

А. В. Балицкий

**ТЕХНОЛОГИЯ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ВАКУУМНОЙ
АППАРАТУРЫ**



10

1820

А. В. БАЛИЦКИЙ

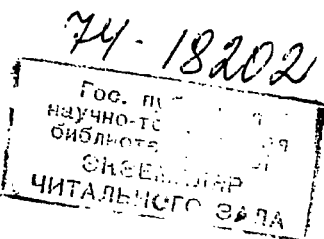
ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАКУУМНОЙ АППАРАТУРЫ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1974

6ПЗ
Б 20
УДК 621.385.002



04
27424

Балицкий А. В.

Б 20 Технология изготовления вакуумной аппаратуры.
Изд. 3-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1974.

312 с. с ил.

В книге описаны наиболее употребительные в вакуумной технике поделочные и уплотняющие материалы и даны сведения по их газопроницаемости и газовыделению в вакууме.

Указаны условия получения сварных и паяных швов для высокого и сверхвысокого вакуума. Приведена рецептура некоторых флюсов.

Разобраны различные типы вакуумных уплотнений и приведены некоторые справочные данные по ним. Кратко описаны основные методы испытаний на герметичность.

Книга предназначена для квалифицированных рабочих, мастеров, технологов, работающих в различных отраслях промышленности и сталкивающихся с изготовлением и эксплуатацией высоковакуумных установок.

Б 30407-408 272-74
051(01)-74

6ПЗ

© Издательство «Энергия», 1974 г.

АНДРЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ БАЛИЦКИЙ

**Технология изготовления
вакуумной аппаратуры**

Редактор *В. Я. Плисковский*

Редактор издательства *В. А. Абрамов*

Переплет художника *Е. В. Никитина*

Художественный редактор *Д. И. Чернышев*

Технический редактор *Н. А. Галанчева*

Корректор *Г. Г. Желтова*

Сдано в набор 27/VII 1973 г. Подписано к печати 5/IV 1974 г.

Т-08439 Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2

Усл. печ. л. 16,38 Уч.-изд. л. 18,01

Тираж 7 000 экз. Зак. 308 Цена 1 р. 05 коп.

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТРЕТЬЕМУ ИЗДАНИЮ

За годы, истекшие со дня выхода в свет второго издания, было внесено много нового в область вакуумной техники, в которой работает автор книги. В нашей стране очень мало публикаций по вопросам высоковакуумного и сверхвысоковакуумного уплотнения разъемных соединений. Публикации в других странах вовсе не освещают наших отечественных достижений, хотя и известных за рубежом по патентам, выданным на них в ряде капиталистических стран.

Это обстоятельство заставило автора в третье издание внести описание и разбор основных конструкций уплотнений, разработанных в СССР.

В книге по возможности исправлены ошибки и пробелы, которыми явно страдало второе издание. Книга предназначается главным образом в помощь технологам, мастерам и квалифицированным рабочим-машиностроителям, которым приходится сталкиваться с изготовлением, ремонтом, наладкой и эксплуатацией высоковакуумных систем.

В книге довольно много места уделено описанию простых технологических приемов изготовления вакуумных установок, поскольку до сих пор нередко приходится осуществлять их в цехах и мастерских иного профиля.

Главы 12 и 13, описывающие металлические уплотнения, написаны автором совместно с инженером Л. А. Филатовским, много внесшим в отечественные разработки вакуумных уплотнений.

Автор приносит глубокую благодарность всем товарищам, своей критикой и помощью содействовавшим улучшению книги, а также научному редактору издания канд. техн. наук В. Я. Плисковскому.

Автор

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВАКУУМНОЙ АППАРАТУРЕ

1-1. ВВЕДЕНИЕ

Современные вакуумные системы чрезвычайно разнообразны как по назначению и конструктивным формам, так и по своим размерам: различного вида и специализации вакуумные камеры, вакуумные печи, чрезвычайно разнообразные по размерам, назначению и

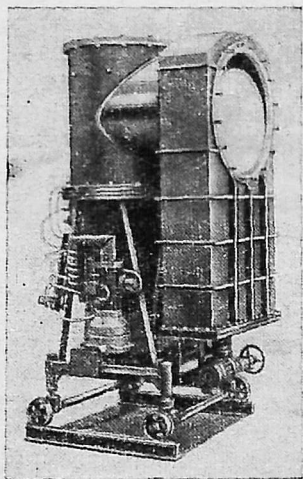


Рис. 1-1. Паромасляный диффузионный вакуумный агрегат ВА-20-1.

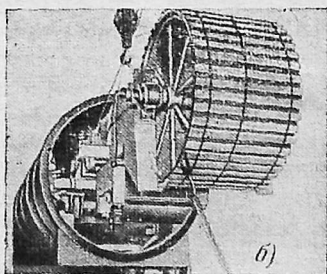
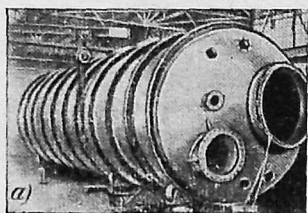


Рис. 1-2. Вакуумная сушильная установка.

a — вакуумная камера; *б* — установка конвейера в камеру.

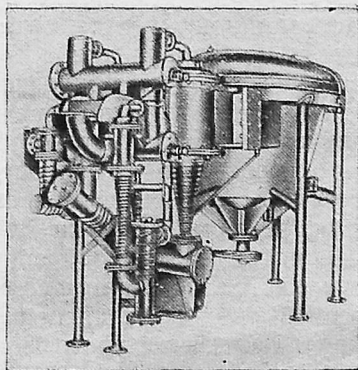


Рис. 1-3. Крупная промышленная установка центробежного типа для молекулярной дистилляции.

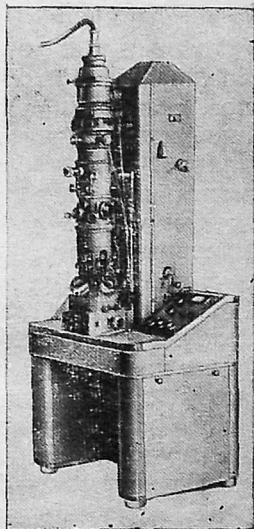


Рис. 1-4. Электронный микроскоп.



Рис. 1-5. Вакуумный химический реактор из стеклопластика, футерованный плотным полиэтиленом.

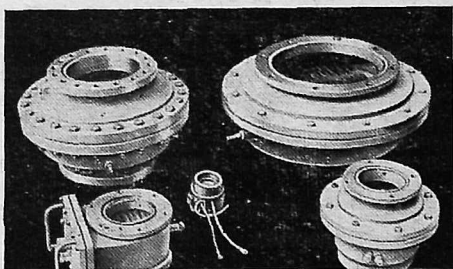


Рис. 1-6. Электротермические вакуумные ловушки.

конструкций перёгонные и дистилляционные установки, установки для напыления металла, установки для обезвоживания, вакуумные системы электронных микроскопов, установки и автоматические линии для изготовления радиоламп и электронно-лучевых трубок, установки для изучения термоядерных процессов, ускорители элементарных частиц, высоковакуумные насосы для всех этих и многих других установок, вентили, ловушки для масляных и ртутных паров. Несмотря на разнообразие систем, в них есть одна общая и главнейшая особенность: внутри установки должно быть низкое давление воздуха или каких-либо других газов, причем часто, чем ниже давление газа внутри установки, тем лучше установка. Эта общая особенность всех вакуумных установок и является фактором, определяющим технологию их изготовления.

На рис. 1-1—1-6 показаны вакуумные установки, взятые для примера из разных областей отечественной и зарубежной техники.

1-2. ОСТАТОЧНОЕ ДАВЛЕНИЕ

Самая совершенная вакуумная система не может обеспечить внутри откачанного объема абсолютной пустоты. В подавляющем большинстве случаев, встречающихся во всех производствах и лабораториях, стремление получить ее было бы совершенно излишним. Однако не безразлично для всех, кто на практике сталкивается с вакуумной техникой, какое количество газа или смеси газов остается в каждой единице объема данного аппарата после его откачки (вакуумирования). Количеством остаточного давления в единице объема определяется степень разреженности (вакуума) в данном объеме и то, как будут протекать в нем различные физические явления и технологические процессы.

Технологи привыкли представлять себе давление как определенную, эффективно действующую силу, приходящуюся на единицу площади поверхности тела. В вакуумной технике приходится иметь дело с такими остаточными давлениями, которые реально представить себе нелегко.

Если нормальное атмосферное давление равно 760 мм рт. ст. и, например, на днище установки диаметром в 1 000 мм это составит усилие 7,85 тс, то при давлении в 1 мм рт. ст. на то же днище будет действовать сила, равная лишь 10 кгс, а при вакууме, достигшем 10^{-6} мм рт. ст., эта сила составит всего 0,0000103 кгс.

1-3. НИЗКИЙ, СРЕДНИЙ, ВЫСОКИЙ И СВЕРХВЫСОКИЙ ВАКУУМ

Естественно, что в условиях, когда на днище установки, например, диаметром в 1 м от внутреннего давления газов приходится общее усилие в одну сотую грамма, давление газа следует рассматривать с несколько иных точек зрения.

Согласно ГОСТ 5197-70 различаются четыре состояния разреженного газа.

Низкий вакуум — область давлений выше 100 н/м^2 , чему соответствуют давления выше 1 мм рт. ст. , при которых средняя длина свободного пути частиц во много раз меньше линейного размера, существенного для рассматриваемого процесса, $\lambda/d \ll 1$.

Средний вакуум — область давлений от 100 до 10^{-1} н/м^2 , чему соответствуют давления от 1 до $7,5 \cdot 10^{-4} \text{ мм рт. ст.}$, при которых средняя длина свободного пути частиц соизмерима с линейным размером, существенным для рассматриваемого процесса, $\lambda/d \approx 1$.

Высокий вакуум — область давлений от 10^{-1} до 10^{-5} н/м^2 , чему соответствуют давления от $7,5 \cdot 10^{-4}$ до $7,5 \cdot 10^{-8} \text{ мм рт. ст.}$, при которых средняя длина свободного пути частиц значительно превышает линейный размер, существенный для рассматриваемого процесса, $\lambda/d \gg 1$.

Сверхвысокий вакуум — область давлений ниже 10^{-5} н/м^2 , чему соответствуют давления ниже $7,5 \cdot 10^{-8} \text{ мм рт. ст.}$, при которых не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от адсорбированного газа за время, существенное для рабочего процесса.

Таблица 1-1

Свободный путь молекул воздуха

| Давление воздуха <i>мм рт. ст.</i> | Средняя длина свободного пути молекул при 20°C |
|---------------------------------------|---|
| $760 = 7,6 \cdot 10^2$ | $6,21 \cdot 10^{-6} \text{ см} = 0,06 \text{ мкм}$ |
| $1 = 1 \cdot 10^0$ | $4,72 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 47 \text{ мкм}$ |
| $0,1 = 1 \cdot 10^{-1}$ | $4,72 \cdot 10^{-2} \text{ см} = 472 \text{ мкм}$ |
| $0,01 = 1 \cdot 10^{-2}$ | $4,72 \cdot 10^{-1} \text{ см} = 4,72 \text{ мм}$ |
| $0,001 = 1 \cdot 10^{-3}$ | $4,72 \text{ см} = 47 \text{ мм}$ |
| $0,0001 = 1 \cdot 10^{-4}$ | $4,72 \cdot 10^1 \text{ см} = 472 \text{ мм}$ |
| $0,00001 = 1 \cdot 10^{-5}$ | $4,72 \cdot 10^2 \text{ см} = 4,72 \text{ м}$ |
| $0,000001 = 1 \cdot 10^{-6}$ | $4,72 \cdot 10^3 \text{ см} = 47,2 \text{ м}$ |
| $0,0000001 = 1 \cdot 10^{-7}$ | $4,72 \cdot 10^4 \text{ см} = 472 \text{ м}$ |
| $0,00000001 = 1 \cdot 10^{-8}$ | $4,72 \cdot 10^5 \text{ см} = 4,72 \text{ км}$ |
| $0,000000001 = 1 \cdot 10^{-9}$ | $4,72 \cdot 10^6 \text{ см} = 47,2 \text{ км}$ |

В отечественной литературе выделялись три основных состояния сильно разреженного газа, в которых физические явления протекают по-разному (низкий, средний и высокий вакуум¹) в зависимости от имеющегося в каждом рассматриваемом случае соотношения между средней длиной свободного пути молекул газа, обозначаемой обычно λ , и нормирующим размером (линейным) откачиваемого объема d .

Таблица 1-1 дает представление о средней длине свободного пути молекулы воздуха при различных давлениях [Л. 1].

Для комнатной температуры, т. е. для 20°C , можно приближенно подсчитать среднюю длину свободного (в сантиметрах) пути молекул воздуха по формуле $\lambda \approx 5 \cdot 10^{-3}/p$, где p — давление воздуха, *мкм рт. ст.*, λ — средняя длина свободного пути, *см.*

¹ Некоторые зарубежные авторы придерживаются деления вакуума на большее число ступеней (например, Я. Горшковский, Польша).

1-4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВАКУУМА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБОВ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ

Практическое значение разделения вакуума на ступени в зависимости от соотношения λ и d очень велико для всех, кто осуществляет различные производственные процессы или физические эксперименты в вакууме. В низком, среднем и высоком вакууме по-разному протекают явления сорбции газов, взаимной их диффузии, такие процессы, как напыление металла на твердые поверхности, теплообмен между телами, электрический разряд и т. п.

Нетрудно заметить, что, разделяя вакуум по соотношению λ и d , мы можем считать за высокий вакуум тем меньшую степень разреженности газа, чем меньший объем, меньшие линейные размеры имеет откачиваемый нами сосуд. Иначе говоря, при одном и том же абсолютном остаточном давлении в пальчиковой радиолампе и в дестилляционной колонне с поперечником в 2—3 м в первой можем иметь высокий вакуум, а во второй — низкий.

Технолога-машиностроителя такая градация по большей части не может удовлетворить. Ведь нетрудно понять, что с точки зрения изготовителя герметизировать маленькую колбочку и откачивать ее до меньшего остаточного давления гораздо легче, чем многометровую камеру. А между тем заказчик предъявляет к последней гораздо большие требования именно в отношении остаточного давления, если он намерен осуществлять в ней процессы, требующие высокого вакуума. Поэтому технолога интересует ряд данных, характеризующих изготавливаемую вакуумную систему, и среди них в первую очередь наименьшее остаточное давление или предельный вакуум, при котором должна работать система, и способам его получения, а также будет ли данная система работать при постоянном действии откачивающих средств (динамическая система) или, будучи раз откачана, система отсекается от насоса затвором и далее в ней должно сохраняться без откачки достигнутое наименьшее или близкое к нему давление (статическая система).

Низкий вакуум (форвакуум) достижим при помощи одних механических, парожеткторных или адсорбционных насосов; высокий вакуум требует применения диффузионных или сорбционных насосов в комбинации с механическими форвакуумными, но в большинстве случаев не требует еще высокотемпературного прогрева откачиваемой системы; сверхвысокий вакуум требует применения сверхвысоковакуумных насосов (электрофизических, турбомолекулярных, криогенных и др.) в соединении с форвакуумными насосами и охлаждаемыми ловушками, а также и обязательного обезгаживания откачиваемой системы путем длительного прогрева под откачкой, часто до 450 °С, а иногда и выше.

Эти условия получения тех или других степеней вакуума в значительной мере определяют и методы изготовления соответствующих вакуумных систем и их элементов.

1-5. ВАКУУМНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

В современной технике требуется разреженность до давления порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст., а нередко и еще более высокий вакуум.

Незначительные количества газов, способные проникнуть внутрь установки, могут резко изменить степень разреженности и сделать

установку неработоспособной. Чувствительность к проникновению в откачиваемый объем малейших количеств газа и отличает вакуумную аппаратуру от любой другой, в том числе и от аппаратуры высоких давлений.

Может показаться, что сосуды или соединения, выдерживающие высокое, например в несколько сотен килограмм на 1 см^2 , давление без сколько-нибудь заметных течей, будут во всяком случае герметичными, если из них выкачать газ, т. е. при обратном перепаде давлений всего в 760 мм рт. ст. Ведь перепад давлений в этом случае будет в сотни раз меньше и установка должна обладать, казалось бы, огромным запасом вакуумной плотности своих стенок. В действительности это не так.

Механическая прочность в этом случае будет заведомо обеспечена, но вакуумная плотность в подавляющем большинстве случаев будет совершенно недостаточной.

Самый лучший, надежно склепанный и даже сваренный обычным способом котел, воздухосборник высокого давления, цилиндр гидравлического домкрата или гидропресса, отлитый из стали со стенками толщиной до 20—30 мм, с точки зрения высокого вакуума могут представлять собой негодную конструкцию.

Очень малая утечка газа, проникающего из сосуда через его стенки, соединения и уплотнения при работе на высоких давлениях, часто не имеет практического значения, так как она совершенно несоизмерима с количеством газа, сжатого в этих сосудах. А между тем проникновение внутрь откачанного сосуда такого же малого количества газа может решительно изменить степень вакуума в нем.

Если, например, из нормального кислородного баллона с геометрическим объемом в 40 л, содержащего газ, сжатый до давления в 150 кгс/см^2 , вытечет количество газа, равное 1 см^3 при давлении 1 кгс/см^2 , то давление в баллоне упадет, очевидно, на $1/6\,000\,000$ часть, или всего на $0,000017\%$, что в огромном большинстве случаев практического значения не имеет.

Теперь посмотрим, что получится, если такое же количество газа впустить в такой же баллон, но предварительно откачанный до давления 10^{-6} мм рт. ст.

В откачанном баллоне до впуска (или натекания) содержалось количество газа, занимающее при давлении 760 мм рт. ст. объем, равный $40\,000 \cdot 10^{-6}/760 = 1/19\,000 \text{ см}^3$. Следовательно, выпускаемый или натекающий 1 см^3 газа больше этого количества в 19 000 раз, а значит, и давление в баллоне возрастает в 19 000 раз. Это дает право говорить, что вакуумные системы должны быть практически совершенно герметичными, газонепроницаемыми, т. е. течи должны быть столь малы, что обнаружить их невозможно даже самыми чувствительными приборами.

Требование герметичности заставляет обратить особое внимание на все соединения деталей и узлов вакуумной системы друг с другом. Естественно, что в соединениях можно скорее всего ожидать образования щелей, пазух или неровностей, будь то постоянные или разъемные соединения.

Постоянными (неразъемными) соединениями мы называем сварные и паяные соединения. Разъемными называем болтовые, винтовые или запрессованные соединения деталей или узлов, уплотняемые в вакуумной технике резиновыми, пластмассовыми или металлическими прокладками-уплотнителями.

Следует оговорить с самого начала, что в высоковакуумной технике, а тем более в сверхвысоком вакууме какие-либо замазывания, заклеивания или закрашивания неплотностей, так же как и подмотки в стыках труб и в соединениях арматуры, совершенно недопустимы.

Для герметизации высоковакуумной и сверхвысоковакуумной системы применимы только сварка, пайка и уплотнение разъемных соединений упругими (неметаллическими или комбинированными) прокладками из специальных материалов или металлическими прокладками. В некоторых редких случаях (чаще всего в лабораторной практике) допускается стыкование специально притертых поверхностей с применением специальных смазок.

В редких же случаях применяется склеивание деталей из пластмасс с применением специальных клеев или растворителей.

Вполне рационально склеивание деталей систем низкого вакуума.

1-6. ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТЕЙ. ПОНЯТИЕ О ВАКУУМНОЙ ГИГИЕНЕ

Не только вакуумная плотность и отсутствие протекания извне определяют качество вакуумной системы. Любой конструкционный материал, будь то металл, стекло, пластмасса или керамика, при определенных условиях может служить источником газа.

Помимо того, в любой, самой незначительной щели или раковине может скопиться, задержаться после предварительной обработки какое-то количество грязи, пыли, масла, растворителей, которые при вакуумировании неизбежно будут служить обильным источником пара или газа.

Если допустить, что в откачиваемом объеме после промывки осталась в щелях соединений вода в количестве 1 мл, то при вакуумировании она превратится в водяной пар, который при атмосферном давлении и температуре 20 °С занял бы объем в 1,25 л. Если весь этот пар был бы выделен сразу, то большая его часть была бы эвакуирована из откачиваемого объема механическим вакуумным насосом при предварительной откачке и на долю высоковакуумного насоса пришлось бы небольшое количество этого пара. Но беда в том, что укрывшиеся в щелях и порах газообразующие вещества переходят в газообразное состояние крайне медленно и происходит это обычно уже при высоком вакууме, когда откачка производится высоковакуумным насосом, а при давлении, например, порядка 10^{-5} мм рт. ст. тот же объем пара будет занимать уже $V = 1,25 \cdot 760 \cdot 10^5 = 95\,000\,000$ л, что явится для пароструйного насоса со средней быстротой действия, например 500 л/сек, огромной нагрузкой.

Изложенное ранее наглядно показывает, какое огромное значение имеют в вакуумной технике правильный выбор конструкционных материалов, соблюдение специфических требований технологии и высокий уровень вакуумной гигиены, т. е. чистота и аккуратность в процессах изготовления, сборки, испытаний и эксплуатации вакуумных систем, чистота всех материалов, инструмента, чистота производственных помещений.

1-7. РАБОТА УЗЛОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Ряд узлов вакуумного оборудования должен работать при минусовых температурах, а иногда и в условиях глубокого холода.

Газоотделение стенок установки, уплотнителей, проникание в откачиваемые объемы паров масла или ртути из диффузионных насосов и, наконец, различные газообразные выделения при технологических процессах, для которых предназначены установки, делают в некоторых случаях недостаточной откачку одним механическим или даже диффузионным насосом. Для удаления или связывания конденсируемых паров и газов в вакуумные системы вводятся ловушки с интенсивным охлаждением их рабочих поверхностей до низких температур.

Конструкции их весьма разнообразны и выбираются в зависимости от назначения и устройства установки. Хладагентами, т. е. охлаждающими веществами, могут служить: вода, различные смеси с сухим льдом, фреон, жидкий азот, жидкий водород и даже жидкий гелий.

Таким образом, узлы охлаждающих и конденсирующих устройств могут работать при температурах от $+450$ и почти до -270 °С. В широких температурных диапазонах работают и устройства для транспортировки хладагентов: сосуда Дьюара и специальные танки. При изготовлении этих узлов и устройств применима по большей части та же технология, что и при изготовлении обычной вакуумной аппаратуры. Следует тут же отметить, что широко распространенное среди машиностроителей мнение о непригодности оловянно-свинцовых припоев для работы при низких температурах ошибочно: пайка этими припоями при соблюдении определенных условий, указываемых ниже, допустима и в условиях глубокого холода.

1-8. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ДВИЖУЩИХСЯ МЕХАНИЗМОВ В ВАКУУМЕ

Важнейшим фактором в работе каждого движущегося механизма является трение между его деталями. Как известно, сила трения в огромной степени зависит от смазки трущихся поверхностей, т. е. от той жидкостной и газовой прослойки или частиц твердой смазки, которые удерживают трущиеся поверхности на определенном расстоянии, не давая деталям разрушать друг о друга свои поверхностные слои.

Такой смазкой являются в обычных атмосферных условиях не только специально наносимые на трущиеся поверхности и постоянно возобновляемые слои смазочных материалов, но и находящиеся на них всегда тончайшие, но крепко с ними связанные пленки адсорбированных веществ, которые при известных нагрузках и на какое-то время сами по себе могут снизить силы трения и предохранить поверхности деталей от разрушения. Следовательно, о действительно сухом трении в обычных атмосферных условиях можно говорить только условно.

Трение скольжения в высоком и сверхвысоком вакууме носит особый характер. В высоком вакууме в движущиеся механизмы редко вносится специальная смазка, так как в большинстве случаев она явилась бы источником газа, а сорбированные слои жидкостей и га-

зов значительно уменьшены и при продолжении откачки все более уменьшаются, вследствие чего наступает действительное сухое трение, что особенно резко выражено в аппаратах сверхвысокого вакуума, где сорбированные пленки удалены почти нацело, а внесение смазки недопустимо. Практически это приводит к быстрому задиранию, заеданию трущихся поверхностей и даже к частичному привариванию их друг к другу, если прикладываются достаточно большие усилия.

Следовательно, к движущимся механизмам, работающим в вакууме, предъявляются специфические требования. Для быстродвижущихся и значительно нагруженных деталей здесь возможно применение только подшипников качения и то лишь специальных типов или прошедших специальную обработку. Качающиеся или медленно скользящие пары при небольших нагрузках должны подвергаться покрытию твердой смазкой, равно как и крепежные детали для установок сверхвысокого вакуума. Последние могут сульфидироваться.

Глава вторая

МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

2-1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Если в отношении расчетов на прочность вакуумные установки по большей части являются сравнительно несложными, то в отношении материалов, из которых изготавливаются эти установки, вакуумная техника предъявляет разнообразные и серьезные требования к их физическим свойствам и химическому составу.

Вакуумная техника сравнительно молода и еще не успела предъявить металлургии и другим отраслям промышленности свои специфические требования на все материалы. Что касается металлов, пластических масс и ряда других материалов, то вакуумщикам приходится часто приспособливаться к материалам общего назначения или выпускаемым по специальным техническим условиям других отраслей техники.

Основные условия, которым должны удовлетворять поделочные материалы в вакуумной технике — это наибольшая вакуумная плотность при самых малых толщинах и наименьшее возможное газовыделение в вакууме даже при повышенной температуре.

Эти условия исключают возможность использования в высоком вакууме сколько-нибудь пористых материа-

лов (как, например, чугуи, техническая резина, фаянс и т. п.). Стенки и внутренние детали высоковакуумной установки нельзя изготовлять из пористых материалов, так как они не только пропускают, но и хорошо поглощают газы и жидкости при соприкосновении с ними, а затем при откачке установки способны длительно «газить», т. е. выделять газы из своих пор.

Удаление газа из пор с помощью откачки и испарение в вакууме поглощенной пористым материалом жидкости при комнатных температурах происходит медленно, так как длина пор значительно превышает размеры их сечения. Обязательной операцией подготовки вакуумной установки к работе является его тщательная промывка чистыми растворителями с последующей просушкой. Детали из пористого материала нельзя достаточно чисто промыть. Растворенные загрязнения прочно забиваются в поры и полностью удалить их оттуда невозможно. Даже мельчайшая пористость материала делает его газопроницаемым. Следовательно, никакие пористые материалы в технике высокого, а тем более в технике сверхвысокого вакуума неприменимы.

Разумеется, особняком стоят высокопористые газопоглощающие материалы, сорбенты (цеолит, активированный уголь и т. п.), являющиеся в некоторых насосах и ловушках рабочим телом, связывающим откачиваемые газы или пары.

Весьма большое значение имеет плотность паров конструкционного материала при той или иной температуре. Применение для изготовления установки высокого, а тем более сверхвысокого вакуума материалов, которые при рабочих или тренировочных (в процессе обезгаживания) температурах имеют плотность паров, близкую к предельному вакууму данной установки, должно быть исключено.

Плотность паров конструкционного материала должна быть на 2—3 порядка ниже остаточного давления в установке при предельном разрежении в условиях максимального предполагаемого его прогрева. Это необходимо потому, что испарение материала происходит в некоторой мере и при более низких температурах и оно ни в коей мере не должно достигать в рабочих условиях заметной величины, иначе может произойти напыление материала на такие детали, для которых это недопустимо, например напыление металла на электронзо-

лирующие детали. Необходимо иметь в виду, что испарению подвержены не только чистые металлы, но и прочно связанные компоненты сплавов.

Академик С. А. Векшинский в своих исследованиях показал [Л. 2], что при соответствующих условиях при нагреве в высоком вакууме из сплавов в значительной части могут быть испарены компоненты с более высокими плотностями паров. Так, например, цинк из латуни можно испарить почти полностью при длительном и достаточно высоком нагреве в высоком вакууме с постоянной откачкой.

Это обстоятельство заставляет с большой осмотрительностью относиться к назначению припоев для пайки тех или иных узлов вакуумной системы, поскольку в большинстве ходовых марок припоев содержатся такие металлы, как кадмий, цинк, магний, висмут, сурьма, имеющие весьма высокие плотности паров при температурах, до которых могут нагреваться современные вакуумные установки.

Ряд сплавов, как, например, латунь, монель-металл, некоторые марки бронзы и т. п., по тем же причинам не могут быть применены в высоковакуумной системе, хотя они и обладают высокими прочими физическими и особенно технологическими свойствами.

Требования вакуумной гигиены обуславливают и необходимость широкого применения, особенно в сверхвысоковакуумных установках, коррозионно-стойких материалов, несмотря на их повышенную стоимость, а иногда и дефицитность. Дело в том, что большинство твердых окислов металлов и сернистых включений ведут себя в вакууме как в восстановительной среде, постепенно переходя в иные соединения и длительно выделяя газообразные соединения или кислород. Следовательно, металлы, имеющие даже следы коррозии, для высоковакуумных систем не пригодны.

Значительная часть вакуумных систем по своему назначению должна быть стойкой к агрессивным газам и жидкостям. Следовательно, повышенная коррозионная стойкость может являться также одним из основных требований, предъявляемых к конструкционным вакуумно-техническим материалам, а в сверхвысоковакуумной системе это требование сочетается еще и с коррозионной стойкостью при повышенных температурах (до 500 °С, а иногда и выше). Чем выше коррозионная стой-

кость материалов, тем чище при всех условиях их поверхности, тем надежнее вакуумная аппаратура.

В вакуумном производстве большую роль играют также неметаллические материалы, из которых изготавливаются (во многих случаях) уплотнители, изоляторы, особо термостойкие детали, а иногда и целые вакуумные системы, как, например, стеклянные лабораторные установки. Для неметаллических материалов важна возможность вакуумно-плотного соединения их с металлами путем пайки или надежного механического соединения.

2-2. МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ЛИТЬЕ

Присущая большинству литых деталей пористость делает нежелательным как размещение их внутри высоковакуумных систем, так и наличие в каких-либо узлах этих систем литых металлических стенок, крышек или днищ. Однако в форвакуумной части систем при сравнительно высоких давлениях (выше 10^{-3} мм рт. ст.) и при соблюдении определенных условий может применяться металлическое литье.

Примером служит высококачественное чугунное и цветное литье, применяемое в механических вакуумных насосах. Здесь литые детали обычно находятся в постоянном контакте с вакуумным маслом, что уменьшает вредное влияние пористости, а главное здесь общий поток откачиваемого газа несоизмеримо велик по сравнению с тем количеством газа, которое может проникнуть через литые стенки или выделяться из их пор.

Для более высокого вакуума литые детали практически неприменимы, если они не подвергнуты специальной обработке, имеющей целью надежно закрыть их поры. Иногда такой обработкой может являться горячее лужение внутренних поверхностей. В последнее время стала применяться также футеровка литых деталей вакуумно-плотными, отделяющими малое количество газов пластическими массами (полиэтилен, фторопласты и др.). Этот способ герметизации, несомненно, имеет большие перспективы в будущем.

Наиболее подходящими марками литейного чугуна для изготовления деталей форвакуумной системы можно считать следующие (или аналогичные им по плотности и механическим свойствам): МСЧ 24-48 (завод имени Владимира Ильича); СЧ 24-44, состав 23 [Л. 3]; СЧ

24-44, составы 12-15; СЧ 21-40, состав 19. Во всех случаях чугуны должны быть плотными, мелкозернистыми, обладать хорошими антифрикционными свойствами, не говоря уже о литейных свойствах.

В последние годы все более широкое распространение получают двухроторные механические вакуумные насосы, работающие по принципу воздуходувки Рутса, а также парожетонные насосы. Для изготовления тех и других выгодно применять алюминиевые литейные сплавы. Из большого количества существующих марок этих сплавов можно рекомендовать для вакуумных целей сплавы АЛ-2, АЛ-5, АЛ-9 ГОСТ 2685-63.

Литейные бронзы, применяемые для изготовления деталей форвакуумной арматуры, не должны содержать цинка, кадмия, фосфора. Так же, как и другие литейные материалы, бронза должна обладать в отливках высокой плотностью и легко обрабатываться.

2-3. ПРОКАТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Ограниченное применение литья для изготовления деталей вакуумных систем делает наиболее пригодным для этой цели листовой и сортовой прокат черных и цветных металлов и сплавов.

В процессе проката литые болванки подвергаются многократному уплотнению между валками прокатных станов в сильно нагретом состоянии, причем происходят сжатие, перегибы и заваривание капиллярных каналов и пор в толще металла, служащих в литом металле породами для газа или мельчайшими резервуарами для него. Это придает большинству прокатных материалов свойства вакуумной герметичности даже при самой небольшой их толщине.

