номер фильтра. Хранятся фильтры в сухом помещении при комнатной температуре.

4. Подготовка фильтров к отбору проб. Перед взятием проб в лаборатории проверяют исправность аппаратуры и взвешивают фильтры АФА-В-18 (или АФА-В-10). Перед взвешиванием фильтры необходимо выдерживать в условиях комнатной температуры и влажности в течение 40—60 мин.

Фильтры взвешивают на аналитических весах с точностью 0,1—0,05 мг. Для взвешивания фильтр АФА-В-18 или АФА-В-10

с помощью пинцета следует сложить вчетверо и перенести на середину чашки весов.

Вес каждого фильтра и его порядковый номер записывают в лабораторный журнал. Для учета фильтров АФА-В-18 их порядковые номера проставляются на бумажном защитном кольце; для учета фильтров АФА-В-10 их номера проставляют на пакетиках (на бумажной кальке), в которых они хранятся, а при заряджении кассет заносят в журнал против номера фильтра еще и номер кассеты.

После взвешивания фильтр АФА-В-18 осторожно, за опрессованные края, помещают снова в защитное кольцо, затем укладывают в пакет из кальки и вставляют в обойму.

Фильтр АФА-В-10 помещают в корпус кассеты, сверху накладывают кольцо-прокладку и затягивают гайкой. Собранные кассеты заворачивают в кальку и укладывают в ящик для переноски.

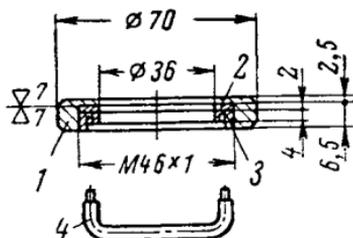


Рис. П-3. Кассеты для закрепления фильтра АФА-В-10.

1 — корпус; 2 — кольцо-прокладка; 3 — зажимная резьбовая втулка; 4 — ключ.

5. На месте взятия пробы присоединяют установку, смонтированную по схеме на рис. П-5 на щитке или в специальном ящике, к отводу газовой магистрали.

В патрон помещают фильтры и затягивают гайкой.

Открывают кран 2 полностью, а затем постепенно кран 3. Объемная скорость фильтрации должна быть не более 100 л/мин (6 м³/ч). Отмечают по ротационному счетчику РС-40 количество газа, прошедшего за время измерения. Количество газа, прошедшего через фильтр, должно быть не менее 1 м³.

Продолжительность взятия пробы зависит от степени загрязнения воздуха, скорости отбора пробы и необходимой навески загрязнений на фильтре.

Минимально необходимая навеска на фильтре — 1 мг при условии изменения температуры от +10 до +25°С и относительной влажности от 30 до 80%. При этом точность определения будет порядка ±10%.

Максимальную навеску рекомендуется брать для фильтров АФА-В-18 не более 50 мг и для фильтров АФА-В-10 — 25 мг.

После окончания взятия пробы патрон с фильтром отключают и вынимают из патрона фильтр с отобранной пробой. Фильтр

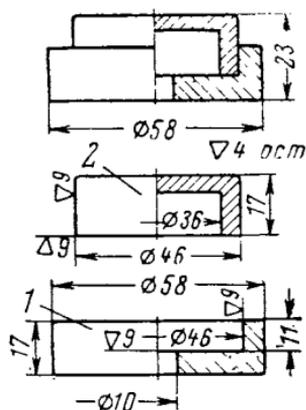


Рис. П-4. Приспособление для опрессовки краев фильтров.

1 — матрица; 2 — пуансон.

АФА-В-18 складывают пополам пылью внутрь, помещают в пакет, в котором он находился до взятия пробы.

При взятии пробы на фильтры АФА-В-10 производят смену кассеты.

Освободившийся патрон готовят для взятия новой пробы.

При отборе проб на каждый фильтр ведут отдельную запись в журнале. Обязательно записывается дата, место и условия взятия проб, номер фильтра и показания ротационного счетчика.

6. Определение привеса фильтра после взятия пробы.

В лаборатории фильтры выдерживают в исходных условиях, складывают пинцетом в 4 раза и взвешивают на тех же весах. Вес фильтра записывают в лабораторный журнал.

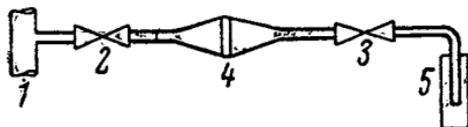


Рис. П-5. Схема соединения приборов для определений содержания загрязнений в газе.

1 — газовая сеть; 2 — отвод с краном и штуцером; 3 — кран; 4 — патрон с фильтром; 5 — ротационный счетчик РС-40.

Если отбор проб происходил в условиях повышенной влажности (около 100%), рекомендуется перед взвешиванием поместить фильтры в эксикатор не менее, чем на 2 ч, или в термостат при 55—60° С на 20—30 мин, а затем 40—60 мин выдержать в условиях комнатной температуры и влажности.

7. Расчет концентрации n ($мг/м^3$) загрязненный газа вычисляется по формуле

$$n = \frac{q_2 - q_1}{v},$$

где q_1 — вес чистого фильтра, мг;

q_2 — вес фильтра с загрязнением, мг;

v — объем пропущенного газа, $м^3$.

3. Основные эксплуатационные показатели установок для очистки водорода, азота, инертных газов от кислорода и паров воды и для осушки воздуха

Характеристики установок	Установки для очистки от кислорода и паров воды					Установка осушки воздуха автоматическая УОВ-30
	водорода, типов			азота и инертных газов, типов		
	ЖК.30.06	ЖК.30.01	ЖК.30.11	ЖК.30.07	ЖК.30.14	
Номинальная производительность, $\text{нм}^3/\text{ч}$	0,3	3	25	0,3	25	30
Содержание примесей в очищенном газе:						
кислорода, не более, % (объемных)	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	—
паров воды, $\text{мг}/\text{м}^3$ (соответствует точке росы — °С)	10 (—60)	20 (—50)	10 (—60)	10 (—60)	10 (—60)	—
Время работы между регенерациями, ч:						
при работе от мокрого газгольдера	24	90	100	35	100	—
при работе на баллонном газе по ГОСТ 3022-61	100	350	400	100	400	—
Потребляемая мощность, квт						
при регенерации	—	6	12^3	—	12^3	—
при очистке	0,8	—	$(17)^4$	0,8	—	—
Габаритные размеры, длина × ширина × высота, мм	0,5	—	5	0,5	6	—
	650 × 300 × 760	1 640 × 560 × 1 500 ¹ 815 × 506 × 1 750 ²	2 185 × 850 × 2 526 ¹ 1 250 × 640 × 1 800 ²	655 × 300 × 750	1 900 × 1 190 × 2 426 ¹ 1 250 × 640 × 1 800 ²	2 840 × 4 340 × 1 250
Ориентировочная цена, тыс. руб.	1,2	4	6	1,5	7,5	3,5

¹ Технологического блока. ² Пульты управления. ³ При работе с одновременной регенерацией. ⁴ Установленная мощность.

4. Влагомеры и газоанализаторы

1. Влагомер автоматический АВЗ-1 для периодических измерений влагосодержания в газах.

Предел измерения:

а) при потоке газа $1000 \text{ см}^3/\text{мин}$ $0-3 \text{ г}/\text{нм}^3$ в диапазонах $0-0,1$; $0-0,05$; $0-0,01$; $0-0,1$; $0-0,5$; $0-1$; $0-2$ и $0-3 \text{ г}/\text{нм}^3$;

б) при потоке газа $50 \text{ см}^3/\text{мин}$ $0-6 \text{ г}/\text{нм}^3$. Погрешность измерений $\pm 5\%$ от верхнего предела шкалы. Температура датчика $0-80^\circ \text{C}$. Входное давление газа на блоке подготовки БП-1 $5-150 \text{ кг}/\text{см}^2$. Габаритные размеры: блок арматуры $275 \times 310 \times 180 \text{ мм}$, блок БП-1 — $265 \times 240 \times 140 \text{ мм}$. Вес блока арматуры 8 кг , блока БП-1 — 6 кг . Ориентировочная цена 1000 руб.

II. Влагомер КИВГ-6 для непрерывного автоматического контроля и регистрации влажности исследуемого газа.

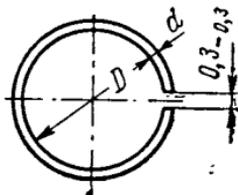
Погрешность измерения $\pm 5\%$ от измеряемой величины. Расход газа $100 \text{ см}^3/\text{мин}$. Габаритные размеры, мм: узел регистрации — $455 \times 305 \times 255$, узел питания — $320 \times 210 \times 170$, датчик — $320 \times 210 \times 170$. Ориентировочная цена 1000 руб.

III. Влагомер ЖК.71.18 для измерения микроконцентраций влажности газов по точке росы с диапазонами измерений: $-20 \div -48^\circ \text{C}$, $-40 \div -60^\circ \text{C}$. Расход газа $30-50 \text{ л}/\text{ч}$, давление $0,2-2 \text{ ат}$. Габариты $270 \times 350 \times 200 \text{ мм}$. Ориентировочная цена 300 руб.

IV—V. Газоанализаторы для определения содержания микроконцентраций кислорода в различных газах типов ГЛ-5108 и ЖК.71.17:

	ГЛ-5108	ЖК.71.17
Шкала в объемных процентах	$0-0,05$; $0-0,01$; $0-0,005$; $0-0,001$;	$0-1 \cdot 10^{-1}$; $0-1 \cdot 10^{-2}$;
Погрешность измерения . . .	$0-0,0005$; $0-0,0001$; $\pm 10\%$ от верхнего предела шкалы	$0-1 \cdot 10^{-3}$; $\pm 10\%$ от показаний
Расход газа, л/мин	$0,4-0,6$	$2,5-3$
Габариты, мм	$630 \times 470 \times 1600$	$490 \times 400 \times 387$
Ориентировочная цена, тыс. руб.	$5,5$	$1,5$

5. Размеры и вес колец из припоя ПСр72В по ТУ ЦМО 3-65. Удельный вес принят равным $9,9 \text{ г}/\text{см}^3$



№ п/п.	D	d	Вес, г	№ п/п.	D	d	Вес, г
1	0,8	0,3	0,0020	5	1,5	0,3	0,0039
2	1,0	0,3	0,0028	6	1,8	0,5	0,0140
3	1,25	0,3	0,0034	7	1,8	0,3	0,0046
4	1,5	0,5	0,0122	8	2,12	0,5	0,0160

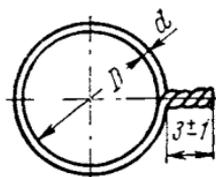
№ п/п.	D	d	Вес, ε	№ п/п.	D	d	Вес, ε
9	2,12	0,3	0,0053	59	11,2	0,5	0,0714
10	2,5	0,5	0,0183	60	11,2	0,3	0,0253
11	2,5	0,3	0,0061	61	11,8	0,8	0,1968
12	3,0	0,5	0,0214	62	11,8	0,5	0,0769
13	3,0	0,3	0,0072	63	11,8	0,3	0,0266
14	3,5	0,5	0,0244	64	12,5	0,8	0,2077
15	3,5	0,3	0,0083	65	12,5	0,5	0,0812
16	4,0	0,8	0,070	66	12,5	0,3	0,0281
17	4,0	0,5	0,0274	67	13,2	0,8	0,2187
18	4,0	0,3	0,0094	68	13,2	0,5	0,0836
19	4,5	0,8	0,0828	69	13,2	0,3	0,0296
20	4,5	0,5	0,0305	70	13,6	0,8	0,2249
21	4,5	0,3	0,0106	71	13,6	0,5	0,0860
22	5,0	0,8	0,0906	72	13,6	0,3	0,0305
23	5,0	0,5	0,0335	73	14,0	0,8	0,2312
24	5,0	0,3	0,0116	74	14,0	0,5	0,0885
25	5,5	0,8	0,0995	75	14,0	0,3	0,0314
26	5,5	0,5	0,0366	76	14,5	0,8	0,2389
27	5,5	0,3	0,0127	77	14,5	0,5	0,0915
28	6,0	0,8	0,1062	78	14,5	0,3	0,0325
29	6,0	0,5	0,0397	79	15,0	0,8	0,2468
30	6,0	0,3	0,0138	80	15,0	0,5	0,0946
31	6,5	0,8	0,0114	81	15,0	0,3	0,0336
32	6,5	0,5	0,0427	82	15,5	0,8	0,2546
33	6,5	0,3	0,0149	83	15,5	0,5	0,0976
34	7,0	0,8	0,1218	84	15,5	0,3	0,0347
35	7,0	0,5	0,0458	85	16,0	0,8	0,2624
36	7,0	0,3	0,0160	86	16,0	0,5	0,1007
37	7,5	0,8	0,1296	87	16,0	0,3	0,0358
38	7,5	0,5	0,0488	88	16,5	0,8	0,2702
39	7,5	0,3	0,0171	89	16,5	0,5	0,1037
40	8,0	0,8	0,1374	90	16,5	0,3	0,0369
41	8,0	0,5	0,0519	91	17,0	0,8	0,2780
42	8,0	0,3	0,0182	92	17,0	0,5	0,1068
43	8,5	0,8	0,1453	93	17,0	0,3	0,0380
44	8,5	0,5	0,0549	94	17,5	0,8	0,2858
45	8,5	0,3	0,0193	95	17,5	0,5	0,1098
46	9,0	0,8	0,1531	96	17,5	0,3	0,0391
47	9,0	0,5	0,0579	97	18,0	0,8	0,2936
48	9,0	0,3	0,0204	98	18,0	0,5	0,1129
49	9,5	0,8	0,1609	99	18,0	0,3	0,0402
50	9,5	0,5	0,0610	100	18,5	0,8	0,3014
51	9,5	0,3	0,0215	101	18,5	0,5	0,1159
52	10,0	0,8	0,1687	102	18,5	0,3	0,0413
53	10,0	0,5	0,0641	103	19,0	0,8	0,3092
54	10,0	0,3	0,0226	104	19,0	0,5	0,1190
55	10,5	0,8	0,1765	105	19,0	0,3	0,0424
56	10,5	0,5	0,0671	106	19,5	0,8	0,3170
57	10,5	0,3	0,0237	107	19,5	0,5	0,1220
58	11,2	0,8	0,1874	108	19,5	0,3	0,0435