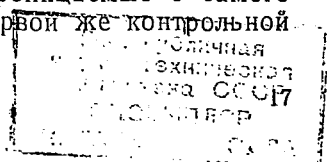
К таким материалам относятся листовой и сортовой прокат нержавеющей стали, часть проката малоуглеродистой конструкционной стали, прокат из меди, латуни, многих сортов бронзы, алюминия и его сплавов, никеля, титана и его сплавов. Широкое применение в вакуумной технике имеют также трубы цельнокатаные и цельнотянутые бесшовные. Трубы сварные, носящие обычно наименование газовых, для вакуумных систем непригодны, так как в подавляющем большинстве случаев их сварные швы не отвечают требованиям вакуумной плотности.

Понятно, что детали более или менее сложной конфигурации из прокатного металла можно изготовить только с помощью сварки или пайки. Далеко не все металлы и сплавы обладают одинаковой способностью свариваться или спаиваться друг с другом. В дальнейшем указывается ряд наиболее употребительных в вакуумной технике марок металлов и сплавов, отвечающих если не полностью, то в наибольшей степени специфическим требованиям вакуумной техники.

Дефекты проката: К сожалению, не все прокатные металлы имеют одинаковую вакуумную плотность во всех направлениях. В то время как медь, латунь, никель, нержавеющей стали почти всегда позволяют изготавливать детали любой формы из любого куска проката с расположением этих деталей в куске (заготовке) по любым плоскостям и направлениям, многие партии малоуглеродистой стали имеют неодинаковую плотность в разных плоскостях заготовки. Здесь важнейшим фактором является направление прокатки, т. е. направление так называемого «прокатного волокна». Часто встречаются также трещины в некоторых специальных сплавах (ковар, железо Армко).

Волокнистость металла обычно на глаз незаметна. Однако волокна шлаковых включений, расположенные нитями вдоль направления прокатки, наблюдаются весьма часто как в листовой, так и в сортовой малоуглеродистой стали многих профилей и размеров. Эти шлаковые волокна имеют различную величину как в поперечном сечении, так и по длине. В некоторых случаях они хорошо заметны на глаз (когда имеют площадь поперечного сечения до 1 мм^2 и резко отличаются от окружающего металла цветом, структурой и твердостью). В других случаях они совершенно незаметны не только для невооруженного глаза, но и при рассмотрении сечения металла в обычные лупы. Однако во всех случаях они являются настоящим бичом производства вакуумных установок и электровакуумных приборов.

В ряде случаев как различные, так и совершенно незаметные шлаковые волокна, пронизывая сравнительно тонкие стенки стальных деталей, образуют в последних мельчайшие отверстия, газопроницаемые с самого начала и обнаруживаемые при первой же контрольной откачке изготовленного узла.



В других случаях эти пороки проката возможно обнаружить только после прогревания деталей в восстановительных средах или в вакууме.

Такие глубоко скрытые шлаковые волокна представляют собой капиллярные каналы, заполненные стекловидной шлаковой массой, в своем естественном виде непроницаемой для газов и неразличимой по внешнему виду. Они могут остаться незамеченными, и детали, изготовленные из такой стали, могут быть пропущены контролером не только после тщательного осмотра, но даже и после контрольного испытания на теченскателе.

Если такие волокна попадут в процессе дальнейшей обработки в зону сварки или в зону термического влияния либо детали с такими волокнами проходят пайку или отжиг в водороде или в вакууме, то они могут стать источником натекания.

Попытки «залечить» такие детали запаиванием или подваркой обычно успеха не имеют, так как шлаковые включения припоями не смачиваются, а при нагреве в процессе пайки (или заварки) выделяют много газов, прорывающих слой накладываемого припоя (или присадного металла) и снова создающих поры.

Такая же картина может получиться и во время эксплуатации готового вакуумного аппарата. Изготовленная вполне качественно во всех других отношениях и прошедшая контрольные откачки установка в дальнейшей работе с нагревом под вакуумом может довольно скоро выйти из строя и оказаться непригодной к работе. Это происходит вследствие разложения при нагреве в вакууме или в восстановительных средах окислов металлов и сульфидных соединений, частично образующих заполнение шлаковых волокон. Заполнение становится пористым и начинает пропускать газ.

Внедрение техники в область сверхвысокого вакуума и разработка в связи с этим весьма чувствительных контрольных приборов дали возможность выявить, что и нержавеющие стали и никелевые сплавы, долгое время считавшиеся безусловно надежными в отношении вакуумной герметичности, не свободны от тех же недостатков, хотя и в меньшей степени.

Только двойная вакуумная переплавка или последовательно проведенные электрошлаковая и вакуумная плавки дают свободный от неметаллических включений

(в пределах чувствительности существующих методов производственного анализа) металл.

В применяемых специальных сортах металла и сплавов дефекты в виде трещин наиболее часто встречаются в болванках и листах железа Армко и в прутках ковара, особенно в их концевых частях.

Борьба с течью по шлаковым волокнам. Лучше всего изготавливать детали так, чтобы волокна проката располагались вдоль стенки и не могли служить соединительными каналами между вакуумной полостью и атмосферой. Иногда это достигается просто путем правильного размещения будущей детали относительно оси заготовки. В других случаях приходится для этой цели заменять целиком детали сварными, например идти на вваривание в стакан днища из листа, хотя по размерам стакан мог бы быть выточен целиком из одного куска. Не следует бояться в этих случаях появления лишнего сварного шва, особенно в стальных деталях. Современная техника сварки позволяет делать сварные соединения, не уступающие по герметичности цельной стенке (в пределах чувствительности существующих, весьма точных методов испытания).

Наконец, выгодно делать детали из поковок. В процессековки газопроницаемые волокна по большей части перегибаются, сплющиваются, завариваются на перегибах.

Ковка не может дать полной гарантии герметичности всех деталей, но снижение брака получается весьма значительным. В особенности это относится к малоуглеродистой стали. Детали из поковок нержавеющей стали, особенно аустенитной, требуют дополнительной термообработки для восстановления ее особых физических свойств.

Снизить брак может также и предварительное испытание материала на герметичность. Для этого следует отрезать с обоих концов болванки (прута) перпендикулярно направлению прокатки образцы толщиной 2—3 мм, отжечь их в вакууме, в водороде или в окиси углерода при 1 000—1 100 °С и затем испытать на герметичность масс-спектрометрическим течеискателем.

Эта мера не всегда полностью достигает цели, так как иногда прутки, плотные по концам, оказываются пористыми в середине, но обычно середина прутка (болванки) бывает плотнее концов.

2-4. ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Сталь. *Конструкционная* углеродистая качественная сталь. Из многочисленных марок стали в вакуумной технике наиболее часто применяются малоуглеродистые, надежно сваривающиеся стали.

Стали марок 08, 10, 15 и 20, ГОСТ 1050-60, хорошо свариваются различными методами газовой и электро-сварки, хорошо паяются твердыми и мягкими припоями, не закаляются, хорошо цементируются. Механические свойства: предел прочности 32—44 кгс/мм², относительное удлинение 26—33%, твердость по Бринеллю 140—170. Как листовая, так и сортовая сталь всех размеров применяется для изготовления всевозможных деталей корпусов и внутренних устройств вакуумной аппаратуры.

Сталь марки 45, ГОСТ 1050-60 (0,42—0,49% С, 0,17—0,37% Si, 0,50—0,80% Mn, 0,040% S, 0,040% P, 0,25% Ni, 0,25% Cr) сваривается значительно хуже, чем малоуглеродистые стали, требует последующего обжига, но даже с последующей термообработкой не рекомендуется для сварных вакуумных узлов. Закаляется до твердости 55 по Роквеллу при температуре заковки 840°C. Паяется хорошо как твердыми, так и мягкими припоями. Механические свойства незакаленной стали: предел прочности 64 кгс/мм², относительное удлинение 17%, твердость по Бринеллю 180—217. Эта сталь рекомендуется для изготовления резьбовых деталей, валов и других значительно нагруженных и подвижных деталей.

Для изготовления тонкостенных штампованных стальных деталей применяется по большей части тонколистовая, отожженная и протравленная сталь марки 08КП или 10КП, ГОСТ 1050-60. Ее основные механические свойства: предел прочности 28—38 кгс/мм², относительное удлинение 26—30%.

Для изготовления невакуумных деталей: рам, станин, каркасов, деталей внешних приводов и т. п. — применимы самые разнообразные стали, предназначенные для общего машиностроения.

Нержавеющая сталь. ГОСТ 5949-61 содержит различные марки нержавеющей стали, но в вакуумной технике далеко не все они одинаково применимы. Наибольшим вниманием вакуумщиков пользуются стали

аустенитного класса и особенно сталь X18H10T, заменившая собой широко распространенную сталь марки 1X18H9T. Сталь эта кислотоупорная, немагнитная, коррозионно-стойкая, хорошо сваривается различными методами электросварки, удовлетворительно паяется твердыми и мягкими припоями при условии применения специальных флюсов. Существенным недостатком большинства нержавеющей сталей является присущая им недостаточная устойчивость против межкристаллитной коррозии, что неизбежно влечет за собой потерю вакуумной герметичности, особенно в сварных швах и зоне температурного влияния и при длительных прогревах деталей до 450—750 °С. В этом интервале температур аустенитная фаза интенсивно распадается и по границам ее зерен при наличии достаточного количества нерастворенного углерода образуются карбиды хрома.

Считается, что сталь с содержанием хрома менее 13% неустойчива против межкристаллитной коррозии. Образование карбидов хрома снижает содержание хрома по границам зерен аустенита ниже 13%. Для уменьшения выпадения хрома в карбиды следует, очевидно, уменьшить содержание углерода в стали и в теле сварных швов или же вводить в сталь титан и ниобий, которые образуют с углеродом карбиды ранее хрома. Повышение содержания никеля также расширяет температурные границы аустенитной структуры и увеличивает устойчивость стали против межкристаллитной коррозии. Легче всего оказалось получить равномерную аустенитную структуру при содержании в стали 18—20% хрома и 8—10% никеля с термообработкой при температурах 1050—1150 °С [Л. 4]. При этих же температурах аустенит способен растворять карбиды, если общее содержание углерода в стали не превышает 0,2%. Однако при комнатной температуре растворимость карбида снижается до 0,02% [Л. 5]. Поэтому для сварных высоковакуумных конструкций лучше применять стали марок 0X18H10T, 00X18H10 и 0X18H12Б.

Сохранению аустенитной структуры содействует также присадка марганца и в меньшей степени азот и медь. Поэтому для вакуумной системы, подвергающейся меньшим прогревам, возможно использование таких сталей, как X17Г9АН4 (ЭИ878), X14Г14Н3Т (ЭИ711), 1X21Н5Т (ЭИ811), X28АН (ЭИ657 с азотом). Из них стали марок 1X21Н5Т и X17Г9АН4 в нагартованном состоянии

обладают значительно большей механической прочностью, чем стали типа X18H10, что делает их особенно пригодными для изготовления сильно нагруженных деталей, как, например, стягивающие болты прогреваемых высоковакуумных соединений. Однако эти стали являются немагнитными не в такой степени, как стали марок X18H10T и 0X18H10T. С понижением содержания углерода ниже 0,04% (сталь 00X18H10) аустенитная сталь также приобретает слабую магнитность.

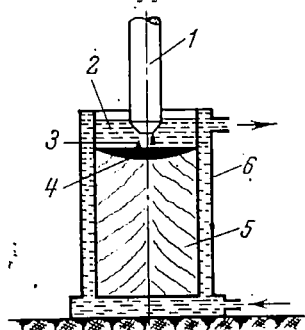


Рис. 2-1. Схема электрошлакового переплава стали. 1 — расходный электрод; 2 — шлаковая ванна; 3 — канал электродного металла; 4 — расплавленный металл; 5 — остывающий металл; 6 — водоохлаждаемый кристаллизатор.

После вакуумного переплава (индукционного или дугового) металл становится почти свободным от различных неметаллических включений, в значительной мере обезгаживается, а следовательно, становится и более плотным, газонепроницаемым, более однородным по всей толщине, лучше сваривается и обрабатывается.

То же самое можно сказать и о сталях электрошлакового переплава. По данным института им. Патона [Л. 6] застывание слитка при электрошлаковом переплаве (рис. 2-1) идет снизу вверх, благодаря чему слиток получается свободным от усадочных раковин, осевой рыхлости и большей части неметаллических включений. Наличие постоянной жидкой газопоглощающей шлаковой ванны на поверхности расплавленного ванным способом металла приводит к значительному обезгаживанию последнего.

По тем же данным плотность стали марки 1X18H9T в результате электрошлакового переплава возрастает приблизительно на 1,2%. Загрязненность стали марки 0X18H9 снижалась по оксидным включениям почти в 3 раза, по силикатам — в 1,5 раза. Содержание газов в той же стали оказалось по кислороду в 1,5 раза, по азоту почти в 3 раза, по водороду на 23% меньше, чем в исходном металле обычной плавки.

Наилучшие результаты получаются при вакуумной плавке стали, предварительно переплавленной электрошлаковым методом, а также при двойной вакуумной

плавке. Сталли аустенитного класса для вакуумных целей нельзя сваривать ацетиленовой сваркой, так как, науглероживаясь, аустенитная сталь теряет свои антикоррозионные свойства.

В табл. 2-1—2-4 приведены состав и свойства нержавеющей сталей.

Сплавы на железо-никелевой и никелевой основе. ГОСТ 5632-61 относит к их числу сплавы, имеющие основной структурой твердый раствор хрома и других легирующих элементов в железоникелевой (сумма железа и никеля более 65% при отношении железа к никелю приблизительно 1,5:1) основе или в никелевой основе, где содержание никеля составляет не менее 55%.

Для вакуумной техники из них особенно интересны сплавы типа ХН78Т (ЭИ435), устойчивые в аппаратах для йодидных процессов, сплавы типа ХН75МБТЮ (ЭИ602), применяющиеся в особо ответственных сварных конструкциях для сверхвысокого вакуума, где требуется обезгаживание или работа при высоких температурах (в некоторых случаях может быть заменен сплавом ХН38ВТ), и сплавы типа НЗ6ХТЮ (ЭИ702), иногда с присадкой молибдена, дисперсионно твердеющие, применяемые для изготовления упругих элементов, работающих при температурах до 600 °С.

В табл. 2-5—2-7 приведены химический состав и свойства этих сплавов.

Часто упоминаемые в иностранных каталогах, патентах и статьях американские марки нержавеющей стали 302 (30302) и 305 (30305) довольно близко соответствуют отечественной марке Х18Н10Т, а американская сталь марки 304 также близко соответствует отечественной стали марки 0Х18Н10Т.

Сплав марки ЭИ-437Б рекомендуется для изготовления пружин, работающих при температурах 400—500 °С. Допустимые напряжения для пружин из этого материала приведены в табл. 2-8.

Сплав марки ЭИ-828 предназначается для изготовления пружин, работающих при еще более высоких температурах — 700—750 °С. Этот сплав сохраняет упругость при указанных температурах при работе в течение 100 ч с напряжением до 45 кгс/мм², от 100 до 1 000 ч с напряжением до 35 кгс/мм² и свыше 1 000 ч — с напряжением до 25 кгс/мм². Сплав марки ЭИ-460 рекомендован для пружин, работающих не только в нагретом

Химический состав нержавеющей стали некоторых марок

| Марка стали | Содержание элементов, массовая концентрация, % | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|---------------------|------------------|-----------|-----------|---------------------|-------------|--------|------------------|--------------------|--------------------|
| | Углерод не более | Кремний не более | Марганец | Хром | Никель | Титан | Ниобий | Железо | Сера не более | Фосфор не более | Прочие элементы |
| 00X18H10 (ЭИ842) | 0,04 | 0,80 | 1,00—2,00 | 17,0—19,0 | 9,0—11,0 | — | — | Основа | 0,020 | 0,035 | — |
| 0X18H10T (ЭИ914) | 0,08 | 0,80 | 1,00—2,00 | 17,0—19,0 | 9,0—11,0 | 5X(C—0,6) | — | „ | 0,020 | 0,035 | — |
| X18H10T (1X18H9T, ЭЯ1T) | 0,12 | 0,80 | 1,00—2,00 | 17,0—19,0 | 9,0—11,0 | (C—0,02)X X5÷0,7 | — | „ | 0,020 | 0,035 | — |
| 0X18H12Б (X18H11Б; ЭИ402) | 0,08 | 0,80 | 1,00—2,00 | 17,0—19,0 | 11,0—13,0 | — | 8·C÷ 1,2 | „ | 0,020 | 0,035 | — |
| X17Г9АН4 (ЭИ878) | 0,12 | 0,80 | 8,0—10,5 | 16,0—18,0 | 3,50—4,50 | — | — | „ | 0,020 | 0,035 | Азот 0,15—0,25 |
| X14Г14НЗТ (ЭИ711) | 0,10 | 0,80 | 13,0—15,0 | 13,0—15,0 | 2,50—3,50 | (C—0,02)X X5÷0,6 | — | „ | 0,020 | 0,035 | — |
| 1X21H5T (ЭИ811) | 0,14 | 0,80 | Не более 0,80 | 20,0—22,0 | 4,80—5,80 | (C—0,02)X X5÷0,8 | — | „ | 0,025 | 0,035 | — |
| X28АН (ЭИ657) | 0,15 | 1,00 | Не более 1,50 | 25,0—28,0 | 1,00—1,70 | — | — | „ | 0,025 | 0,035 | Азот 0,18—0,25 |

Примечание. С—количество углерода

Механические свойства тонколистовой стали некоторых марок

| Марка стали | Термически обработанная сталь | | | Нагартованная сталь | | |
|-------------|--|--|----------------------------|---------------------|--|----------------------------|
| | Рекомендуемый режим термической обработки | Временное сопротивление, кгс/мм ² | Относительное удлинение, % | Состояние металла | Временное сопротивление, кгс/мм ² | Относительное удлинение, % |
| 00X18H10 | Закалка при 1 050—1 080 °С, охлаждение в воде | 50 | 45 | — | — | — |
| 0X18H10T | Закалка при 1 050—1 080 °С, охлаждение в воде или на воздухе | 52 | 40 | — | — | — |
| X18H10T | То же | 54 | 40 | — | — | — |
| 0X18H12B | „ „ | 54 | 40 | — | — | — |
| X17Г9АН4 | „ „ | 70 | 40 | Нагартованное | 100 | 20 |
| X14Г14Н3Т | Закалка при 1 050—1 080 °С, охлаждение в воде | 70 | 35 | „ | 100 | 20 |
| 1X21H5T | Закалка при 950—1 050 °С, охлаждение в воде или на воздухе | 65 | 18 | — | — | — |
| X28АН | Закалка при 850—950 °С, охлаждение в воде или на воздухе | 54 | 17 | — | — | — |
| 0X18H10 | Закалка при 1 050—1 080 °С, охлаждение в воде | 52 | 45 | Полунагартованное | 79—95 | 25 |

Механические свойства сортовой стали

| Марка стали | Термически обработанная сталь | | | | Нагартованная сталь | | | |
|-------------|---|--|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------|--|---------------------------------------|----------------------------|
| | Рекомендуемый режим термической обработки | Механические свойства | | | Состояние металла | Механические свойства | | |
| | | Временное сопротивление, кгс/мм ² | Предел текучести, кгс/мм ² | Относительное удлинение, % | | Временное сопротивление, кгс/мм ² | Предел текучести, кгс/мм ² | Относительное удлинение, % |
| 00X18H10 | Закалка при 1 050—1 100 °С, охлаждение на воздухе, в масле или в воде | 45 | 16 | 40 | — | — | — | — |
| 0X18H10T | Закалка при 1 050—1 100 °С, охлаждение на воздухе, в масле или в воде | 50 | 20 | 40 | — | — | — | — |
| X18H10T | Закалка при 1 050—1 100 °С, охлаждение на воздухе или в воде | 52 | 20 | 40 | — | — | — | — |
| 0X18H12Б | То же | 50 | 18 | 40 | — | — | — | — |
| X17Г9АН4 | Закалка при 1 050—1 100 °С, охлаждение на воздухе, в масле или в воде | 70 | 35 | 40 | Нагартованное с обжатием 30% | 120 | 95 | 10 |
| X14Г14НЗТ | Закалка при 1 000—1 080 °С, охлаждение на воздухе, в масле или в воде | 60 | 25 | 35 | Нагартованное | 100 | 80 | 20 |
| 1X21H5T | Закалка при 950—1 050 °С, охлаждение на воздухе | 60 | 35 | 20 | — | — | — | — |

Физические и технологические свойства нержавеющей стали некоторых марок

| Марка стали | Температурный коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C} \times 10^6$, при температурах, $^\circ\text{C}$ | | | | | | Температура начала интенсивного окалинообразования на воздухе, $^\circ\text{C}$ | Коэффициент теплопроводности, $\text{кал}/(\text{см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C})$ | Коррозионная стойкость | Магнитность | Температураковки, $^\circ\text{C}$ |
|---------------------|---|------|-------|-------|-------|-------|---|--|--|------------------------------------|------------------------------------|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 600 | 800 | | | | | |
| 00X18H10 | 16,0 | — | — | — | — | — | — | 0,04 (20 $^\circ\text{C}$) | Высокое сопротивление межкристаллитной коррозии | В закаленном состоянии немагнитная | — |
| 0X18H10T (ЭИ914) | — | — | — | — | — | — | 800 | — | Повышенное сопротивление межкристаллитной коррозии | То же | — |
| X18H10T (ЭЯ1Т) | 15,95 | — | 17,32 | 18,74 | 21,23 | 25,59 | 800 | 0,053 (20 $^\circ\text{C}$), 0,066 (800 $^\circ\text{C}$) | Удовлетворительное сопротивление межкристаллитной коррозии | " " | — |
| 0X18H12B (ЭИ402) | — | — | — | — | — | — | — | 0,038 (20 $^\circ\text{C}$) | Устойчива против окисления при температуре до 900 $^\circ\text{C}$ | " " | — |
| X17Г9АН4 (ЭИ878) | 11,0 | 15,9 | 17,3 | 18,7 | 21,2 | — | — | — | — | Немагнитная | 850— —1150 |

| Марка стали | Температурный коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C} \times 10^6$, при температурах, $^\circ\text{C}$ | | | | | | Температура начала интенсивного окалинирования на воздухе, $^\circ\text{C}$ | Коэффициент теплопроводности, $\text{кал}/(\text{см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C})$ | Коррозионная стойкость | Магнитность | Температураковки, $^\circ\text{C}$ |
|----------------------|---|------|------|------|------|------|---|--|--|-------------|------------------------------------|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 600 | 800 | | | | | |
| X14Г14НЗТ (ЭИ711) | 16,0 | 16,7 | 17,5 | 18,4 | 19,5 | 20,6 | — | 0,039 (20 $^\circ\text{C}$), 0,12 (800 $^\circ\text{C}$) | Удовлетворительное сопротивление межкристаллитной коррозии | — | — |
| 1Х21Н5Т (ЭИ811) | 10,2 | 14,4 | 16,8 | 16,8 | 17,5 | 18,0 | — | 0,04 (20 $^\circ\text{C}$), 0,07 (800 $^\circ\text{C}$) | — | Магнитная | 950— —1 080 |
| X28АН (ЭИ657) | 8,6 | — | — | 12,0 | — | — | — | — | Высокая | " | — |

Таблица 2-5

Химический состав некоторых сплавов на железо-никелевой и никелевой основе

| Марка сплава | Содержание элементов, массовая концентрация, % | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|-----------|---------------|-----------------|
| | Углерод не более | Кремний не более | Марганец не более | Хром | Никель | Титан | Алюминий | Вольфрам | Молибден | Ниобий | Железо | Сера не более | Фосфор не более |
| XН78Т (ЭИ435) | 0,12 | 0,80 | 0,70 | 19,0— —22,0 | Основа | 0,15— —0,35 | 0,15 (не более) | — | — | — | 6,0 | 0,015 | 0,020 |
| XН75МБТЮ (ЭИ602) | 0,10 | 0,80 | 0,40 | 19,0— —22,0 | . | 0,35— —0,75 | 0,35—0,75 | — | 1,80—2,30 | 0,90— —1,30 | 8,0 | 0,012 | 0,020 |
| XН38ВТ (ЭИ703) | 0,12 | 0,80 | 0,70 | 20,0— —23,0 | 35,0— —39,0 | 0,70— —1,20 | 0,50 (не более) | 2,80— —3,50 | — | — | Основа | 0,020 | 0,030 |
| Н36ХТЮ (ЭИ702) по ЧМТУ 5834-57 | 0,05 | 0,6 | 0,80— —1,30 | 11,5— —18,0 | 34,5— —36,5 | 0,90— —1,20 | Разрешается около 0,8—1,35 | — | Разрешается около 5—8 | — | Остальное | 0,020 | 0,020 |

Механические свойства некоторых сплавов на железо-никелевой и никелевой основе

| Марка сплава | Термически обработанный сплав | | | Нагартованная сталь | | |
|--------------------------------|---|--|----------------------------|---|--|----------------------------|
| | Рекомендуемый режим термической обработки | Временное сопротивление, кгс/мм ² | Относительное удлинение, % | Состояние металла | Временное сопротивление, кгс/мм ² | Относительное удлинение, % |
| | | Не менее | | | Не менее | |
| ХН78Т (ЭИ435) | Закалка при 980—1020 °С в воде или на воздухе | 70 | 30 | — | — | — |
| ХН75МБТЮ (ЭИ602) | Закалка при 1050—1080 °С в воде | 75 | 40 | — | — | — |
| НЗ6ХТЮ (ЭИ702) по ЧМТУ 5834—57 | Закалка при 960—980 °С в воде | 75 | Прутки 20, лента 38 | После закалки при 920—950 °С в воде и дисперсионного твердения при 650—670 °С в течение 2 ч | 125 | Прутки 15, лента 8 |

Физические и технологические свойства некоторых сплавов на железо-никелевой и никелевой основе

| Марка стали | Температурный коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C} \times 10^6$, при температурах, $^\circ\text{C}$ | | | | | | Температура начала интенсивного окалинообразования на воздухе, $^\circ\text{C}$ | Коэффициент теплопроводности, $\text{кал}/(\text{см}\cdot\text{сек}\cdot^\circ\text{C})$ | Коррозионная стойкость | Магнитность | Температураковки, $^\circ\text{C}$ |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|------|------|---|--|-------------------------------------|-------------|------------------------------------|
| | 100 | 200 | 300 | 400 | 600 | 800 | | | | | |
| ХН78Т (ЭИ435) | 12,8 | 14,22 | 15,88 | 16,95 | 18,7 | 21,0 | 1 100 | 0,036 (20 $^\circ\text{C}$) 0,06 (800 $^\circ\text{C}$) | Высокая, кроме серо-содержащих сред | — | 900— —1 150 |
| ХН75МБТЮ (ЭИ602) | 12,4 | 13,5 | — | — | 16,5 | 19,6 | 1 050 | 0,032 (20 $^\circ\text{C}$) 0,048 (800 $^\circ\text{C}$) | Высокая | Немагнитный | — |
| ХН38ВТ (ЭИ703) | — | — | — | — | — | — | 1 050 | — | — | — | — |
| Н36ХТЮ (ЭИ702) по ЧМТУ 5834-57 | 12— —13,3 | — | — | — | 14,0 | — | — | — | — | Немагнитный | — |

Напряжения для пружин из сплава ЭИ-437Б, кгс/мм²

| Термическая обработка | Характер нагрузки пружин | Длительность работы, ч | Рабочая температура, °С | |
|--|--------------------------|------------------------|-------------------------|-----|
| | | | 400 | 500 |
| Отпуск при температуре 750 ± 10 °С в течение 1 ч | Динамическая | До 10 | 40 | 25 |
| | | 10—100 | 25 | 20 |
| | | 100—500 | 20 | 15 |
| | Плавная | До 10 | 50 | 30 |
| | | 10—100 | 35 | 25 |
| | | 100—500 | 30 | 20 |
| Статическая | До 10 | 55 | 35 | |
| | 10—100 | 40 | 30 | |
| | 100—500 | 35 | 25 | |

состоянии, но и в условиях глубокого холода. Испытания показали, что пружины из этого сплава могут работать с очень высокими напряжениями металла (до 40 кгс/мм²) при температурах от -256 до $+500$ °С.

По коррозионной стойкости сплавы ЭИ-437Б и ЭИ-828 относятся к материалам второго класса, а сплав ЭИ-460 относится к материалам первого класса.

2-5. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Медь имеет широкое применение в технике высокого и сверхвысокого вакуума, причем в вакуумной технике применяются только высокие сорта наиболее чистой меди: МБ (бескислородная), М0 и М1 (ГОСТ 859-66).

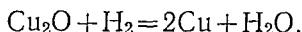
Свойства меди приведены в табл. 2-9, 2-10.

Чистая техническая медь получается электролизом сырого металла или рафинированием сырой меди в расплавленном состоянии. Однако такой металл еще содержит некоторое количество кислорода в виде закиси меди. Примесь же кислорода даже в количестве 0,1% весьма вредна, особенно для вакуумно-герметизирующей сварки меди и пайки или отжига ее в среде водорода. В теле сварного шва и в зоне термического влияния присутствие даже весьма малых количеств кислорода является причиной пористости металла и образования трещин.

Основные физические и механические свойства технической меди

| Характеристика | Показатель | Примечание |
|--|-------------------------|-----------------|
| Температура плавления, °С | 1 083 | — |
| Температура кипения, °С | 2 360 | — |
| Плотность при 20 °С, г/см ³ | 8,94 | — |
| Температурный коэффициент линейного расширения, 1/°С, в пределах температур, °С: | | |
| 0—100 | 16,4 · 10 ⁻⁶ | — |
| 25—300 | 17,7 · 10 ⁻⁶ | — |
| 0—600 | 18,6 · 10 ⁻⁶ | — |
| 0—800 | 19,3 · 10 ⁻⁶ | — |
| Коэффициент теплопроводности, кал/(см·сек·°С) | 0,923 | — |
| Линейная усадка, % | 2,1 | Литье в кокиль |
| Удельное электрическое сопротивление при 20 °С, ом·мм ² /м | 0,01748 | По ГОСТ 1535-42 |
| Коэффициент трения по осевой стали: | | |
| со смазкой веретенным маслом № 2 | 0,011 | — |
| без смазки | 0,43 | — |
| Предел прочности, кгс/мм ² | 22—24 | Мягкая |
| Предел прочности, кгс/мм ² | 45 | Твердая |
| Относительное удлинение, % | 50 | Мягкая |
| Относительное удлинение, % | 6 | Твердая |
| Твердость по Бринеллю | 45 | Мягкая |
| Твердость по Бринеллю | 120 | Твердая |
| Предел ползучести, кгс/мм ² : | | |
| при 20 °С | 7 | — |
| при 400 °С | 1,4 | — |

Водород при высоких температурах сравнительно легко проникает в толщу меди и восстанавливает закись меди, образуя водяные пары:



При этом создаются микроскопические области опрощенных давлений, так как водяные пары имеют малую скорость диффузии, что приводит к образованию мельчайших трещин в металле («водородная болезнь») и вызывает его хрупкость. На рис. 2-2 показана микроструктура (200-кратное увеличение) бескислородной меди (а) и обычной электролитической меди (б) после их

отжига в водороде в течение 30 мин при 850 °С [Л. 7]. Сравнение этих фотографий дает отчетливое представление о степени растрескивания меди вследствие «водородной болезни».

Бескислородная медь может быть получена переплавкой электролитической меди в защитной газовой среде, состоящей из азота и окиси углерода, не содер-

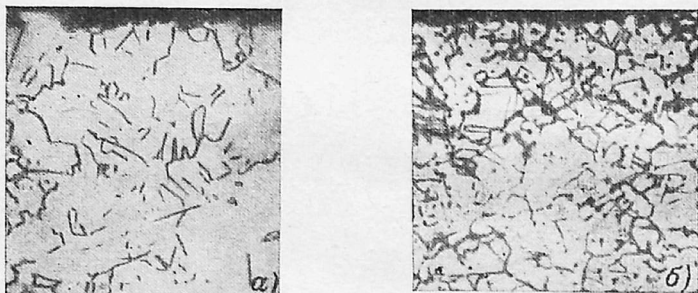


Рис. 2-2. Признаки водородной болезни в меди.

а — бескислородная медь после отжига в водороде (признаки водородной болезни по границам немногих кристаллов); *б* — обыкновенная электролитическая медь после отжига в водороде (ясно видны последствия восстановления Cu_2O).

жащей свободного кислорода, или переплавкой меди в высоком вакууме. Разлив такого металла производится обязательно в защитной среде. Применение окиси углерода при очистке меди от кислорода основано на том ее свойстве, что в среде, не содержащей кислорода и не проникающей в медь, последняя выделяет содержащийся в ней кислород, и если этот слой все время удалять путем воздействия на горячий металл окисью углерода с образованием CO_2 , то пленка кислорода на поверхности металла будет возобновляться за счет нового выделения кислорода, содержащегося в металле.