№ п/п.	D	d	Вес, e	№ п/п.	D	d	Вес, e
109	20,0	1,0	0,5125	159	31,5	0,5	0,1952
110	20,0	0,8	0,3248	160	32,5	1,0	0,8175
111	20,0	0,5	0,1251	161	32,5	0,8	0,5201
112	20,5	1,0	0,5246	162	32,5	0,5	0,2013
113	20,5	0,8	0,3317	163	33,5	1,0	0,8419
114	20,5	0,5	0,1281	164	33,5	0,8	0,5357
115	21,2	1,0	0,5418	165	33,5	0,5	0,2074
116	21,2	0,8	0,3436	166	34,5	1,0	0,8663
117	21,2	0,5	0,1324	167	34,5	0,8	0,5513
118	21,8	1,0	0,5564	168	34,5	0,5	0,2135
119	21,8	0,8	0,3530	169	35,5	1,0	0,8907
120	21,8	0,5	0,1360	170	35,5	0,8	0,5669
121	22,4	1,0	0,5710	171	35,5	0,5	0,2196
122	22,4	0,8	0,3623	172	36,5	1,0	0,9151
123	22,4	0,5	0,1397	173	36,5	0,8	0,5825
124	23,0	1,0	0,5857	174	36,5	0,5	0,2257
125	23,0	0,8	0,3717	175	37,5	1,0	0,9395
126	23,0	0,5	0,1434	176	37,5	0,8	0,5982
127	23,6	1,0	0,6003	177	37,5	0,5	0,2318
128	23,6	0,8	0,3811	178	38,7	1,0	0,9628
129	23,6	0,5	0,1470	179	38,7	0,8	0,6169
130	24,3	1,0	0,6174	180	38,7	0,5	0,2391
131	24,3	0,8	0,3920	181	40,0	1,0	1,000
132	24,3	0,5	0,1513	182	40,0	0,8	0,6372
133	25,0	1,0	0,6345	183	40,0	0,5	0,2471
134	25,0	0,8	0,4029	184	42,5	1,0	1,0615
135	25,0	0,5	0,1556	185	42,5	0,8	0,6763
136	25,8	1,0	0,6540	186	42,5	0,5	0,2623
137	25,8	0,8	0,4154	187	45,0	1,0	1,0982
138	25,8	0,5	0,1604	188	45,0	0,8	0,7153
139	26,5	1,0	0,6711	189	45,0	0,5	0,2776
140	26,5	0,8	0,4264	190	47,5	1,0	1,1836
141	26,5	0,5	0,1647	191	47,5	0,8	0,7544
142	27,2	1,0	0,6882	192	47,5	0,5	0,2928
143	27,2	0,8	0,4374	193	48,7	1,0	1,2129
144	27,2	0,5	0,1690	194	48,7	0,8	0,7731
145	28,0	1,0	0,7077	195	48,7	0,5	0,3002
146	28,0	0,8	0,4498	196	50,0	1,0	1,2446
147	28,0	0,5	0,1739	197	50,0	0,8	0,7934
148	29,0	1,0	0,7321	198	50,0	0,5	0,3081
149	29,0	0,8	0,4654	199	51,5	1,0	1,2812
150	29,0	0,5	0,1800	200	51,5	0,8	0,8168
151	30,0	1,0	0,7565	201	51,5	0,5	0,3172
152	30,0	0,8	0,4810	202	53,0	1,0	1,3178
153	30,0	0,5	0,1861	203	53,0	0,8	0,8403
154	30,7	1,0	0,7736	204	53,0	0,5	0,3262
155	30,7	0,8	0,4920	205	54,5	1,0	1,3544
156	30,7	0,5	0,1903	206	54,5	0,8	0,8637
157	31,5	1,0	0,7931	207	54,5	0,5	0,3356
158	31,5	0,8	0,5045	208	56,0	1,0	1,3910

№ п/п.	D	d	Вес, ε	№ п/п.	D	d	Вес, ε
209	56,0	0,8	0,8871	259	92,5	1,0	2,2818
210	56,0	0,5	0,3447	260	92,5	0,8	1,4572
211	58,0	1,0	1,4398	261	92,5	0,5	0,5647
212	58,0	0,8	0,9183	262	95,0	1,0	2,3428
213	58,0	0,5	0,3569	263	95,0	0,8	1,4962
214	60,0	1,0	1,4886	264	95,0	0,5	0,5818
215	60,0	0,8	0,9496	265	97,5	1,0	2,4038
216	60,0	0,5	0,3691	266	97,5	0,8	1,5353
217	61,5	1,0	1,5252	267	97,5	0,5	0,5979
218	61,5	0,8	0,9730	268	100	1,0	2,4648
219	61,5	0,5	0,3782	269	100	0,8	1,5743
220	63,0	1,0	1,5619	270	100	0,5	0,6131
221	63,0	0,8	0,9964	271	103	1,0	2,5380
222	63,0	0,5	0,3874	272	103	0,8	1,6212
223	65,0	1,0	1,6107	273	103	0,5	0,6314
224	65,0	0,8	1,0277	274	106	1,0	2,6112
225	65,0	0,5	0,3996	275	106	0,8	1,6680
226	67,0	1,0	1,6595	276	106	0,5	0,6497
227	67,0	0,8	1,0589	277	109	1,0	2,6844
228	67,0	0,5	0,4118	278	109	0,8	1,7149
229	69,0	1,0	1,7083	279	109	0,5	0,6681
230	69,0	0,8	1,0902	280	112	1,0	2,7576
231	69,0	0,5	0,4240	281	112	0,8	1,7617
232	71,0	1,0	1,7571	282	112	0,5	0,6864
233	71,0	0,8	1,1214	283	115	1,0	2,8309
234	71,0	0,5	0,4362	284	115	0,8	1,8086
235	73,0	1,0	1,8059	285	115	0,5	0,7047
236	73,0	0,8	1,1526	286	118	1,0	2,9041
237	73,0	0,5	0,4484	287	118	0,8	1,8554
238	75,0	1,0	1,8547	288	118	0,5	0,7230
239	75,0	0,8	1,1839	289	122	1,0	3,0017
240	75,0	0,5	0,4606	290	122	0,8	1,9179
241	77,5	1,0	1,9157	291	122	0,5	0,7461
242	77,5	0,8	1,2229	292	125	1,0	3,0749
243	77,5	0,5	0,4759	293	125	0,8	1,9647
244	80,0	1,0	1,9667	294	125	0,5	0,7644
245	80,0	0,8	1,2620	295	128	1,0	3,1459
246	80,0	0,5	0,4911	296	128	0,8	2,0116
247	82,5	1,0	2,0377	297	128	0,5	0,7840
248	82,5	0,8	1,3010	298	132	1,0	3,2457
249	82,5	0,5	0,5064	299	132	0,8	2,0612
250	85,0	1,0	2,0987	300	132	0,5	0,8084
251	85,0	0,8	1,3381	301	136	1,0	3,3433
252	85,0	0,5	0,5219	302	136	0,8	2,1366
253	87,5	1,0	2,1597	303	136	0,5	0,8309
254	87,5	0,8	1,3791	304	140	1,0	3,4410
255	87,5	0,5	0,5369	305	140	0,8	2,1983
256	90,0	1,0	2,2207	306	140	0,5	0,8572
257	90,0	0,8	1,4181	307	145	1,0	3,5614
258	90,0	0,5	0,5521	308	145	0,8	2,2771

№ п/п.	D	d	Вес, г	№ п/п.	D	d	Вес, г
309	145	0,5	0,8877	326	175	0,8	2,7457
310	150	1,0	3,6850	327	175	0,5	1,0707
311	150	0,8	2,3552	328	180	1,0	4,3994
312	150	0,5	0,9182	329	180	0,8	2,8218
313	155	1,0	3,8070	330	180	0,5	1,1012
314	155	0,8	2,4333	331	185	1,0	4,5314
315	155	0,5	0,9487	332	185	0,8	2,8997
316	160	1,0	3,9290	333	185	0,5	1,1317
317	160	0,8	2,5114	334	190	1,0	4,6612
318	160	0,5	0,9792	335	190	0,8	2,9800
319	165	1,0	4,0511	336	190	0,5	1,1424
320	165	0,8	2,5885	337	195	1,0	4,7832
321	165	0,5	1,0100	338	195	0,8	3,0581
322	170	1,0	4,1731	339	195	0,5	1,1927
323	170	0,8	2,6676	340	200	1,0	4,9052
324	170	0,5	1,0402	341	200	0,8	3,1362
325	175	1,0	4,2951	342	200	0,5	1,2233

6. Размеры и вес колец с закруткой из
припоя ПСр72В по ТУ ЦМО 3-65. Удельный
вес принят равным $9,9 \text{ г/см}^3$



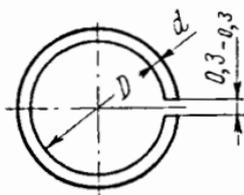
№ п/п.	D	d	Вес, г	№ п/п.	D	d	Вес, г
1	0,8	0,3	0,0062	22	5,0	0,8	0,1206
2	1,0	0,3	0,0070	23	5,0	0,5	0,0451
3	1,25	0,3	0,0076	24	5,0	0,3	0,0158
4	1,5	0,5	0,0238	25	5,5	0,8	0,1295
5	1,5	0,3	0,0081	26	5,5	0,5	0,0482
6	1,8	0,5	0,0256	27	5,5	0,3	0,0169
7	1,8	0,3	0,0088	28	6,0	0,8	0,1362
8	2,12	0,5	0,0276	29	6,0	0,5	0,0513
9	2,12	0,3	0,0095	30	6,0	0,3	0,0180
10	2,5	0,5	0,0299	31	6,5	0,8	0,1414
11	2,5	0,3	0,0104	32	6,5	0,5	0,0543
12	3,0	0,5	0,0330	33	6,5	0,3	0,0191
13	3,0	0,3	0,0114	34	7,0	0,8	0,1518
14	3,5	0,5	0,0360	35	7,0	0,5	0,0574
15	3,5	0,3	0,0126	36	7,0	0,3	0,0202
16	4,0	0,8	0,1000	37	7,5	0,8	0,1596
17	4,0	0,5	0,0390	38	7,5	0,5	0,0604
18	4,0	0,3	0,0136	39	7,5	0,3	0,0213
19	4,5	0,8	0,1128	40	8,0	0,8	0,1674
20	4,5	0,5	0,0421	41	8,0	0,5	0,0635
21	4,5	0,3	0,0146	42	8,0	0,3	0,0224

№ п/п.	D	d	Вес, e	№ п/п.	D	d	Вес, e
43	8,5	0,8	0,1753	93	17,0	0,3	0,0422
44	8,5	0,5	0,0665	94	17,5	0,8	0,3158
45	8,5	0,3	0,0235	95	17,5	0,5	0,1214
46	9,0	0,8	0,1831	96	17,5	0,3	0,0433
47	9,0	0,5	0,0695	97	18,0	0,8	0,3236
48	9,0	0,3	0,0246	98	18,0	0,5	0,1245
49	9,5	0,8	0,1909	99	18,0	0,3	0,0444
50	9,5	0,5	0,0726	100	18,5	0,8	0,3314
51	9,5	0,3	0,0258	101	18,5	0,5	0,1275
52	10,0	0,8	0,1717	102	18,5	0,3	0,0455
53	10,0	0,5	0,0941	103	19,0	0,8	0,3392
54	10,0	0,3	0,0268	104	19,0	0,5	0,1306
55	10,5	0,8	0,2065	105	19,0	0,3	0,0466
56	10,5	0,5	0,0787	106	19,5	0,8	0,3470
57	10,5	0,3	0,0279	107	19,5	0,5	0,1336
58	11,2	0,8	0,1904	108	19,5	0,3	0,0477
59	11,2	0,5	0,0830	109	20,0	1,0	0,5595
60	11,2	0,3	0,0295	110	20,0	0,8	0,3548
61	11,8	0,8	0,2268	111	20,0	0,5	0,1367
62	11,8	0,5	0,0885	112	20,5	1,0	0,5716
63	11,8	0,3	0,0308	113	20,5	0,8	0,3617
64	12,5	0,8	0,2377	114	20,5	0,5	0,1397
65	12,5	0,5	0,0928	115	21,2	1,0	0,5888
66	12,5	0,3	0,0323	116	21,2	0,8	0,3736
67	13,2	0,8	0,2487	117	21,2	0,5	0,1440
68	13,2	0,5	0,0952	118	21,8	1,0	0,6034
69	13,2	0,3	0,0338	119	21,8	0,8	0,3830
70	13,6	0,8	0,2549	120	21,8	0,5	0,1476
71	13,6	0,5	0,0976	121	22,4	1,0	0,6180
72	13,6	0,3	0,0347	122	22,4	0,8	0,3924
73	14,0	0,8	0,2612	123	22,4	0,5	0,1513
74	14,0	0,5	0,1001	124	23,0	1,0	0,6327
75	14,0	0,3	0,0356	125	23,0	0,8	0,4017
76	14,5	0,8	0,2689	126	23,0	0,5	0,1550
77	14,5	0,5	0,1031	127	23,6	1,0	0,6473
78	14,5	0,3	0,0367	128	23,6	0,8	0,4111
79	15,0	0,8	0,2768	129	23,6	0,5	0,1586
80	15,0	0,5	0,1062	130	24,3	1,0	0,6644
81	15,0	0,3	0,0378	131	24,3	0,8	0,4220
82	15,5	0,8	0,2846	132	24,3	0,5	0,1629
83	15,5	0,5	0,1092	133	25,0	1,0	0,6815
84	15,5	0,3	0,0389	134	25,0	0,8	0,4329
85	16,0	0,8	0,2924	135	25,0	0,5	0,1672
86	16,0	0,5	0,1123	136	25,8	1,0	0,7010
87	16,0	0,3	0,0400	137	25,8	0,8	0,4454
88	16,5	0,8	0,3002	138	25,8	0,5	0,1720
89	16,5	0,5	0,1153	139	26,5	1,0	0,7181
90	16,5	0,3	0,0411	140	26,5	0,8	0,4564
91	17,0	0,8	0,3080	141	26,5	0,5	0,1763
92	17,0	0,5	0,1184	142	27,2	1,0	0,7352

№ п/п.	D	d	Вес, ε	№ п/п.	D	d	Вес, ε
143	27,2	0,8	0,4674	193	48,7	1,0	1,2599
144	27,2	0,5	0,1806	194	48,7	0,8	0,8031
145	28,0	1,0	0,7547	195	48,7	0,5	0,3118
146	28,0	0,8	0,4798	196	50,0	1,0	1,2916
147	28,0	0,5	0,1855	197	50,0	0,8	0,8234
148	29,0	1,0	0,7791	198	50,0	0,5	0,3197
149	29,0	0,8	0,4954	199	51,5	1,0	1,3282
150	29,0	0,5	0,1916	200	51,5	0,8	0,8468
151	30,0	1,0	0,8035	201	51,5	0,5	0,3288
152	30,0	0,8	0,5110	202	53,0	1,0	1,3648
153	30,0	0,5	0,1977	203	53,0	0,8	0,8703
154	30,7	1,0	0,8206	204	53,0	0,5	0,3378
155	30,7	0,8	0,5220	205	54,5	1,0	1,4014
156	30,7	0,5	0,2019	206	54,5	0,8	0,8937
157	31,5	1,0	0,8401	207	54,5	0,5	0,3472
158	31,5	0,8	0,5345	208	56,0	1,0	1,4380
159	31,5	0,5	0,2068	209	56,0	0,8	0,9171
160	32,5	1,0	0,8646	210	56,0	0,5	0,3563
161	32,5	0,8	0,5501	211	58,0	1,0	1,4868
162	32,5	0,5	0,2129	212	58,0	0,8	0,9483
163	33,5	1,0	0,8889	213	58,0	0,5	0,3685
164	33,5	0,8	0,5657	214	60,0	1,0	1,5356
165	33,5	0,5	0,2190	215	60,0	0,8	0,9796
166	34,5	1,0	0,9133	216	60,0	0,5	0,3807
167	34,5	0,8	0,5813	217	61,5	1,0	1,5722
168	34,5	0,5	0,2251	218	61,5	0,8	1,0030
169	35,5	1,0	0,9377	219	61,5	0,5	0,3898
170	35,5	0,8	0,5969	220	63,0	1,0	1,6089
171	35,5	0,5	0,2312	221	63,0	0,8	1,0264
172	36,5	1,0	0,9621	222	63,0	0,5	0,3990
173	36,5	0,8	0,6125	223	65,0	1,0	1,6577
174	36,5	0,5	0,2373	224	65,0	0,8	1,0577
175	37,5	1,0	0,9865	225	65,0	0,5	0,4112
176	37,5	0,8	0,6282	226	67,0	1,0	1,7065
177	37,5	0,5	0,2434	227	67,0	0,8	1,0889
178	38,7	1,0	1,0098	228	67,0	0,5	0,4234
179	38,7	0,8	0,6469	229	69,0	1,0	1,7553
180	38,7	0,5	0,2507	230	69,0	0,8	1,1202
181	40,0	1,0	1,0470	231	69,0	0,5	0,4356
182	40,0	0,8	0,6672	232	71,0	1,0	1,8041
183	40,0	0,5	0,2587	233	71,0	0,8	1,1514
184	42,5	1,0	1,1085	234	71,0	0,5	0,4479
185	42,5	0,8	0,7063	235	73,0	1,0	1,8529
186	42,5	0,5	0,2739	236	73,0	0,8	1,1826
187	45,0	1,0	1,1452	237	73,0	0,5	0,4600
188	45,0	0,8	0,7453	238	75,0	1,0	1,9017
189	45,0	0,5	0,2892	239	75,0	0,8	1,2139
190	47,5	1,0	1,2306	240	75,0	0,5	0,4722
191	47,5	0,8	0,7844	241	77,5	1,0	1,9627
192	47,5	0,5	0,3044	242	77,5	0,8	1,2529

№ п/п.	D	d	Вес, з	№ п/п.	D	d	Вес, з
243	77,5	0,5	0,4875	293	125	0,8	1,9947
244	80,0	1,0	2,0137	294	125	0,5	0,7760
245	80,0	0,8	1,2920	295	128	1,0	3,1929
246	80,0	0,5	0,5027	296	128	0,8	2,0416
247	82,5	1,0	2,0847	297	128	0,5	0,7956
248	82,5	0,8	1,3310	298	132	1,0	3,2927
249	82,5	0,5	0,5180	299	132	0,8	2,0912
250	85,0	1,0	2,1457	300	132	0,5	0,8200
251	85,0	0,8	1,3681	301	136	1,0	3,3903
252	85,0	0,5	0,5335	302	136	0,8	2,1666
253	87,5	1,0	2,2067	303	136	0,5	0,8425
254	87,5	0,8	1,4091	304	140	1,0	3,4880
255	87,5	0,5	0,5485	305	140	0,8	2,2283
256	90,0	1,0	2,2677	306	140	0,5	0,8688
257	90,0	0,8	1,4481	307	145	1,0	3,6084
258	90,0	0,5	0,5637	308	145	0,8	2,3071
259	92,5	1,0	2,3288	309	145	0,5	0,8993
260	92,5	0,8	1,4872	310	150	1,0	3,7320
261	92,5	0,5	0,5763	311	150	0,8	2,3852
262	95,0	1,0	2,3898	312	150	0,5	0,9298
263	95,0	0,8	1,5262	313	155	1,0	3,8540
264	95,0	0,5	0,5934	314	155	0,8	2,4633
265	97,5	1,0	2,4508	315	155	0,5	0,9603
266	97,5	0,8	1,4653	316	160	1,0	3,9760
267	97,5	0,5	0,6095	317	160	0,8	2,5414
268	100	1,0	2,5118	318	160	0,5	0,9908
269	100	0,8	1,6043	319	165	1,0	4,0981
270	100	0,5	0,6247	320	165	0,8	2,6185
271	103	1,0	2,5850	321	165	0,5	1,0216
272	103	0,8	1,6512	322	170	1,0	4,2020
273	103	0,5	0,6430	323	170	0,8	2,6976
274	106	1,0	2,6582	324	170	0,5	1,0518
275	106	0,8	1,6980	325	175	1,0	4,3421
276	106	0,5	0,6613	326	175	0,8	2,7757
277	109	1,0	2,7314	327	175	0,5	1,0823
278	109	0,8	1,7449	328	180	1,0	4,4464
279	109	0,5	0,6797	329	180	0,8	2,8518
280	112	1,0	2,8046	330	180	0,5	1,1128
281	112	0,8	1,7917	331	185	1,0	4,5784
282	112	0,5	0,6980	332	185	0,8	2,9297
283	115	1,0	2,8779	333	185	0,5	1,1433
284	115	0,8	1,8386	334	190	1,0	4,7082
285	115	0,5	0,7163	335	190	0,8	3,0100
286	118	1,0	2,9511	336	190	0,5	1,1540
287	118	0,8	1,8854	337	195	1,0	4,8302
288	118	0,5	0,7346	338	195	0,8	3,0881
289	122	1,0	3,0487	339	195	0,5	1,2043
290	122	0,8	1,9479	340	200	1,0	4,9522
291	122	0,5	0,7577	341	200	0,8	3,1662
292	125	1,0	3,1219	342	200	0,5	1,2349

7. Размеры и вес колец из припоя ПСр15 по ГОСТ 8190-56.
Удельный вес принят равным 8,3 г/см³



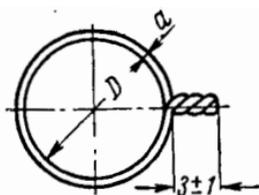
№ п/п.	D	d	Вес, г	№ п/п.	D	d	Вес, г
1	0,8	0,3	0,0015	37	7,5	0,5	0,0409
2	1,0	0,3	0,0024	38	7,5	0,3	0,0144
3	1,25	0,3	0,0028	39	8,0	0,8	0,1152
4	1,5	0,3	0,0033	40	8,0	0,5	0,0434
5	1,8	0,5	0,0117	41	8,0	0,3	0,0153
6	1,8	0,3	0,0038	42	8,5	0,8	0,1218
7	2,12	0,5	0,0134	43	8,5	0,5	0,0463
8	2,12	0,3	0,0045	44	8,5	0,3	0,0162
9	2,5	0,5	0,0153	45	9,0	0,8	0,1284
10	2,5	0,3	0,0052	46	9,0	0,5	0,0486
11	3,0	0,5	0,0179	47	9,0	0,3	0,0174
12	3,0	0,3	0,0061	48	9,5	0,8	0,1349
13	3,5	0,5	0,0205	49	9,5	0,5	0,0512
14	3,5	0,3	0,0070	50	9,5	0,3	0,0180
15	4,0	0,8	0,0628	51	10,0	0,8	0,1414
16	4,0	0,5	0,0230	52	10,0	0,5	0,0537
17	4,0	0,3	0,0079	53	10,0	0,3	0,0189
18	4,5	0,8	0,0694	54	10,5	0,8	0,1480
19	4,5	0,5	0,0256	55	10,5	0,5	0,0563
20	4,5	0,3	0,0088	56	10,5	0,3	0,0198
21	5,0	0,8	0,0759	57	11,2	0,8	0,1571
22	5,0	0,5	0,0281	58	11,2	0,5	0,0598
23	5,0	0,3	0,0097	59	11,2	0,3	0,0212
24	5,5	0,8	0,0834	60	11,8	0,8	0,1650
25	5,5	0,5	0,0307	61	11,8	0,5	0,0644
26	5,5	0,3	0,0168	62	11,8	0,3	0,0223
27	6,0	0,8	0,0890	63	12,5	0,8	0,1741
28	6,0	0,5	0,0032	64	12,5	0,5	0,0680
29	6,0	0,3	0,0116	65	12,5	0,3	0,0236
30	6,5	0,8	0,0956	66	13,2	0,8	0,1833
31	6,5	0,5	0,0358	67	13,2	0,5	0,0701
32	6,5	0,3	0,0125	68	13,2	0,3	0,0248
33	7,0	0,8	0,1021	69	13,6	0,8	0,1885
34	7,0	0,5	0,0383	70	13,6	0,5	0,0721
35	7,0	0,3	0,0134	71	13,6	0,3	0,0256
36	7,5	0,8	0,1086	72	14,0	0,8	0,1938