Для определения действительной примеси кислорода в меди, помимо микроскопических методов [Л. 7], можно рекомендовать метод перегиба образцов, отожженных в водороде при 850 °С в течение 30 мин. Образцы в виде проволоки или полосок не толще 1,5 мм многократно перегибаются (после отжига) на приспособлении, показанном на рис. 2-3, которое может быть сделано из стандартных ручных тисочков. Медь марки МО должна вы-

держивать четыре перегиба, а бескислородная медь марки МБ — десять перегибов (одним перегибом считается сгибание на 90° от прямого положения и обратно до прямого).

Однако самая лучшая бескислородная медь может быть испорчена и насыщена кислородом при небрежной ее обработке в процессе изготовления деталей, например при ковке, отжиге, травлении. Скорость насыщения меди кислородом быстро возрастает с повышением температуры. Так, если время проникания кислорода в медь на глубину $0,5 \text{ мм}$ при 600°C составляет сотни часов, то при 700°C оно составит уже 160 мин , а при 800°C всего лишь 15 мин [Л. 78]. Соответственно весьма различным может быть и газо-выделение в вакууме из деталей, изготовленных из меди.

Механические свойства прокатной меди неодинаковы для ее отожженного и неотожженного состояний, так как медь очень легко принимает наклеп (нагартовывается) не только при обработке давлением, но и при других видах механической обработки, что характеризуется следующими цифрами:

| | |
|--|--------|
| Временное сопротивление разрыву, кгс/мм^2 : | |
| отожженная | 20—25 |
| нагартованная | 40—49 |
| Относительное удлинение, %: | |
| отожженная | 50—30 |
| нагартованная | 6—2 |
| Твердость по Бринеллю: | |
| отожженная | 35—40 |
| нагартованная | 80—120 |

Медь хорошо отжигается при нагреве до $650\text{—}700^\circ\text{C}$ с охлаждением в воде или на воздухе (обдуванием), порог же рекристаллизации нагартованной меди лежит между 250 и 300°C , вследствие чего нагрев до 450°C

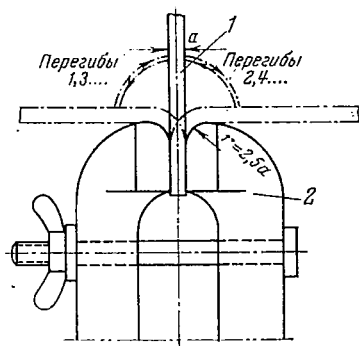


Рис. 2-3. Схема испытания меди методом перегиба.

1 — испытуемый образец (полоска, проволока); 2 — зажим.

даже с медленным охлаждением в некоторой степени снимает наклеп.

Предел ползучести меди при 20 °С составляет 7 кгс/мм², при 200 °С — 5 кгс/мм², а при 400 °С снижается до 1,4 кгс/мм² [Л. 9].

Благодаря наивысшей (среди конструкционных металлов) теплопроводности медь широко применяется в охлаждаемых устройствах, но вследствие этого свойства вакуумно-герметичная сварка ее значительно затруднена, равно как и пайка твердыми припоями крупных медных узлов. Высокая пластичность отожженной меди позволяет с успехом использовать ее для изготовления уплотнителей прогреваемых высоковакуумных разъемных соединений.

Медь легко амальгамируется ртутью, и в высоковакуумных ртутных установках применение меди ограничивается защищенными от паров ртути уплотнителями.

Обращаем внимание читателей на очень близкие значения температурного коэффициента линейного расширения меди и стали Х18Н10Т [16,4—19,3 × 10⁻⁶ мм/(мм·°С) и 16,00—20·10⁻⁶ мм/(мм·°С) соответственно], что позволяет не только паять их друг с другом твердыми припоями, но иногда и сваривать газодуговой сваркой.

Латунь марки Л62, ГОСТ 1019-47 (60,5—63,5% Cu, 36,0—39% Zn, примесей не более 0,5%) или латунь марки ЛС59-1, ГОСТ 1019-47 (57,0—60,0% Cu, 0,8—1,9% Pb, примесей не более 0,75%, остальное — цинк). Применение латуни в вакуумной технике ограничивается изготовлением мелких деталей, не подвергающихся нагреву. При нагреве в вакууме цинк из латуни начинает испаряться, загрязняя систему и постепенно превращая латунь в пористый металл.

Бронза рекомендуется из числа сортов, не содержащих цинка. Для вакуумных деталей, пружин, электроконтактов, шестерен хороша бериллиевая бронза марки БрБ2 ГОСТ 493-54 (2,0—2,3% Be, 0,25 Al, 0,15% Si, 0,50% Ni, 0,4% Fe, остальное — медь). Для подшипниковых втулок применяется также алюминиевая бронза марки БрА5 ГОСТ 493-54 (4,0—6,0% Al), содержащая цинк только как примесь.

Хромистая бронза в ряде случаев может служить заменителем меди, особенно в сварных вакуумно-герметических конструкциях, так как сваривается хромистая

бронза легче и соединения образует более надежные, чем чистая медь. Однако теплопроводность и электропроводность хромистой бронзы на 15—20% ниже, чем у чистой меди.

Хромистая бронза марки Бр. Х08 содержит не менее 99,0% меди, 0,5—0,8% хрома и менее 0,2% разных примесей (МРТУ-3-103-63) и выпускается в виде листа и проволоки. Бронза этой марки, а также бронза с содержанием хрома до 1,2% применяется как присадочный металл при вакуумной сварке меди. Для этих же целей иногда применяется бронза БрКМц3-1 (кремнемарганцевая), ГОСТ 493-54, а в последнее время более широко применяются сплавы № 5 и 204. Сплав № 5 в виде проволоки содержит до 0,6% никеля и 0,04—0,09% циркония, остальное — медь. В виде листа сплав № 5 содержит не менее 98,8% меди, 0,5—0,7% никеля и 0,15—0,3% циркония. В таком виде этот сплав, как и хромистая бронза, в ряде высоковакуумных конструкций с успехом заменяет медь, так как сваривается он лучше меди, а его физические свойства очень близки к меди.

Сплав № 204, выпускаемый в виде проволоки по ТУ ЦМО-03 № 50-64, является, пожалуй, лучшим присадочным металлом для аргоно-дуговой и гелиево-дуговой сварки меди.

Широко применяемый в электровакуумных приборах чистый никель находит сравнительно малое применение в вакуумной технике, за исключением изготовления гальванических покрытий и тепловых экранов.

Однако чистый никель обладает ценным свойством давать надежные вакуумные спаи как со сталью и медью, так и с алюминием, вследствие чего из никеля можно делать переходные детали для особо сложных паяных узлов.

Никель марки НО, ГОСТ 492-52, содержит никеля 99,6%, кобальта не более 0,2% и остальных примесей (Fe, Si, C, S и Cu) в сумме не более 0,2%.

Сплавы никеля: алюмель (марка НМцАК-2-2-1), хромель (НХ9,5), копель (НМ56,5), ферронихром (Х15Н60), нихром (Х20Н80), константан (МНМц40-1,5) — применяются в виде проволоки для изготовления термопар, а нихром также и для изготовления нагревателей.

Алюминий и его сплавы за последнее время приобретают в вакуумной технике все большее значение. Ли-

стовой алюминий, обычно марки АД-1М, ГОСТ 12592-67 (98,75% Al, 0,05% Cu, 0,1% Mn, 0,6% Si, 0,4% Fe, прочие примеси — 0,1%), является основным материалом для изготовления паропроводов масляных диффузионных насосов. Алюминий почти вдвое менее теплопроводен, чем медь, но все же его теплопроводность очень велика по сравнению со сталью, и это необходимо учитывать при сварке и пайке. Температурный коэффициент линейного расширения алюминия очень велик [в среднем для интервала температур 20—300 °C $k = 25,5 \cdot 10^{-6}$ мм/(мм·°C)]. Механические свойства алюминия невысоки: предел прочности 11—13 кгс/мм², относительное удлинение 24%, твердость по Бринеллю 30.

Для сварных конструкций применяется главным образом сплав АМц (96,65—97,2% Al, 0,2% Cu, 0,05% Mg, 1,0—1,6% Mn, 0,6% Si, 0,7% Fe, 0,1% Zn, прочие примеси 0,1%). Температурный коэффициент линейного расширения сплава АМц составляет в интервалах температур, мм/(мм·°C):

| | |
|-----------|-------------------------|
| 20—100 °C | 24 · 10 ⁻⁶ |
| 20—200 °C | 24,8 · 10 ⁻⁶ |
| 20—300 °C | 25,9 · 10 ⁻⁶ |

Коэффициент теплопроводности равен 0,38 для нагартованного и 0,45 для отожженного материала. Предел прочности АМц в полунагартованном состоянии 14,5—20 кгс/мм², относительное удлинение 18%, твердость по Бринеллю 40.

В последнее время для производства сварных вакуумных конструкций стали применять сплав АМгб, обладающий большей механической прочностью, чем сплав АМц, однако результаты при этом бывают не всегда удовлетворительными.

Как алюминий, так и сплав АМц способны давать вакуумно-герметизирующие спан.

Дюралюминий марки Д-1 или Д-16, ГОСТ 4783-68, имеет химический состав: 3,8—4,9% Cu, 0,4—1,8% Mg, 0,3—0,9% Mn, менее 0,1% Ni, 0,5—0,7% Fe, 0,5—0,7% Si, 0,3% Zn, остальное — Al. Механические свойства для группы Т: предел прочности 38—43 кгс/мм², относительное удлинение 18%, твердость по Бринеллю 100—105.

Дюралюминий не дает вакуумно-герметизирующих сплавов и вакуумно-герметично не сваривается. Он применяется в вакуумной технике главным образом для то-

ченных или фрезерованных деталей, входящих в алюминиевые узлы, так как коэффициенты линейного расширения дюралюминия и алюминия близки.

Индий вошел в вакуумную технику в последние годы главным образом в качестве материала для высоковакуумных уплотнителей и как составная часть некоторых припоев.

Благодаря своей мягкости, низкой плотности насыщенных паров (10^{-7} мм рт. ст. при 540°C) и способности смачивать многие металлы и сплавы, а также и ряд неметаллических материалов индий служит прекрасным уплотнителем, но он дорог и применение его рационально только в самых ответственных конструкциях, не требующих высокого прогрева (температура плавления индия 156°C).

2-6. ПРЕЦИЗИОННЫЕ СПЛАВЫ И ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ

Прецизионные сплавы. Эту группу составляют главным образом никелевые сплавы, обладающие точно определенными физическими свойствами, необходимыми для создания тех или иных узлов вакуумной системы, например для спаев со стеклом или с керамикой.

Важнейшее место среди них занимает ковар марки Н29К 18А, ЧМ-ТУ № 2977-51. Его химический состав: 0,2% С, 0,15—0,20% Si, 0,35—0,48% Mn, 0,008—0,015% S, 0,008% P, W и Cr — следы, 28,5—29,3% Ni, 17,9—18,5% Co, остальное — Fe.

Для спая со стеклом особое значение имеют физические свойства металла. Для ковара они в среднем следующие:

| | |
|---|--------------------------|
| Температура плавления | 1 450 °C |
| Температурный коэффициент линейного расширения в пределах температур, мм/(мм·°C): | |
| 20—300 °C | $4,7-5,45 \cdot 10^{-6}$ |
| 20—400 °C | $4,73-5,5 \cdot 10^{-6}$ |
| 20—500 °C | $5,6-6,4 \cdot 10^{-6}$ |

Ковар является наиболее распространенным в вакуумной технике сплавом для пайки с так называемыми тугоплавкими стеклами, имеющими средние значения температурного коэффициента линейного расширения.

Он хорошо паяется мягкими и твердыми припоями. Сваривается ковар труднее, чем сталь, но при соблюдении определенных условий могут быть получены надежные вакуумные швы. Отожженный ковар хорошо штампуются и обрабатывается на давальном станке.

Кроме ковара марки Н29К18А выпускается ковар марки Н29К18Б, ЧМТУ № 2978-51, отличающийся от первого тем, что при температурах ниже 35 °С он претерпевает рекристаллизацию с распадением аустенита, что значительно изменяет его физические свойства и в спаях с некоторыми сортами стекла приводит к растрескиванию.

Для спаев со стеклом, имеющим высокий температурный коэффициент линейного расширения, применяется сталь марки Х18ТФМ (ЭИ636), ЧМТУ № 4713-54, имеющая коэффициент линейного расширения в пределах $10,9-11,2 \cdot 10^{-6}$ мм/(мм · °С).

Сплав фени — сплавы железа с никелем нескольких марок имеют большое значение для изготовления спаев с керамикой и монокристаллами чистого корунда.

Важнейшие свойства сплава фени приведены в табл. 2-11.

Таблица 2-11

Основные свойства сплавов фени

| Марка сплава | Пределы температурного коэффициента линейного расширения в пределах температур, 1/°С | | Точка Кюри, °С |
|--------------|--|-------------------------|----------------|
| | 20—300 °С | 20—490 °С | |
| Н42 | $4,0-4,8 \cdot 10^{-6}$ | $5,4-6,4 \cdot 10^{-6}$ | 350 |
| Н45 | $7,0-8,0 \cdot 10^{-6}$ | $7,5-8,5 \cdot 10^{-6}$ | 425 |
| Н50 | $8,2-9,3 \cdot 10^{-6}$ | $8,2-9,3 \cdot 10^{-6}$ | 500 |

Для спаев со стеклом разработаны также сплавы: Н47Д5 с температурным коэффициентом линейного расширения $8-9 \cdot 10^{-6}$ мм/мм · °С, пригодный для спаев со стеклами С-87-1, С-88-1 и С-89-2; Н47ХБ с такими же основными свойствами, пригодный для пайки во влажном водороде; Н33К17 с температурным коэффициентом линейного расширения $7-8 \cdot 10^{-6}$ мм/мм · °С, пригодный для пайки со стеатитовой керамикой.

В ряде случаев бывает необходим металл с весьма малым коэффициентом линейного расширения. Такими свойствами обладает сплав инвар (Н36, ЭН36), темпе-

ратурный коэффициент линейного расширения которого при 20°C равен 10^{-6} мм/(мм·°C), но при нагревании выше 50°C быстро растет и при 100°C равен уже 2×10^{-6} мм/(мм·°C), при 200°C составляет $6,5 \times 10^{-6}$ мм/(мм·°C), а при 400°C достигает $16,5 \times 10^{-6}$ мм/(мм·°C). Инвар обладает очень малой теплопроводностью: $0,026$ кал/(см·сек·°C).

Тугоплавкие металлы. Для изготовления деталей нагревателей, тепловых экранов, токоподводов и т. п. применяются тугоплавкие металлы: вольфрам, молибден, тантал, сплав тантал-ниобий.

Вольфрам выпускается в виде штабиков квадратного сечения, прутков, проволоки и ленты.

Марки вольфрама, применяемые в вакуумной технологии: ВА-3 с кремнеалюминиевой присадкой, ВА-5 с кремнеалюминиевой присадкой, ВТ-15 с присадкой окиси тория (радиоактивен).

Вольфрам первых двух марок обычно идет на детали нагревателей, вольфрам марки ВТ-15 — на изготовление неплавящихся электродов при аргоно-дуговой сварке металлов и для изготовления катодов при обязательном соблюдении определенных правил техники безопасности.

Вольфрам очень тверд, хрупок, особенно после нагрева до 1100°C и выше, в результате которого волокнистый кованый или тянутый вольфрам приобретает мелкокристаллическую структуру.

Средние механические свойства вольфрама тянутого или кованого, неотожженного следующие: предел прочности при растяжении $180\text{—}400$ кгс/мм² (в зависимости от толщины), относительное удлинение $1\text{—}4\%$, твердость по Бринеллю 350. Вольфрам обрабатывается резанием при подогреве до $200\text{—}250^{\circ}\text{C}$.

Молибден марки МЧ чистый, без присадок, с содержанием примесей в сумме не более $0,073\%$ и молибден марки МРН с содержанием примесей в сумме до $0,1\%$ применяются для изготовления деталей нагревателей и остеклованных вводов.

Механические свойства неотожженного молибдена: предел прочности при растяжении $100\text{—}250$ кгс/мм², относительное удлинение $2\text{—}5\%$, твердость по Бринеллю $200\text{—}230$. Отожженный молибден имеет значительно большее удлинение — до 20% . Молибден выпускается промышленностью в виде штабиков квадратного сечения (заготовок), проволоки, прутков и ленты.

Сваривается молибден очень плохо. Обрабатывается на давящем станке при подогреве до 500—600°C.

Тантал является весьма ценным металлом для вакуумной техники из-за большой химической стойкости, тугоплавкости, способности при температурах 700—1300°C не только не выделять газы, но интенсивно поглощать их, тем самым улучшая вакуум в установке. Особенно важна способность тантала свариваться с вольфрамом и молибденом. Тантал выпускается в виде прутков и лент. Для изготовления давящих деталей и штамповки тантал предварительно отжигается в высоком вакууме ($P=5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) при температуре 1600°C, что делает его значительно более пластичным.

Механические свойства неотожженного тантала: предел прочности при растяжении 75—125 кгс/мм², относительное удлинение 1—1,5%, твердость по Бринеллю 350.

Отожженный тантал имеет относительное удлинение до 30%.

Сплав тантала с ниобием выпускается промышленностью в виде лент (ТУ от 13/ХІ 1954 г.) следующих марок: ТН-3 с содержанием ниобия до 3,5%, ТН-20 с содержанием ниобия до 23%.

Титан приобретает очень широкое распространение в машиностроении вообще, и, в частности в высоковакуумной технике, где он применяется главным образом для изготовления деталей для электрофизических насосов.

Титан и его сплавы имеют очень выгодное соотношение прочности и плотности, жаропрочны и коррозионно-стойки при невысоких температурах. При высоких температурах титан имеет свойство связывать атмосферные газы, что, с одной стороны, делает его особенно ценным в вакуумной технике, а с другой стороны, несколько затрудняет его производство и горячую обработку.

Титан имеет две аллотропические модификации: α и β . Однако промышленный титан существует в виде α -модификации (ниже 882°C) или $\alpha+\beta$. Большинство старых титановых сплавов имело последнюю структуру. К числу α -структурных относятся сплавы титан—алюминий—олово (марка А-110-АТ, США) и титан—алюминий (марка ВТЗ, ВТЗ-1, В15, СССР) и технический титан.

Сплавы с α -структурой прочны до 600°C, сравнительно хорошо свариваются, менее чувствительны, чем

$\alpha + \beta$ -сплавы, к воздействию атмосферных газов вплоть до температуры 1 090°C, однако менее пластичны.

Сплавы со сложной структурой при температурах порядка 430°C становятся непрочными и очень чувствительными к атмосферным газам при высоком нагреве.

Для титана и его сплавов весьма вредной примесью является водород, сильно повышающий чувствительность к надрезу, даже в количествах порядка сотых долей процента.

Путем отжига в высоком вакууме можно снизить содержание водорода в титане, например, с 0,015 до 0,005%, что сильно повышает его вязкость при том же пределе прочности.

Отжиг должен проводиться при давлении $5 \cdot 10^{-5}$ — $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. для разных сплавов по разным режимам: титан ВТ1Д—отжиг при 800°C, 2 ч; сплав ВТ2—отжиг при 700°C, 12 ч; сплав ВТ3—отжиг при 700°C, 2ч.

Разработка титановых сплавов продолжается весьма интенсивно, что обеспечивает постоянное появление сплавов с новыми свойствами. Поэтому при определении назначения марки сплава конструкторам необходимо обращаться к литературным источникам.

Технический титан ВТ1 (листы, прутки, проволока) хорошо сваривается аргоно-дуговой и контактной сваркой. При аргоно-дуговой сварке требуется особо тщательная газовая защита металла со всех сторон. Штамповка простых деталей может производиться в холодном состоянии, более сложная штамповка требует подогрева до 400°C (обогреваемые штампы). Отжиг для снятия наклепа производится при 525°C, с выдержкой до 6 мин, лучше в вакууме. То же самое относится и к обработке ВТ5. Сплав ВТ3 при температурах 450—500°C склонен к охрупчиванию.

Сплавы ВТ3, ВТ3-1 имеют при 20°C температурный коэффициент линейного расширения $k \approx 8,5 \times 10^{-6}$ мм/(мм·°C), а сплав ВТ5— 8×10^{-6} . Предел прочности этого сплава при растяжении составляет 80—95 кгс/мм² при относительном удлинении 9—20%. Сплавы ВТ3 и ВТ3-1, а также сплавы марок Т-3, Т-4, Т-6, Т-8 (не подверженные охрупчиванию при температурах 400—500°C) имеют предел прочности до 115 кгс/мм² при относительном удлинении 13—15%.

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

3-1. СТЕКЛО

Для изготовления различного вида остеклованных вводов, изолированных стеклом от металлической массы аппарата, но вакуумноплотных во всех своих частях и спаях, для малых сосудов Дьюара, вакуумметрических приборов, смотровых окон, а иногда и для целых вакуумных систем (например, на лабораторных откачных постах) широко применяется стекло.

Для этих целей в большинстве случаев применяются те же сорта стекол, что и в производстве электровакуумных приборов, в виде дровового стекла, т. е. штабиков (палочек), трубок, цилиндров и капилляров, служащих полуфабрикатом для ручного или машинного изготовления различных деталей аппаратуры.

По системе обозначения сортов стекла после буквы С следуют цифры, характеризующие величину температурного коэффициента линейного расширения данного сорта стекла, а затем через дефис порядковый номер разработки этого сорта.

Стекло—аморфный материал, не имеющий кристаллического строения. Это определяет его прозрачность и весьма малое газовыделение в вакууме (при комнатной температуре).

Стекло хрупко. Относительное удлинение стекла при растяжении для большинства его сортов практически равно нулю. При повышенных температурах (выше 350°C) стекло постепенно приобретает вязкость и в интервале температур 450—700°C постепенно размягчается, становится весьма тягучим, может вытягиваться в волокно (стеклоткань, стеклянная вата), образовывать тонкостенные сосуды, трубки, пузыри, листы.

По химическому составу стекло в подавляющем большинстве случаев является сплавом целого ряда окислов. В состав технического стекла обычно входят, помимо кремнезема SiO_2 , являющегося основной составной частью, еще и окислы калия, натрия, бора, бария, алюминия, свинца, цинка, магния, кальция в самых разнообразных пропорциях (от нуля до 30%) и сочетаниях.

Химический состав некоторых сортов технического стекла, массовая концентрация, %

| Сорта стекла | SiO ₂ | B ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | BaO | PbO | ZnO | Na ₂ O | K ₂ O |
|----------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|------|-----|-------------------|------------------|
| С-37-1 | 57,6 | — | 25,0 | 7,4 | 8,0 | — | — | — | — | 2,0 |
| С-39-1 | 73,0 | 16,5 | — | — | — | — | 6,0 | — | 3,0 | 1,5 |
| С-40-1 | 74,9 | 18,0 | 1,0 | 0,3 | — | — | — | — | 4,2 | 1,7 |
| С-47-1 | 68,5 | 17,2 | 2,5 | — | — | — | — | 5,0 | 6,8 | — |
| С-49-1 | 67,5 | 20,3 | 3,5 | — | — | — | — | — | 8,7 | — |
| С-49-2 | 66,9 | 20,3 | 3,5 | — | — | — | — | — | 3,9 | 5,4 |
| С-87-1 | 55,3 | — | 1,7 | — | — | — | 30,0 | — | 3,8 | 9,2 |
| С-89-5 | 72,5 | — | 1,5 | 5,5 | 3,5 | — | — | — | 15,0 | 2,0 |
| С-90-1 | 69,5 | — | — | 5,5 | 3,5 | 5,0 | — | — | 12,5 | 4,0 |
| Кварцевое прозрачное | 98,8 | — | 0,1 | 0,1 | — | — | — | — | — | — |

В табл. 3-1 приведен химический состав наиболее часто применяемых в вакуумной технологии сортов стекла.

В прямой зависимости от химического состава стекла стоит важнейшее его свойство—температурный коэффициент линейного расширения. Это свойство определяет возможность получения надежных спаев стекла с различными металлами, что иногда служит источником названия сорта стекла. Например, молибденовыми называются сорта стекла, способные давать хорошие спаи с молибденом.

Технические сорта стекла делятся на две основные группы: тугоплавкие и легкоплавкие. Названия этих групп отнюдь не определяют относительной легкоплавкости готового стекла. Они произошли от относительной плавкости шихты, из которой варится стекло. Готовое же стекло входит в ту или другую группу в зависимости от величины температурного коэффициента линейного расширения. К тугоплавким стеклам относятся сорта с коэффициентом линейного расширения ниже $5,5 \cdot 10^{-6}$ мм/(мм·°С). Эта группа называется иногда еще твердым стеклом. К группе легкоплавких относятся сорта с температурным коэффициентом линейного расширения от $5,5 \cdot 10^{-6}$ до $11 \cdot 10^{-6}$ мм/(мм·°С).

Наиболее тугоплавким (и по названию и по действительным свойствам) является кварцевое стекло, состоящее почти целиком из чистого кремнезема. Оно резко отличается от других сортов по температуре размягче-

ния, термостойкости, пределу прочности, твердости и обладает высокой прозрачностью для ультрафиолетовых лучей. Как видно из табл. 3-2, стекло выдерживает гораздо большие напряжения на сжатие, нежели на растяжение. Это происходит потому, что поверхность стекла, несмотря на видимую гладкость, покрыта обычно сетью микротрещин являющимися зачатками разрушения при растяжении материала.

Таблица 3-2

Основные физические свойства технического стекла разных сортов

| Сорт стекла | Температурный коэффициент линейного расширения ($\cdot 10^7$ при 2) — 200°C | Временное сопротивление, кгс/мм ² | | Теплопроводность, $\frac{\text{ккал}}{\text{см} \times \text{сек} \times ^\circ\text{C}}$ | Температура размягчения, $^\circ\text{C}$ | Термостойкость, $^\circ\text{C}$ | Диэлектрическая постоянная | Температурные пределы отжига, $^\circ\text{C}$ | |
|----------------------|--|--|--------------|---|---|----------------------------------|----------------------------|--|----------------|
| | | растяжению | сжатию | | | | | Нижний предел | Верхний предел |
| С-37-1 | 36—39 | 8,4 | — | — | 796—816 | 185 | — | 570 | 760 |
| С-39-1 | 38—41 | 7,8 | 110,6 | 0,003 | 630—650 | 230 | 4,2— —4,7 | 405 | 550 |
| С-40-1 | 40 | 7,0 | 109 | — | 620 | 240 | — | 410 | 530 |
| С-47-1 | 46—48 | 9,05 | 109 | 0,0021 | 580—600 | 200 | — | 410 | 565 |
| С-49-1 | 48—50 | 3—5 | — | — | 570—590 | 180 | — | 400 | 550 |
| С-49-2 | 48—50 | 3—5 | 85 | 0,0019 | 565—585 | 180 | 5,35 | 400 | 540 |
| С-87-1 | 86—90 | 4—6 | 85 | 0,0016 | 480—500 | 100 | 6,5 | 350 | 460 |
| С-89-5 | 87—91 | — | — | — | 530 | — | — | — | — |
| С-90-1 | 88—92 | — | — | — | 540—560 | 110 | — | 390 | 515 |
| Кварцевое прозрачное | 5,5— —6,1 | 7—12 | 160— —200 | 0,0033— —0,0064 | 1 500 | — | 3,5— —3,7 | — | — |

Обычные сорта технического стекла не отличаются особой тугоплавкостью и термостойкостью (способностью выдерживать без растрескивания быстрое охлаждение после высокого нагрева), но кварцевое стекло вполне пригодно для изготовления термостойких вакуумных деталей, высококачественных изоляторов, смотровых стекол системы, нагреваемой в процессе эксплуатации.

Кварцевое стекло обладает самым низким температурным коэффициентом линейного расширения [$0,55 \times 10^{-6}$ мм/(мм· $^\circ\text{C}$) при 20°C и $1,1 \times 10^{-6}$ мм/(мм· $^\circ\text{C}$)

при 1 200 °С], чем определяется его особая термостойкость, а следовательно, возможность изготовления из него жаропрочных деталей вплоть до рабочих камер индукционных печей.

Промышленность выпускает стержни и трубы из прозрачного кварцевого стекла (ВТУ № 53 и 59) длиной до 1 м и диаметром до 20 мм. Из непрозрачного кварцевого стекла выпускаются трубы диаметром до 500 (ВТУ № 54), длиной 1 500 мм.

В то время как обычные сорта технического стекла сравнительно легко спаиваются со многими металлами и сплавами, пайка кварцевого стекла с металлами затруднена ввиду указанных его особых тепловых свойств.

3-2. КЕРАМИКА

Ни один из сортов стекла в настоящее время не может удовлетворить всем требованиям техники, предъявляемым ею к электроизоляционным материалам. Поэтому за последние годы в вакуумной технике все более широко используется керамика. Хотя керамика является не менее, а может быть и более древним материалом, чем стекло, высококачественная техническая керамика и особенно вакуумно-плотная, газонепроницаемая керамика появились сравнительно недавно.

В высоковакуумной системе керамика применяется для изготовления электроизолирующих и жаропрочных деталей, тиглей и деталей подсобного характера (сопла горелок, подставки, облицовка печей и т. п.).

В отличие от стекла, все технические сорта которого являются вакуумно-плотным материалом, керамика далеко не всегда газонепроницаема и только некоторые ее виды отвечают требованиям техники высокого вакуума. Существует много сортов керамики, применяемой в вакуумной технике. Они могут быть объединены в четыре основные группы, которые кратко рассмотрим.

Стеатит — керамика, имеющая в основе своего состава тальк (до 84%) с добавками в разных пропорциях окиси магния (до 20%), углекислого бария (до 11%), различных сортов высококачественной глины (до 16%) и некоторых других материалов. Благодаря мягкости талька и его способности к весьма мелкому помолу стеатитовые керамики обладают малой усадкой при обжиге, что важно для получения изделий с точными размерами и хорошей шлифуемостью. Эта керамика до-

вольно легко режется тонкими карборундовыми кругами. Однако пайка стеатита с металлами довольно сложна. Стеатит имеет способность стареть, теряя с течением времени вакуумную плотность, что ограничивает его применение.

Форстерит. Высокочастотная керамика, вакуумно-плотная, имеющая в основе тальк, обожженный совместно с окисью магния и образовавший дисиликат магния. По механическим свойствам форстерит выше стеатита. Температурный коэффициент линейного расширения форстерита в среднем имеет также большее значение и близко подходит к температурному коэффициенту линейного расширения титана, что позволяет получать между ними почти согласованные спай. Аналогично стеатиту форстерит может стареть с образованием микротрещин.

Алундовая керамика имеет в основе состава глинозем (алунд, окись алюминия, Al_2O_3). Состав алундовых материалов весьма разнообразен. Кроме алунда, в них входят обожженные глины, углекислый барий, диборат бария, углекислый калий, в небольших количествах окись магния. Чем выше процент содержания алунда (от 70 до 98%), тем выше качество керамики как вакуумного материала, тем она прочнее, выше ее теплопроводность, а следовательно, и термостойкость. Высокоалюмооксидные сорта керамики паяются в вакууме с некоторыми металлами методом металлизации и применением активных припоев или флюсующих обмазок (с титаном или цирконием). Высшие сорта алундовой керамики отличаются особой прочностью при сжатии до 20 000 кгс/см². Температура их размягчения доходит до 1 900 °С.

Большое распространение получили материалы: миналунд, стоал, 22X, 22XC, сапфирит. Вакуумно-плотные узлы на основе миналунда применимы для сверхвысокого вакуума и прогрева до температуры 700 °С [Л. 10—12].

Миналунд М-7 наиболее распространен. Его химический состав: СаО—1,63%, SiO₂—4,34%, Al₂O₃—94,03%.

Сапфирит состоит из 98% Al₂O₃ и некоторого количества В₂O₃ и Мо (в сумме 2%). Сапфирит обладает очень высокими диэлектрическими свойствами (табл. 3-3) и повышенной теплопроводностью, а следовательно, и термостойкостью.