№ п/п.	D	d	Вес, г	№ п/п.	D	d	Вес, г
73	14,0	0,5	0,0742	120	22,4	1,0	0,4787
74	14,0	0,3	0,0262	121	22,4	0,8	0,3037
75	14,5	0,8	0,2003	122	22,4	0,5	0,1171
76	14,5	0,5	0,0767	123	23,0	1,0	0,4910
77	14,5	0,3	0,0272	124	23,0	0,8	0,3116
78	15,0	0,8	0,2069	125	23,0	0,5	0,1202
79	15,0	0,5	0,0793	126	23,6	1,0	0,5033
80	15,0	0,3	0,0282	127	23,6	0,8	0,3195
81	15,5	0,8	0,2134	128	23,6	0,5	0,1232
82	15,5	0,5	0,0818	129	24,3	1,0	0,5176
83	15,5	0,3	0,0291	130	24,3	0,8	0,3286
84	16,0	0,8	0,2200	131	24,3	0,5	0,1268
85	16,0	0,5	0,0844	132	25,0	1,0	0,5320
86	16,0	0,3	0,0300	133	25,0	0,8	0,3378
87	16,5	0,8	0,2265	134	25,0	0,5	0,1304
88	16,5	0,5	0,0869	135	25,8	1,0	0,5483
89	16,5	0,3	0,0309	136	25,8	0,8	0,3482
90	17,0	0,8	0,2331	137	25,8	0,5	0,1345
91	17,0	0,5	0,0895	138	26,5	1,0	0,5626
92	17,0	0,3	0,0318	139	26,5	0,8	0,3575
93	17,5	0,8	0,2396	140	26,5	0,5	0,1381
94	17,5	0,5	0,0921	141	27,2	1,0	0,5770
95	17,5	0,3	0,0328	142	27,2	0,8	0,3667
96	18,0	0,8	0,2461	143	27,2	0,5	0,1417
97	18,0	0,5	0,0946	144	28,0	1,0	0,5933
98	18,0	0,3	0,0337	145	28,0	0,8	0,3771
99	18,5	0,8	0,2527	146	28,0	0,5	0,1458
100	18,5	0,5	0,0972	147	29,0	1,0	0,6138
101	18,5	0,3	0,0346	148	29,0	0,8	0,3902
102	19,0	0,8	0,2592	149	29,0	0,5	0,1509
103	19,0	0,5	0,0997	150	30,0	1,0	0,6342
104	19,0	0,3	0,0355	151	30,0	0,8	0,4032
105	19,5	0,8	0,2658	152	30,0	0,5	0,1560
106	19,5	0,5	0,1023	153	30,7	1,0	0,6485
107	19,5	0,3	0,0364	154	30,7	0,8	0,4125
108	20,0	1,0	0,4297	155	30,7	0,5	0,1595
109	20,0	0,8	0,2723	156	31,5	1,0	0,6649
110	20,0	0,5	0,1049	157	31,5	0,8	0,4229
111	20,5	1,0	0,4398	158	31,5	0,5	0,1636
112	20,5	0,8	0,2784	159	32,5	1,0	0,6854
113	20,5	0,5	0,1074	160	32,5	0,8	0,4360
114	21,2	1,0	0,4542	161	32,5	0,5	0,1687
115	21,2	0,8	0,2881	162	33,5	1,0	0,7058
116	21,2	0,5	0,1110	163	33,5	0,8	0,4491
117	21,8	1,0	0,4665	164	33,5	0,5	0,1739
118	21,8	0,8	0,2959	165	34,5	1,0	0,7263
119	21,8	0,5	0,1140	166	34,5	0,8	0,4622

№ п/п.	D	d	Вес, ε	№ п/п.	D	d	Вес, ε
167	34,5	0,5	0,1790	212	58,0	0,5	0,2992
168	35,5	1,0	0,7468	213	60,0	1,0	1,2480
169	35,5	0,8	0,4753	214	60,0	0,8	0,7961
170	35,5	0,5	0,1841	215	60,0	0,5	0,3094
171	36,5	1,0	0,7672	216	61,5	1,0	1,2787
172	36,5	0,8	0,4883	217	61,5	0,8	0,8157
173	36,5	0,5	0,1892	218	61,5	0,5	0,3171
174	37,5	1,0	0,7877	219	63,0	1,0	1,3095
175	37,5	0,8	0,5015	220	63,0	0,8	0,8353
176	37,5	0,5	0,1943	221	63,0	0,5	0,3248
177	38,7	1,0	0,8122	222	65,0	1,0	1,3504
178	38,7	0,8	0,5172	223	65,0	0,8	0,8616
179	38,7	0,5	0,2005	224	65,0	0,5	0,3342
180	40,0	1,0	0,8384	225	67,0	1,0	1,3913
181	40,0	0,8	0,5342	226	67,0	0,8	0,8877
182	40,0	0,5	0,2072	227	67,0	0,5	0,3452
183	42,5	1,0	0,8899	228	69,0	1,0	1,4322
184	42,5	0,8	0,5670	229	69,0	0,8	0,9140
185	42,5	0,5	0,2199	230	69,0	0,5	0,3555
186	45,0	1,0	0,9207	231	71,0	1,0	1,4731
187	45,0	0,8	0,5997	232	71,0	0,8	0,9401
188	45,0	0,5	0,2327	233	71,0	0,5	0,3657
189	47,5	1,0	0,9923	234	73,0	1,0	1,5140
190	47,5	0,8	0,6324	235	73,0	0,8	0,9663
191	47,5	0,5	0,2455	236	73,0	0,5	0,3759
192	48,7	1,0	1,0169	237	75,0	1,0	1,5550
193	48,7	0,8	0,6481	238	75,0	0,8	0,9925
194	48,7	0,5	0,2517	239	75,0	0,5	0,3862
195	50,0	1,0	1,0435	240	77,0	1,0	1,6061
196	50,0	0,8	0,6652	241	77,0	0,8	1,0252
197	50,0	0,5	0,2583	242	77,0	0,5	0,3990
198	51,5	1,0	1,0741	243	80,0	1,0	1,6572
199	51,5	0,8	0,6848	244	80,0	0,8	1,0580
200	51,5	0,5	0,2659	245	80,0	0,5	0,4117
201	53,0	1,0	1,1048	246	82,5	1,0	1,7084
202	53,0	0,8	0,7045	247	82,5	0,8	1,0907
203	53,0	0,5	0,2735	248	82,5	0,5	0,4246
204	54,5	1,0	1,1135	249	85,0	1,0	1,7595
205	54,5	0,8	0,7241	250	85,0	0,8	1,1218
206	54,5	0,5	0,2814	251	85,0	0,5	0,4375
207	56,0	1,0	1,1662	252	87,5	1,0	1,8107
208	56,0	0,8	0,7437	253	87,5	0,8	1,1562
209	56,0	0,5	0,2890	254	87,5	0,5	0,4501
210	58,0	1,0	1,2071	255	90,0	1,0	1,8618
211	58,0	0,8	0,7699	256	90,0	0,8	1,1889

№ п/п.	D	d	Вес, e	№ п/п.	D	d	Вес, e
257	90,0	0,5	0,4629	300	136	1,0	2,8034
258	92,5	1,0	1,9130	301	136	0,8	1,7912
259	92,5	0,8	1,2216	302	136	0,5	0,6966
260	92,5	0,5	0,4734	303	140	1,0	2,8849
261	95,0	1,0	1,9642	304	141	0,8	1,8430
262	95,0	0,8	1,2543	305	141	0,5	0,7187
263	95,0	0,5	0,4878	306	145	1,0	2,9858
264	97,5	1,0	2,0153	307	145	0,8	1,9090
265	97,5	0,8	1,2871	308	145	0,5	0,7442
266	97,5	0,5	0,5013	309	150	1,0	3,0895
267	100	1,0	2,0665	310	150	0,8	1,9745
268	100	0,8	1,3198	311	150	0,5	0,7698
269	100	0,5	0,5140	312	155	1,0	3,1918
270	103	1,0	2,1278	313	155	0,8	2,0400
271	103	0,8	1,3591	314	155	0,5	0,7954
272	103	0,5	0,5294	315	160	1,0	3,2940
273	106	1,0	2,1892	316	160	0,8	2,1054
274	106	0,8	1,3984	317	160	0,5	0,8209
275	106	0,5	0,5447	318	165	1,0	3,3964
276	109	1,0	2,2506	319	165	0,8	2,1700
277	109	0,8	1,4377	320	165	0,5	0,8468
278	109	0,5	0,5601	321	170	1,0	3,4987
279	112	1,0	2,3119	322	170	0,8	2,2364
280	112	0,8	1,4769	323	170	0,5	0,8721
281	112	0,5	0,5755	324	175	1,0	3,6010
282	115	1,0	2,3734	325	175	0,8	2,3019
283	115	0,8	1,5162	326	175	0,5	0,8977
284	115	0,5	0,5908	327	180	1,0	3,6884
285	118	1,0	2,4348	328	180	0,8	2,3657
286	118	0,8	1,5555	329	180	0,5	0,9232
287	118	0,5	0,6061	330	185	1,0	3,7991
288	122	1,0	2,5166	331	185	0,8	2,4310
289	122	0,8	1,6079	332	185	0,5	0,9488
290	122	0,5	0,6255	333	190	1,0	3,9079
291	125	1,0	2,5780	334	190	0,8	2,4983
292	125	0,8	1,6471	335	190	0,5	0,9578
293	125	0,5	0,6408	336	195	1,0	4,0102
294	128	1,0	2,6375	337	195	0,8	2,5638
295	128	0,8	1,6864	338	195	0,5	0,9999
296	128	0,5	0,6573	339	200	1,0	4,1125
297	132	1,0	2,7212	340	200	0,8	2,6293
298	132	0,8	1,7280	341	200	0,5	1,0256
299	132	0,5	0,6777				

8. Размеры и вес колец с закруткой из припоя ПСр15 по ГОСТ 8190-56. Удельный вес принят равным $8,3 \text{ г/см}^3$



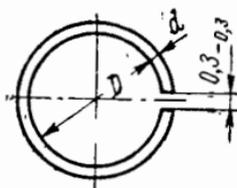
№ п/п.	D	d	Вес, г	№ п/п.	D	d	Вес, г
1	0,8	0,3	0,0050	35	7,0	0,3	0,0169
2	1,0	0,3	0,0059	36	7,5	0,8	0,1336
3	1,25	0,3	0,0063	37	7,5	0,5	0,0507
4	1,5	0,3	0,0068	38	7,5	0,3	0,0179
5	1,8	0,3	0,0073	39	8,0	0,8	0,1402
6	1,8	0,5	0,0215	40	8,0	0,5	0,0532
7	2,12	0,3	0,0080	41	8,0	0,3	0,0188
8	2,12	0,5	0,0232	42	8,5	0,8	0,1468
9	2,5	0,5	0,0250	43	8,5	0,5	0,0561
10	2,5	0,3	0,0087	44	8,5	0,3	0,0197
11	3,0	0,5	0,0277	45	9,0	0,8	0,1534
12	3,0	0,3	0,0096	46	9,0	0,5	0,0584
13	3,5	0,5	0,0303	47	9,0	0,3	0,0209
14	3,5	0,3	0,0105	48	9,5	0,8	0,1599
15	4,0	0,8	0,0878	49	9,5	0,5	0,0610
16	4,0	0,5	0,0328	50	9,5	0,3	0,0215
17	4,0	0,3	0,0114	51	10,0	0,8	0,1664
18	4,5	0,8	0,0792	52	10,0	0,5	0,0635
19	4,5	0,5	0,0354	53	10,0	0,3	0,0224
20	4,5	0,3	0,0123	54	10,5	0,8	0,1730
21	5,0	0,8	0,0857	55	10,5	0,5	0,0661
22	5,0	0,5	0,0379	56	10,5	0,3	0,0233
23	5,0	0,3	0,0132	57	11,2	0,8	0,1821
24	5,5	0,8	0,0932	58	11,2	0,5	0,0696
25	5,5	0,5	0,0405	59	11,2	0,3	0,0247
26	5,5	0,3	0,0142	60	11,8	0,8	0,1900
27	6,0	0,8	0,1140	61	11,8	0,5	0,0742
28	6,0	0,5	0,0418	62	11,8	0,3	0,0258
29	6,0	0,3	0,0151	63	12,5	0,8	0,1991
30	6,5	0,8	0,1206	64	12,5	0,5	0,0778
31	6,5	0,5	0,0456	65	12,5	0,3	0,0271
32	6,5	0,3	0,0160	66	13,2	0,8	0,2083
33	7,0	0,8	0,1271	67	13,2	0,5	0,0799
34	7,0	0,5	0,0481	68	13,2	0,3	0,0288

№ п/п.	D	d	Вес, e	№ п/п.	D	d	Вес, e
69	13,6	0,8	0,2135	114	21,2	1,0	0,4932
70	13,6	0,5	0,0819	115	21,2	0,8	0,3131
71	13,6	0,3	0,0291	116	21,2	0,5	0,1208
72	14,0	0,8	0,2188	117	21,8	1,0	0,5055
73	14,0	0,5	0,0840	118	21,8	0,8	0,3209
74	14,0	0,3	0,0297	119	21,8	0,5	0,1238
75	14,5	0,8	0,2253	120	22,4	1,0	0,5177
76	14,5	0,5	0,0865	121	22,4	0,8	0,3287
77	14,5	0,3	0,0307	122	22,4	0,5	0,1269
78	15,0	0,8	0,2319	123	23,0	1,0	0,5300
79	15,0	0,5	0,0891	124	23,0	0,8	0,3366
80	15,0	0,3	0,0317	125	23,0	0,5	0,1300
81	15,5	0,8	0,2384	126	23,6	1,0	0,5423
82	15,5	0,5	0,0916	127	23,6	0,8	0,3445
83	15,5	0,3	0,0326	128	23,6	0,5	0,1330
84	16,0	0,8	0,2450	129	24,3	1,0	0,5566
85	16,0	0,5	0,0942	130	24,3	0,8	0,3536
86	16,0	0,3	0,0335	131	24,3	0,5	0,1366
87	16,5	0,8	0,2515	132	25,0	1,0	0,5710
88	16,5	0,5	0,0967	133	25,0	0,8	0,3628
89	16,5	0,3	0,0344	134	25,0	0,5	0,1403
90	17,0	0,8	0,2581	135	25,8	1,0	0,5873
91	17,0	0,5	0,0993	136	25,8	0,8	0,3732
92	17,0	0,3	0,0353	137	25,8	0,5	0,1443
93	17,5	0,8	0,2646	138	26,5	1,0	0,6016
94	17,5	0,5	0,1019	139	26,5	0,8	0,3825
95	17,5	0,3	0,0363	140	26,5	0,5	0,1479
96	18,0	0,8	0,2711	141	27,2	1,0	0,6160
97	18,0	0,5	0,1044	142	27,2	0,8	0,3917
98	18,0	0,3	0,0372	143	27,2	0,5	0,1479
99	18,5	0,8	0,2777	144	28,0	1,0	0,6323
100	18,5	0,5	0,1070	145	28,0	0,8	0,4021
101	18,5	0,3	0,0381	146	28,0	0,5	0,1556
102	19,0	0,8	0,2842	147	29,0	1,0	0,6528
103	19,0	0,5	0,1095	148	29,0	0,8	0,4152
104	19,0	0,3	0,0390	149	29,0	0,5	0,1608
105	19,5	0,8	0,2908	150	30,0	1,0	0,6732
106	19,5	0,5	0,1121	151	30,0	0,8	0,4282
107	19,5	0,3	0,0399	152	30,0	0,5	0,1658
108	20,0	1,0	0,4687	153	30,7	1,0	0,6875
109	20,0	0,8	0,2983	154	30,7	0,8	0,4375
110	20,0	0,5	0,1147	155	30,7	0,5	0,1693
111	20,5	1,0	0,4788	156	31,5	1,0	0,7039
112	20,5	0,8	0,3034	157	31,5	0,8	0,4479
113	20,5	0,5	0,1172	158	31,5	0,5	0,1734

№ п/п.	D	d	Вес, z	№ п/п.	D	d	Вес, e
159	32,5	1,0	0,7244	205	54,5	0,8	0,7491
160	32,5	0,8	0,4610	206	54,5	0,5	0,2912
161	32,5	0,5	0,1785	207	56,0	1,0	1,2052
162	33,5	1,0	0,7448	208	56,0	0,8	0,7687
163	33,5	0,8	0,4741	209	56,0	0,5	0,2988
164	33,5	0,5	0,1837	210	58,0	1,0	1,2461
165	34,5	1,0	0,7653	211	58,0	0,8	0,7949
166	34,5	0,8	0,4872	212	58,0	0,5	0,3090
167	34,5	0,5	0,1888	213	60,0	1,0	1,2870
168	35,5	1,0	0,7858	214	60,0	0,8	0,8211
169	35,5	0,8	0,5003	215	60,0	0,5	0,7192
170	35,5	0,5	0,1939	216	61,5	1,0	1,3177
171	36,5	1,0	0,8062	217	61,5	0,8	0,8407
172	36,5	0,8	0,5133	218	61,5	0,5	0,3269
173	36,5	0,5	0,1990	219	63,0	1,0	1,3485
174	37,5	1,0	0,8267	220	63,0	0,8	0,8603
175	37,5	0,8	0,5265	221	63,0	0,5	0,3346
176	37,5	0,5	0,2041	222	65,0	1,0	1,3894
177	38,7	1,0	0,8512	223	65,0	0,8	0,8866
178	38,7	0,8	0,5422	224	65,0	0,5	0,3440
179	38,7	0,5	0,2103	225	67,0	1,0	1,4303
180	40,0	1,0	0,8774	226	67,0	0,8	0,9127
181	40,0	0,8	0,5592	227	67,0	0,5	0,3550
182	40,0	0,5	0,2170	228	69,0	1,0	1,4712
183	42,5	1,0	0,9289	229	69,0	0,8	0,9390
184	42,5	0,8	0,5920	230	69,0	0,5	0,3653
185	42,5	0,5	0,2297	231	71,0	1,0	1,5121
186	45,0	1,0	0,9597	232	71,0	0,8	0,9651
187	45,0	0,8	0,6247	233	71,0	0,5	0,3755
188	45,0	0,5	0,2425	234	73,0	1,0	1,5530
189	47,5	1,0	1,0313	235	73,0	0,8	0,9913
190	47,5	0,8	0,6574	236	73,0	0,5	0,3857
191	47,5	0,5	0,2543	237	75,0	1,0	1,5940
192	48,7	1,0	1,0559	238	75,0	0,8	1,0175
193	48,7	0,8	0,6731	239	75,0	0,5	0,3960
194	48,7	0,5	0,2615	240	77,5	1,0	1,6451
195	50,0	1,0	1,0825	241	77,5	0,8	1,0502
196	50,0	0,8	0,6902	242	77,5	0,5	0,4088
197	50,0	0,5	0,2681	243	80,0	1,0	1,6962
198	51,5	1,0	1,1131	244	80,0	0,8	1,0830
199	51,5	0,8	0,7098	245	80,0	0,5	0,4215
200	51,5	0,5	0,2757	246	82,5	1,0	1,7474
201	53,0	1,0	1,1438	247	82,5	0,8	1,1157
202	53,0	0,8	0,7295	248	82,5	0,5	0,4344
203	53,0	0,5	0,2833	249	85,0	1,0	1,7985
204	54,5	1,0	1,1525	250	85,0	0,8	1,1468

№ п/п.	D	d	Вес, e	№ п/п.	D	d	Вес, e
251	85,0	0,5	0,4473	297	132	1,0	2,7602
252	87,5	1,0	1,8497	298	132	0,8	1,7530
253	87,5	0,8	1,1812	299	132	0,5	0,6875
254	87,5	0,5	0,4599	300	136	1,0	2,8424
255	90,0	1,0	1,9008	301	136	0,8	1,8162
256	90,0	0,8	1,2139	302	136	0,5	0,7064
257	90,0	0,5	0,4727	303	140	1,0	2,9239
258	92,5	1,0	1,9520	304	140	0,8	1,8680
259	92,5	0,8	1,2466	305	140	0,5	0,7285
260	92,5	0,5	0,4832	306	145	1,0	3,0248
261	95,0	1,0	2,0032	307	145	0,8	1,9340
262	95,0	0,8	1,2793	308	145	0,5	0,7340
263	95,0	0,5	0,4976	309	150	1,0	3,1285
264	97,5	1,0	2,0543	310	150	0,8	1,9995
265	97,5	0,8	1,3121	311	150	0,5	0,7796
266	97,5	0,5	0,5111	312	155	1,0	3,2308
267	100	1,0	2,1055	313	155	0,8	2,0650
268	100	0,8	1,3448	314	155	0,5	0,8052
269	100	0,5	0,5238	315	160	1,0	3,3330
270	103	1,0	2,1668	316	160	0,8	2,1304
271	103	0,8	1,3841	317	160	0,5	0,8307
272	103	0,5	0,5392	318	165	1,0	3,4354
273	106	1,0	2,2282	319	165	0,8	2,1950
274	106	0,8	1,4234	320	165	0,5	0,8566
275	106	0,5	0,5545	321	170	1,0	3,5377
276	109	1,0	2,2896	322	170	0,8	2,2614
277	109	0,8	1,4627	323	170	0,5	0,8819
278	109	0,5	0,5699	324	175	1,0	3,6400
279	112	1,0	2,3509	325	175	0,8	2,3269
280	112	0,8	1,5019	326	175	0,5	0,9075
281	112	0,5	0,5853	327	180	1,0	3,7274
282	115	1,0	2,4124	328	180	0,8	2,3907
283	115	0,8	1,5412	329	180	0,5	0,9330
284	115	0,5	0,6007	330	185	1,0	3,8381
285	118	1,0	2,4738	331	185	0,8	2,4560
286	118	0,8	1,5805	332	185	0,5	0,9586
287	118	0,5	0,6159	333	190	1,0	3,9464
288	122	1,0	2,5556	334	190	0,8	2,5233
289	122	0,8	1,6329	335	190	0,5	0,9676
290	122	0,5	0,6353	336	195	1,0	4,0492
291	125	1,0	2,6170	337	195	0,8	2,5888
292	125	0,8	1,4721	338	195	0,5	1,0097
293	125	0,5	0,6506	339	200	1,0	4,1516
294	128	1,0	2,6765	340	200	0,8	2,6543
295	128	0,8	1,7114	341	200	0,5	1,0354
296	128	0,5	0,6671				

9. Размеры и вес колец припоя из меди вакуумной плавки марки МВ по ТУ 2-63. Удельный вес принят равным 8,9 г/см³



№ п/п	D	d	Вес, г	№ п/п	D	d	Вес, г
1	0,8	0,3	0,002	40	8,0	0,8	0,111
2	1,0	0,3	0,002	41	8,0	0,5	0,044
3	1,25	0,3	0,002	42	8,0	0,3	0,016
4	1,5	0,5	0,008	43	8,5	0,8	0,119
5	1,5	0,3	0,003	44	8,5	0,5	0,047
6	1,8	0,5	0,010	45	8,5	0,3	0,017
7	1,8	0,3	0,004	46	9,0	0,8	0,126
8	2,12	0,5	0,012	47	9,0	0,5	0,049
9	2,12	0,3	0,004	48	9,0	0,3	0,018
10	2,5	0,5	0,014	49	9,5	0,8	0,133
11	2,5	0,3	0,005	50	9,5	0,5	0,052
12	3,0	0,5	0,016	51	9,5	0,3	0,019
13	3,0	0,3	0,006	52	10,0	0,8	0,140
14	3,5	0,5	0,009	53	10,0	0,5	0,055
15	3,5	0,3	0,007	54	10,0	0,3	0,020
16	4,0	0,8	0,056	55	10,5	0,8	0,147
17	4,0	0,5	0,022	56	10,5	0,5	0,058
18	4,0	0,3	0,008	57	10,5	0,3	0,021
19	4,5	0,8	0,063	58	11,2	0,8	0,157
20	4,5	0,5	0,025	59	11,2	0,5	0,061
21	4,5	0,3	0,009	60	11,2	0,3	0,022
22	5,0	0,8	0,070	61	11,8	0,8	0,166
23	5,0	0,5	0,027	62	11,8	0,5	0,065
24	5,0	0,3	0,010	63	11,8	0,3	0,023
25	5,5	0,8	0,077	64	12,5	0,8	0,176
26	5,5	0,5	0,030	65	12,5	0,5	0,069
27	5,5	0,3	0,011	66	12,5	0,3	0,025
28	6,0	0,8	0,084	67	13,2	0,8	0,185
29	6,0	0,5	0,033	68	13,2	0,5	0,072
30	6,0	0,3	0,012	69	13,2	0,3	0,026
31	6,5	0,8	0,091	70	13,6	0,8	0,191
32	6,5	0,5	0,036	71	13,6	0,5	0,075
33	6,5	0,3	0,013	72	13,6	0,3	0,027
34	7,0	0,8	0,098	73	14,0	0,8	0,197
35	7,0	0,5	0,038	74	14,0	0,5	0,077
36	7,0	0,3	0,014	75	14,0	0,3	0,028
37	7,5	0,8	0,105	76	14,5	0,8	0,204
38	7,5	0,5	0,041	77	14,5	0,5	0,080
39	7,5	0,3	0,015	78	14,5	0,3	0,029