4-308 Физические характеристики основных типов вакуумно-плотной керамики [Л 12, 38, 39]

| Характеристика | Показатели по типам керамики | | | | |
|--|------------------------------|-------------------|----------------------------|---------------|----------------------------|
| | Стеатит | Форстерит | Алундовая 22-ХС | Алундовая М-7 | Сапфирит |
| Плотность, $г/см^3$ | 2,7 | 2,8 | 3,8 | 3,76 | 3,89—3,94 |
| Пористость по водопоглощению, % | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| Временное сопротивление при 20 °С, $кгс/см^2$: | | | | | |
| при растяжении | 210—680 | 550—600 | 1 200—2 000 | — | — |
| при изгибе | 700—1 700 | 1 250—1 600 | 3 200—4 000 | 4 250 | 3 000—4 000 |
| при сжатии | 3 500—6 400 | 5 600—6 800 | — | — | — |
| Временное сопротивление при ударном изгибе, $кгс/см^2$ | — | — | 6,5—7,2 | — | 6,5—7,2 |
| Твердость по Моосу | 7,5 | 7,5 | — | — | — |
| Теплопроводность, $кал/(см·сек·°С)$ | $6 \cdot 10^{-3}$ | $8 \cdot 10^{-3}$ | $25 \div 32 \cdot 10^{-3}$ | — | $50 \div 60 \cdot 10^{-3}$ |
| Средний температурный коэффициент линейного расширения ($k \cdot 10^{-7}$) в интервале температур, °С: | | | | | |
| 20—100 | 64 | 90 | — | — | — |
| 20—300 | — | — | 63—65 | — | 65—67 |
| 20—700 | 83—90 | 100,0 | — | — | — |
| 20—900 | — | — | 80—84 | 73 | 84—86 |
| Удельное электрическое сопротивление, $ом·см$ | — | — | 10^{14} | 10^{14} | 10^{14} |
| Термостойкость | Плохая | Плохая | Хорошая | Хорошая | Повышенная |
| Пробивное напряжение, $кв/мм$ | 10—35 | 9—10 | 30—45 | — | 32—47 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь ($tg \delta \cdot 10^4$) при 1 МГц и 20 °С | 3—30 | 3—5 | 3—5 | 3,1 | Менее 1,0 |
| Диэлектрическая проницаемость при 1 МГц и 20 °С | 5,0—6,5 | 6,0—6,5 | 9,5—10,3 | 8,9 | 10—10,7 |

3.3. ПЛАСТМАССЫ

Современные достижения химии позволяют производить неметаллические материалы, обладающие самыми разнообразными свойствами, часто не уступающие многим металлам по прочности и химической стойкости. Более того, наивысшие показатели по химической стойкости, эластичности, диэлектрическим свойствам в сочетании с пластичностью принадлежат именно синтетическим материалам.

Нет сомнения, что в недалеком будущем отечественная химическая промышленность сможет выпускать материалы с заранее задуманными физическими свойствами в самых различных их сочетаниях, превосходящими природные материалы. С точки зрения вакуумщиков в настоящее время главными недостатками синтетических материалов являются их недостаточная термостойкость, большое газовыделение и высокий температурный коэффициент линейного расширения, на порядок и более превосходящий тот же показатель у металлов, керамики и стекла. Все же из пластмасс уже теперь делаются многие детали вакуумной системы: уплотнители, диафрагмы, изоляторы — электрические и термические, гибкие трубопроводы и т. п.

Фторопласт-4 (фторлон-4) производится отечественной промышленностью по ГОСТ 10007-62 в виде рыхлой творожистой массы [Л. 13, 14], из которой дальнейшим прессованием и спеканием при 360—380 °С получают различные изделия: пленки, плитки, трубы, готовые детали. Имеются три марки фторопласта-4: марка А для переработки в конденсаторную или электроизоляционную пленку; марка Б для переработки в крупные изделия; марка В для переработки в мелкие изделия.

Фторопласт-4 является кристаллическим полимером тетрафторэтилена (в США называется тефлоном, в Англии — флюоном, во Франции — сорефлоном, в ФРГ — хостафлоном ТГ). Его тепловые характеристики: разложение при 415 °С, плавление — 327 °С (в вязкотекучее состояние не переходит), стеклование — около —120 °С.

При разных скоростях охлаждения от температуры спекания (360—380 °С) до температуры ниже 250 °С можно получить закаленные изделия с плотностью 2,15 г/см³ и степенью кристалличности около 50% или

незакаленные с плотностью $2,2 \text{ г/см}^3$ и степенью кристалличности свыше 65%, обладающие соответственно различными механическими свойствами.

Фторопласт-4 обладает наивысшей химической стойкостью из всех поделочных материалов и весьма высокими электроизолирующими свойствами. Он совершенно не поддается воздействию кислот, щелочей, органических растворителей, не смачивается водой, не имеет адгезии к клеям. Хорошо обрабатывается резанием, а при условии медленной деформации — и давлением. При нагреве выше 200°C начинается выделение паров фтора в очень малых количествах.

По сравнению с вакуумными резинами фторопласт-4 обладает более высокой термостойкостью и морозостойкостью. Собственное газовыделение фторопласта примерно в 40 раз меньше, чем у лучших сортов вакуумных резин.

Фторопласт-4 способен под сжимающей нагрузкой медленно заполнять все неровности уплотняемых поверхностей. Хотя по сравнению с резинами фторопласт-4 имеет малую упругость и большую остаточную деформацию, за счет небольшого коэффициента трения с металлами (0,04—0,1) он находит применение в основном для уплотнения вакуумных вводов движения.

Высокие диэлектрические свойства фторопласта-4, мало зависящие от температуры и частоты приложенного напряжения, позволяют широко его использовать для изготовления различного рода изоляторов и электрических вакуумных вводов.

Основные свойства фторопласта-4

| | |
|--|--------------------------------|
| Плотность, г/см^3 | 2,15—2,20 |
| Водопоглощение за сутки, % | 0,00 |
| Теплоемкость, $\text{ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ | 0,25 |
| Теплопроводность, $\text{кал/см} \cdot \text{сек} \cdot ^\circ\text{C}$ | 0,058 |
| Температура разложения, $^\circ\text{C}$ | Выше 415 |
| Допустимая рабочая температура, $^\circ\text{C}$ | 200 |
| Морозостойкость, $^\circ\text{C}$ | —110 |
| Температурный коэффициент линейного расширения | $(55—210) \cdot 10^{-6}$ |
| Предел прочности при растяжении, кгс/см^2 | 140—315 |
| Относительное удлинение, % | 250—500 |
| Предел упругости при сжатии, кгс/см^2 | 30 |
| Твердость по Бринеллю | 4 (незакаленный) |
| Удельное поверхностное электрическое сопротивление, ом | $(1,5 \div 2,7) \cdot 10^{17}$ |
| Удельное объемное электрическое сопротивление, $\text{ом} \cdot \text{см}$ | $1 \cdot 10^{17}—10^{20}$ |
| Электрическая прочность при 20°C , кв/мм | 26 |

| | |
|--|----------|
| Диэлектрическая проницаемость при 50, 10 ³ , 10 ⁶ <i>гц</i> | 1,9—2,2 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь при 50, 10 ³ , 10 ⁶ <i>гц</i> | 0,00025 |
| Горючесть | Не горит |

Выпускается также фторопласт-4Д, имеющий те же физико-механические свойства, но позволяющий при смешении его со смазывающими веществами переработку в детали методом экструзии на плунжерных прессах, чего нельзя делать при переработке фторопласта-4. Из неспеченного фторопласта-4Д со смазывающими веществами делается фторопластовый уплотнительный материал ФУМ, выпускаемый промышленностью по МРТУ М-870-62.

Материал ФУМ марки В применим для всех сред, кроме кислорода, азотной кислоты и других сильных окислителей. Он выпускается трех профилей: круглый — диаметром от 1 до 22 *мм*, квадратный — от 3×3 до 8×8 *мм* и полосовой — от 2×4 до 2×8 *мм* кусками не менее 1000 *мм*. Материал ФУМ применяется в закрытых уплотнениях при температурах от —60 до 150 °С.

Кроме указанных выпускаются также фторопласт-40 (фторлон-40) по ВТУ-817-59 (марки: 40П — для прессования, 40Ш — для переработки экструзией) и фторопласт-42 (фторлон-42) по ВТУ-208-62 (марка 42П — для прессования и экструзии). Фторопласт-40 тверже фторопласта-4 и менее термостоек, уступает последнему по электроизоляционным свойствам и химической стойкости, но более технологичен и почти не склонен к ползучести.

Фторопласт-42 значительно уступает остальным маркам фторопласта почти по всем показателям и может применяться только в менее ответственных соединениях.

Полиимид как уплотнительный материал стал применяться в вакуумной технике недавно. Полиимид марки ПМ в виде пленки толщиной 30—50 *мкм* выпускается по ТУ № П-551-67. Пленка ПМ термостойка до 300 °С, морозостойка до минус 190 °С, прочна (временное сопротивление на растяжение 1200 *кгс/см²* при удлинении около 20%), обладает температурным коэффициентом линейного расширения, близким к алюминию.

Другой вид полиимида (прессовочный материал) в отечественной вакуумной технике еще не получил широкого применения. По литературным данным [Л. 13,

15] выпускаются уплотнители из прессованного полиимида, являющегося жестко-упругим материалом, с собственным газовыделением, меньшим, чем у фторопласта, но большим, чем у меди. К отрицательным свойствам прессованного полиимида следует отнести его относительную гигроскопичность, вследствие которой он разрушается при длительном кипячении в воде и под действием водяного пара.

Прессовочный материал ПМ-67 имеет примерно такие же физические свойства, как и пленка ПМ.

Полиэтилен имеет три вида в зависимости от давления, при котором производится его полимеризация: полиэтилен высокого давления ВД, полиэтилен среднего давления СД и полиэтилен низкого давления НД. Все три вида отличаются друг от друга по свойствам и технологии переработки.

Полиэтилен ВД выпускается промышленностью по МРТУ-6-05-889-65 нескольких сортов, маркирующихся по «индексу расплава», т. е. по массовому количеству материала, вытекающему за 10 мин при 190°C через капилляр диаметром 2,095 и длиной 8 мм под нагрузкой 2,16 кгс. В обозначении марок первая буква и цифра (П-2) обозначают полиэтилен ВД, следующие три цифры — десятикратную величину индекса расплава, а последняя буква указывает на основное назначение данного сорта.

Полиэтилен НД также выпускается нескольких сортов и маркируется по аналогичному принципу, но начиная со знаков П-4. Основные физические свойства полиэтилена приведены в табл. 3-4.

Собственное газовыделение полиэтилена приближается к газовыделению фторопласта (рис. 3-3), но интервал рабочих температур у него много уже. Поэтому полиэтилен может служить хорошим уплотнителем только при температурах от -50 до $+50$ °С. Ионизирующее облучение повышает его механическую прочность и термостойкость. Полиэтилен недостаточно маслостоек и светостоек, дешев и удобен для всевозможных подсобных изделий (лабораторная посуда, мешки, чехлы, изоляционная пленка и т. п.).

Полиамиды (П-68, П-6) с собственным газовыделением, близким к газовыделению полиэтилена, пригодны для изготовления небольших, непрогреваемых деталей вакуумных систем. Прочность материала П-68 составля-

Физические свойства некоторых сортов полиэтилена [Л. 13]

| Характеристика | Полиэтилен ВД | Полиэтилен НД | Полиэтилен СД |
|---|---|---|---|
| Плотность, $г/см^3$ | 0,918—0,935 | 0,95 | 0,96—0,97 |
| Предел прочности, $кгс/см^2$: при растяжении | 120—160 | 220—320 | 270—330 |
| при изгибе | 120—170 | 200—350 | 250—400 |
| Модуль упругости при изгибе, $кгс/см^2$ | 1 500—2 500 | 5 500—3 000 | 8 000—10 500 |
| Предел текучести при растяжении, $кгс/см^2$ | 90—100 | 220—260 | 250—300 |
| Относительное удлинение, % при скорости растяжения: | | | |
| 100 мм/мин | 150—600 | 400—800 | 20—400 |
| 50 мм/мин | — | — | 400—900 |
| Удлинение при достижении предела текучести, % | — | 15—30 | 5—10 |
| Удельная ударная вязкость, $кгс \cdot см/см^2$ | — | Не ломается | Не ломается |
| Твердость по Бринеллю | 1,4—2,5 | 4,5—5,8 | 5,6—6,5 |
| Удельное объемное электрическое сопротивление, $ом \cdot см$ | 10^{17} | 10^{17} | 10^{17} |
| Диэлектрическая проницаемость при $10^6 гц$ | 2,2—2,3 | 2,1—2,4 | 2,3 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь при $10^6 гц$ | $2 \cdot 10^{-4} \div 3 \times 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4} \div 5 \times 10^{-4}$ | $2 \cdot 10^{-4} \div 4 \times 10^{-4}$ |
| Электрическая прочность, $кв/мм$: | | | |
| при толщине 1 мм | 45—60 | 45—60 | 45—60 |
| " " 2 мм | 28,36 | 28—36 | 29—31 |
| Температура плавления, °С | 105—108 | 120—125 | 127—130 |
| Теплостойкость по НИИПП, °С | 108—110 | 120—128 | 128—133 |
| Температурный коэффициент линейного расширения в интервале от 0 до 100 °С | $2,2 \div 5,5 \times 10^{-4}$ | $4 \cdot 10^{-4}$ | $2,2 \div 5,5 \times 10^{-4}$ |
| Морозостойкость, °С | —70 | Ниже —70 | —70 |
| Водопоглощение за 30 суток, % | 0,04 | 0,03—0,004 | 0,01 |
| Светостойкость, ч, не менее | 240 | 240 | — |

ет при растяжении 500—700 кгс/см², при сжатии 700—900 кгс/см².

Органическое стекло (плексиглас) хорошо обрабатывается резанием, склеивается и сваривается (табл. 3-5). Применяется в высоковакуумной технике, в частности для деталей питателей азотных ловушек.

Таблица 3-5

Основные технические свойства органического стекла

| Характеристика | Показатели для стекла марки | |
|--|-----------------------------|-------------------------------|
| | Ст-1 (ВТУ МХП Бу 11-57) | Ст-2-55 (РТУ МХП Бу 27-56) |
| Плотность, г/см ³ | 1,18 | 1,19 |
| Теплостойкость, °С | 110—120 | 130—135 |
| Температурный коэффициент линейного расширения: | | |
| при 20 °С | 77·10 ⁻⁶ | 69·10 ⁻⁶ |
| при 100 °С | 115·10 ⁻⁶ | 84·10 ⁻⁶ |
| Коэффициент преломления | 1,48 | 1,48 |
| Предел прочности при статическом изгибе, кгс/см ² | 1 207 | 1 212 |
| То же при растяжении, кгс/см ² | 780 | 923 |
| Относительное удлинение, % | 4 | 3,3 |
| Удельная ударная вязкость, кгс·см/см ² | 12,5 | 14,6 |
| Твердость по Бринеллю | 23,7 | 29,9 |
| Водопоглощение за 24 ч, % | 0,057 | 0,093 |

Органическое стекло СТ-1 может быть склеено 3-5%-ным раствором того же стекла в дихлорэтано, а стекло марки Т-2-55 — клеем В31-Ф9.

Сварка органического стекла производится путем местного разогрева поверхностей соединения до 150 °С, для чего между ними вводится стальная лента, нагреваемая пропусканием тока и последующего сжатия с усилием 10—15 кгс/см² с выдержкой в течение 20 мин.

Прессовочный материал АГ-4 (ОМ-ТУ № 431-57) — теплостойкий и влагостойкий волокнистый прессматериал, в основе которого лежит стеклянное волокно, пропитанное модифицированной фенольно-формальдегидной смолой. Материал обладает механическими свойствами, не уступающими свойствам чугуна, достаточно кислотоупорен и маслостоек, хороший диэлектрик. Диа-

пазон рабочих температур материала АГ-4 лежит между -60 и $+200$ °С, кратковременно (1—2 ч) он выдерживает температуру в 250 °С. Малая усадка при прессовании, высокая прочность и хорошая текучесть позволяют изготавливать из этого материала тонкостенные и резьбовые детали. Имеются два сорта материала: сорт В — в виде волокна-путанки и сорт С — в виде лент разной ширины и длины. Из них при прессовании под удельным давлением около $1\,000$ кгс/см² при температуре 150 — 160 °С с выдержкой в $1,5$ мин на 1 мм толщины стенки получают изделия, обладающие свойствами, приведенными в табл. 3-6.

Таблица 3-6

Основные технические свойства прессматериала АГ-4

| Характеристика | Показатели по сортам | |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| | В | С |
| Плотность, г/см ³ | 1,7—1,8 | 1,7—1,8 |
| Теплостойкость по Мартенсу, °С | 280 | 280 |
| Водопоглощение за 24 ч, г/см ² | 0,0078 | 0,0078 |
| Маслостойкость и бензостойкость при 20 °С за 24 ч, % | 0,05 | 0,05 |
| Кислотостойкость при 20 °С за 24 ч, % | 0,1 | 0,1 |
| Температурный коэффициент линейного расширения при 20 ° | $(8 \div 1) \cdot 10^{-6}$ | $(8 \div 10) \cdot 10^{-6}$ |
| Теплопроводность, ккал/(сек·см·°С) | $6 \cdot 10^{-4}$ | — |
| Предел прочности при статическом изгибе, кгс/см ² | 1 000 | 2 000 |
| То же после выдержки 100 ч при 200 °С | 1 360 | — |
| То же после выдержки 300 ч при 250 °С | 400 | — |
| Предел прочности при сжатии, кгс/см ² | 1 300 | 1 300 |
| Предел прочности при растяжении, кгс/см ² | 800 | 2 000—4 000 |
| Ударная вязкость, кгс·см/см ² | 30—100 | 150—200 |
| То же после выдержки 300 ч при 200 °С | 25 | — |
| Твердость по Бринеллю | 130—145 | 140 |
| Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом | $1 \cdot 10^{12}$ | $1 \cdot 10^{12}$ |
| Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см | $1 \cdot 10^{12}$ | $1 \cdot 10^{12}$ |
| Электрическая прочность, кв/мм | 15 | 13 |
| Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 гц | 0,05 | 0,05 |
| Диэлектрическая проницаемость при 10^6 гц | 8 | 8 |

Вследствие высокого газовыделения этот материал применим только в устройствах с низким вакуумом.

Текстолит листовой (ГОСТ 2910-67) и прутковый (ГОСТ 5385-68), текстолит гибкий марки МА (ТУ МХП 488-50) служат материалом для внешних изолирующих деталей, панелей щитков, изолирующих прокладок вводов на форвакууме, и тому подобных деталей, требующих механической обработки.

Детали, находящиеся вне вакуумной полости (электрические разъемы, ручки, маховички и т. п.), изготавливаются из пресспорошков различных марок и других пластмасс.

3-4. РЕЗИНЫ

Наиболее широко распространенным материалом для изготовления различного вида уплотнителей в аппаратуре низкого, среднего и высокого вакуума является вакуумная резина, обладающая незначительной пористостью и сравнительно малым (по сравнению с обычными сортами резины) газовыделением.

Выпускаемые нашей промышленностью вакуумные резины делятся, с одной стороны, на обычные и термостойкие и, с другой — на маслостойкие и немаслостойкие.

Белая вакуумная резина марки 7889 — немаслостойкая, наиболее эластичная, выпускается в виде пластины, трубок (вакуумных шлангов) и шнура круглого и прямоугольного сечения. Этот сорт резины пригоден для уплотнителей, работающих в температурных условиях от $+70$ до -10°C . Длительное охлаждение ниже -10°C делает эту резину хрупкой, непригодной для уплотнения.

Пластины сорта 7889 выпускаются толщиной от 2 до 20 мм, шириной и длиной от 250 до 500 мм; физико-механические и физико-химические показатели должны укладываться в нормы, приведенные в табл. 3-7.

Трубки (шланги) выпускаются длиной от 600 до 1500 мм. Шнуры круглого и прямоугольного сечения выпускаются длиной 6000 мм, диаметром от 3 до 30 мм (или по высоте и ширине прямоугольного сечения).

Более морозостойкими, но такими же нестойкими против органических растворителей и нетермостойкими являются сорта ИРП-1118 и ИРП-1289. Сорта ИРП-1345, ИРП-1399 и 51-1433 наиболее термостойки, но неодина-

Физико-механические свойства вакуумных резин

| Характеристика | Нормы по сортам | | | | | | | | |
|---|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Сорт 7889 | Сорт 9024 | Сорт ИРП-1015 | Сорт ИРП-1368 | Сорт ИРП-1399С | Сорт 51-1433 | Сорт ИРП-2043 | Сорт ИРП-1118 | Сорт ИРП-1289 |
| Тип каучука | Натуральный | СКМ-26 | СКН-40 | СКТВ-1 | СКТВ-1 | СКТФВ-803 | СКФ-26 | СКМС-10 | СКМС-10 |
| Относительное удлинение при разрыве, % не менее | 550 | 350 | 400 | 130 | 200 | 400 | 160 | 160 | 260 |
| Остаточное удлинение, %, не более | 20 | 17 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 |
| Условноравновесный модуль, кгс/см ² | 24 | 45 | 34 | 30—40 | 40—50 | 40—50 | 70 | 84 | 45 |
| Температурный диапазон работоспособности, °С | -10 ÷ +70 | -30 ÷ +70 | -25 ÷ +70 | -50 ÷ +200 | -50 ÷ +200 | -60 ÷ +200 | -30 ÷ +200 | -60 ÷ +70 | -60 ÷ +70 |
| Стойкость к маслу и бензину | Нестойкая | Стойкая | Стойкая | Нестойкая | Нестойкая | Нестойкая | Стойкая | Нестойкая | Нестойкая |
| Скорость газовыделения при высшей рабочей температуре, $\text{л} \cdot 10^{-4}$ лкмл/(сек·см ²) | 0,4 | 0,2 | 1,8 | 3,3 | 2,36 | 3,6 | 2,0 | 0,5 | 1,2 |
| Проницаемость по азоту при 25 °С, см ³ /(см ² ·сек·кгс/см ²) | $7,5 \cdot 10^{-8}$ | $7 \cdot 10^{-8}$ | $4 \cdot 10^{-8}$ | $231 \cdot 10^{-8}$ | $190 \cdot 10^{-8}$ | $200 \cdot 10^{-8}$ | $0,4 \cdot 10^{-8}$ | $7,3 \cdot 10^{-8}$ | $9,1 \cdot 10^{-8}$ |

ково хорошо противостоят растворителям. Наиболее универсальным является сорт ИРП-2043, маслобензостойкий, термостойкий, обладающий хорошими уплотняющими свойствами.

Резина сорта 9024: черная, маслостойкая, значительно более твердая, чем резина 7889, обладает примерно вдвое меньшим газовыделением. Она выпускается только в виде пластин (табл. 3-6) по тем же ТУ, что и резина сорта 1015, отличающаяся меньшей прочностью, но несколько большей маслостойкостью, чем сорт 9024.

Для устройств, прогреваемых до температуры 200 °С, в качестве уплотнителей могут применяться прокладки из резины сорта ИРП-2043, если к этим устройствам не предъявляется требования особой чистоты остаточной среды. При нагреве резины ИРП-2043 выделяются главным образом азот, водород, пары воды, углекислый газ и очень малое количество низкомолекулярных углеводов.

По своим физико-механическим свойствам резина ИРП-2043, изготавливаемая на основе фтористого каучука, довольно близка к зарубежному эластомерному материалу «Витон».

В западноевропейской и американской высоковакуумной технике получили распространение бутиловая резина, которая, судя по литературным данным [Л. 17], является сейчас лучшим из упругих прокладочных материалов, и фтористый эластомер «Витон» (сорта А и В), имеющий несколько большее газовыделение, но, вероятно, более термостойкий, чем бутиловая резина.

3-5. ПАСТЫ, ЗАМАЗКИ, ЗАСТЫВАЮЩИЕ УПЛОТНИТЕЛИ

Как указывалось ранее, форвакуумное оборудование, арматура и аппараты, работающие при низком вакууме, не так чувствительны к очень малым течам или собственному газовыделению уплотнителей, как высоковакуумные установки. Поэтому сборка форвакуумных насосов, например, производится с уплотнением стыковых поверхностей высококачественными лаками (глифталевым, шеллачным) или термостойкими герметиками (материал ФКС, материал ТГ-18, материал ВГК-18 № 2) [Л. 13]. С помощью этих материалов могут герметизироваться и форвакуумные трубопроводы, если они отделены от высоковакуумной системы соответствующими высоковакуумными вентилями или затворами.

В некоторых случаях, главным образом при испытаниях еще неготовых высоковакуумных установок, встречается необходимость временно (на один раз) достигнуть вакуумной герметичности хотя бы и не вполне надежными средствами, но с малой затратой времени и

при сравнительно низком предельном вакууме (10^{-4} — 10^{-5} мм рт. ст.). Для этих целей, а также для временного, аварийного устранения отдельных, единичных течей в процессе эксплуатации высосововакуумных установок применяются вакуумные пасты (смазки), замазки и застывающие уплотнители (заливочные массы).

Некоторые авторы упоминают о них, как о монтажных эксплуатационных материалах, и даже считают их для некоторых конструкций единственным средством получения необходимой герметичности. Это справедливо только для притертых пробковых кранов из стекла. Считаю необходимым предостеречь наших читателей от соблазна применять эти материалы и для других вакуумных устройств в постоянной практике. При современном состоянии последней следует прибегать к ним только в единичных случаях как к временной мере и считать состояние аппарата, в котором применены эти материалы, нерабочим или требующим ремонта, так как их собственное газовыделение слишком велико.

Для временного улучшения прилегания резиновых уплотнителей при испытаниях незаконченных узлов наиболее часто применяется вакуумная смазка (уплотняющая, типа Рамзая) по ВТУ МНП № 450-53.

Главными составляющими частями ее являются каучук (натуральный) и вазелин, для более густых сортов пасты добавляется парафин (три части каучука, 10 частей вазелина, две части парафина). Паста варится при 100 — 150 °С длительное время при интенсивном перемешивании до получения вполне однородной клеобразной массы [Л. 18].

Для лучшего уплотнения резиновые прокладки смазываются легким слоем такой пасты с обеих сторон. При этом возможно уплотнение и грубо (не ниже третьего класса чистоты) обработанных стыковых поверхностей. Так же уплотняют и соединения резиновых шлангов с металлическими или стеклянными трубками: конец шланга слегка смазывается изнутри пастой и плотно надевается на трубку.

Для временной ликвидации отдельных течей в металле (трещин, раковин) употребляются вакуумные замазки типа пластилина, состоящие обычно из вязких нефтяных масел или остатков перегонки вакуумных масел и 50—60% нейтральных наполнителей (нифузорной земли и т. п.). Они выпускаются по ВТУ № 452-53.

Для герметического соединения на короткое время металла со стеклом или заделки трещин в стекле применяются застывающие уплотнители, т. е. термопластичные заливочные массы, плавящиеся или сильно размягчающиеся при температурах 50 — 90 °С и застывающие при комнатной температуре.

В качестве такого уплотнителя используют так называемую менделеевскую замазку, состоящую из сплавленных с порошкообразными наполнителями канифоли и воска. Наполнителями могут служить пермза, асбест, мумия.

На той же основе канифоли и воска составляется и пиценн, плавящийся при температуре 60 — 90 °С и быстро застывающий при комнатной температуре.

3-6. КЛЕИ

Для форвакуумных систем в ряде случаев выгодно применять склеенные детали и даже узлы, так как современная химия предложила ряд высокопрочных, клеящих металл и пластмассы, со-

ставов, часть которых обладает термостойкостью, не меньшей, чем оловянно-свинцовые припой. Мисгни из выпускаемых сейчас клеев достаточно устойчивы против разбавленных кислот, бензина, минеральных масел и щелочей.

Феноло-поливинилацетатные клеи марок БФ-2, БФ-4, ВС-10Т представляют собой композиции, дающие соединения металлов с пределами прочности при сдвиге 170—220 кгс/см^2 , а при равномерном отрыве 320—600 кгс/см^2 . Клей марки ВС-10Т пригоден и для склеивания неметаллических материалов; он стоек до температуры 300 °С. Еще более термостоек (до 350 °С) клей марки ВС-350. Клей БФ значительно менее теплостойки, но они маслобензостойки. Например, действие бензина на соединение, выполненное клеем БФ-2, даже за 500 ч вызывает снижение прочности всего на 3—5%.

Эпоксидные клеи марок Л-4, ВК-9 и КЛН-1 отверждаются при комнатной температуре. Эти клеи готовят на месте потребления, так как срок их жизни до отверждения 45—120 мин. Эпоксидные клеи нетермостойки.

Кремнийорганические клеи отличаются большей термостойкостью. Для склеивания металлов применяются клеи марок ВК-2 и ВК-8. Клей ВК-2 при нагреве до 300 °С теряет 20% прочности. Техническая характеристика кремнийорганических клеев приведена ниже.

| | Клей ВК-2 | Клей ВК-8 |
|---|-----------|-----------|
| Предел прочности, кгс/см^2 : | | |
| при сдвиге | 90 | 155 |
| при равномерном отрыве | 220 | 215 |
| при неравномерном отрыве | 8—9 | 13—15 |
| Температура склеивания, °С | 200 | 180 |
| Давление при склеивании, кгс/см^2 | 8—15 | 8—15 |
| Продолжительность выдержек под давлением, ч | 1 | 3 |

Кремнийорганический клей марки МАС-1 используется при соединении вулканизированной полисилоксановой резины с металлом. Он смешивается с отвердителем (перекись бензоила) перед употреблением. Выдерживает длительно нагрев до 250 °С.

Карбинольный клей с отвердителем (перекись бензоила) может применяться для склеивания стали, чугуна, алюминия, цинка, стекла, керамики, мрамора, слюды, многих пластмасс. Он интересен тем, что его прочность в соединениях почти одинакова как на сдвиг, так и на отрыв. Не рекомендуется склеивать карбинольным клеем медь и ее сплавы, органическое стекло, резину. Карбинольный клей не термостоек (не выше 60 °С), хрупок при ударах, маслостоек.

Существует и еще целый ряд подобных клеев. Все они при склеивании требуют чрезвычайно тщательной подготовки соединяемых поверхностей и выдержки под сжимающим усилием в 1—5 кгс/см^2 при повышенных температурах (порядка 120—180 °С) от 30 мин до нескольких часов или в течение десятков часов при температурах 70—100 °С.

3-7. ВАКУУМНЫЕ МАСЛА

Механические форвакуумные насосы, а также высоковакуумные диффузионные масляные насосы могут работать только на специальных сортах высококачественного вакуумного масла.

Для механических форвакуумных насосов требуется масло с высокой термоокислительной стойкостью, высокой сопротивляемостью осмоливанию, не содержащее самых легких и самых тяжелых фракций, с температурой вспышки не ниже 200 °С. Этим данным в основном соответствует масло марки ВМ-4, ГОСТ 7903-56. Кинематическая вязкость его (по ГОСТ 33-53) лежит в пределах 47—57 мм²/сек при температуре 50 °С.

Требования, предъявляемые к маслам для бустерных и высоковакуумных масляных диффузионных насосов, много сложнее. Для обеих категорий насосов масла должны обладать следующими качествами: высокой термической и термоокислительной стойкостью; высоким давлением пара в кипятыльнике насоса при возможно низких рабочих температурах; максимальной однородностью фракционного состава; химической инертностью по отношению к конструкционным материалам насосов.

Помимо того, масла для высоковакуумных насосов должны иметь наименьшую упругость пара при комнатной температуре, в то время как для бустерного масла эта упругость лишь не должна превышать 1 · 10⁻⁵ мм рт. ст. Высоковакуумные масла должны обладать наименьшей способностью растворять в себе газы [Л. 19].

Отечественная промышленность выпускает несколько сортов минеральных вакуумных масел: масло для вспомогательных (бустерных) пароструйных насосов по ГОСТ 9184-59 и масла ВМ-1, ВМ-2, ВМ-5 для высоковакуумных диффузионных насосов.

Кроме того, в высоковакуумных насосах применяются в качестве рабочей жидкости и сложные эфиры фталевой и себациновой кислот, а также полифениловые эфиры.

Эфиры ОФ (фталевой кислоты) и ОС (себациновой кислоты) позволяют достигать при помощи диффузионных насосов предельного вакуума порядка 10⁻⁸—10⁻⁷ мм рт. ст.

Полифениловые эфиры отличаются особой однородностью. При их использовании в соответствующем оборудовании возможно достижение предельного вакуума 5 · 10⁻¹⁰ мм рт. ст. [Л. 19].

Масла на основе кремнийорганических соединений (марки: ПЭС-В-1; ПЭС-В-2; ПФМС-2/5Л; ФМ-1) обладают рядом несомненных преимуществ по сравнению с минеральными маслами и эфирами, особенно по термоокислительной стойкости; так, например, наименее воздухостойкие масла этого класса (ПЭС-В-1 и ПЭС-В-2) в 250 раз более стойки, чем минеральные масла, а масло марки ФМ-1 наряду с высокой воздухостойкостью позволяет получать вакуум, как и полифениловые эфиры, 5 · 10⁻¹⁰ мм рт. ст.

Глава четвертая

ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ И ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ВАКУУМЕ

4-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Известно, что нет конструкционных материалов абсолютно газонепроницаемых, так же как нет и материалов, хотя бы в какой-то мере не насыщенных газами и

не способных отделять их в высоком вакууме. Очевидно, нет также и совершенно неиспаряемых материалов: при известных температурных условиях в высоком или сверхвысоком вакууме все материалы способны испаряться и имеют присущую каждому из них плотность паров. Правда, в современных условиях не все пары можно экспериментально получить при измеримой их плотности. Плотность паров некоторых материалов пока можно только вычислить.

Все материалы, кроме того, имеют способность сорбировать газы, т. е. удерживать на своей поверхности различные количества тех или других газов, с которыми они соприкасались, и отдавать (десорбировать) их в вакууме. При этом десорбция газов в вакууме протекает с разной интенсивностью при различных температурных условиях и различных давлениях.

Не следует смешивать явления сорбции и коррозии. Первая имеет характер связывания газов или жидкостей твердым телом (в рассматриваемом нами случае) и только в редких случаях приводит к нарушению целостности материала сорбента. Вторая имеет четко выраженный характер химической реакции, сопровождающейся разрушением сорбента (поглощающего тела).

В практике производства высоковакуумной аппаратуры имеют большое значение не только физико-химические свойства того или другого конструкционного материала и присущие им газопроницаемость и газовыделение в вакууме, но и влияния, которые могут оказать на эти качества материала выбираемые нами методы его обработки: различные температуры и газовые среды для отжига металла или его пайки, режимковки, методы сварки, способы полировки и даже зачистки поверхностей, режим предварительной подготовки уплотнителей и многое другое. Все это может стать факторами, определяющими качество вакуумной системы и соответствие ее своему назначению. При этом, конечно, чем выше вакуум, при котором должен будет работать изготавливаемый аппарат, тем важнее становится правильность выбора материалов для всех его деталей и методов их обработки и сборки.

Так, если, например, детали из бескислородной меди сварить в защитной струе аргона или гелия, но не в газонаполненной камере, а затем сварной узел подвергнуть отжигу или пайке в водороде, то сварные швы растрес-

скаются, так как во время сварки медь в зоне термического влияния и в теле шва насытится кислородом и станет подверженной водородной болезни, хотя исходный материал и не был ей подвержен.

4-2. ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

В отечественной литературе газопроницаемость принято оценивать по способности пропускать в единицу времени (1 сек) сквозь слой материала в 1 см то или другое количество кубических сантиметров свободного (нормального) газа, т. е. находящегося при давлении 760 мм рт. ст. и 0°C. При этом газопроницаемость относится к разности давлений в 760 мм рт. ст. и к площади в 1 см². Таким образом, размерность газопроницаемости выражается в см³·см/(сек·см² кгс/см²). В зарубежной литературе часто принимается размерность см³××мм/(дм²·ч·кгс/см²), т. е. количество кубических сантиметров газа (при нормальном атмосферном давлении и 0°C), проникающего через слой материала в 1 мм на площади в 1 дм² за 1 ч при перепаде давлений в 760 мм рт. ст.

В настоящее время наиболее изучена проницаемость металлов (да и других материалов) для водорода, так как водород легче других газов растворяется в металлах и проникает через металлические стенки.

Однако это не является общим законом для всех металлов. Примером тому может служить серебро, более проницаемое для кислорода, нежели для водорода.

Серебро в незначительных количествах растворяет водород даже при плавке, но в расплавленном состоянии активно насыщается кислородом, который затем (при остывании и кристаллизации серебра) интенсивно выделяется. Эта склонность к растворению значительных количеств кислорода присуща серебру и в твердом состоянии, особенно при высоких температурах. Поэтому при отжиге, пайке и сварке серебра его следует тщательно изолировать от соприкосновения с кислородом. По той же причине серебро, как и медь, подвержено водородной болезни, поэтому все операции горячей обработки его следует производить в вакууме или в инертных газах.

Значительной растворимости какого-либо газа в металле соответствует обычно и повышенная диффузия

его, т. е. проницаемость для данного газа. Именно так и обстоит дело с серебром: оно настолько проницаемо для кислорода, что из него делают фильтры для наполнения приборов чистым кислородом. При этом пропущенный через серебряный фильтр кислород оказывается спектрально чистым.

Фильтр, сделанный из трубки чистого серебра с толщиной стенки около 0,2 мм, при разности давлений в 760 мм рт. ст., нагретый до 625°C, пропускает за 1 ч 0,036 см³ свободного (0°C, 760 мм рт. ст.) кислорода через каждый квадратный сантиметр площади стенки [Л. 7].

Фильтры для водорода делаются из палладия, который при температурах 300—400°C проницаем практически только для водорода. При этом проницаемость является максимальной, если в палладии имеются следы родия и калия. Тщательно очищенный палладий имеет значительно меньшую проницаемость по водороду [Л. 7].

Надо иметь в виду, что при фильтровании водорода через палладиевый фильтр давление его не должно превышать 30 мм рт. ст., так как при более высоких давлениях палладий растрескивается. Не следует также охлаждать насыщенный водородом палладий ниже 160°C, что также портит металл. Перед охлаждением палладиевый фильтр следует обезгазить откачкой.

Ртутные и масляные пары (углеводороды), даже пары смазки кранов, портят палладиевые фильтры, снижая их проницаемость. Регенерация таких засоренных фильтров возможна путем прогрева на воздухе при 500°C и последующего восстановления в водороде при 300°C [Л. 7].

Никель менее проницаем для водорода, чем палладий, однако он также при определенных условиях избирательно пропускает водород и может быть использован для изготовления фильтров. Никель не так чувствителен к температурному режиму в присутствии водорода, как палладий, но при 500°C никель все же способен пропускать не только водород, но и азот и кислород. Правда, проницаемость для водорода при этом в 2 000 раз больше, чем для азота, и почти в 7 000 раз больше, чем для кислорода.

Малоуглеродистая сталь (железо) имеет значительную проводимость для атомарного водорода даже при комнатных температурах. При температурах выше

200 °С железные стенки вакуумных установок пропускают уже заметное количество водорода [Л. 7].

Особенно заметно это свойство железа в вакуумных установках, изготовленных из малоуглеродистой стали и охлаждаемых снаружи водой. Так как водопроводная вода содержит много примесей, хлорирована и вызывает интенсивную коррозию стенок охлаждаемой установки, то на внешней поверхности стенок образуется атомарный водород, интенсивно диффундирующий через стенки и воссоединяющийся частично внутри установки в молекулярный газ.

По этой причине вакуумные системы из малоуглеродистой стали, если они предназначены для сколько-нибудь длительной статической работы, т. е. с отключенными насосами, не следует делать с рубашечным охлаждением водой, заменяя таковое масляным или воздушным охлаждением или напайкой змеевиков из облуженных оловом медных трубок с последующей окраской. При воздушном охлаждении необходимо делать защитное антикоррозионное покрытие, так как малоуглеродистая сталь корродирует и в обычной атмосфере.

Медь при комнатной температуре достаточно плотна по отношению ко всем газам, так что из меди нередко делаются тонкостенные оболочки для отпаянных электровакуумных приборов.

Особой плотностью обладает медь, полученная вакуумной переплавкой порошкообразного бескислородного металла и разлитая в вакууме же в графитовые формы. Если такой процесс ведется с перегревом до 1 800 °С и длительной выдержкой, можно получить крупнокристаллическую медь и даже монокристаллы, отличающиеся повышенными теплопроводностью и вакуумной плотностью [Л. 7].

Мелкозернистая литая медь заметно подвержена диффузии водорода. Тянутый металл значительно менее проницаем и практически герметичен даже при кратковременном прогреве до 500 °С. При более высоких температурах резко возрастает насыщение меди кислородом (см. гл. 2), а следовательно, и проницаемость как по кислороду, так и в еще большей степени по водороду.

Алюминий в прокате сравнительно малопроницаем для газов, даже для водорода, возможно вследствие наличия плотной стекловидной окисной пленки (Al_2O_3), ко-

торой он всегда покрыт и которая снижает газопроницаемость алюминия в 10 раз по сравнению с металлом, с поверхности которого механически счищена в вакууме пленка Al_2O_3 перед самым испытанием [Л. 7].

Газопроницаемость нержавеющей сталей можно считать более низкой, чем у обычной стали [Л. 78]. Данные по газопроницаемости некоторых металлов приведены в табл. 4-1 [Л. 7].

4-3. ГАЗОПРоницаемость НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Неметаллические материалы еще более разнообразны по газопроницаемости, чем металлы. Поэтому только специальные сорта керамики, резины, лишь некоторые пластмассы пригодны для целей высоковакуумной техники.

В то же время неметаллические материалы, применяемые в вакуумной системе, как это видно из табл. 4-2, не обладают способностью пропускать газ с такой избирательностью в отношении разных газов, как это наблюдается у металлов (палладий, серебро). По данным [Л. 16] проницаемости резины, полиэтилена и некоторых других материалов для азота, кислорода, водорода и гелия имеют величины примерно одного порядка для каждого материала.

Газопроницаемость неметаллических материалов в значительной степени зависит и от того, в каком состоянии находится материал: растянутом, сжатом или ненапряженном. Замечено, что стекло, напряженное растягивающими силами, значительно более газопроницаемо, чем сжатое или хотя бы ненапряженное. Некоторые авторы не без основания видят причину этого в том, что стекло покрыто сетью микротрещин, которые при растяжении раскрываются шире и становятся проводниками газа в глубину материала. То же самое относится к резинам и большей части пластмасс [Л. 78].

4-4. ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Все металлы в той или иной степени насыщены газами. При этом поглощение газов металлами имеет три вида:

физическая адсорбция; хемосорбция (химическая адсорбция); абсорбция газов (растворение газов в металле).

Таблица 4-1

∞ Проницаемость некоторых металлов для газов при различных температурах, $см^3 \cdot см / (см^2 \cdot сек \cdot кгс / см^2)$

| Металл | Газ | Температура, °C | | | | | | |
|------------------------|----------|----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | 20 | 200 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Малоуглеродистая сталь | Водород | $0,11 \cdot 10^{-9}$ | $1 \cdot 10^{-7}$ | $0,39 \cdot 10^{-6}$ | $0,97 \cdot 10^{-5}$ | $1,94 \cdot 10^{-5}$ | $3,35 \cdot 10^{-5}$ | $5,3 \cdot 10^{-5}$ |
| Никель | " | — | — | $0,17 \cdot 10^{-5}$ | $0,61 \cdot 10^{-5}$ | $1,7 \cdot 10^{-5}$ | $3,82 \cdot 10^{-5}$ | $7,3 \cdot 10^{-5}$ |
| Медь | " | — | — | $1,14 \cdot 10^{-8}$ | $0,81 \cdot 10^{-7}$ | $0,36 \cdot 10^{-6}$ | $1,14 \cdot 10^{-6}$ | $2,91 \cdot 10^{-6}$ |
| Алюминий | " | — | — | $0,5 \cdot 10^{-7}$ | $0,1 \cdot 10^{-5}$ | $0,4 \cdot 10^{-5}$ | — | — |
| Серебро | Кислород | — | — | $0,42 \cdot 10^{-8}$ | — | $2 \cdot 10^{-7}$ | — | $3,1 \cdot 10^{-6}$ |
| Палладий | Водород | — | — | $0,5 \cdot 10^{-2}$ | $0,75 \cdot 10^{-2}$ | $1,03 \cdot 10^{-2}$ | $1,3 \cdot 10^{-2}$ | $1,61 \cdot 10^{-2}$ |
| Платина | " | — | — | $0,36 \cdot 10^{-7}$ | $2,05 \cdot 10^{-7}$ | $0,81 \cdot 10^{-6}$ | $2,36 \cdot 10^{-6}$ | $0,56 \cdot 10^{-5}$ |
| Малоуглеродистая сталь | Азот | — | — | — | — | — | — | $0,17 \cdot 10^{-6}$ |

Таблица 4-2

Проницаемость некоторых неметаллических материалов для газов $см^3 \cdot см / (см^2 \cdot сек \cdot кгс / см^2)$

| Материал | Температура, °C | N ₂ | O ₂ | H ₂ | He |
|-----------------------|-----------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Резина, сорт 7889 | 20 | $5 \cdot 10^{-8}$ | $1,6 \cdot 10^{-7}$ | $3 \cdot 10^{-7}$ | $1,3 \cdot 10^{-7}$ |
| | 50 | — | — | — | $4,5 \cdot 10^{-7}$ |
| Резина, сорт 9024 | 20 | $0,45 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | $9 \cdot 10^{-8}$ | $4,2 \cdot 10^{-8}$ |
| | 50 | — | — | — | $1,7 \cdot 10^{-7}$ |
| Резина, сорт 2043 | 20 | $1,2 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ |
| | 150 | $0,4 \cdot 10^{-2}$ | $1,1 \cdot 10^{-5}$ | $2,2 \cdot 10^{-5}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$ |
| Полиэтилен | 20 | $0,6 \cdot 10^{-8}$ | $1,4 \cdot 10^{-8}$ | $4 \cdot 10^{-8}$ | $2,5 \cdot 10^{-8}$ |
| Эпоксидная смола ЭД-5 | 80 | — | — | — | $5,5 \cdot 10^{-8}$ |
| Стекло С-49-2к | 300 | — | — | $0,2 \cdot 10^{-9}$ | $3,8 \cdot 10^{-9}$ |

Физической адсорбцией называется удержание газа на поверхности твердого тела с образованием на этой поверхности пленки толщиной в одну или несколько молекул газа. Количество сорбированного газа зависит

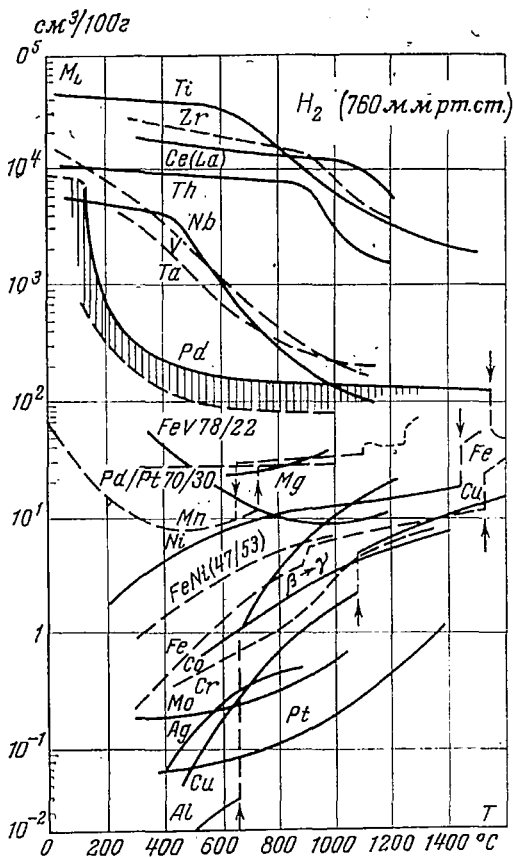


Рис. 4-1. Зависимость растворимости водорода M в некоторых металлах от температуры T при давлении водорода 760 мм рт. ст.) [Л. 7].

от действительной величины поверхности единицы массы сорбента.

Хемосорбция по сути явления значительно отличается от физической адсорбции. Как говорит Смителлс

[Л. 54], «создается впечатление, что этот тип адсорбции связан с химическим взаимодействием поверхности металла с газом и наиболее отчетливо проявляется в таких системах, как кислород — серебро, окись углерода — никель. Хотя этот тип адсорбции не является химической реакцией, так как не образуется новой фазы, он, вероятно, является необходимой предварительной стадией химического воздействия, которое может произойти при еще более высоких температурах. Например, для упомянутых систем известны определенные химические соединения Ag_2O , $\text{Ni}(\text{CO})_4$ и т. д.»

Обычно все эти явления протекают в различных сочетаниях и являются полностью или частично обратимыми. Из них два последних, т. е. *химическая адсорбция* и особенно *абсорбция газов*, зачастую приводят к поглощению металлами очень больших количеств газа. Рисунок 4-1 дает понятие о количествах водорода, растворимых в некоторых металлах при различных температурах [Л. 7].

Растворимостью называется объем газа в 1 см^3 , абсорбируемый данной массой металла (обычно 1 или 100 г до насыщения при 0°C и 760 мм рт. ст.).

Растворенный в металле и адсорбированный его поверхностью газ при вакуумировании начинает выделяться тем интенсивнее, чем легче данный газ проникает в металл и чем ниже давление газа в окружающем пространстве. При этом обычно, но не всегда, выделение газа в вакууме увеличивается с повышением температуры.

Водород обычно легче всех других газов диффундирует в металл и легче всего удаляется из него. Кислород, наоборот, относится к медленно удаляемым газам.

Абсорбция некоторых газов даже при комнатных температурах протекает в виде химических реакций, причем если реакция может иметь газовую фазу, то снижение давления смещает реакцию именно в сторону газовой фазы, т. е. при понижении давления в окружающем пространстве из твердой фазы выделяется газ. Этим объясняются восстановление окислов в вакууме и газовыделение другими соединениями, имеющимися в металлах в виде включений или поверхностных пленок, а иногда и твердых растворов. Отсюда видно, какое огромное значение имеют в вакуумной технике как чистота состава металла, так и чистота поверхности стенок

аппарата, особенно для аппаратуры сверхвысокого вакуума.

Следовательно, газовыделение в вакууме со стенок сосуда не является только следствием насыщенности металла газами, их загрязнения или адсорбции газа поверхностью чистого металла. Если бы мы смогли очистить металл и поверхности стенок вакуумного сосуда и путем тех или других манипуляций полностью удалить газ, сорбированный на внутренней поверхности металла из атмосферы перед вакуумированием, то процесс газовыделения не прекратился бы вовсе, а только уменьшился бы до тех значений, которые соответствуют газопроницаемости данного металла при данном перепаде давлений и температуре. Следует учитывать, однако, что количество газа, проникающего извне, обычно несравненно меньше того, которое получается в результате разложения загрязнений, восстановления окисных пленок и извлечения газов, растворенных в металле при его изготовлении и содержащихся в неметаллических включениях.

В табл. 4-3 приведены некоторые данные по газовыделению различных металлов в разных условиях, полученные при исследованиях в СССР и других странах.

Рассмотрение этой таблицы подтверждает высказанные ранее соображения. Так, например, нержавеющая сталь, по французским данным, в необработанном виде при 20 °С отделяет газ почти на порядок больше, чем полированная, но механическое полирование повышает газоотделение в 3 раза против электролитического. По данным отечественных исследований необработанная нержавеющая сталь выделяет газ на порядок больше, нежели такая же сталь, выдержанная в вакууме 6 ч при 20 °С.

Необезгаженная медь сорта М3 выделяет при 400 °С в 300 раз больше газа, чем обезгаженная в течение 15 ч при той же температуре.

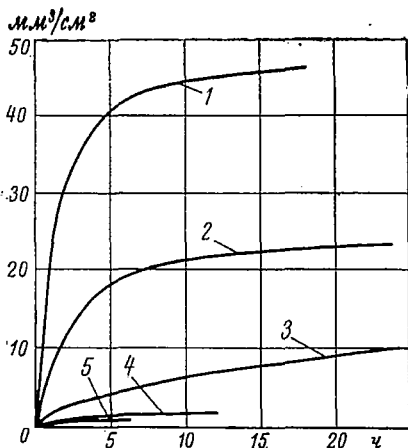
Рисунок 4-2 показывает газовыделение с поверхности помещенного в вакуум тонкого образца полированной необезгаженной стали 1X18H9T при трех различных температурах, а также газовыделение такого же образца, обезгаженного при 580 °С, затем выдержанного 10 суток в сухом воздухе и потом снова нагретого в вакууме до 395 °С.

Скорость удельного газовыделения некоторых металлов при различных температурах, л·мм/(см²·сек)

| Материал | Обработка | Место производства | Температура, °С (л·мм/(см ² ·сек)) | | |
|---|---------------------------------------|--------------------|---|-------------------|-------------------|
| | | | 20 | 214 | 400 |
| Сталь 1X18H9T листовая толщиной 2 мм необезгаженная | Поверхность не обработана | СССР | $6 \cdot 10^{-8}$ | $2 \cdot 10^{-7}$ | $2 \cdot 10^{-6}$ |
| То же после вакуумирования в течение 6 ч при 20 °С | То же | СССР | $6 \cdot 10^{-9}$ | — | — |
| То же после вакуумирования в течение 15 ч при 400 °С | " " | СССР | — | — | $2 \cdot 10^{-8}$ |
| Медь МЗ, лист 0,25 мм, необезгаженная | " " | СССР | $6 \cdot 10^{-9}$ | $8 \cdot 10^{-8}$ | $3 \cdot 10^{-6}$ |
| То же после вакуумирования в течение 4 ч при 20 °С | " " | СССР | $2 \cdot 10^{-8}$ | — | — |
| То же после вакуумирования в течение 15 ч при 400 °С | " " | СССР | — | — | $1 \cdot 10^{-8}$ |
| Дюралюминий Д-16 после вакуумирования в течение 3 ч при 20 °С | " " | СССР | $2 \cdot 10^{-8}$ | — | — |
| Нержавеющая сталь марки 225 | " " | Франция | $8 \cdot 10^{-9}$ | — | — |
| То же | Механическое полирование | Франция | $6 \cdot 10^{-10}$ | — | — |
| То же | Электрополирование | Франция | $2 \cdot 10^{-10}$ | — | — |
| Малоуглеродистая сталь | Химическое никелирование | Франция | $6 \cdot 10^{-10}$ | — | — |
| То же | Хромирование с последующей полировкой | Франция | $9 \cdot 10^{-10}$ | — | — |
| Медь высокой частоты | Не обработана | Франция | $6 \cdot 10^{-9}$ | — | — |
| Мед бескислородная | То же | Франция | $2 \cdot 10^{-9}$ | — | — |
| Алюминий листовой | Химическая очистка поверхности | Франция | $6 \cdot 10^{-9}$ | — | — |
| То же | После 24 ч на воздухе | Франция | $9 \cdot 10^{-9}$ | — | — |
| Ковар листовой | Очищенная поверхность | Франция | $8 \cdot 10^{-10}$ | — | — |

Рис. 4-2. Количество газа, выделенное с образца полированной стали 1X18H9T в вакууме.

1 — при 580 °С; 2 — при 395 °С; 3 — при 214 °С; 4 — обезгаженной и протравленной стали в горячей азотной кислоте; 5 — обезгаженной при 580 °С, выдержанной 10 суток в сухом воздухе и нагретой до 395 °С (объем газа, приведенный к нормальным условиям, 760 мм рт. ст., 0 °С).



Рисунки 4-3 и 4-4 иллюстрируют такие же опыты, проведенные (как и с нержавеющей сталью) с медью и никелем.

Сравнение этих данных показывает, что все три металла в отношении чистого газовыделения имеют свои характерные особенности. Так, если нержавеющая сталь

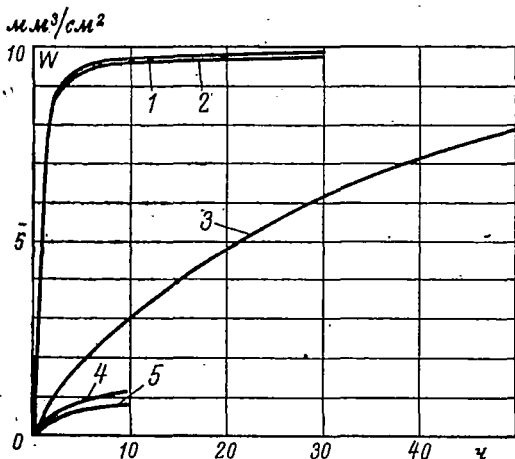


Рис. 4-3. Количество газа, выделенное с образца полированной меди в вакууме.

1 — при 580 °С; 2 — при 395 °С; 3 — при 214 °С; 4 — обезгаженной при 580 °С, выдержанной 10 суток в сухом воздухе и вновь нагретой до 395 °С; 5 — обезгаженной и протравленной в горячей азотной кислоте. (Приведено к нормальным условиям 760 мм рт. ст., 0 °С.)

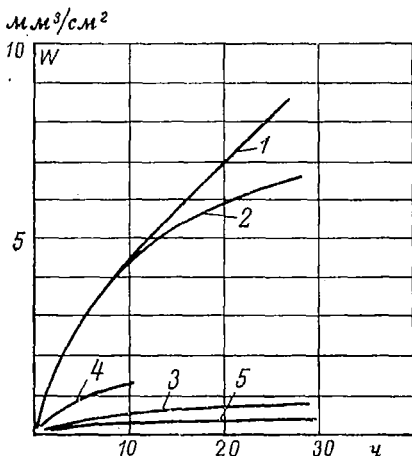


Рис. 4-4. Количество газа, выделенное с образца полированного никеля в вакууме.

1 — при 580 °C; 2 — при 395 °C; 3 — при 214 °C; 4 — обезгаженного и протравленного в горячей азотной кислоте; 5 — обезгаженного при 395 °C, выдержанного 10 суток в сухом воздухе и вновь нагретого до 395 °C. (Приведено к нормальным условиям 760 мм рт. ст., 0 °C.)

увеличивает газовыделение почти пропорционально температуре, то медь резко увеличивает его при нагреве до 400 °C, а затем газовыделение меди до 580 °C остается почти на том же уровне. Никель выделяет сравнительно мало газа до 200 °C, резко повышает газовыделение при нагреве от 200 до 400 °C и продолжает повышать его с дальнейшим ростом температуры, но характер этого повышения значительно отличается от газовыделения меди и нержавеющей стали.

У металлов, обезгаженных при температурах до 600 °C, соприкосновение с сухим воздухом, даже в течение нескольких суток, не вызывает при дальнейшем вакуумировании столь значительного газовыделения, как первоначальное. Влажный воздух, естественно, оказывает иное действие, вызывая появление окисных пленок и пленок влаги.

При прогреве выше 600 °C в вакууме никель приобретает губчатое строение и, будучи потом помещен даже в сухой воздух, насыщается газом и его повторное газовыделение мало отличается от первоначального, а если никель обезгазить при 830 °C, то при повторном вакуумировании он выделяет газ в значительно больших количествах.

✓ Влияние способа обработки поверхности металла на его газовыделение, несмотря на важность этого вопроса для конструкторов и технологов, до сих пор изучено недостаточно. На вакуумирование при комнатной температуре химическое полирование, механическое полирова-

ние и ультразвуковая промывка в дистиллированной воде стали марки IX18H9T влияют почти одинаково, уменьшая газовыделение примерно на порядок против необработанной, но тщательно промытой поверхности.

В целях уменьшения газовыделения при повышенных температурах следует отдавать предпочтение тем методам обработки, при которых не наносится на металл каких-либо пленок и металл не насыщается газом. Такими методами являются, например, ультразвуковая обработка в дистиллированной воде, электрохимическое полирование, чисто химическое полирование, виброобкатывание, вакуумный отжиг. Что касается механических методов обработки, кроме обработки резанием, то шлифование абразивами и полирование с пастами, несомненно, должны загрязнять поверхность металла, втирая продукты износа кругов в микронеровности металла. Крацевание, т. е. обработка стальными щетками на больших скоростях, также дает отрицательные результаты, так как при большой относительной скорости концы проволоки мгновенно привариваются к металлу и затем вытягивают из металла усики, создавая очищенную от загрязнений, но ворсистую поверхность. Крацевание на малых скоростях и с обязательной частой промывкой, а лучше с травлением щеток для поддержания их в чистоте дает хорошие результаты, но оно мало производительно по сравнению с химическими методами обработки.

4-5. ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Неметаллические материалы в отношении газовыделения представляют весьма сложную картину.

При комнатной температуре стекло, керамика, фторопласт мало отличаются по газовыделению от хорошо очищенного металла.

При повышении температуры стекло в зависимости от сорта выделяет большее или меньшее количество водяного пара. Тугоплавкие (твердые, боросиликатные) стекла выделяют максимум водяного пара при температуре около 300 °С (рис. 4-5), а щелочные и свинцовые — в области температур 150—200 °С [Л. 20].

Керамика при повышенных температурах выделяет вначале различных газов больше, чем стекло, но при температурах выше 350 °С не проявляет признаков раз-

ложения и интенсивного выделения паров воды, что свойственно многим сортам стекла.

На рис. 4-6 [Л. 16] показано газовыделение в зависимости от времени нагрева фторопласта-4, вакуумной резины сорта 7889 и текстолита по сравнению со сталью.

Другие пластмассы и органическое стекло имеют большее газовыделение. Так, например, прессматериал

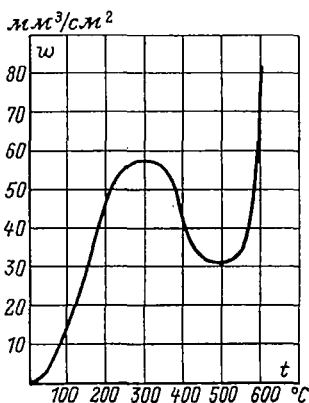


Рис. 4-5. Количество газа, выделяемое тугоплавким стеклом в вакууме.

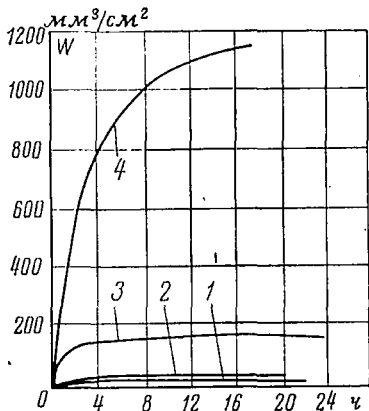


Рис. 4-6. Количество газа, выделенное образцами материалов, помещенными в вакуум, неметаллических материалов по сравнению со сталью.

1 — сталь 35 при 200 °С; 2 — фторопласт-4 при 200 °С; 3 — резина марки 7889 при 70 °С; 4 — текстолит при 150 °С. (Приведено к нормальным условиям 760 мм рт. ст., 0 °С.)

АГ-4 при 50 °С выделяет в первые часы обезгаживания $6 \cdot 10^{-3}$ л · мкм/сек на 1 см², причем такое интенсивное газовыделение продолжается длительное время.

Из числа клеев, применяемых в вакуумной технике, наименьшим газовыделением, очевидно, обладает эпоксидная смола: $2 \cdot 10^{-5}$ л · мкм/сек на 1 см².

По данным, опубликованным в США, скорость газовыделения уплотняющих материалов, применяемых в американской практике, составляет [Л. 17] 10^5 л · мкм/сек на 1 см²:

| | |
|-------------------|-----|
| Неопрен | 5,4 |
| Тефлон | 2,5 |
| Витон А | 2,0 |

| | |
|------------------------------|------|
| Бутил | 1,08 |
| Натуральная резина | 2,16 |
| Силикон (красный) | 0,44 |
| Силикон (зеленый) | 0,44 |

По тем же данным чрезвычайно большую роль в газовыделении резин и пластмасс играет рабочая температура. Так, при изменении температуры от +6 до -25°C, т. е. всего на 31°C, предельный вакуум, полученный в испытательной установке с захлаживаемыми эластичными уплотнителями, улучшался при прокладках, изготовленных из: бутила в 4—6 раз; натуральной резины в 4 раза; неопрена до 10 раз; резины Буна в 7—8 раз; витона А в 2 раза; тефлона в 4 раза.

Это указывает на значительное уменьшение газопроницаемости и газовыделения с понижением температуры.

Глава пятая

ЗАГОТОВКИ И ДЕТАЛИ

5-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В основном специфика изготовления вакуумных аппаратов касается соединений — сварных, паяных и разъемных, а также чистоты поверхностей и аккуратности сборки.

Но удовлетворить всем требованиям вакуумной техники могут только те установки, которые собраны из правильно заготовленных и отделанных деталей. С самого начала (с заготовок) технолог, мастер, рабочий должны иметь в виду специфические требования вакуумной техники и подготавливать все для их соблюдения.

Качественные аппараты можно создавать, соблюдая неотступно весь комплекс технических решений, указанных в чертежах и технических условиях.

Так как большинство высоковакуумных установок являются сварными конструкциями, материал, из которого режутся заготовки, должен строго соответствовать маркам, назначенным в чертежах. Склад металла должен принимать и выдавать металл обязательно по сертификатам. Пересортица металла совершенно недопус-

тима. Для обеспечения этого лучше всего организовывать резку заготовок непосредственно на складе с тем, чтобы остатки металла немедленно возвращались в ту самую ячейку, откуда был взят для раскроя лист или прут. Иначе неизбежно образование значительных количеств остаточного металла с утраченной маркировкой.

5-2. МЕТОДЫ РЕЗКИ ЗАГОТОВОК

Кислородная резка. Чрезвычайно высокие требования, предъявляемые к сварным и паяным соединениям, и широкое применение нержавеющей сталей, никелевых сплавов и цветных металлов ставят перед технологами нелегкие задачи по раскрою металла на заготовки.

Обычная кислородная резка пригодна только для малоуглеродистой стали, но и тут нужно иметь в виду, что в вакуумной технике не допускается сварка кромок, обработанных каким-либо тепловым методом.