№ п/п.	D	d	Вес, e	№ п/п.	D	d	Вес, e
79	15,0	0,8	0,211	129	23,6	0,5	0,129
80	15,0	0,5	0,082	130	24,3	1,0	0,533
81	15,0	0,3	0,030	131	24,3	0,8	0,341
82	15,5	0,8	0,218	132	24,3	0,5	0,133
83	15,5	0,5	0,085	133	25,0	1,0	0,549
84	15,5	0,3	0,031	134	25,0	0,8	0,351
85	16,0	0,8	0,225	135	25,0	0,5	0,137
86	16,0	0,5	0,088	136	25,8	1,0	0,566
87	16,0	0,3	0,032	137	25,8	0,8	0,362
88	16,5	0,8	0,232	138	25,8	0,5	0,141
89	16,5	0,5	0,090	139	26,5	1,0	0,581
90	16,5	0,3	0,033	140	26,5	0,8	0,372
91	17,0	0,8	0,239	141	26,5	0,5	0,145
92	17,0	0,5	0,093	142	27,2	1,0	0,597
93	17,0	0,3	0,034	143	27,2	0,8	0,382
94	17,5	0,8	0,246	144	27,2	0,5	0,149
95	17,5	0,5	0,096	145	28,0	1,0	0,614
96	17,5	0,3	0,035	146	28,0	0,8	0,393
97	18,0	0,8	0,253	147	28,0	0,5	0,154
98	18,0	0,5	0,099	148	29,0	1,0	0,636
99	18,0	0,3	0,036	149	29,0	0,8	0,407
100	18,5	0,8	0,260	150	29,0	0,5	0,159
101	18,5	0,5	0,101	151	30,0	1,0	0,658
102	18,5	0,3	0,037	152	30,0	0,8	0,421
103	19,0	0,8	0,267	153	30,0	0,5	0,165
104	19,0	0,5	0,104	154	30,7	1,0	0,674
105	19,0	0,3	0,038	155	30,7	0,8	0,431
106	19,5	0,8	0,274	156	30,7	0,5	0,168
107	19,5	0,5	0,107	157	31,5	1,0	0,691
108	19,5	0,3	0,039	158	31,5	0,8	0,442
109	20,0	1,0	0,439	159	31,5	0,5	0,173
110	20,0	0,8	0,281	160	32,5	1,0	0,713
111	20,0	0,5	0,110	161	32,5	0,8	0,456
112	20,5	1,0	0,450	162	32,5	0,5	0,178
113	20,5	0,8	0,288	163	33,5	1,0	0,735
114	20,5	0,5	0,112	164	33,5	0,8	0,470
115	21,2	1,0	0,465	165	33,5	0,5	0,184
116	21,2	0,8	0,298	166	34,5	1,0	0,757
117	21,2	0,5	0,116	167	34,5	0,8	0,484
118	21,8	1,0	0,478	168	34,5	0,5	0,189
119	21,8	0,8	0,306	169	35,5	1,0	0,779
120	21,8	0,5	0,120	170	35,5	0,8	0,498
121	22,4	1,0	0,491	171	35,5	0,5	0,195
122	22,4	0,8	0,314	172	36,5	1,0	0,801
123	22,4	0,5	0,123	173	36,5	0,8	0,512
124	23,0	1,0	0,505	174	36,5	0,5	0,200
125	23,0	0,8	0,323	175	37,5	1,0	0,823
126	23,0	0,5	0,126	176	37,5	0,8	0,527
127	23,6	1,0	0,518	177	37,5	0,5	0,206
128	23,6	0,8	0,331	178	38,7	1,0	0,849

№ п/п.	<i>D</i>	<i>d</i>	Вес, <i>e</i>	№ п/п.	<i>D</i>	<i>d</i>	Вес, <i>z</i>
179	38,7	0,8	0,543	221	63,0	0,8	0,885
180	38,7	0,5	0,212	222	63,0	0,5	0,345
181	40,0	1,0	0,878	223	65,0	1,0	1,426
182	40,0	0,8	0,562	224	65,0	0,8	0,913
183	40,0	0,5	0,219	225	65,0	0,5	0,356
184	42,5	1,0	0,932	226	67,0	1,0	1,470
185	42,5	0,8	0,597	227	67,0	0,8	0,941
186	42,5	0,5	0,233	228	67,0	0,5	0,367
187	45,0	1,0	0,987	229	69,0	1,0	1,514
188	45,0	0,8	0,632	230	69,0	0,8	0,969
189	45,0	0,5	0,248	231	69,0	0,5	0,378
190	47,5	1,0	1,042	232	71,0	1,0	1,558
191	47,5	0,8	0,667	233	71,0	0,8	0,997
192	47,5	0,5	0,260	234	71,0	0,5	0,389
193	48,7	1,0	1,068	235	73,0	1,0	1,602
194	48,7	0,8	0,684	236	73,0	0,8	1,025
195	48,7	0,5	0,267	237	73,0	0,5	0,400
196	50,0	1,0	1,097	238	75,0	1,0	1,646
197	50,0	0,8	0,702	239	75,0	0,8	1,053
198	50,0	0,5	0,274	240	75,0	0,5	0,411
199	51,5	1,0	1,130	241	77,5	1,0	1,700
200	51,5	0,8	0,723	242	77,5	0,8	1,088
201	51,5	0,5	0,282	243	77,5	0,5	0,425
202	53,0	1,0	1,163	244	80,0	1,0	1,755
203	53,0	0,8	0,744	245	80,0	0,8	1,123
204	53,0	0,5	0,291	246	80,0	0,5	0,439
205	54,5	1,0	1,196	247	82,5	1,0	1,810
206	54,5	0,8	0,765	248	82,5	0,8	1,158
207	54,5	0,5	0,299	249	82,5	0,5	0,452
208	56,0	1,0	1,229	250	85,0	1,0	1,865
209	56,0	0,8	0,786	251	85,0	0,8	1,193
210	56,0	0,5	0,307	252	85,0	0,5	0,466
211	58,0	1,0	1,273	253	87,5	1,0	1,920
212	58,0	0,8	0,814	254	87,5	0,8	1,229
213	58,0	0,5	0,318	255	87,5	0,5	0,480
214	60,0	1,0	1,316	256	90,0	1,0	1,975
215	60,0	0,8	0,842	257	90,0	0,8	1,264
216	60,0	0,5	0,329	258	90,0	0,5	0,494
217	61,5	1,0	1,349	259	92,5	1,0	2,029
218	61,5	0,8	0,863	260	92,5	0,8	1,299
219	61,5	0,5	0,337	261	92,5	0,5	0,507
220	63,0	1,0	1,382	262	95,0	1,0	2,084

№ п/п.	D	d	Вес. e	№ п/п.	D	d	Вес. e
263	95,0	0,8	1,334	303	136	0,5	0,746
264	95,0	0,5	0,521	304	140	1,0	3,072
265	97,5	1,0	2,139	305	140	0,8	1,966
266	97,5	0,8	1,369	306	140	0,5	0,768
267	97,5	0,5	0,535	307	145	1,0	3,181
268	100	1,0	2,194	308	145	0,8	2,036
269	100	0,8	1,404	309	145	0,5	0,795
270	100	0,5	0,548	310	150	1,0	3,291
271	103	1,0	2,260	311	150	0,8	2,106
272	103	0,8	1,446	312	150	0,5	0,823
273	103	0,5	0,565	313	155	1,0	3,400
274	106	1,0	2,326	314	155	0,8	2,176
275	106	0,8	1,488	315	155	0,5	0,850
276	106	0,5	0,581	316	160	1,0	3,510
277	109	1,0	2,391	317	160	0,8	2,246
278	109	0,8	1,530	318	160	0,5	0,877
279	109	0,5	0,598	319	165	1,0	3,620
280	112	1,0	2,457	320	165	0,8	2,317
281	112	0,8	1,572	321	165	0,5	0,905
282	112	0,5	0,614	322	170	1,0	3,730
283	115	1,0	2,523	323	170	0,8	2,387
284	115	0,8	0,615	324	170	0,5	0,932
285	115	0,5	0,631	325	175	1,0	3,840
286	118	1,0	2,589	326	175	0,8	2,457
287	118	0,8	1,657	327	175	0,5	0,960
288	118	0,5	0,647	328	180	1,0	3,949
289	122	1,0	2,677	329	180	0,8	2,527
290	122	0,8	1,713	330	180	0,5	0,987
291	122	0,5	0,669	331	180	1,0	4,059
292	125	1,0	2,743	332	185	0,8	2,597
293	125	0,8	1,755	333	185	0,5	1,015
294	125	0,5	0,686	334	185	1,0	4,169
295	128	1,0	2,808	335	190	0,8	2,668
296	128	0,8	1,797	336	190	0,5	1,042
297	128	0,5	0,702	337	190	1,0	4,278
298	132	1,0	2,896	338	195	0,8	2,738
299	132	0,8	1,853	339	195	0,5	1,069
300	132	0,5	0,724	340	195	1,0	4,388
301	136	1,0	2,984	341	200	0,8	2,808
302	136	0,8	1,909	342	200	0,5	1,097

10. Предельные отклонения гладких цилиндрических паяных соединений

Материал деталей: отверстия — сплав 29НЖ, вала — сталь Э

Припой — медь

Оптимальный зазор при температуре

Температура пайки — 1 100°С

пайки 0,02 — 0,10 мм

Среда — водород

Номинальный диаметр соед. динения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО. мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	-0,0024	A _{2a}	+0,014	От 1 до 3	-0,017	-0,090	Ш ₃
6	-0,0049		+0,018	Св. 3 до 6	-0,025	-0,080	
10	-0,008		+0,022	" 6 " 10	-0,035	-0,085	
18	-0,015		+0,027	" 10 " 18	-0,030	-0,070	
30	-0,025		+0,033	" 18 " 30	-0,040	-0,080	
40	-0,033	A _{2a}	+0,039	" 30 " 50	-0,050	-0,100	
50	-0,041						
60	-0,049	A _{2a}	+0,046	" 50 " 70	-0,065	-0,105	Л
70	-0,057			" 70 " 80	-0,095	-0,120	
80	-0,066						
90	-0,074	A _{2a}	+0,054	" 80 " 90	-0,080	-0,125	Л
100	-0,082			" 90 " 100	-0,100	-0,125	
110	-0,090			" 100 " 120	-0,120	-0,140	
120	-0,099						
130	-0,107	A _{2a}	+0,063	" 120 " 140	-0,130	-0,155	
140	-0,115			" 140 " 160	-0,150	-0,170	
150	-0,124			" 160 " 170	-0,160	-0,180	
160	-0,132			" 170 " 180	-0,170	-0,190	
170	-0,140						
180	-0,148						

Приложение 10

Материал деталей: отверстия—сталь Э, вала—сплав 29НК

Припой — медь

Оптимальный зазор при температуре

Температура пайки — 1 100° С

пайки 0,02 — 0,10 мм

Среда—водород

Номинальный диаметр со-единения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска	
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм			
					ВО	НО		
3	+0,002	A _{2a}	+0,014	От 1 до 3	-0,017	-0,060	Хз Сз	
6	+0,005		+0,018	Св. 3 до 6	-0,017	-0,065		
10	+0,008		+0,022	„ 6 „ 10	-0,015	-0,055		
18	+0,015		+0,027	„ 10 „ 18	0	-0,035		
30	+0,023		+0,033	„ 18 „ 30	0	-0,045		
40	+0,033		A _{2a}	+0,039	„ 30 „ 50	0	-0,025	C _{2a}
50	+0,041			+0,046	„ 50 „ 70	+0,032	+0,002	H _{2a}
60	+0,049				„ 70 „ 80	+0,041	+0,011	T _{2a}
70	+0,057				+0,054	„ 80 „ 100	+0,058	+0,023
80	+0,066		„ 100 „ 120	+0,070		+0,045		
90	+0,074	+0,063	„ 120 „ 130	+0,085		+0,058		
100	+0,082							
110	+0,090							
120	+0,099							
130	+0,107							

Приложение 10

Материал деталей: отверстия — сплав 29НК, вала — медь МВ, МБ

Припой — ПЗл35М

Оптимальный зазор при температуре

Температура пайки — 1 020° С

пайки 0,02 — 0,15 мм

Среда — водород

Номинальный диаметр со-единения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	-0,027	-	+0,020	От 1 до 3	-0,007	-0,120	Л ₄ Л ₄
6	-0,054		+0,025	Св. 3 до 6	-0,080	-0,160	
10	-0,090		+0,030	„ 6 „ 10	-0,100	-0,200	
18	-0,163		+0,035	„ 10 „ 18	-0,180	-0,280	

Номинальный диаметр соединения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
30	-0,272	A ₃	+0,045	Св. 18 до 30	-0,290	-0,380	
40	-0,363		+0,050	30 " 40	-0,380	-0,460	
50	-0,457			40 " 50	-0,480	-0,560	
60	-0,544		+0,060	50 " 60	-0,560	-0,630	
70	-0,635			60 " 70	-0,660	-0,730	
80	-0,726			70 " 80	-0,750	-0,820	
90	-0,817		+0,070	80 " 90	-0,840	-0,900	
100	-0,907			90 " 100	-0,930	-0,990	
110	-0,998			100 " 110	-1,020	-1,080	
120	-1,088			110 " 120	-1,110	-1,170	
130	-1,178		+0,080	120 " 130	-1,200	-1,250	
140	-1,271			130 " 140	-1,300	-1,340	
150	-1,361	140 " 150		-1,380	-1,430		
160	-1,452	150 " 160		-1,470	-1,520		
170	-1,543	160 " 170		-1,560	-1,610		
180	-1,635	170 " 180		-1,660	-1,700		
190	-1,725	+0,090	180 " 190	-1,740	-1,780		
200	-1,815		190 " 200	-1,830	-1,870		
210	-1,905		200 " 210	-1,920	-1,960		
220	-1,993		210 " 220	-2,010	-2,050		
230	-2,083		220 " 230	-2,100	-2,140		
240	-2,179		230 " 240	-2,200	-2,240		
250	-2,266		240 " 250	-2,290	-2,330		

Материал деталей: отверстия — медь, вала — сплав 29НК

Припой — ПЗл35М

Оптимальный зазор при температуре

Температура пайки — 1020° С

пайки 0,02 — 0,15 мм

Среда — водород

Номинальный диаметр соединения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	+0,027	A ₃	+0,020	От 1 до 3	0	-0,040	C _{3a}
6	+0,054		+0,025	Св. 3 до 6			
10	+0,090		+0,030	" 6 " 10	0	-0,030	C ₃
18	+0,163		+0,035	" 10 " 18	+0,080	+0,045	ПрЗз