Кромки под сварку обязательно должны быть обработаны механически, т. е. резцом, пилой, фрезой. Следовательно, раскрой, если он производится кислородной резкой, необходимо вести с припусками на механическую обработку кромок с тем, чтобы везде она захватывала не менее 2 мм металла, оплавленного кислородным резаком.

Ручная кислородная резка стали значительных толщин обычно оставляет крайне неровные, изъеденные пламенем кромки с большими прожогами и наплывами. Это приводит к необходимости последующего большого съема металла на станках, к большим припускам на механическую обработку кромок и к перерасходу металла. Выгодно поэтому применять кислородно-резательные автоматы, которые даже на самых больших толщинах металла дают аккуратный, экономный рез. Капитальные затраты на приобретение автоматов окупаются даже на малых производствах за 1—2 года.

Мы не описываем этого оборудования, так как оно общезвестно.

Значительно сложнее обстоит дело с резкой нержавеющей сталей, жаропрочных сплавов и цветных металлов. Попытки резать их, даже при небольших толщинах, кислородом или электрической дугой с применением сварочных или угольных электродов приводят к порче заготовок и преждевременному износу оборудования,

так как приходится работать на форсированных режимах. При этом металл прожигается плохо, крайне неаккуратно, перерасход металла, дорогого и дефицитного, получается весьма значительный.

На крупных производствах, где резка производится непрерывно и постоянно, имеет смысл применять кислородно-флюсовые аппараты типа УРХС-4 с применением порошкообразных флюсов [Л. 21]. Однако следует помнить, что для резки кислородно-флюсовым аппаратом необходимо специальное, утепленное и хорошо вентилируемое помещение, так как в процессе резки образуется очень много удушливого дыма, а порошкообразный флюс весьма чувствителен к сырости и при малейшей утрате сыпучести перестает правильно поступать к резаку.

По этим же причинам резку должен производить постоянно один и тот же человек, специально обученный и хорошо умеющий налаживать довольно сложное оборудование. При правильной работе кислородно-флюсового аппарата можно получить аккуратный рез как на нержавеющей стали, так и на алюминиевых сплавах и меди.

Некоторых из перечисленных недостатков кислородно-флюсовой резки удастся избежать, заменяя порошкообразный флюс железной проволокой, вводимой в пламя кислородного резака с целью получения дополнительного тепла и изменения химического состава разрезаемого металла в расплавленной ванне реза, т. е. с той же целью, с которой вводится и порошковый флюс [Л. 22]. Но этот метод пригоден лишь для резки нержавеющей стали, и работать на такой резке должны два человека, так как специальной аппаратуры для нее не выпускается. Железную проволоку можно с успехом заменить и полосками титана (из отходов).

Воздушно-дуговая резка. Для разделительной резки нержавеющей стали и цветных металлов может быть применена резка электрической дугой (рис. 5-1), совмещенной с сильной воздушной струей, выдувающей расплавленный металл. Электрод из смеси угля с графитом зажимается в резаке, через рукоятку которого, снабженную воздушным краном (ручным или автоматическим), подводится сжатый воздух под давлением 4—6 кгс/см². Электрод углубляется в щель реза на всю толщину разрезаемого металла плюс 2—3 мм (конец

электрода выступает снизу). Дуга горит между боковой поверхностью электрода и металлом, а воздух, вырываясь из отверстий или щели, располагаемых около электрода, омывает последний и выдувает из реза расплавленный металл [Л. 23].

Резка ведется на постоянном токе (плюс на электроде). Ширина реза зависит от диаметра электрода и обычно бывает больше этого диаметра на 3—5 мм. Наиболее часто применяемые диаметры электродов для резки листового металла толщиной до 25 мм — от 6 до 12 мм.

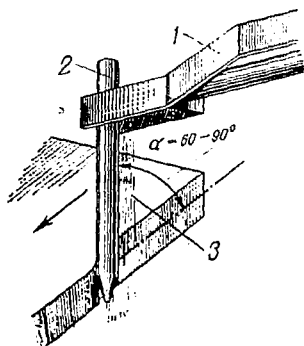


Рис. 5-1. Схема разделительной воздушно-дуговой резки.

1 — резак; 2 — электрод; 3 — струя воздуха.

Источниками тока могут служить обычные, но достаточно мощные генераторы постоянного тока с напряжением холостого хода не менее 65 в, например генераторы ПС-500 или ПСМ-1000.

Нашей промышленностью освоен выпуск воздушно-дуговых резаков марки РВД-1 (рис. 5-2) с губками прямоугольного сечения, пружиной

для зажима электрода и ручным воздушным краном, рассчитанных на величину тока до 500 а.

Расход воздуха составляет 0,35—0,7 м³/мин.

К недостаткам этого метода следует отнести возможность науглероживания поверхности металла на кромках реза при неправильно выбранных режимах работы [Л. 23].

Резка проникающей дугой заключается в глубоком проплавлении металла по линии реза дуговым разрядом, направляемым потоком высокотемпературного ионизированного газа (плазмы). Одновременно газовая струя удаляет расплавленный металл. Газ приобретает необходимые свойства в головке резака, где он подвергается непосредственному действию мощного дугового разряда.

Рисунок 5-3 изображает схему головки резака с проникающей дугой. Между вольфрамовым электродом 1 и корпусом 2 возбуждается кратковременная дуга, которая затем увлекается струей ионизированного в ней

газа через отверстие сопла и из него исходит струя светящейся электропроводящей плазмы 3. Резак с факелом этой плазмы, образовавшейся во вспомогательной

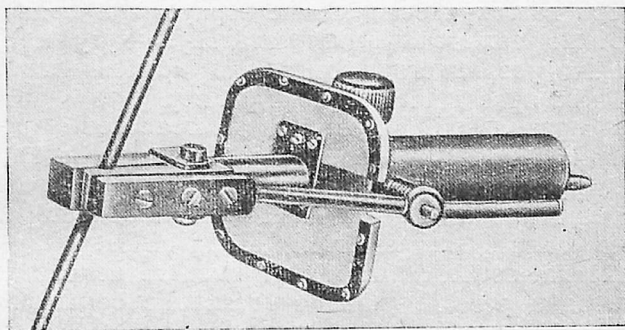


Рис. 5-2. Воздушно-дуговой резак РВД-1.

внутренней дуге, подносится к разрезаемому металлу 4, на который подается рабочее напряжение (плюс на металле) постоянного тока. Касаясь металла факелом

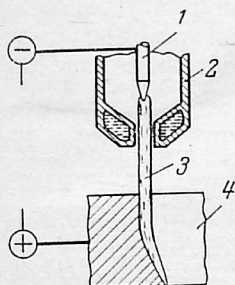


Рис. 5-3. Схема головки резака с проникающей дугой.

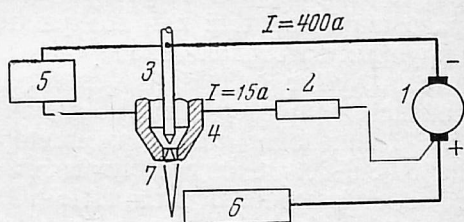


Рис. 5-4. Схема высокочастотного возбуждения дуги с использованием вспомогательного разряда.

1 — источник тока; 2 — балластное сопротивление в цепи вспомогательной дуги; 3 — электрод; 4 — наконечник; 5 — осциллятор; 6 — разрезаемый металл; 7 — плазменный факел вспомогательной дуги.

плазмы, зажигают уже рабочую, режущую дугу между вольфрамовым электродом и разрезаемым металлом.

Схема зажигания дуги при помощи осциллятора приведена на рис. 5-4. Существуют также системы резаков, которые можно зажигать вспомогательной дугой, кратковременно замыкая разрядный промежуток опусканием электрода до соприкосновения с корпусом и поднятием его. Можно зажигать вспомогательную дугу и путем замыкания разрядного промежутка временным введением в него проводящей вставки [Л. 23].

Для правильной работы и долговечности резака очень важна точность его изготовления и сборки, так как вольфрамовый электрод должен стоять строго соосно с отверстием сопла, иначе наступают односторонний перегрев сопла и быстрый выход его из строя.

Такие же последствия может вызвать неправильная эксплуатация резака: резка с чрезмерно большой скоростью, отклоняющая режущую дугу от центрального положения, или касание наконечником разрезаемого металла, при котором дуга рабочего тока перескакивает внутрь сопла и, несмотря на водяное охлаждение, быстро его сжигает. К этому же может привести работа без доступа или при недостаточном поступлении в резак охлаждающей воды.

Установка УДР-2М, как и некоторые другие, не лишена существенного недостатка — плохого охлаждения сопла резака, благодаря чему резак быстро выходит из строя. Это учтено в модернизированной установке ИТЭФ-20М, общий вид которой показан на рис. 5-5. Система охлаждения ее резака исключает возможность образования паровых или воздушных мешков. Для резки крупных заготовок такая установка или подобные ей совмещаются с одной из известных газорезательных установок, например типа АСШ или СГУ-60-1. На схеме рис. 5-6 показана такая комбинированная установка типа УГЭР-500. Она состоит из станции управления 1, источника питания 2 типа ИПГ-500, поддерживающего шланги кронштейна 3, плазменной горелки 4 типа Т-18 и копировальной прямоугольно-координатной газорезательной машины 5 [Л. 76]. На такой установке можно раскраивать листы металла шириной до 2 000 и длиной до 6 000 при толщине до 150 мм. В листах толщиной до 70 мм возможна пробивка начального отверстия при помощи той же горелки, для чего горелка устанавли-

вается над листом на высоте 60 мм и при включенном перемещении по контуру реза и с зажженной вспомогательной дугой плавно опускается для возбуждения основной дуги. Последняя, постепенно углубляясь в металл, выплавляет канавку, по которой стекает металл и прорезает сквозное отверстие.

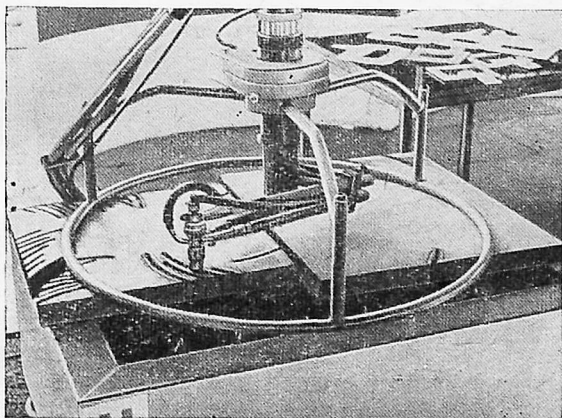


Рис. 5-5. Общий вид установки ИТЭФ-20М.

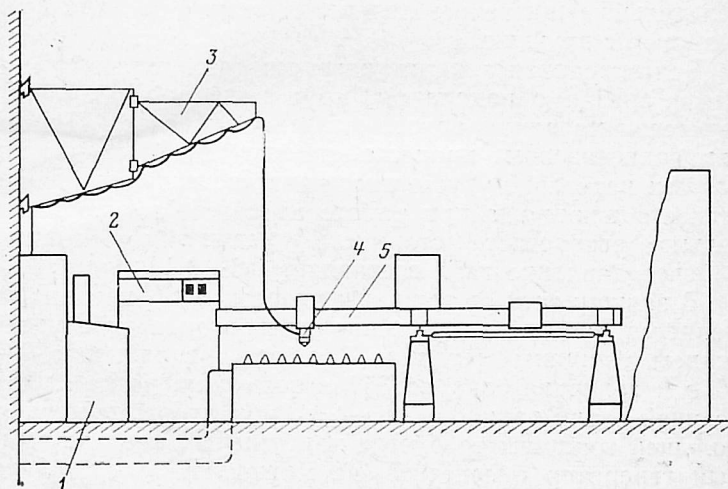


Рис. 5-6. Схема установки УГЭР-500 [Л. 76].

Промышленность выпускает также комплекты РДМ (рис. 5-7) для ручной резки, самые простые из всех существующих. Они состоят из ручного резака и коллектора, укрепляющегося на разрезаемом листе или на плите, где производится резка. Управление газом производится кранами в рукоятке резака. Электрический режим контролируется по приборам на генераторе или распре-

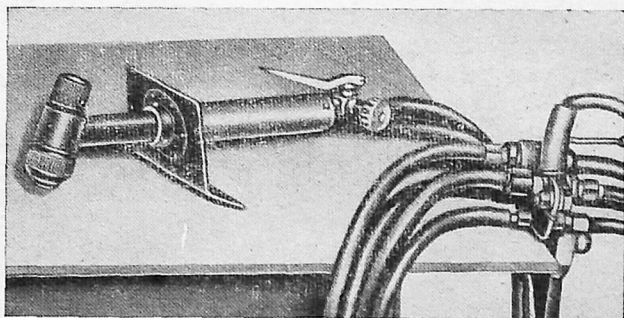


Рис. 5-7. Комплект резательной аппаратуры РДМ для ручной резки.

Слева — резак, справа — коллектор.

делительном щитке резательного поста. Вся работа регулируется вручную.

Вся описанная аппаратура рассчитана для работы на смеси аргона с водородом, но в ряде случаев работа ведется и на одном аргоне или даже на азоте. При таком одногазовом процессе снижается производительность и несколько ухудшается качество реза, увеличивается его ширина, а при работе на одном аргоне значительно возрастает стоимость резки. Необходимое рабочее давление газа составляет $0,2—0,4$ кгс/см².

В зависимости от толщины разрезаемого металла изменяется рабочее напряжение дуги, возрастая с увеличением толщины металла. Так, при напряжении 60—65 в и величине тока до 350 а возможна резка нержавеющей стали толщиной 20—22 мм. Для резки металла большей толщины требуется напряжение, которое обычный генератор обеспечить не может. В этом случае включаются последовательно два генератора типа ПС-500, что дает возможность резать металл толщиной

до 70 мм. Желательно при этом питать их обмотки возбуждения от независимого источника, включая их последовательно [Л. 23] во избежание перемагничивания.

Сварочные выпрямители типов ВСС-300, ВСС-500 можно соединять последовательно по два и три в одной установке.

Резка плазменной струей. Отличие плазменной струи, применяемой также для резки металлов, плохо поддающихся кислородной резке, от проникающей дуги состоит в том, что здесь дуга горит не между электродом и разрезаемым металлом, а между электродом и наконечником, на выходном торце которого или в его канале располагается одно из дуговых пятен (второе — на вольфрамовом электроде), а наружу вырывается и режет металл только струя плазмы, образующей факел вне дуги.

Схемы устройства головок плазмогенераторов показаны на рис. 5-8. Анодное пятно дуги не остается в одной точке сопла, а быстро перемещается по кругу (дуга вращается), благодаря чему каждая точка получает немного энергии, отводимой материалом сопла в охлаждающую воду, и сопло не сгорает в течение длительного времени. Таким образом, дуга здесь является внутренней, а газ под ее воздействием преобразуется в струю

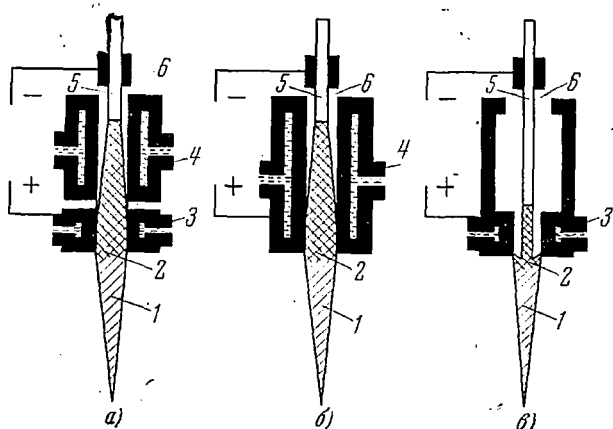


Рис. 5-8. Схемы плазмогенераторов.

а — с каналом и соплом; б — с длинным каналом; в — с коротким соплом.
1 — плазма; 2 — дуга; 3 — сопло; 4 — канал; 5 — электрод; 6 — подача газа.

плазмы. При работе на аргоне температура в струе плазмы достигает 10 000—15 000 °С. Кроме аргона, возможна работа на чистом азоте, водороде, гелии или на их смесях. Струей плазмы можно резать более толстый металл, чем проникающей дугой.

Плазменная струя не только плавит металл, но и выносит его расплавленные частицы из зоны реза, обладая значительной кинетической энергией.

Плазменная струя образуется при более низких напряжениях тока, нежели проникающая дуга, поэтому питание может осуществляться одним генератором ПС-500.

Установки плазменной струи комплектуются обычно из стандартной сварочной системы: генератора, пускорегулирующих устройств, баллонов, смесительной и регулирующей газовой аппаратуры с добавлением к ним резака — плазмогенератора.

Резка плазменной струей может производиться вручную или резательной машиной (многих типов), табл. 5-1.

Таблица 5-1

Характеристики плазменных резаков [Л. 23]

| Тип резака | Мощность, кВт, | | Диаметр сопла, мм | Диаметр канала, мм | Диаметр электрода, мм | Применяемый вариант | Габаритные размеры, мм | | Масса, кг |
|------------|---------------------|--------|-------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|-----|-----------|
| | Максимальный ток, а | Высота | | | | | Диаметр или длина | | |
| ИМЕТ-105 | 25 | 500 | 1,5—6 | 1—6 | 4—8 | Механизированный | 220 | 50 | 1,400 |
| ИМЕТ-106 | 15 | 300 | 3—5 | 2 | 4—6 | Ручной | 110 | 50 | 0,350 |
| ИМЕТ-106А | 15 | 350 | 3—5 | — | 4—6 | Механизированный | 110 | 425 | 1,100 |
| ГПН-1-60 | 25 | 500 | 3—4 | — | 3—6 | Ручной | 100 | 300 | 0,700 |
| | | | | | | " | 150 | 400 | 0,900 |

Как плазменная струя, так и проникающая дуга дают очень аккуратный, экономный по расходу металла рез, а некоторое удорожание работы по сравнению с кислородно-флюсовой резкой вполне компенсируется высоким

качеством заготовок, экономией ценного металла и гораздо лучшими условиями работы резчиков.

В случае необходимости работы на морозе резакн с проникающей дугой и резакн с плазменной струей могут охлаждаться антифризом вместо воды [Л. 24].

5-3. ОБРАБОТКА КРОМОК

Вакумно-плотная сварка и пайка не допускают сборки узлов с излишними зазорами между кромками деталей и требуют обязательной их механической обработки после тепловой резки.

В любой точке кромки заготовки, подвергавшейся оплавлению или прожиганию при разрезании или вырезке отверстий, должны быть сняты механическим резанием не менее 2 мм металла.

Точность обработки кромок должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить плотное прилегание кромок с зазорами не больше указанных в гл. 6 и 7.

Класс чистоты обработки кромок должен быть не ниже $\nabla 4$, с тем чтобы обеспечить возможность их промывки и протирки перед сваркой или пайкой начисто и насухо, без застревания на них волокон от протирочного материала.

Естественно, что мелкие заготовки, которые могут быть отрезаны на металлорежущих станках, не следует заготавливать тепловыми методам (исключая ковку). Их кромки нужно обрабатывать по возможности одновременно с резкой.

5-4. КОВКА ЗАГОТОВОК

Ковка заготовок, помимо имеющего место в ряде случаев экономического значения, оказывается иногда наиболее рациональным методом уничтожения пороков прокатного металла, о которых говорилось в § 2-4. Целью такойковки являются дробление, переламывание шлаковых волокон, закатанных в металле, и частичная заварка газопроницаемых ходов, образуемых этими волокнами. Следовательно, ковка заготовок для вакуумных деталей должна вестись при нагревах, близких к верхнему пределу температурного интервалаковки данного металла.

**Температурные интервалыковки заготовок
для вакуумных деталей**

| Материал | Температура, °С | |
|----------------------------|-----------------|----------------|
| | началаковки | окончанияковки |
| Малоуглеродистая сталь | 1 200 | 1 050 |
| Среднелегированная сталь | 1 150 | 1 000 |
| Высоколегированная сталь | 1 150 | 1 050 |
| Сплавы на никелевой основе | 1 080 | 980 |

В табл. 5-2 приведены интервалы температур, за пределы которых не следует выходить.

Малоуглеродистая и среднелегированная сталь послековки не должна охлаждаться слишком быстро во избежание появления трещин и термических напряжений. Высоколегированные нержавеющие стали для снятия наклепа подвергаются закалке при 1 050—1 150 °С.

Поковки для вакуумных деталей должны делаться с припусками на механическую обработку много большими, чем в общем машиностроении, так как верхние слои металла заготовки на глубину не менее 2 мм подлежат съему как непригодные для сварки и пайки вакуумно-плотными швами и вообще для работы в высоком вакууме из-за насыщенности газами и углеродом.

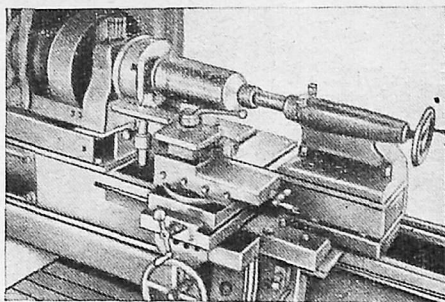
5-5. ДАВИЛЬНЫЕ РАБОТЫ

На рис. 5-9 изображен давилый станок для изготовления разнообразных круглых тонкостенных деталей из тонколистового металла.

Давленые детали можно делать из любого вязкого листового металла: алюминия, меди, латуни, отожженной малоуглеродистой стали (декапированная сталь), серебра, платины, никеля, отожженного кобальта, фурдита, нержавеющей стали и т. п.

Давильные станки отличаются от токарно-винторезных большей высотой центров, повышенным числом оборотов, упрощенной суппортной кареткой и наличием на ней подручника, если давилый работа ведется вручную.

Рис. 5-9. Давильный станок для крупной ручной работы.



Давильным способом делаются детали паропроводов масляных диффузионных насосов, различные кожухи, детали (днища) баллонов, сосудов Дьюара, металлические поплавки, детали вакуумных ловушек, тонкостенные металлические сосуды, платиновая химическая посуда и т. п.

Работа производится стальным, латунным или бронзовым давилником, т. е. скругленным на конце стержнем с длинной, прочной рукоятью. Для многих работ применяется давилник с роликом (рис. 5-10). Для обрезки кромок употребляется резак, т. е. резец по металлу, но на длинном стержне с рукоятью для оперирования вручную.

Изготовление деталей производится из круглой заготовки-диска на больших оборотах станка. Заготовка 1 прижимается пинолью задней бабки при помощи прижима 2 (рис. 5-11) к оправке 3. Скругленным концом

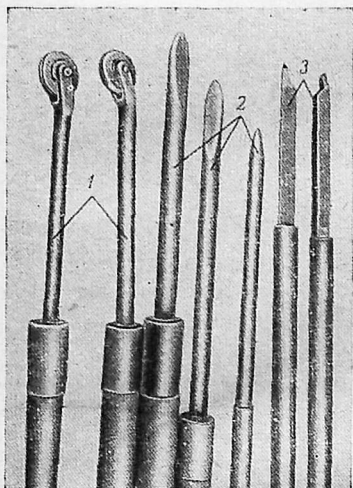


Рис. 5-10. Ручной инструмент для давилных работ.

1 — давилник с роликом; 2 — гладкие давилники; 3 — резаки для подрезки кромок.

давилника 4 (или роликом) рабочий-давилщик сильно нажимает на диск заготовки, проводя от центра к периферии и прижимает его к оправке, перегоняя металл

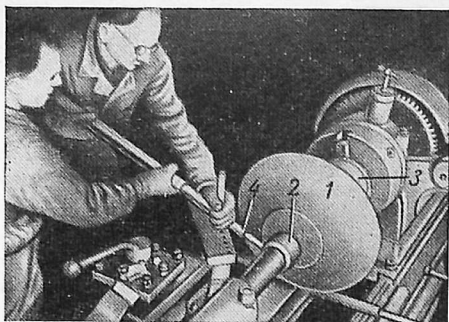


Рис. 5-11. Работа на давяльном станке (ручная).

1 — заготовка; 2 — прижим; 3 — оправка; 4 — да-
вильник.

в направлении движения рабочего конца давяльника. Смазкой служит сухое мыло.

В процессе изготовления материал давяльных деталей сильно нагартовывается и часто требует последующего, а иногда и промежуточного отжига. Алюминиевые де-

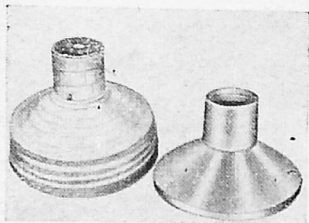


Рис. 5-12. Простая давя-
ная деталь из алюминия и
деревянная оправка для
нее.

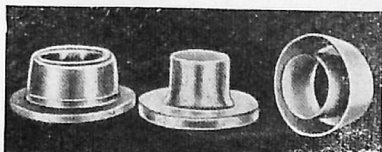


Рис. 5-13. Более сложная, вывер-
нутая давяная деталь и метал-
лические оправки для нее.

тали требуют окончательной рихтовки в пресс-формах.

В последнее время на некоторых заводах стали успешно применять механизированное давление, т. е. работу с давяльником, закрепляемым в резце-держателе, с использованием самоходов станка и копируемых устройств.

Такая работа при серийном производстве, безуслов-

но, менее опасна и более производительна, но пригодна далеко не для всех форм деталей.

Простые детали, как, например, конические, цилиндрические, полушария и т. п., могут быть изготовлены на одной оправке (рис. 5-12). Более сложные формы деталей, например так называемые «выворотные», требуют по меньшей мере двух оправок (рис. 5-13). Некоторые детали требуют последовательной обработки на нескольких оправках.

Для изготовления деталей из алюминия могут быть использованы деревянные оправки из дерева твердых пород: бука, дуба, ясеня. Однако они применимы в тех случаях, когда оправки не должны служить для больших партий деталей или долго храниться на складе, так как при длительной службе деревянные оправки растрескиваются, коробятся, сминаются, теряют размеры.

Для медных, латунных, стальных деталей необходимы полые чугунные или стальные оправки. Для больших партий алюминиевых деталей при жестких допусках могут служить оправки из дюралюминия или силумина (литые).

Для крупных деталей необходимо иметь так называемые затяжные оправки, т. е. оправки для предварительной затяжки заготовки из плоской в объемную форму, грубо приближающуюся к форме детали. Эти оправки могут быть выполнены из твердых пород дерева.

Металлические оправки для крупных деталей предпочтительно делать пустотелыми для уменьшения их массы, так как массивные оправки тяжелы и на больших скоростях вращения, необходимых для давяльной работы, развивают слишком большой маховой момент.

Заготовки для деталей диаметром до 50 мм вырезаются исходя из расчета: $D = d_{\text{ср}} + 2h$, где D — диаметр диска заготовки; $d_{\text{ср}}$ — средний диаметр детали; h — полная высота детали по образующим.

Для деталей диаметром от 50 до 100 мм $D = d_{\text{ср}} + 1,5h$.

Для деталей диаметром свыше 100 мм $D = d_{\text{ср}} + h$.

При изготовлении деталей из декапированной стали ВГ даже в случае применения нескольких переходов промежуточного отжига делать не нужно. То же относится и к алюминию. Медные детали требуют промежу-

точных отжигов, которые необходимо вести очень осторожно, лучше в среде инертного газа или в среде окиси углерода, во избежание изъязвления поверхности металла и насыщения его кислородом.

После давления готовые медные детали подлежат травлению и затем обезгаживанию в вакууме при температуре до 300 °С.

5-6. МЕХАНИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ И ПРОЧНОСТЬ ОБОЛОЧЕК

В значительном большинстве вакуумные установки не испытывают иных механических нагрузок, кроме создаваемых атмосферным давлением воздуха.

Это справедливо для всех установок, предназначенных для проведения технологических операций в вакууме или для изоляции, определенных процессов от воздуха или других газов. Следовательно, установки этой категории рассчитываются на равномерно распределенную внешнюю нагрузку стенок величиной в 1 кгс/см².

Такое незначительное давление на стенки позволяет изготавливать эту категорию установок сравнительно тонкостенными, но с обязательным соблюдением правильных, устойчивых форм, особенно при более или менее крупных размерах сосудов, с выпуклыми сферическими, коробовыми или коническими крышками и с довольно толстыми днищами и соединительными фланцами.

Как ни мало внешнее атмосферное давление по сравнению хотя бы с давлением пара в котлах или распространенным в промышленной технике давлением сжатого воздуха в 6—7 кгс/см², все же не следует забывать, что на днище вакуумного сосуда диаметром 1 м суммарное усилие составит почти 8 тс.

Следует отметить, что прямоугольные формы и плоские стенки, крышки в вакуумной системе нежелательны и должны применяться только в случаях крайней необходимости.

Многие вакуумные установки часть времени работают в условиях повышенных и даже высоких давлений, причем повышенное давление может быть приложено как изнутри, так и снаружи. Действующие в таких установках силы и их расчетные схемы в большинстве случаев не отличаются от сил и схем, применяемых в расчетах установок повышенного и высокого давлений (па-

ровые котлы, воздухохборники, трубопроводы, рабочие цилиндры и пр.). Однако необходимо помнить, что при расчете не следует допускать значительных деформаций их элементов, хотя бы и упругих, так как они могут послужить причиной нарушения вакуумной плотности в соединениях вследствие появления мельчайших трещин в сварных и паяных швах или перекосов и снижения натягов во фланцевых соединениях.

Довольно часто к указанным нагрузкам на элементы установок добавляются и значительные сосредоточенные нагрузки, такие, например, как нажимные усилия от штоков на заслонки и клапаны, силы натяга болтов и т. п. Обычно эти нагрузки имеют постоянный знак и очень редко носят ударный характер.

В соответствии с действующими силами, по большей части равномерно распределенными и носящими характер статических нагрузок, определяются и технологичные формы деталей и узлов вакуумной системы.

Технологичными являются во всех видах вакуумной системы цилиндрические формы с использованием для обечаек стандартных цельнотянутых или цельнокатаных труб, а при больших диаметрах — вальцованных из листа сварных цилиндров. Для небольших аппаратов, работающих без повышенного давления, толщина стенок обычно задается не расчетом на прочность, а технологическими соображениями. Стенки должны иметь толщину, позволяющую производить надежную и дешевую сварку или пайку и механические крепления. Практика показала, что для категории установок, испытывающих только давление атмосферы, технологичны и надежны выпуклые днища и крышки.

Таблица 5-3

Толщины стенок для установок из стали, работающих без повышенного давления, мм

| Диаметр цилиндрической обечайки, мм | Стенка обечайки | Выпуклая крышка | Конусная крышка | Водяная рубашка |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 200 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 1,5 |
| 400 | 2,5 | 3,0 | 2,5 | 1,5 |
| 500 | 3,5 | 3,5 | 3,0 | 2,0 |
| 600 | 4,0 | 4,0 | 3,0 | 2,0 |
| 700 | 4,5 | 4,5 | 3,5 | 2,5 |
| 800 | 4,5 | 4,5 | 4,0 | 2,5 |
| 1 500 | 8,0 | 10,0 | 8,0 | — |
| 2 300 | 10,0 | 12,0 | 10,0 | — |

Очень многие вакуумные установки (насосы, автоклавы и т. п.) работают при значительном выделении тепла внутри них или с подогревом извне. Нередко часть стенок или крышки таких установок нужно охлаждать водой. Толщины материалов для изготовления их указаны в табл. 5-3.

Стенки установки в полости водяной рубашки должны проверяться на прочность при внешнем давлении охлаждающей воды, практически достигающем в городских и заводских водопроводных системах 6 кгс/см^2 .

5-7. ОБЕЧАЙКИ И ФЛАНЦЫ

Приведенные в табл. 5-3 толщины металла обеспечивают возможность надежной сварки обечаек и крышек электродуговой сваркой. В то же время такие обечайки достаточно легки и могут быть изготовлены на обычных вальцах.

Как и всякие тонкостенные оболочки, тонкостенные вакуумные установки прочны только при условии устойчивости, при условии сохранения упругих свойств оболочки во всех ее частях, а это практически обеспечивается только при правильной форме обечаек и крышек, т. е. при аккуратном их изготовлении. Правильная цилиндрическая форма обечаек может быть получена легче всего на токарном станке, поэтому следует считать весьма рациональным изготовление корпусов системы из цельных труб, если позволяют их размеры. В случаях, когда отсутствуют трубы нужного размера и сорта, обечайки должны быть свальцованы на вальцах из металла необходимой толщины, тщательно отрихтованы и сварены.

Не рекомендуется свертывать обечайки из толстых листов с запасом толщины на обработку и протачивать их после сварки, как это стараются делать на многих заводах, боясь, что из тонких листов без запаса толщины не получится правильных обечаек. При достаточно аккуратной работе и правильном ведении сварки обечайки могут быть надежно изготовлены из тонколистового материала и без проточки. Также и крышки или днища сферической или коробовой формы могут быть выполнены из тонколистового материала путем выгибания под прессом или гидравлическим методом.

Свальцованная обечайка, стянутая хомутами, проваривается встык сквозным проваром или с двух сторон. Газодуговая сварка с двух сторон применима в том случае, если в результате стык проваривается на всю толщину.

Электродуговая сварка с двух сторон нежелательна, а сварка с двух сторон с оставлением между швами непроваренной части, например с накладкой, совершенно недопустима. В последнем случае неизбежно получаются газовые карманы с капиллярными выходами в вакуумное пространство. При этом становится невозможным даже определить их место.

Если обечайка делается из малоуглеродистой стали, то сварку следует делать под слоем флюса или сквозным проваром электродами с последующей зачисткой с внутренней стороны, а в месте посадки фланца — и снаружи. Рихтовка производится вручную, на вальцах или на оправках.

При изготовлении обечайки из нержавеющей стали толщиной до 3 мм лучше всего применять аргоно-дуговую сварку методом оплавления кромок. Такая сварка не требует вовсе зачистки шва и позволяет производить после сварки повторную вальцовку для окончательной рихтовки обечайки.

При изготовлении обечайек из меди или алюминия сварку можно вести только гелиево-дуговым или аргоно-дуговым методом. Легче всего делать сварку с отбортовкой наружу свариваемых кромок заготовки на 1,5—3 мм (для толщин 1—2 мм), но при достаточной квалификации сварщика можно варить и встык с раскисляющими присадками или даже оплавлением кромок. В последнем случае для меди — только гелиево-дуговой сваркой,

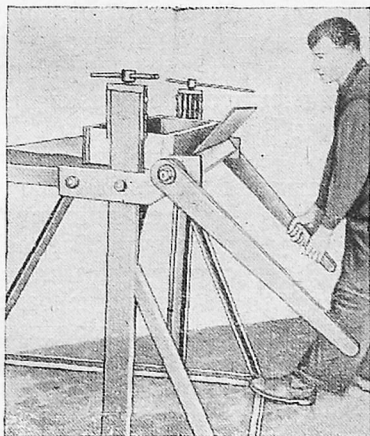


Рис. 5-14. Простой гибочный станок для изготовления прямоугольных обечайек.

После сварки и тщательной рихтовки обечайки нельзя допускать отклонения от назначенной формы более чем на 0,5 мм. Листы металла, из которых делают обечайки вакуумных аппаратов, обязательно предварительно очищаются от грязи, окалины и всех следов коррозии. Изъеденные ржавчиной листы нельзя пускать в производство. Очистку лучше всего производить гидроабразивным методом или травлением, а в случае невозможности этого—абразивным кругом на гибком валу.

Гибку прямоугольных обечаек можно делать на различных гибочных станках.

Простейший из них приведен на рис. 5-14.

Фланцы для сварки с обечайками или трубами, если такие фланцы не имеют силовой развязки, т. е. утоньшенной части, отделяющей тело фланца от обечайки, нужно делать с припуском по толщине, так как после сварки даже толстые фланцы коробятся, изгибаясь в сторону шва. Поэтому после сварки их приходится обрабатывать в окончательный размер. Величина припуска на окончательную обработку после сварки определяется в зависимости от размеров фланца, но должна быть не менее 1,5 мм.

Фланцы, имеющие силовую развязку, должны привариваться в окончательно обработанном виде. Их обработка после сварки недопустима, так как на них при этом получается дробленая поверхность.

В тех случаях, когда по размерам свариваемого корпуса или патрубка невозможна окончательная обработка фланцев после сварки, так как сваренные узлы не проходят по станкам, необходимо заготавливать фланцы заодно с малым переходным патрубком (манжегой), который потом сваривается встык с обечайкой (рис. 5-15). Такие фланцы обрабатываются сразу окончательно, если они вытачиваются из толстого металла (рис. 5-16).

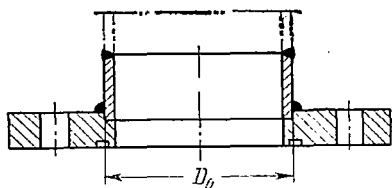


Рис. 5-15. Фланец с переходным приварным патрубком.

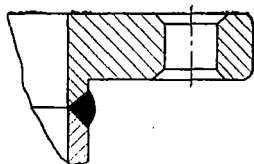


Рис. 5-16. Фланец с коротким переходным патрубком (цельный).

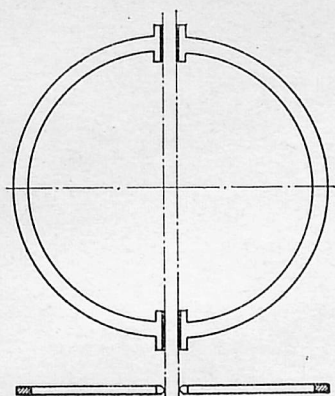


Рис. 5-17. Заготовки для фланца очень большого диаметра.

Так как обечайку, если только она не выточена из трубы, никогда не удастся заготовить строго цилиндрической и она всегда будет иметь небольшую эллиптичность, то для хорошей посадки под вакуумную сварку диаметр посадочной выточки под обечайку во фланце определяется по формуле

$$D_0 = \frac{D_{\text{макс}} + D_{\text{мин}}}{2} + (0,3 \div 2,0) \text{ мм},$$

где D_0 — искомый диаметр выточки; $D_{\text{макс}}$ — наибольший внешний диаметр обечайки; $D_{\text{мин}}$ — наименьший внешний диаметр обечайки.

Как указывалось выше, усиление шва обечайки в месте посадки во фланец снимается заподлицо с основным металлом, и обечайка плотно сажается в посадочное место во фланце, а затем приваривается.

Фланцы, превосходящие по размерам ширину листов металла, приходится делать сварными из двух полуколец (а иногда и из большего числа элементов). Заготовка для таких фланцев изображена на рис. 5-17. Полукольца имеют на концах уширения, которые после сварки срезаются. Их назначение — служить заходными по-

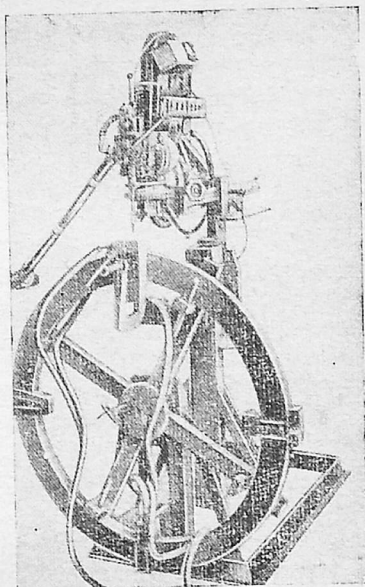


Рис. 5-18. Установка для электрошлаковой сварки фланцев.

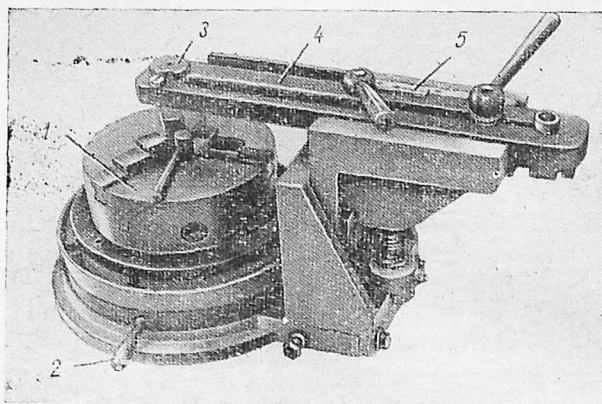


Рис. 5-19. Приспособление для сверловки отверстий во фланцах.

лочками при сварке. Заготовки из малоуглеродистой или нержавеющей стали или никелевых сплавов свариваются автоматической сваркой под флюсом или электрошлаковой сваркой (рис. 5-18). Заготовки из нержавеющей стали и жаропрочных сплавов могут свариваться также методом ручной электросварки качественными электродами в несколько проходов. Сварка должна производиться особо тщательно, так как шов в этих случаях обязательно обрабатывается резанием и частично перерезается.

Немалое значение имеет точное сверление во фланцах болтовых отверстий в соответствии с чертежом. Разметка этих отверстий отнимает много времени. Поэтому выгодно иметь универсальные приспособления, подобные изображенному на рис. 5-19. Самоцентрирующий патрон 1 установлен на планшайбе, поворот которой на определенный угол фиксируется фиксатором 2. Сверление отверстия производится через кондуктор 3, крепящийся на ползунке 4. Диаметр болтовой окружности устанавливается по шкале 5.

5-8. ДНИЩА И КРЫШКИ

Выше говорилось о том, что плоские днища и крышки необходимо делать значительной толщины. Их соединение с обечайкой на сварке делается в заточку

(рис. 5-20), причем диаметр ее определяется выражением

$$D_0 = \frac{D_{\text{макс}} + D_{\text{мин}}}{2} - (0,3 \div 2,0), \text{ мм},$$

где D_0 — искомый наружный диаметр посадочной заточки; $D_{\text{макс}}$ — наибольший внутренний диаметр обечайки; $D_{\text{мин}}$ — наименьший внутренний диаметр обечайки.

Сварной шов обечайки внутри снимается вровень с основным металлом. Электродуговая или газодуговая сварка ведется снаружи, а если на предприятии имеется автоматическая сварка под слоем флюса, то можно сварку плоских днищ с обечайками производить этим методом изнутри. Этим достигается наибольшая чистота внутри установки.

Однако гораздо выгоднее, чем плоские днища, делать сферические, коробовые, конические, вообще выпуклые днища и особенно крышки. На выпуклые днища идет в 3—5 раз меньше металла, затрата же рабочей силы почти одинакова, если учесть все операции (складские и заготовительные), которые приходится производить с толстым листовым материалом.

Конические днища могут быть свальцованы и сварены, сферические же и коробовые днища могут быть

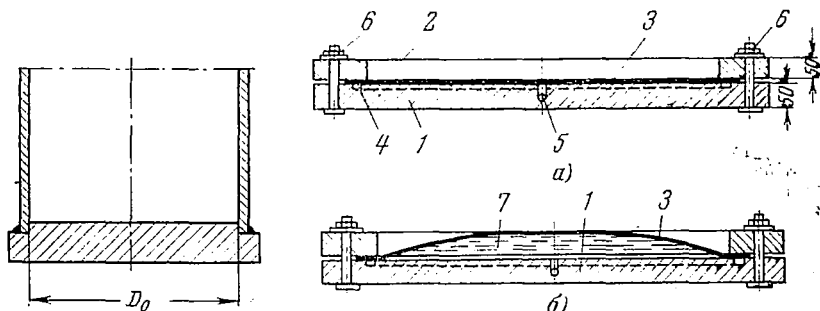


Рис. 5-20. Вварка плоского толстого днища в обечайку электродуговой сваркой.

Рис. 5-21. Изготовление выпуклого днища гидравлическим методом.

а — подготовка; б — выгибание днища; 1 — стальной диск; 2 — стальное кольцо; 3 — заготовка днища; 4 — уплотнитель; 5 — подвод рабочей жидкости от насоса; 6 — стяжные болты диаметром 25—30 мм; 7 — рабочая жидкость.

отпрессованы на гидравлических прессах. Матрицы и пуансоны для этой работы могут быть чугунными или сварными. Так как толщина металла для выпуклых днищ небольших установок обычно не превышает 5 при диаметре до 800 мм, то для их изготовления вполне достаточен пресс мощностью в 100 тс.

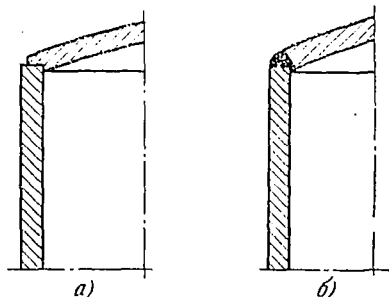
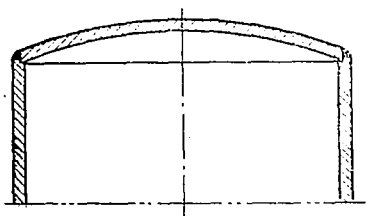


Рис. 5-22. Соединение выпуклого днища с обечайкой в расточку электродуговой сваркой.

Рис. 5-23. Соединение выпуклого днища с обечайкой газодуговой сваркой с заточкой на днище.
а — заготовка; б — выполненный шов.

Наконец, при отсутствии достаточно мощного пресса выпуклые днища можно с успехом изготавливать гидравлическим способом при помощи простого приспособления, приведенного на рис. 5-21, а и б. Изготовленное таким методом выпуклое днище будет иметь форму естественного прогиба упругой плоской диафрагмы, т. е. по краям будет почти плоским. Поэтому нужно брать приспособление с внутренним диаметром несколько боль-

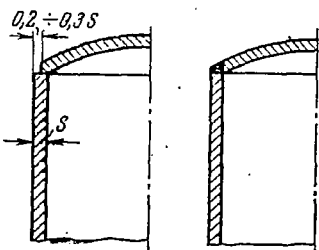


Рис. 5-24. Соединение обечайки с днищем газодуговой сваркой без заточек.

шим, чем заданный диаметр днища, чтобы готовую деталь вырезать из заметно выпуклой части заготовки.

Следует считать, что для металла толщиной до 5 мм достаточно давать давление жидкости до 30 кгс/см² и что такое днище (крышка) может надежно служить при внешнем давлении, равном $\frac{1}{5}$ давления жидкости, при котором днище было изготовлено.

Тонкие выпуклые днища соединяются с обечайками в расточку, делаемую в обечайке (рис. 5-22). Расточка должна быть очень небольшой: 1,0—1,5 мм, только чтобы центрировать днище при сборке. Затем делаются прихватки электросваркой, после чего ведется провар всего шва.

Для газодуговой сварки заточка делается на днище и сварка производится оплавлением кромок металла (рис. 5-23), причем металл оплавляемой кромки днища наплавляется на выступающую кромку обечайки.

Если днище имеет плоские края или если обечайка имеет правильную цилиндрическую форму и днище легко центрировать без заточки, сварка может производиться, как это показано на рис. 5-24. Так же свариваются газодуговой сваркой и плоские днища с обечайками правильной формы.

Сварные швы, сделанные ручной электродуговой сваркой, зачищаются стальными щетками, а корни швов, где неминуемо скапливается некоторое количество шлака, — абразивным кругом, так же как и обратная сторона аргоно-

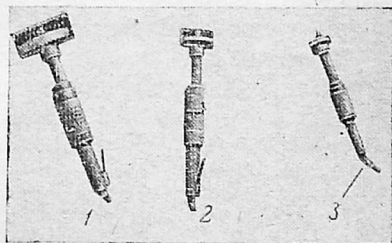


Рис. 5-25. Пневматические шлифовальные машинки.
1 — ПШМ-150; 2 — ПШМ-08-90; 3 — ПШМ-08.

Таблица 5-4

Характеристика пневматических шлифовальных машин

| Основные данные | Тип машины | | |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-----------|
| | ПШМ-150 | ПШМ-08-90 | ПШМ-08 |
| Скорость, об/мин | 500 | 8 000 | 12 500 |
| Мощность, квт | 0,96 | 0,88 | 0,48 |
| Расход воздуха, м ³ /мин | 1,7 | 1,1 | 0,4 |
| Габариты, мм | 515×170×160 | 510×110×100 | 440×80×80 |
| Масса, кг | 4,5 | 2,7 | 1,7 |

говых швов, если сварки велась с одной стороны сквозным проваром и на обратной стороне выступили небольшие натеки металла.

Для такой зачистки удобнее всего применять пневматические шлифовальные машинки, изображенные на рис. 5-25. Их техническая характеристика приведена в табл. 5-4. Эти машинки удобны и для зачистки поверхностей металла.

5-9. ГОРЛОВИНЫ И ПАТРУБКИ

Во многих случаях горловины или патрубки имеют весьма небольшую длину и настолько широкий фланец, что вести сварку такого патрубка с основным корпусом аппарата становится затруднительным, если патрубок и фланец уже сварены друг с другом.

В таких случаях рекомендуется приварить к корпусу сначала только обечайку патрубка (рис. 5-26), а потом

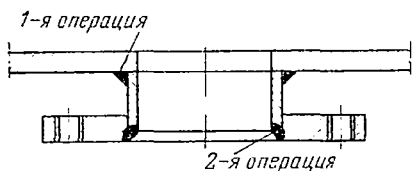


Рис. 5-26. Порядок приварки коротких патрубков с широкими фланцами.

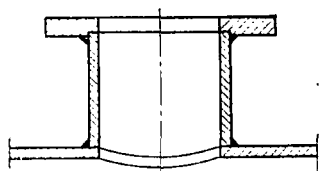


Рис. 5-27. Правильная сварка патрубков с обечайкой корпуса электродуговым методом.

приварку фланца производить с торца. При этом рекомендуется применять газодуговую (аргоно-дуговую или гелиево-дуговую) сварку.

В ряде случаев бывает выгодно приваривать горловину или патрубок к корпусу, не вырезая окна, прямо к цельной стенке, а затем после сварки и испытания шва на герметичность вырезать окно через патрубок на токарном, фрезерном или расточном станке.

Такой способ соединения особенно рекомендуется при больших сечениях коротких патрубков, когда можно ожидать значительной поводки узла при сварке. При сварке патрубка с цельным корпусом и последующей разделке окна поводка будет значительно меньшей.

Предварительную разделку окна для патрубка или горловины следует делать по внутреннему размеру патрубка и собирать и сваривать патрубок с корпусом, как показано на рис. 5-27.

Разметка и вырезка окон под патрубки в установках больших размеров значительно облегчается при пользовании соответствующими приспособлениями по схеме, показанной на рис. 5-28. На консоли 1, поворачивающейся вокруг стойки 2, может перемещаться и фиксироваться на различных вылетах каретка 3, несущая штангу 4, которая может поднимать или опускать закреплен-

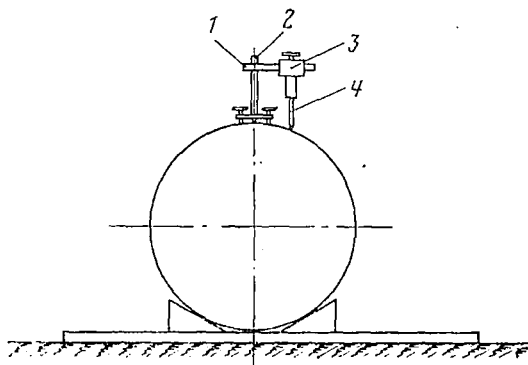


Рис. 5-28. Приспособление для вырезки окон.

ный на ее конце инструмент, следя за кривизной обрабатываемого корпуса. На конце штанги 4 крепится разметочный инструмент или различного рода режущие приспособления.

5-10. ТРУБОПРОВОДЫ

Нет ни одной вакуумной установки, в составе которой не было бы трубопровода. Наиболее ходовые диаметры вакуумных трубопроводов — от 16 до 50 мм. При производстве единичных установок выгоднее пользоваться простыми роликовыми приспособлениями для гнутья труб, так как везде, где это возможно по размерам, колена трубопроводов нужно делать гнутыми из цельнотянутых труб. В серийном производстве, даже при самых малых сериях, рекомендуется применять более совершенное оборудование.

На рис. 5-29 показан современный трубогибочный станок с программным управлением типа ТГПС-3 (ИО-626). Станок этот весьма универсален. На нем можно гнуть стальные трубы диаметром от 12 до 40 мм

и трубы из цветных металлов до 50 мм. Наименьший радиусгиба — 1,5 диаметра при прямом участке между гибом не менее двух диаметров; наибольший радиусгиба не ограничен. Изгибы трубы могут располагаться в любых плоскостях. Утоньшение стенки трубы в месте изгиба не превышает 4%.

Детали для сварных угловых колен, когда таковые необходимы, следует заготавливать с некоторым угло-

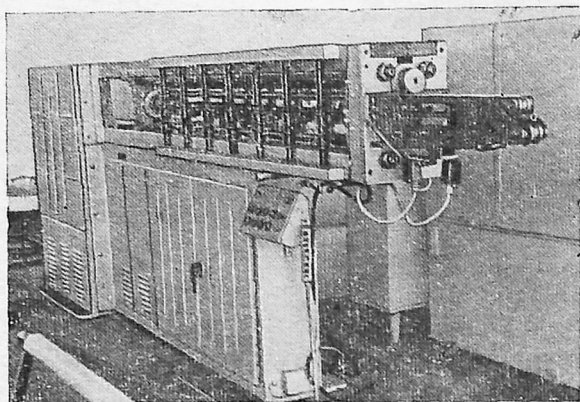


Рис. 5-29. Трубогибочный станок ТГПС-3.

вым припуском, имея в виду, что после сварки угол готового колена окажется острее, чем он получается при сборке деталей перед сваркой. Происходит это вследствие неодинакового действия усадки металла шва внутри угла колена и снаружи его. Величина такого заострения угла колена при сварке составляет иногда до 2° на каждый из сваренных швов (имеются в виду стыковые швы, образующие угол колена, а не соединяющие колено с фланцами).

В вакуумной технике необходимо обращать самое серьезное внимание на правильность изготовления колен и других деталей трубопроводов, так как даже небольшие несоответствия углов и размеров приводят к невозможности достигнуть полной герметичности в разъемных соединениях.

Колена трубопроводов из нержавеющей стали лучше всего сваривать аргоно-дуговой сваркой. Все ска-

занные выше о фланцах в части припусков на окончательную обработку, последовательности операций и пр. относится также и к фланцам вакуумных трубопроводов.

При изготовлении вакуумных трубопроводов и их колен, не подлежащих прогреву, могут быть широко применены соединения труб с их фланцами на резьбе с последующей пропайкой мягким припоем. Такие соединения выгодны, так как фланцы для них обрабатываются сразу окончательно, ибо мягкая пайка не дает сколько-нибудь существенных поводов и может производиться как последняя операция. С другой стороны, резьбовые соединения позволяют производить подгонку окончательных размеров трубопровода при сборке.

5-11. ДЕТАЛИ ДЛЯ СПАИВАНИЯ СО СТЕКЛОМ

Как известно, со стеклом может спаиваться ряд металлов и сплавов, однако наиболее распространены в настоящее время спай стекла с коваром, сталью Х18ТФМ, сплавом фени и меньше с медью, молибденом и др.

Из ковара, имеющего малый температурный коэффициент линейного расширения, выполняются детали самой различной формы: стержневые, кольцевые, чашечные и т. п. Ковар лучше других сплавов спаивается со стеклом, но он требует соблюдения некоторых правил обработки. Высококачественный спай может быть достигнут только при условии, что поверхность коваровой детали обработана не ниже восьмого класса чистоты (в месте спая). Если в стекло вплавляется кромка детали, то на ней не должно быть не только заусенцев, но и острых углов. Все углы должны быть скруглены. Не должно быть на месте спая и рисок, особенно поперек спая.

Заготовки из ковара, хромистых сталей, сплава фени чаще всего делаются штампованными, реже давленными и еще реже точеными. Обработка коваровых деталей в месте будущего спая со стеклом допускается только режущим инструментом (резцом): напильником, шабером и стеклянной шкуркой. Сталь Х18ТФМ требует такой же обработки, как и ковар. Из молибдена делаются в основном стержневые детали с последующим остеклованием.

Для спая меди со стеклом требуется создать такие условия, при которых спай мог бы осуществляться, несмотря на весьма большое различие температурных коэффициентов линейного расширения стекла и меди. Для этого нужно, чтобы кромка медной детали была податлива и могла при остывании спая без больших усилий изменять свои размеры настолько, насколько этого потребует стекло.

Это условие практически осуществимо только при толщине металла около вая в стекло не более 0,2 мм. Для достижения этого медные детали затачиваются на токарном станке на конус с углом заострения стенки около 1,5—2°. При такой заточке необходимо тщательно выверять детали в патроне и производить заточку конуса изнутри и проверку цилиндра снаружи с одной постановки, чтобы избежать разностенности.

5-12. ОХЛАЖДАЮЩИЕ ЗМЕЕВИКИ

Часто вакуумная система при работе требует прогрева одной части корпуса при интенсивном охлаждении его другой части, например, пароструйные насосы. Другие установки работают при значительном выделении тепла в их рабочих камерах, что также требует охлаждения стенок корпуса.

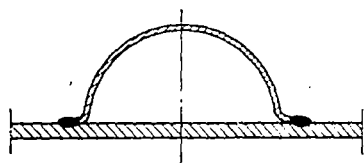


Рис. 5-30. Поперечное сечение паярного змеевика.

В установках небольших размеров и цилиндрической формы выгодно осуществлять охлаждение, делая на корпусах водяные рубашки. На корпусах установок более сложной формы отвод тепла осуществляется напаянными змеевиками, обычно из медных трубок круглого сечения или фасонного профиля.

В установках больших размеров ни рубашки водяного охлаждения, ни напаянные змеевики перепрабелны. Первые потому, что по условиям прочности их было бы необходимо делать толстостенными, а следовательно, и очень тяжелыми, вторые — по дефицитности и дороговизне цветных металлов.

Для больших установок рациональнее всего применять змеевики полукруглого сечения с отбортовкой (рис. 5-30). Такие змеевики изготавливаются на зигмашин-

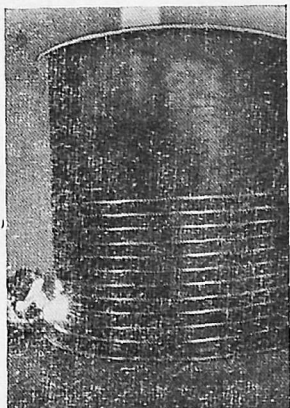


Рис. 5-31. Наварка змеевика на цилиндрический корпус.

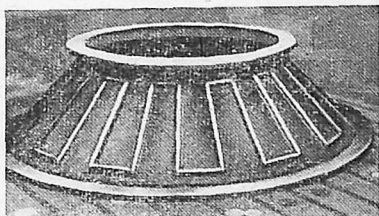


Рис. 5-32. Наварка змеевика на конус.

нах и навариваются на корпуса цилиндрической формы спирально (рис. 5-31), а на корпуса более сложной формы — отдельными кусками, соединяемыми между собой сваркой под различными углами (рис. 5-32).

Глава шестая

ВАКУУМНО-ПЛОТНАЯ СВАРКА

6-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Специального метода вакуумно-плотной сварки в технике не существует. В вакуумной технике применяются многие виды сварки металлов. И все же приходится говорить особо именно о вакуумно-плотной сварке, так как таковой сварка может быть только в том случае, если для данного материала метод сварки правильно выбран и она выполнена достаточно аккуратно с соблюдением определенных условий. Нашей задачей является выявить эти условия на основании имеющегося опыта, указать, как обеспечить их соблюдение, и помочь правильному выбору лучших методов сварки в различных случаях (в зависимости от применяемых материа-

лов, условий работы свариваемых установок и их конструктивных особенностей).

Вакуумно-плотными сварными швами мы будем в дальнейшем называть сварные швы, не имеющие видимых пороков как снаружи, так и в разрезах, на всей длине которых при откачке и испытании сваренных ими сосудов не удастся обнаружить течей при применении масс-спектрометрического течеискателя типа ПТИ.

В настоящее время — это самый чувствительный промышленный прибор для нахождения течей, и те соединения, в которых им не обнаруживаются дефектов, мы приравниваем по вакуумной плотности к цельному металлу.

Мы думаем, что здесь следует предостеречь читателя от одного, довольно широкого распространенного заблуждения, касающегося определения вакуумной плотности швов.

Часто приходится слышать и читать выражение: такое соединение (шов, уплотнение) может обеспечить такой-то вакуум. Можно ли так определять качество соединений? На наш взгляд, это неправильное определение.

Предельное остаточное давление является функцией многих переменных, в том числе и качества соединений, но не только его одного, а, следовательно, одно и то же соединение в одном случае, в одних условиях может обеспечить достижение данного предельного давления, а в других условиях не может. Нельзя говорить о способности соединения обеспечить то или другое предельное давление, не указывая, в какой системе, статической или динамической, какого объема, при каких откачивающих средствах и т. п. будет достигаться это давление.

Поэтому мы считаем более правильным говорить ясно и определенно об отсутствии или наличии течи как о вакуумной плотности или неплотности соединения, основываясь на показаниях течеискателя. При этом нельзя не упомянуть и еще об одной формулировке того же самого неправильного определения. Часто говорят, что данное соединение может обеспечить натекание не свыше столько-то *л·мк·рт. ст/сек*. Мы думаем, что это тоже неправильное определение вакуумной плотности.

Опыт показывает, что хорошо выполненный сварной шов может по всем показателям (прочности, плотности, вязкости, коррозионной стойкости) быть не хуже сплош-

ной стенки. Если же считается для какого-либо данного случая, что шов неравноценен по плотности сплошной стенке и его газопроницаемость больше, то очевидно ее нужно оценить определенной величиной, отнесенной к единице длины. Следовательно, натекание, которое может быть гарантировано данным швом, будет пропорционально его полной длине. Следует указывать удельное натекание на единицу длины шва.

Если же теческатель, несмотря на тщательность и правильность испытаний, течи не обнаруживает, то натекание, обнаруживаемое по изменениям давления за длительные периоды времени без откачки, нет оснований относить к сварным швам. Оно может явиться результатом газопроницаемости или газовыделения основного металла, неправильно выбранного метода обработки поверхностей, газовыделения уплотнителей и т. п.

Изделие следует строго испытывать теческателем и по результатам испытания сварные швы определять как вакуумно-плотные или нет.

6-2. ВЫБОР МЕТОДА

Газовая ацетиленовая сварка. При сварке малоуглеродистых или низколегированных сталей с толщиной стенок в месте сварки менее 1,5 мм можно применять газовую ацетиленовую сварку. Лучшие результаты получаются при сварке с отбортовкой и при угловой сварке снаружи. Сварка встык не рекомендуется. При больших толщинах газовая сварка для вакуумной системы не рациональна, так как дает значительное коробление деталей, окисление и ненадежные швы.

Электродуговая сварка качественными электродами для получения вакуумно-плотных швов применима как для малоуглеродистых сталей, так и для нержавеющей сталей с толщиной стенок в месте сварки 2 мм и более. Электродуговая сварка при этих толщинах пригодна для любых форм соединения, где шов не будет мешать сборке узла (стыковая, угловая, тавровая). Электроды должны быть строго определенных марок.

Автоматическая сварка под слоем флюса для вакуумных целей вполне применима как для малоуглеродистых, так и нержавеющей сталей.

Швы, полученные методом автоматической сварки, гладки и обычно не требуют дальнейшей обработки, да-

же если они расположены внутри аппарата и к этой установке предъявляются высокие требования в отношении чистоты поверхности. В то же время они настолько плотны, что допускают в случае необходимости обработку резанием и очень редко при этом (если сварка сделана правильно) обнаруживают течи. В обычных случаях автоматическую сварку можно рекомендовать для толщины стали от 3,0 мм и выше; при соблюдении мер предосторожности от прожогов и при достаточной внимательности сварщика можно соединять под флюсом сталь толщиной 2,0 и даже 1,5 мм.

Методом автоматической сварки удается при наличии достаточно универсального сварочного станка или манипулятора получать ряд швов, заведомо невыполнимых при ручной электродуговой сварке, как, например, внутренние швы в глубоких цилиндрах небольшого сечения и в других труднодоступных местах.

Электрошлаковая сварка. Этот метод сварки пригоден только для соединения малоуглеродистой и нержавеющей стали толщиной более 30 мм. Электрошлаковой сваркой удается получать наиболее плотные швы без каких-либо неметаллических включений.

Электродуговая сварка в защитной газовой среде, т. е. газодуговая сварка, применима весьма широко, хотя и по-разному для разных металлов.

Различаются два вида сварки в защитной газовой среде:

сварка плавящимся электродом, когда дуга горит между изделием и непрерывно подающейся электродной проволокой из того же металла, что и изделие (или близкого по химическому составу), и шов образуется с усилением за счет плавления электродной проволоки;

сварка неплавящимся электродом, когда дуга горит между изделием и неплавящимся электродом из вольфрама, а шов образуется или за счет оплавления кромок основного металла без усиления, или с усилением за счет присадочного металла из дополнительного прутка, вносимого сварщиком в зону дуги.

Особенно хорошие результаты дает газодуговая сварка нержавеющей сталей неплавящимся электродом. Сварка их может вестись как с присадочным материалом, так и методом оплавления кромок основного металла при самых разнообразных конструкциях соединений

(стыковая, угловая, тавровая, с отбортовкой и пр.). Шов получается пластичный, плотный и гладкий.

Ручная газодуговая сварка нержавеющей сталей широко применима для толщины металла от 0,5 до 5,0 мм, а при правильном конструировании сварного соединения и для больших толщин. Лучшей защитной средой являются аргон или гелий, но применение гелия при сварке нержавеющей сталей часто не оправдывается из-за его дороговизны.

При условии механизации сварки газодуговым методом с неплавящимся электродом можно успешно варить нержавеющую сталь толщиной 0,1—0,5 мм. Нержавеющие стали толщиной 2 мм и выше можно варить в среде аргона также и плавящимся электродом.