Материал деталей: отверстия — сталь Э, вала — медь

Припой — ПЗл35М

Оптимальный зазор при температуре

Температура пайки — 1 020° С

пайки 0,02— 0,15 мм

Среда — водород

Номинальный диаметр со-единения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	-0,024	A ₃	+0,020	От 1 до 3	-0,060	-0,120	Л ₄
6	-0,048		+0,025	Св. 3 до 6	-0,080	-0,160	
10	-0,080		+0,030	" 6 " 10	-0,100	-0,200	
18	-0,143		+0,035	" 10 " 18	-0,160	-0,240	
30	-0,238		+0,045	" 18 " 30	-0,280	-0,350	
40	-0,318		+0,050	" 30 " 50	-0,340	-0,420	
50	-0,398				-0,420	-0,500	
60	-0,478		+0,060	" 50 " 80	-0,500	-0,560	
70	-0,557				-0,580	-0,650	
80	-0,637				-0,660	-0,730	
90	-0,717	+0,070	" 80 " 120	-0,740	-0,800		
100	-0,796			-0,820	-0,880		
110	-0,875			-0,900	-0,950		
120	-0,955			-0,980	-1,030		
130	-1,035	+0,080	" 120 " 180	-1,060	-1,100		
140	-1,115			-1,140	-1,180		
150	-1,195			-1,210	-1,260		
160	-1,275			-1,290	-1,350		
170	-1,355			-1,380	-1,420		
180	-1,435			-1,460	-1,500		
190	-1,515	+0,090	" 180 " 250	-1,540	-1,580		
200	-1,592			-1,610	-1,650		
210	-1,672			-1,690	-1,730		
220	-1,752			-1,770	-1,810		
230	-1,832			-1,850	-1,890		
240	-1,910			-1,930	-1,970		
250	-1,990			-2,010	-2,050		

Материал деталей: отверстия — медь, вала — сталь Э

Припой — ПЗл35М Оптимальный зазор при температуре
 Температура пайки — 1 020° С пайки 0,02 — 0,15 мм
 Среда — водород

Номинальный диаметр со-единения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	+0,024	A ₃	+0,020	От 1 до 3	0	-0,060	C ₄
6	+0,048		+0,025	Св. 3 до 6	0	-0,080	
10	+0,080		+0,030	„ 6 „ 10	0	-0,030	C ₃
18	+0,143		+0,035	„ 10 „ 18	+0,115	+0,022	

Материал деталей: отверстия — сплав 29НК, вала — медь

Припой — ПЗп75СрМ Оптимальный зазор при температуре
 Температура пайки — 920° С пайки 0,02 — 0,08 мм
 Среда — водород

Номинальный диаметр со-единения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы, диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	-0,026	A ₃	+0,020	От 1 до 3	-0,030	-0,090	X ₄
6	-0,056		+0,025	Св. 3 до 6	-0,080	-0,120	
10	-0,086		+0,030	„ 6 „ 10	-0,100	-0,140	
18	-0,156		+0,035	„ 10 „ 18	-0,170	-0,200	
30	-0,259		+0,045	„ 18 „ 30	-0,280	-0,300	
40	-0,345		+0,050	„ 30 „ 40	-0,360	-0,380	

Материал деталей: отверстия — медь, вала — сплав 29НК

Припой — ПЗл75СрМ

Оптимальный зазор при температуре пайки 0,02 — 0,08 мм

Температура пайки — 920° С

Среда — водород

Номинальный диаметр соединения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	+0,026	A _{2a}	+0,014	От 1 до 3	0	-0,040	C _{3a}
6	+0,052		+0,018	Св. 3 до 6	0	-0,012	C _{2a}
9	+0,086		+0,022	„ 6 „ 10	+0,065	+0,035	Pr13

Материал деталей: отверстия — сталь Э, вала — медь

Припой ПЗл75СрМ

Оптимальный зазор при температуре пайки 0,02 — 0,10 мм

Температура пайки — 920° С

Среда — водород

Номинальный диаметр соединения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	-0,021	A _{2a}	+0,014	От 1 до 3	-0,030	-0,090	X ₄
6	-0,042		+0,018	Св. 3 до 6	-0,080	-0,120	
10	-0,070		+0,022	„ 6 „ 10	-0,100	-0,150	
18	-0,126		+0,027	„ 10 „ 18	-0,120	-0,180	
30	-0,210		+0,033	„ 18 „ 30	-0,230	-0,280	
40	-0,280		+0,039	„ 30 „ 40	-0,300	-0,340	
50	-0,350			„ 40 „ 50	-0,370	-0,410	
60	-0,420		+0,046	„ 50 „ 60	-0,440	-0,470	
70	-0,490			„ 60 „ 70	-0,510	-0,540	
80	-0,560			„ 70 „ 80	-0,580	-0,610	
90	-0,630	+0,054	„ 80 „ 90	-0,650	-0,680		
100	-0,700		„ 90 „ 100	-0,720	-0,750		
110	-0,770		„ 100 „ 110	-0,790	-0,820		
120	-0,840		„ 110 „ 120	-0,860	-0,890		

Приложение 10

Материал деталей: отверстия — медь, вала — сталь Э

Припой — ПЗл75СрМ

Оптимальный зазор при температуре

Температура пайки — 920° С

пайки 0,02 — 0,10 мм

Среда — водород

Номинальный диаметр соединения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	+0,021	A _{2a}	+0,014	От 1 до 3	0	-0,040	C _{3a}
6	+0,042		+0,018	Св. 3 до 6	0	-0,025	
10	+0,070		+0,022	" 6 " 10	+0,039	-0,005	Pr2з
18	+0,126		+0,027	" 10 " 18	+0,080	-0,045	

Приложение 10

Материал деталей: отверстия — сплав 29НК, вала — медь МВ, МБ

Припой — ПСр52П20

Оптимальный зазор при температуре

Температура пайки — 920° С

пайки 0,01 — 0,08 мм

Среда — водород

Номинальный диаметр соединения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	-0,026	A _{2a}	+0,014	От 1 до 3	-0,030	-0,090	X ₄
6	-0,052		+0,018	Св. 3 до 6	-0,080	-0,120	
10	-0,086		+0,022	" 6 " 10	-0,100	-0,150	
18	-0,155		+0,027	" 10 " 18	-0,160	-0,210	
30	-0,258		+0,033	" 18 " 30	-0,270	-0,300	
40	-0,346		+0,039	" 30 " 40	-0,360	-0,390	
50	-0,432			" 40 " 50	-0,440	-0,470	
60	-0,518		+0,046	" 50 " 60	-0,530	-0,550	
70	-0,605			" 60 " 70	-0,620	-0,640	
80	-0,690			" 70 " 80	-0,700	-0,720	
90	-0,775	" 80 " 90		-0,780	-0,800		
100	-0,864	+0,054	" 90 " 100	-0,870	-0,890		
110	-0,950		" 100 " 110	-0,960	-0,980		
120	-1,035		" 110 " 120	-1,040	-1,060		

Материал деталей: отверстия — медь МВ МБ, вала — сплав 29НК

Припой — ПС52П20
 Температура пайки — 920° С
 Среда — водород

Оптимальный зазор при температуре пайки 0,01 — 0,08 мм

Номинальный диаметр соединения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	+0,026	A _{3a}	+0,014	От 1 до 3	0	-0,040	C _{3a}
6	+0,052		+0,018	Св. 3 до 6	0	-0,048	C _{3a}
10	+0,086		+0,022	„ 6 „ 10	+0,070	+0,040	Pr2з

Приложение 1

Материал деталей: отверстия — медь МВ, МБ, вала — сплав 29НК

Припой — ПСр72В
 Температура пайки — 800° С
 Среда — водород

Оптимальный зазор при температуре пайки 0,02 — 0,08 мм

Номинальный диаметр соединения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	+0,024	A _{2a}	+0,014	От 1 до 3	0	-0,040	C _{3a}
6	+0,048		+0,018	Св. 3 до 6	0	-0,012	C _{2a}
10	+0,080		+0,022	„ 6 „ 10	+0,065	+0,035	Pr3з
18	+0,145		+0,027	„ 10 „ 18	+0,115	+0,080	Pr3з

Материал деталей: отверстия — сплав 29НК, вала — медь МВ, МБ

Припой — ПСр72В

Оптимальный зазор при температуре

Температура пайки — 800° С

пайки 0,02 — 0,08 мм

Среда — водород

Номинальный диаметр соединения, мм	Тепловое изменение зазора, мм	Для отверстия		Интервалы диаметров, мм	Для вала		Обозначение поля допуска
		Обозначение поля допуска	Допускаемое ВО, мм (НО=0)		Допускаемые отклонения, мм		
					ВО	НО	
3	-0,024	Λ _{2a}	+0,014	От 1 до 3	-0,030	-0,090	Х ₄
6	-0,048		+0,018	Св. 3 до 6	-0,080	-0,120	
10	-0,080		+0,022	" 6 " 10	-0,100	-0,150	
18	-0,145		+0,027	" 10 " 18	-0,160	-0,200	
30	-0,241		+0,033	" 18 " 30	-0,260	-0,290	
40	-0,322	Λ _{2a}	+0,039	" 30 " 40	-0,340	-0,370	
50	-0,402		" 40 " 50	-0,420	-0,450		
60	-0,482	Λ _{2a}	+0,046	" 50 " 60	-0,490	-0,520	
70	-0,563			" 60 " 70	-0,570	-0,600	
80	-0,643			" 70 " 80	-0,650	-0,680	

11. Установки и шкафы для хранения деталей в вакууме или защитной атмосфере, в осушенном воздухе и для герметизации тары

Установки для хранения деталей в вакууме типов:

	И.058.008	И.079.0001	И.079.0002
Число камер, шт.	2	4	9
Размер камер, мм			
длина	699	699	655
ширина	500	500	200
высота	300	300	200
Разрежение в камерах, мм рт. ст.	1·10 ⁻¹	1·10 ⁻¹ —5·10 ⁻²	3·10 ⁻²
Габаритные размеры установок, мм:			
длина	1 090	1 090	995
ширина × высота	830 × 1 565	1 560 × 1 565	1 080 × 1 870
Цена, тыс. руб.	0,65	1,31	1,54

Шкаф ИО99.0001 для хранения деталей в углекислом газе, азоте или сухом очищенном воздухе. Шкаф сохраняет герметичность при давлении газа внутри шкафа до 200 мм вод. ст. Рабочий объем — 0,5 м³. Габариты 700×580×1655 мм. Ориентировочная цена 1 000 руб.

Установка ИО58.007 для герметизации деталей в вакууме. Используется для герметизации стеклянной тары, куда помещены детали или полуфабрикаты. Время герметизации не более 10 мин. Одновременно герметизируется одна тара. Вакуум в герметизированной таре — 6·10⁻¹ мм рт. ст. Габариты 850×730×1 054 мм. Ориентировочная цена 450 руб.

12. Основные характеристики водородных и вакуумных электрических печей для пайки электровакуумных приборов

Тип печи	Мощность, потребляе- мая, кВт	Максималь- ная темпера- тура, °С	Защитная среда или вакуум, мм рт. ст.	Размеры рабочего пространства, мм		Габаритные размеры, мм			Число рабо- чих камер	Рабочий цикл, ч	Ориентиро- вочная цена, тыс. руб.	Примечания
				Диаметр	Высота	Длина	Ширина	Высота				
<i>Колпачковые печи</i>												
И.059.005	250	1 200	H ₂	740	1 400	3 300	2 400	$\frac{4\ 270}{1\ 900}$	1	3÷4	10,2	1,3
ЦЭП-370	225	1 200	H ₂	300	1 200				1			
И.059.004	140	1 200	H ₂	480	800				1			
А.560.06	140	1 200	H ₂	400	650							
И.059.007	100	1 200	H ₂ ·5·10 ⁻⁵	470	800	$\frac{2\ 000}{1\ 000}$	$\frac{2\ 000}{700}$	$\frac{2\ 600}{1\ 900}$	1		10	1,3
И.057.0003 (И.059.010)	80	2 500	5·10 ⁻⁵	150	500	$\frac{2\ 500}{700}$	$\frac{1\ 000}{925}$	$\frac{3\ 500}{1\ 900}$			12	
И.059.008	40	1 200	H ₂ ·5·10 ⁻⁵	250	800	$\frac{1\ 500}{1\ 000}$	$\frac{1\ 000}{735}$	$\frac{3\ 500}{2\ 000}$	1	1	8	
И.059.009	40	1 700	H ₂ ·8·10 ⁻⁴	250	400	$\frac{1\ 500}{1\ 000}$	$\frac{1\ 000}{735}$	$\frac{2\ 600}{2\ 000}$	1	1	8	
СКБ-7001А	40	1 200	H ₂	200	350				1			
А.560.13	25	1 250	H ₂	220	300				2			

Тип печи	Мощность, потребляемая, кВт	Максимальная температура, °С	Защитная среда или вакуум, мм рт. ст.	Размеры рабочего пространства, мм		Габаритные размеры, мм			Число рабочих камер	Рабочий цикл, ч	Ориентировочная, тыс. руб.	Примечания
				Диаметр	Высота	Длина	Ширина	Высота				
ЦЭП-273	25	1 100	$1 \cdot 10^{-5}$	280	300	2 200	2 510	1 900	2			
А.560-02	12	1 200	H ₂	140	180				2			
Ю.057.0008	10	1 200	$5 \cdot 10^{-5}$	200	300	1 530	830	2 100	1		8	2
						490	600	1 610				
И.059.014	5	1 300	H ₂	130	180	1 660	520	2 000	2	1,5	4,9	4
И.059.015	5	1 300	H ₂	130	180	745	620	1 480	1	1,5	3	
И.059.017	5	1 300	$5 \cdot 10^{-5}$	130	180	1 980	1 870	1 810	2	1,5	14,5	5
<i>Конвейерные печи</i>												
И.059.012	70	1 200	$5 \cdot 10^{-5}$	150	150	11 500	1 200	1 600	—			6
И.059.006	60	1 200	H ₂	200	200	5 560	1 980	3 500	—	10*	25	8
И.059.013	35	1 200	H ₂	150	150	5 000	960	2 200	—		6	7
						850	500	1 800				

Примечания. 1. Числа под чертой в графе габаритных размеров — размеры пульта управления.

2. С программным регулятором.

3. Перепад температур по высоте не более 70° С.

4. Ускоренное охлаждение, автоматическое управление температурой, выдержкой и отключением.

5. Автоматическое управление по вакууму и температуре.

6. Шлюзовая, непрерывного действия производительность 3—20 изделий в 1 ч.

7. Ускоренное принудительное охлаждение, роторные затворы, непрерывного действия.

8. Конвейерная на 100 подвесок в смену.

* Время разогрева.

13. Эквивалентное по объему число колец припоя из проволоки другого диаметра

Расчетный диаметр проволоки припоя, мм	Диаметр проволоки, мм															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8
	Число колец припоя															
2,0	400	100	44,5	25	16	11,1	8,2	6,3	5,0	4,0	2,8	2,4	2,0	1,8	1,6	1,2
1,9	361	90	40	22,5	14,4	10	7,4	5,7	4,5	3,6	2,5	2,1	1,8	1,6	1,4	1,1
1,8	324	81	36	20,2	13	9,0	6,6	5,1	4,0	3,3	2,3	2,0	1,7	1,5	1,3	1,1
1,7	289	72,4	32	18	11,5	8	5,9	4,5	3,5	2,9	2	1,7	1,5	1,3	1,1	
1,6	256	64	28,5	16	10	7,1	5,2	4,0	3,2	2,6	1,8	1,5	1,3	1,1		
1,5	225	56	25	14	9	6,3	4,6	3,5	2,8	2,3	1,6	1,3	1,2			
1,4	196	49	21,8	12,2	7,9	5,5	4,0	3,1	2,4	2,0	1,4	1,2				
1,3	169	42	18,8	10,6	6,8	4,7	3,5	2,7	2,1	1,7	1,2					
1,2	144	36	16	9	5,8	4,0	2,9	2,3	1,8	1,5						
1,1	121	30	13,5	7,5	4,8	3,4	2,5	1,9	1,5	1,2						
1,0	100	25	11,1	6,3	4,0	2,8	2,0	1,6	1,2							
0,9	81	20	9	5,0	3,2	2,2	1,7	1,3								
0,8	64	16	7,1	4,0	2,6	1,8	1,3									
0,7	49	12,4	5,5	3,1	2,0	1,4										
0,6	36	9,0	4,0	2,3	1,5											
0,5	25	6,3	2,8	1,6												
0,4	16	4,0	1,8													
0,3	9	2,3														
0,2	4,0															

ЛИТЕРАТУРА

Балицкий А. В., Технология изготовления вакуумной аппаратуры, Госэнергоиздат, 1959.

Богословский С. Д. и Сердюк С. В., Скоростная капиллярная пайка стальных изделий токами высокой частоты, Машгиз, 1949.

Брукер Х. Р., Битсон Е. В., Пайка в промышленности, Оборонгиз, 1957.

Вологдин В. В., Пайка при индукционном нагреве, Машгиз, 1957.

Гладков А. С., Подвигина О. П., Чернов О. В., Пайка деталей электровакуумных приборов, М., «Энергия», 1967.

Есенберлин Р. Е., Пайка металлов в печах с газовой средой, Машгиз, 1962.

Имшенник К. П. и Бухман Н. А., Технология пайки твердосплавного инструмента, Машгиз, 1954.

Калинина З. М., Дефекты легированных сталей, Metallurgizdat, 1960.

Ковалевский Р. Е., Чекмарев А. А., Оснастка для высокотемпературной пайки, сб. № 1 «Пайка металлов в производстве и перспективы ее развития» изд. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1962.

Ковалевский Р. Е., Показаньева Р. С., Метод исследования и оценки пористости паяных швов, сб. № 2 «Пайка в машиностроении», изд. МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1967.

Коль В., Технология материалов для электровакуумных приборов, Госэнергоиздат, 1957.

Кунин Л. Л., Поверхностные явления в металлах, Metallurgizdat, 1955.

Куликов Ф. В. и Лехциер И. Р., Твердая пайка, Госэнергоиздат, 1959.

Лакедемонский А. В., Хряпин В. Е., Паяние и припой, Metallurgizdat, 1958.

Лакедемонский А. В., Хряпин В. Е., Справочник паяльщика, Машгиз, 1959.

Лашко Н. В., Лашко-Авакян С. В., Пайка металлов, Машгиз, 1959.

Лебединский М. А., Технология электровакуумного производства, Госэнергоиздат, 1961.

Лоцманов С. Н., Петрунин И. Е., Пайка металлов, изд-во «Машиностроение», 1966.

Любимов М. Л., Спаи металла со стеклом, Госэнергоиздат, 1957.

Руководство по пайке металлов, перевод с англ., под ред. С. Н. Лоцманова, Оборонгиз, 1960.

Фролов В. В., Явления смачивания металлических поверхностей расплавленными металлами. Защита металлов от коррозии и образования накипи, Сборник статей № 24, МВТУ им. Баумана, Машгиз, 1953.

Черепнин Н. В., Вакуумные свойства материалов для электронных приборов, изд-во «Советское радио», 1966.

Эспе В., Технология электровакуумных материалов, перевод с нем., под ред. Р. А. Нилендера и А. А. Котляра, Госэнергоиздат, 1960, т. I.

Энциклопедический справочник машиностроения, том 3, Машгиз, 1947.

Александрова А. Т. и др., Технологическое оборудование электровакуумного производства, Госэнергоиздат, 1952, гл. 15.

Баббат Г. И., Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение, изд-во «Энергия», 1965.

Славинский М. П., Физико-химические свойства элементов, Metallurgizdat, 1952.

Ахенбах М., Оценка рентгеновских снимков, Экспресс-информация «Сварка», ВИНТИ, 1966, № 3, реф. 17.

Рабодзей Н. В., Астрин В. А., Кузмичева Н. В., Вопросы развития рентгено-телевизионной микроскопии непрозрачных объектов, «Труды конференций по электронной технике», 1966, вып. 2, МЭП.

Кеел И. Г., Испытание качества паяных соединений без разрушения, Экспресс-информация «Сварка», ВИНТИ, 1963, № 34, реф. 142.

By E. V. Beatson, B. Sc. (Eng) M. I. E. E., M. Inst. W., Brazing in Controlled Atmospheres and in Vacuo, British Welding Journal, April, 1958, p. 137—143.

Colbus I., Grundsätzliche Fragen zum Lötten und zu den Lötverbindungen, Konstruktion, 1955, № 7, Heft 11, S. 419—430.

Rollason E. C., M. Sc., Ph. D., F. I. M., F. Inst. W., British Welding Journal, March, 1958, p. 89—104.

Herrschaft D. C., The Evolution of Ductile High—Temperature Brazing Alloys, Metal Progress, September, 1961, p. 97—100.

Weber H. M., How to Braze Stainless Steel, September, 1956, № 10, p. 94—102.

Schatz G., Die metallurgischen Vorgänge zwischen Hartlot und Grundwerkstoffen und Folgerungen für die Lötgerechte Konstruktion, Schweißen und Schneiden, 1957, Heft 12, S. 522—530.

Alexander M., Haufmann, Precision Furnace Brazing, American Machinist, (Metallworking Manufacturing), Special Report, July, 10, 1961, № 508.

Blanchet B., Etude du comportement des metaux d'apport de brasage au moyln d'une eprouvette a jeu variable, Soudage et Techniques connexes, mai—juin, 1961, p. 199—210.

Dumon P., Etude metallurgique d'assemblages brases en vue d'obtenir l'etancheite au vide a 500°C, Soudage et Techniques Connexes, 1963, vol. 17, № 11, 12, p. 426—438.

Gibula A., The Soundness of High—temperature Brazed Joints in Heat-resisting Alloys, British Welding Journal, May, 1958, p. 185—201.

Тэдзука Кэйдзо, Есоуу Гиндзюцу, Weld Techn., 1964, 12, № 9, 13—19 (японск.).

Тэдзука Кэйдзо, Онибаба Йосими. Исследование влияния зазоров на образование пустот при пайке, Есэцу Гаккайси, J. Japan Weld. Soc., 1964, 33, № 9, 826 (японск.).

McM aster K., Finding Malfunctions before they Happen, Electronics, 1964, November, 16

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Введение	4
Глава первая. Пайка и ее особенности в производстве электровакуумных приборов	6
1-1. Виды пайки	6
1-2. Особенности пайки в производстве электровакуумных приборов	7
Глава вторая. Основные физико-химические процессы, происходящие при пайке	10
2-1. Основные стадии процесса пайки	10
2-2. Смачивание поверхности твердых металлов припоем	11
2-3. Растекаемость припоя на металлической поверхности	15
2-4. Образование паяного шва	26
2-5. Влияние газов и вакуума на процессы пайки и качество паяного шва	31
Глава третья. Припой	36
3-1. Основные группы припоев	36
3-2. Виды припоев	44
Глава четвертая. Основные соображения по конструированию паяных узлов	46
4-1. Особенности конструкции паяных узлов электровакуумных приборов	46
4-2. Вакуумная плотность металлов	62
4-3. Типовые элементы конструкций вакуумноплотных оболочек	75
4-4. Требования вакуумной плотности в чертежах и соответствующие схемы контроля	82
4-5. Посадки, обеспечивающие вакуумноплотные спаи	87
4-6. Покрyтия соединяемых материалов	97
4-7. Типовые конструкции соединений	101
4-8. Определение расхода припоя	101
Глава пятая. Оснастка для пайки	108
5-1. Основные требования к оснастке для пайки и правила ее конструирования	109
5-2. Классификация и типовые примеры конструкций оснастки	111
5-3. Материалы для оснастки	127
	207

Глава шестая. Подготовка деталей и припоя к пайке, их хранение и сборка узлов	130
Глава седьмая. Способы нагрева и применяемое оборудование	133
7-1. Пайка с нагревом излучением	134
7-2. Токовая пайка (пайка джоулевым теплом)	141
7-3. Пайка с индукционным нагревом	143
Глава восьмая. Виды брака паяных соединений и их контроль	151
8-1. Виды брака паяных соединений	151
А. Внешний брак	151
Б. Дефекты сплошности паяного шва	154
8-2. Контроль паяных соединений	156
8-3. Методика исследования качества паяных швов	162
<i>Приложения</i>	
1. Правила и методы испытания газов, используемых для технологических целей	166
2. Метод определения содержания загрязнений газов твердыми частицами и маслом	166
3. Основные эксплуатационные показатели установок для очистки водорода, азота, инертных газов от кислорода и паров воды и для осушки воздуха	171
4. Влагомеры и газоанализаторы	172
5. Размеры и вес колец из припоя ПСр72Б по ТУ ЦМО 3-65. Удельный вес принят равным 9,9 г/см ³	172
6. Размеры и вес колец с закруткой из припоя ПСр72В по ТУ ЦМО 3-65. Удельный вес принят равным 9,9 г/см ³	176
7. Размеры и вес колец из припоя ПСр15 по ГОСТ 8190-56. Удельный вес принят равным 8,3 г/см ³	180
8. Размеры и вес колец с закруткой из припоя ПСр15 по ГОСТ 8190-56. Удельный вес принят равным 8,3 г/см ³	184
9. Размеры и вес колец припоя из меди вакуумной плавки марки МВ по ТУ 2-63. Удельный вес принят равным 8,9 г/см ³	188
10. Предельные отклонения гладких цилиндрических паяных соединений	192
11. Установки и шкафы для хранения деталей в вакууме или защитной атмосфере, в осушенном воздухе и для герметизации тары	200
12. Основные характеристики водородных и вакуумных электрических печей для пайки электровакуумных приборов	201
13. Эквивалентное по объему число колец припоя из проволоки другого диаметра	203
14. Приспособление для пайки многоканального образца и чертеж для обработки средней части образца	204
Литература	205