Алюминий и его сплавы свариваются легко в среде гелия (при более широких границах режимов) и труднее — в среде аргона. Однако и в аргоне могут быть получены вполне качественные вакуумные соединения при наличии соответствующей механизированной аппаратуры.

Алюминий и его сплавы могут свариваться в защитной газовой среде как неплавящимся электродом без присадки или с присадкой, так и плавящимся электродом.

Ковар толщиной до 1,5 мм надежно сваривается электрической дугой неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона или гелия.

С нержавеющей сталью ковар толщиной до 1,5 мм сваривается также в среде инертных газов.

Титан и его сплавы вакуумно-плотно соединяются газодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом при условии полной газовой защиты зоны термического влияния с обеих сторон, т. е. в газонаполненной камере или с применением установки, обеспечивающей такую защиту дополнительным поддувом газа.

Точечная контактная сварка не может дать вакуумных соединений, но широко применяется для сварки различных элементов конструкции.

Шовная роликовая импульсная сварка применяется для сталей разных марок, ковара и никеля при толщинах от 0,1 до 0,5 мм (сильфоны, мембраны и т. п.).

Заваривание медных и алюминиевых трубок небольших диаметров (например, штенгелей) и некоторых небольших деталей из тех же материалов при удобной их конфигурации может с успехом осуществляться холод-

ной сваркой методом пластической деформации, а сварка переходников (трубчатых или стержневых) из разноименных материалов (медь — алюминий, сталь — медь, сталь — алюминий, сталь — ковар) встык может осуществляться в одних случаях методом трения, а в других — методом диффузионной сварки в вакууме.

В вакуумной камере производится и сварка электронным лучом, которая применяется для соединения химически активных и тугоплавких металлов: титана, тантала, циркония, вольфрама, молибдена и др. В последнее время в связи с разработкой крупногабаритных электронно-лучевых сварочных установок на них стали сваривать и довольно крупные узлы из специальной стали, меди, алюминиевых сплавов, титана.

В вакуумной же камере выполняется и сварка упомянутым выше диффузионным методом, заключающимся в том, что свариваемые детали при нагреве, не достигающем температуры плавления, в среде вакуума способны свариваться при сравнительно небольших усилиях сжатия, не вызывающих заметного отклонения деталей от запроектированных размеров.

Диффузионный метод ценен в случаях необходимости сварки разноименных материалов, резко отличающихся друг от друга по физическим свойствам. Этим методом и его разновидностью — термокомпрессионным методом можно соединять детали в некоторых сочетаниях с неметаллическими материалами. Однако этот способ сварки требует специальных приспособлений для каждой случая сварки.

6-3. УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМНО-ПЛОТНЫХ ШВОВ

Некоторые требования, так же как и некоторые сварочные приспособления, являются общими для всех (или нескольких) методов вакуумно-плотной сварки. Поэтому для краткости изложения мы познакомим с ними читателя в первую очередь.

Главнейшим условием, обеспечивающим вакуумную плотность сварных швов, является аккуратность работы, т. е. неуклонное и точное выполнение технологических требований и вакуумной гигиены. Она может быть соблюдена в достаточной степени только там прежде всего, где достаточно чисто. Рабочее место сварщика, сварочный пост, все приспособления, детали и присадоч-

ный материал должны быть чистыми: пыль, сор, окалина недопустимы. Помещение сварочной мастерской должно хорошо вентилироваться и иметь хорошее освещение.

Вторым основным условием является удобство работы сварщика. Сварщик должен при ручной сварке работать сидя, для чего сварочный пост снабжается поворотным и регулируемым по высоте сиденьем. Для всех методов вакуумно-плотной сварки обязательными являются следующие технологические требования.

1. Свариваемый металл должен быть очищен и тщательно обезжирен.

Следы жиров, мыла, сорбированная влага, осевшая на поверхности основного металла пыль — все это в процессе сварки образует газ, остающийся в швах в виде мельчайших или более крупных пор, а иногда и раковин.

2. Присадочный металл также должен быть тщательно очищен и обезжирен.

3. Сварной шов должен накладываться по возможности от начала до конца непрерывно и во всяком случае с минимально возможным числом перерывов (каждый перерыв в сварке шва является местом возможного образования течи).

4. В случае перерыва в наложении шва, случайного или необходимого (например, для смены электрода), конец уже наложенного шва должен быть тщательно зачищен от шлака или окалины (бойком, зубилом, стальной щеткой) и продолжение шва должно накладываться с перекрытием в 5—15 мм в зависимости от толщины материала.

5. Сварка должна вестись с равномерной скоростью.

6. В отличие от сварки общего назначения сварочная дуга для вакуумно-плотной сварки должна перемещаться прямолинейно вдоль линий сварного шва.

7. Для вакуумной сварки детали небольших толщин и размеров собираются с зазором не более 0,3 мм, но без запрессовки.

8. Подварки крайне нежелательны. Нужно стремиться варить весь шов одинаково качественно.

9. Особое внимание должно обращать на стыки и перекрещивания швов, в которых даже у опытных сварщиков обнаруживается наибольшее количество течей.

10. В обычной сварке нагруженных конструкций, производимой усиленным швом, вогнутый шов считается



Рис. 6-1. Вращающийся подъемный столик для сварки кольцевых швов.

Такой столик совершенно необходим для сварки кольцевых вакуумных швов любым методом.

Для небольших деталей очень удобным приспособлением является зажимной патрон, свободно вращающийся на шпинделе, смонтированном на качающейся доске,

браком. Вакуумная же сварка иногда допускает несколько вогнутый шов как в стыковых, так и в угловых соединениях. Такой шов получается при сварках оплавлением кромок без присадочного металла, а также и при сварке под слоем флюса.

11. Обработка кромок под любой вид сварки должна производиться только механическим способом.

Сварочный пост должен быть оборудован металлическим верстаком размером не менее 1200×700 мм для подготовки деталей и мелкой сварки, покрытым лучше всего дюралюминиевой плитой не тоньше 20 мм. Обязательным оборудованием для каждого сварочного поста является также поворотный столик на подъемном винте или колонке с кремальерой (рис. 6-1).



Рис. 6-2. Манипулятор с самоцентрирующим патроном. Сварка корпуса насоса Н-1-С.



Рис. 6-3. Манипулятор с самоцентрирующим патроном.

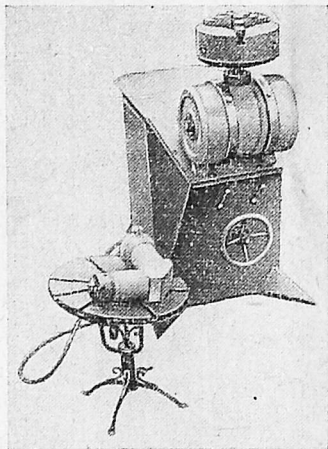


Рис. 6-4. Гидравлический манипулятор.

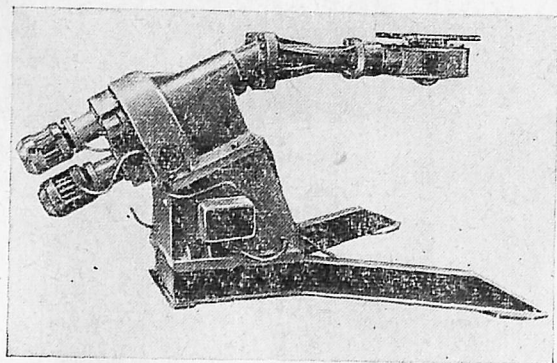
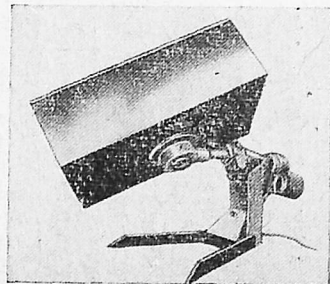


Рис. 6-5. Манипулятор-позиционер типа СМ-1000П грузоподъемностью 1 000 кг.



закрепляющейся под любым углом. Как видно на рис. 6-2 и 6-3, такое приспособление позволяет сваривать детали, равномерно вращая их в самом удобном для сварки положении.

Для сборки и сварки в фиксированном положении более крупных узлов сварочный цех оборудуется также плитой с приспособлением для крепления деталей, лучше всего чугуновой, размерами $1500 \times 1000 \times 500$ мм.

Помимо плиты необходимо иметь один или несколько (смотря по характеру производства) манипуляторов, обеспечивающих возможность сварки крупных узлов вакуумных аппаратов в наиболее удобных положениях. На рис. 6-4 показан гидравлический манипулятор для сварки деталей массой до 25 кг с бесступенчатой регулировкой числа оборотов. Манипулятор имеет приставку для сварки изогнутых труб. На рис. 6-5 изображен

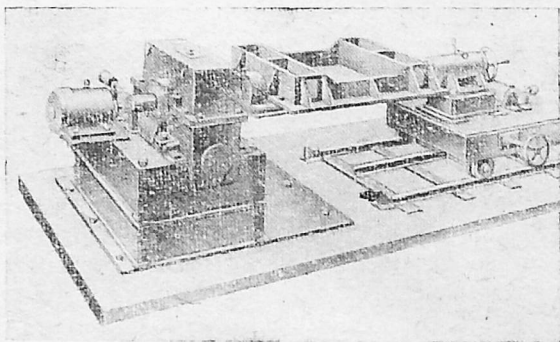


Рис. 6-6. Двухстоечный кантователь для сварки узлов массой до 10 т.

более мощный электрифицированный манипулятор для узлов массой до 1000 кг, а на рис. 6-6 показан двухстоечный кантователь для сварки узлов массой до 10 т.

Манипуляторы нужны почти для всех методов сварки. Они дают возможность получать более высокое качество сварки, чем при работе на полу или на плитах, за счет более равномерного перемещения детали или горелки (в случае соединения манипулятора с трактором) и за счет производства сварки в наивыгоднейших для каждого шва положениях.

Вообще при сварке ответственных конструкций сле-

дует руководствоваться правилом, которое гласит, что сварка механизированная или автоматизированная всегда лучше ручной.

6-4. ГАЗОВАЯ СВАРКА

Несколько внимательнее необходимо рассмотреть характерные особенности некоторых видов сварки применительно к изготовлению высоковакуумной системы.

Для вакуумной плотной газовой сварки малоуглеродистой стали небольших толщин (менее 1,5 мм) вполне пригоден ацетилено-кислородный пламя. Ацетилен может применяться из баллонов, также может быть получен на месте сварки в любом ацетиленовом генераторе. Применяются обычные горелки малых номеров. В отношении подачи кислорода также никаких особых требований для вакуумной сварки не предъявляется.

Таким образом, для газовой вакуумно-плотной сварки все оборудование и инструмент остаются обычными, стандартными. Мы считаем ацетилено-кислородную аппаратуру и оборудование общезвестными и не будем на них останавливаться, заметим только, что для газовой сварки стали малых толщин, что чаще всего и встречается в изготовлении вакуумной системы, следует пользоваться ацетиленовыми и кислородными шлангами облегченного типа. Это значительно облегчает манипулирование горелкой и дает возможность сварщику уточнить свои движения, что особенно важно при изготовлении тонких и сложных деталей (сварка трубок, nipples, рубашек охлаждения, охлаждаемых ловушек и т. п.). Сварка ведется нейтральным пламенем обычными приемами как оплавлением кромок основного металла, так и с присадочным металлом.

Виды сварных соединений и соответственная подготовка деталей и сборка узлов под сварку — обычные.

Газовая сварка цветных металлов и нержавеющей стали в вакуумной технике не рекомендуется ввиду неизбежного интенсивного окисления или науглероживания металлов и выгорания некоторых компонентов из цветных сплавов, что делает швы ненадежными в вакуумном отношении.

6-5. РУЧНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА

В вакуумной технике, как и во всем машиностроении, распространенным видом сварки является ручная электродуговая сварка качественными обмазанными электродами. При достаточной квалификации сварщика, правильно подобранных режимах сварки и качественных электродах ручная электродуговая сварка дает вакуумно-плотные швы.

Ручной электродуговой сваркой можно сваривать как малоуглеродистые стали, так и высоколегированные нержавеющие стали. Общие правила вакуумно-плотной сварки, приведенные в начале главы, целиком относятся и к электродуговой сварке. Из них особенно важны: соблюдение чистоты, подбор высококачественных электродов, достаточная сила сварочного тока, короткая дуга, непрерывность горения дуги, зачистка мест стыковки швов и зажигания дуги, прямолинейность перемещения сварочной дуги.

Сварку малоуглеродистых и нержавеющих высоколегированных сталей следует производить постоянным током. Сварка этих сталей переменным током, особенно при наличии осциллятора, возможна, но

результаты получаются далеко не столь надежными, да и сама сварка более трудна и требует большого опыта сварщика.

Вакуумно-плотная сварка требует наибольшей плотности металла шва. Так как при обычной электродуговой сварке шов образуется в основном за счет наплавления металла электрода, то необходимо соблюдать условия, при которых правильно подобранный металл электрода переходил бы в шов с наименьшей степенью окисления и азотирования. Это может быть достигнуто путем сварки наиболее короткой дугой.

Короткая дуга (2—3 мм) развивает достаточно тепла для глубокого провара шва непосредственно в сварочной ванне, но не перегревает металл электрода в капельной его фазе, когда он образует жидкую каплю на конце электрода и стекает в сварочную ванну. Жидкий металл при короткой дуге имеет меньшую поверхность соприкосновения с кислородом и азотом воздуха, уменьшается вероятность образования в шве окислов железа и включений MnO и SiO_2 . Газовая защита, образовавшаяся при сгорании газообразующих компонентов обмазки, при короткой дуге достигает своего наиболее полного эффекта: при малой высоте столба дуги тот же объем защитных газов образует более широкий и надежный защитный пояс.

Наоборот, при длинной дуге металл электрода, расплавляясь, образует свободную каплю, сравнительно долго остающуюся в столбе дуги. Капля металла перегревается до попадания в сварочную ванну, причем имеется большая возможность соприкосновения расплавленного металла с воздухом.

Таблица 6-1

Основные свойства отечественных электродов для сварки малоуглеродистых сталей

| Характеристика | Тип электрода | |
|--|------------------------------|------------------------------|
| | УОНИИ-13/45 | УОНИИ-13/55 |
| Класс по ГОСТ 9466-60 | Э-42А-Ф | Э-50А-Ф |
| Диаметр, мм | 2, 3, 4, 5, 6 | 2, 3, 4, 5, 6 |
| Род сварочного тока | Постоянный, на электроде (+) | Постоянный, на электроде (+) |
| Среднее значение механических свойств металла шва: | | |
| предел прочности, кгс/мм ² | 46 | 52 |
| относительное удлинение, % | 26 | 25 |
| ударная вязкость, кгс·м/см ² | 21 | 21 |
| угол загиба | 180° | 170° |
| Коэффициент наплавки, г/(а·ч) | 9—10 | 8,5—9,5 |
| Переход металла в шов, % | 90—95 | 93—95 |
| Рекомендуемый ток, а, для электрода диаметром, мм: | | |
| 3,0 | 80—109 | 80—100 |
| 4,0 | 130—150 | 130—150 |
| 5,0 | 170—200 | 170—200 |
| Длина дуги | Предельно короткая | Предельно короткая |

При длинной дуге, кроме того, металл шва легко может получить нерастворимые в железе включения и избыток газов, которые при быстром затвердевании и остывании шва приводят к образованию раковин и шлаков. Таким образом, вопрос о длине дуги в вакуумной сварке приобретает первостепенную важность.

Электроды, пригодные для вакуумной сварки, должны обеспечивать получение металла шва, обладающего высокой пластичностью, очень плотного, не склонного к образованию трещин, с легко отделяемой шлаковой коркой. Кроме того, они должны давать малое разбрызгивание металла в процессе сварки, так как большое количество брызг способствует загрязнению и коррозии изделий в околошовной зоне.

Для малоуглеродистой стали следует рекомендовать электроды УОНИИ-13/45, ГОСТ 9467-60. Этими электродами можно уверенно получать вакуумно-плотные швы. Менее пластичный шов, но достаточно надежный в отношении вакуумной плотности получается при сварке малоуглеродистой стали электродами УОНИИ-13-55, ГОСТ 9467-60. В табл. 6-1 приведены технические данные электродов обеих марок [Л. 55].

Из распространенных в нашей промышленности импортных электродов для сварки малоуглеродистой стали рекомендуются чехословацкие электроды марки ВН-48. Они дают весьма надежный чистый шов, и сварка ими незатруднительна в различных положениях. Из шведских электродов надежной является марка ОК49Р. Все указанные марки требуют постоянного тока с подключением (+) на электрод (обратная полярность).

При всех марках электродов сварка должна вестись по очищенному до блеска металлу с обязательным соблюдением изложенных выше общих правил вакуумной сварки.

Таблица 6-2

Основные свойства импортных электродов для сварки малоуглеродистой стали

| Характеристика | Тип электрода | |
|--|------------------------------|------------------------------|
| | ВН-48 (Чехосл. вакпла) | ОК49Р (Швеция) |
| Класс | Э-42А | Э-42А |
| Диаметр, мм | 2; 3,25; 4; 5; 6 | 2; 3,25; 4; 5 |
| Род сварочного тока | Постоянный, на электроде (+) | Постоянный, на электроде (+) |
| Среднее значение механических свойств металла шва: | | |
| предел прочности, кгс/мм ² | 42 | 42—44 |
| относительное удлинение, % | 22 | 20 |
| ударная вязкость, кгс·м/см ² | 14 | 11—14 |
| Рекомендуемый ток, а, для электрода диаметром, мм: | | |
| 2 | 60—90 | 60—90 |
| 3,25 | 75—130 | 80—140 |
| 4,0 | 120—190 | 130—200 |
| 5,0 | 190—260 | 180—250 |
| Длина дуги | Возможно короткая | Возможно короткая |

В табл. 6-2 приведены основные характеристики импортных сварочных электродов для малоуглеродистой стали.

Из нержавеющей стали наиболее широко в вакуумной технике применяется сталь X18H10T. Для сварки этой стали обычно применяются отечественные электроды марки ОЗЛ-14/02Х19Н19, ГОСТ 9466-60, имеющие покрытие рутилового типа. Наплавленный ими металл обеспечивает стойкость против межкристаллитной коррозии даже при кратковременной выдержке в интервале температур 500—650 °С, являющемся наиболее критическим для аустенитных сталей.

Для сварки этой же стали, когда к металлу шва предъявляются требования стойкости против межкристаллитной коррозии, но в менее критических температурных условиях пригодны электроды марки ЦЛ-11/08Х19Н10Б, ГОСТ 9466-60. Эти электроды создают в сварных швах металл типа 19-9, легированный ниобием.

Электроды марки ЭА-400/10У-1/04Х19Н11МЗ, ГОСТ 9466-60, с фтористокальциевым покрытием, благодаря содержанию в покрытии ванадия и легированию молибденом, обеспечивают швы, стойкие против межкристаллитной коррозии при температурах до 350 °С в коррозионных средах и малую склонность к образованию горячих трещин [Л. 55].

Для сварки подобных же сталей применяются также электроды марки НИАТ-1/06Х19Н9Т ГОСТ 9466-60, имеющие карбонатуриловое покрытие. Швы, выполненные этими электродами, стойки против образования горячих трещин и обладают повышенной стойкостью в сернокислотных средах.

Для сварки хромоникелевых сплавов типа инхром (Х20Н80, ХН78Т и др.) применяются электроды марки ЦТ-28/Х15Н60М15, ГОСТ 9466-60.

Рекомендуется строго придерживаться технологических указаний, даваемых заводами-изготовителями электродов в этикетках и в марочниках.

Для сварки малоуглеродистой стали со сталями аустенитного класса применяются электроды марки 48Г, ГОСТ 9466-60, с покрытием фтористокальциевого типа и стержнем из стали марки СВ-08Х20Н10Г6, ГОСТ 2246-60. Для этой же цели могут быть применены и электроды марки ОЗЛ-6/07Х25Н13, ГОСТ 9466-60 [Л. 55].

Никаких особых приемов вакуумной сварки нержавеющей стали нет. Сварку нержавеющей стали можно вести смелее, чем сварку малоуглеродистой стали, так как нержавеющая сталь меньше подвержена окислению и при ее сварке меньше опасность прожогов. Поэтому швы на нержавеющей стали получаются более плотными.

Сварка нержавеющей стали должна вестись в основном на постоянном токе, на электроде (+), на повышенных режимах. Дуга перемещается прямолинейно.

Следует обращать внимание на условия хранения электродов. Покрытие электродов гигроскопично; хранить их нужно только в совершенно сухом месте. Электроды, которые сохранялись более 5—6 недель, перед сваркой нужно просушивать в течение 1 ч при температурах от 120 до 300 °С. Это замечание относится ко всем электродам, как отечественным, так и импортным (табл. 6-3).

6-6. СВАРКА ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА

Ручная электродуговая сварка во многих случаях не может удовлетворить всем требованиям вакуумной техники, а для сверхвысокого вакуума она рекомендуется только в некоторых случаях.

Основные свойства отечественных электродов для сварки некоторых
нержавеющих и жароупорных сталей

| Характеристика | Марка электрода и стали | | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | ЦЛ-11/08Х19 Н10Б | ОЗА-14/02 Х19Н9 | ЭА-400/16У- -1/04Х19Н11М3 | ЦТ-28/Х15 Н60М15 | НИАТ-1/06 Х19Н9Т |
| Класс по ГОСТ 9466-60 | ЭА-1Б | ЭА-1 | ТУ ОСЗ | ЭА-1 | ЭА-1 |
| Диаметр, мм | 2; 3; 4; 5 | 3; 4; 5 | 2; 3; 4; 5 | 3; 4 | 2,5; 3; 4; 5 |
| Род сварочного тока | Постоянный на электро- де (+) | Постоянный и переменный | Постоянный на электро- де (+) | Постоянный на электро- де (+) | Постоянный на электро- де (+) |
| Среднее значение механических свойств металла шва: | | | | | |
| предел прочности, кгс/мм ² | 60 | 60 | 60 | 50 | 60 |
| относительное удлинение, % | 30 | 40 | 35 | 14 | 38 |
| ударная вязкость, кгс·м/см ² | 10 | 15 | 12 | — | 15 |
| угол загиба | 180° | 180° | 180° | — | 180° |
| Переход металла в шов, % | 90 | 85 | 90 | 90 | 90 |
| Коэффициент наплавки, г/(а·ч) | 10 | 10 | 12 | 11 | 10 |
| Рекомендуемый ток, а, для электрода диамет- ром, мм: | | | | | |
| 2 | 40—10 | — | 40—60 | — | 30—50 |
| 3 | 60—80 | 50—70 | 70—90 | 80—100 | 50—80 |
| 4 | 130—150 | 120—140 | 120—130 | 110—140 | 110—140 |
| 5 | 150—180 | 150—170 | 140—160 | — | 140—170 |
| Длина дуги | — | — | Возможно короткая | — | — |

В тех случаях, когда требуется особо высокая плотность шва, отсутствие каких-либо неровностей, могущих задержать на себе грязь, или необходима механическая обработка сварного шва, ручная сварка становится уже малопригодной. Какова бы ни была квалификация сварщика и каковы бы ни были электроды, все же поверхность ручного электродугового шва остается по меньшей мере грубошероховатой, а в толще шва встречаются мелкие раковины и значительные на первый взгляд шлаковые включения.

Механическая обработка ручных электродуговых швов в вакуумной технике не рекомендуется: в большинстве случаев она приводит к появлению течей, а подварка швов нежелательна. Исключение составляет многослойная сварка толстых заготовок.

Кроме того, нередко случаются, когда вследствие неблагоприятных размеров и формы деталей внутренние швы просто не могут быть выполнены вручную, так как сварщик не может подобраться к ним с необходимой степенью удобства или безопасности. В таких случаях для сварки малоуглеродистых и нержавеющей сталей может с успехом применяться автоматическая сварка под слоем флюса.

Сварные швы, выполненные этим методом, отличаются гладкой блестящей поверхностью и высокой плотностью металла. Эти швы допускают последующую механическую обработку без нарушения вакуумной плотности. Сущность метода автоматической сварки под слоем флюса общезвестна.

Для сварки крупных и средних вакуумных аппаратов вполне пригодны различные установки для сварки под слоем флюса, как, например, тракторный автомат типа АДС-500, или установки с использованием типовых сварочных тракторов, например, типа ТС-35 или АДС-1000-2, или ТС-17М; используются также сварочные головки типа СГ-6 или УСА-2 и др., монтируемые в соединении с различными манипуляторами для кольцевых швов или самоходными механизмами, винтовыми или реечными, для прямых швов.

Эти установки описаны во многих трудах по автоматической сварке, и мы не будем на них останавливаться. Они по большей

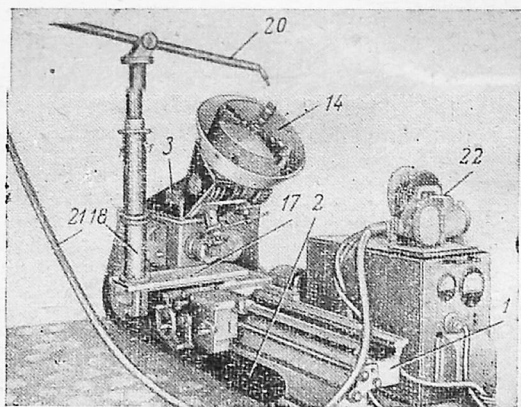


Рис. 6-7. Универсальный сварочный станок, переделанный из небольшого токарного станка.

части сваривают металл электродной проволокой диаметром 4—5 мм [Л. 25].

Укажем подробнее на оборудование для более мелких работ.

Автоматические установки для их сварки должны быть менее мощными, так как обычно здесь требуется сварка металла меньших толщин. Для сварки вакуумных установок средней величины достаточно электродной проволоки толщиной 2—2,5 мм.

В общем машиностроении для таких работ применяются полуавтоматы, но вакуумно-плотная сварка не может быть надежно достигнута только с их помощью, т. е. с механической подачей электродной проволоки, но с перемещением дуги вдоль шва вручную. При сварке под слоем флюса, когда зона дуги не видна, а вполне равномерное движение горелки вручную невозможно, неизбежны отдельные «перехваты» в ширине шва и глубине провара. В этих точках обязательно образуются трещины.

Однако полуавтоматы могут успешно применяться для вакуумно-плотной сварки в соединении с различными станками, обеспечивающими равномерное перемещение сварочной дуги вдоль шва. Пример приспособления обычного токарного станка для сварки с помощью полуавтомата ПШ-5 показан на рис. 6-7 и 6-8.

Сварочный станок создан на базе старого небольшого токарно-винторезного станка. При реконструкции станка полностью были сохранены и использованы его коробка скоростей, коробка передач и весь механизм продольного и поперечного самоходов. Со станка сняты задняя бабка и резцедержатель, а также ножки станины. Станина 1 укреплена на плоской сварной раме 2 (рис. 6-7). Крышка передней бабки заменена сварным кронштейном 3. Наклонный червячный вал вмонтирован в трубу 4, присоединенную к поперечным перекладкам кронштейна (рис. 6-8).

Вал этот приводится в движение от шпинделя станка парой конических шестерен 5 и 6; последняя крепится съемным диском 7. В свою очередь вал приводит в движение червячное колесо 8, сидящее на шпонке на горизонтальном поперечном валу 9, который кон-

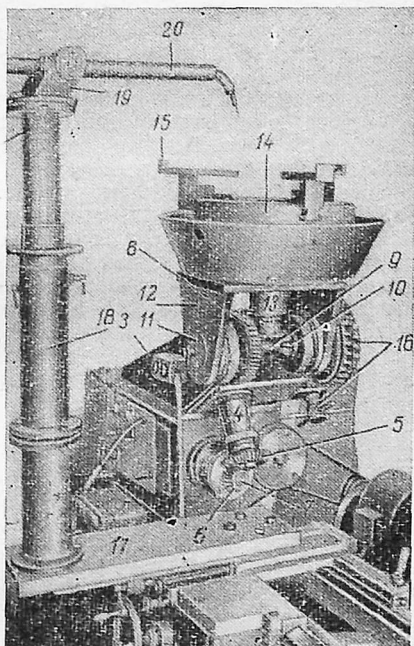


Рис. 6-8. Передняя бабка и рабочая штанга на подъемной колонке универсального сварочного станка.

цами вставлен в подшипники 11, служащие одновременно осями для шарнирного соединения кронштейна 3 со скобой 12. Эта скоба, таким образом, может качаться около оси вала 9, на котором закреплена и коническая шестерня 10.

Скоба 12, качающаяся на подшипниках 11, служит для монтажа рабочего шпинделя 13, на одном конце которого имеется коническая шестерня, сцепленная с шестерней 10, а на другом крепится обычный токарный патрон 14 диаметром 300—400 мм. Дополнительные кулачки 15 позволяют зажимать в нем детали диаметром до 600 мм. Скоба 12 вместе с патроном может устанавливаться под любым углом к оси станка (при помощи червячной пары 16, в которой червяк смонтирован на кронштейне 3, а червячное колесо — на скобе 12), причем патрон всегда будет получать движение от вала 9 через шестерню 10.

Это устройство позволило одновременно поднять центр шпинделя и патрона достаточно высоко над станиной и сделать ось шпинделя качающейся. Поэтому возможно установить свариваемую деталь под наиболее удобным углом к горизонту и снизить скорость вращения патрона с деталью до скоростей, необходимых для сварки. В описываемом станке общее передаточное число равно 1:174.

На суппортную каретку вместо резцедержателя установлена плита 17 с подъемной колонкой 18, несущей на верхнем конце рабочую штангу 20. Последняя может поворачиваться вокруг оси колонки, двигаться вдоль или назад благодаря шарнирной головке 19.

Электродная проволока подается с катушки подающего механизма 22 сварочного полуавтомата ПШ-5 по шлангу 21 через рабочую штангу 20. Через сварочный мундштук она направляется непосредственно на шов.

Внутри рабочей штанги на изоляторах уложена толстостенная латунная трубка, служащая направляющей для электродной проволоки и электрически соединенная с источником сварочного тока. Таким образом, сварочная проволока изолирована от массы станка, на которую замыкается второй полюс.

Для сварки деталей кольцевыми швами как внутренними (рис. 6-9 и 6-10), так и наружными (рис. 6-11) деталь зажимается

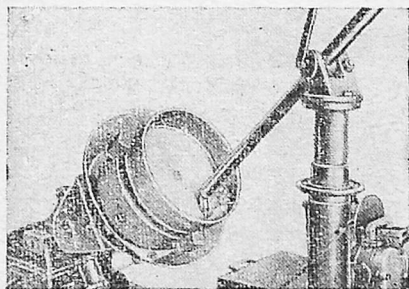


Рис. 6-9. Внутренний вакуумный шов, наложенный под слоем флюса на сварочном станке.

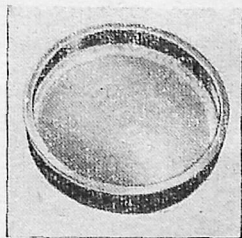


Рис. 6-10. Внутренний вакуумный шов, выполненный под слоем флюса.

в патрон, устанавливается под наимыгоднейшим углом для данной работы; сварочная рабочая штанга подводится к месту сварки и направляется сварочным мундштуком на линию шва. При помощи рукояток коробки скоростей устанавливается нужная скорость сварки, подбором шестерен — скорость подачи электродной проволоки, а также подбирается необходимая сила тока.

После этого на место сварки засыпается флюс. Вращение патрона с деталью и подача сварочного тока заблокированы с подачей проволоки, включаются одновременным нажатием двух кнопок.

Безотказное зажигание дуги обеспечивается тем, что до засыпки флюса под конец электродной проволоки подсыпается немного железных опилок, которые образуют мостик, облегчающий зажигание дуги.

Флюс засыпается совочком, что позволяет производить внутреннюю сварку деталей малых диаметров при значительной длине. Бункер для флюса препятствовал бы этому. Сварщик следит за прогревом шва (с тыльной стороны) и поддерживает слой флюса. Желательно сколоть на ходу шлаковую корку в начале шва, так как шов должен замыкаться лучше на чистый металл, а не на шлак, иначе в стыке шва может образоваться течь.

В тех случаях, когда шов ведется по краю детали и вокруг шва не может удержаться слой флюса (толщиной 30—40 мм), на конец рабочей штанги надеваются металлические рамки различной формы, удерживающие достаточное количество флюса для надежной защиты зоны сварки от действия кислорода воздуха. Рамки имеют по краям бахрому (щеточки) из шнурового асбеста, которая соприкасается с металлом детали и шлаковой коркой шва. По мере расплавления флюса сварщик добавляет в рамку свежие его порции.

Для сварки прямых швов деталь в зависимости от ее формы можно зажимать в патрон или укладывать на металлический стол

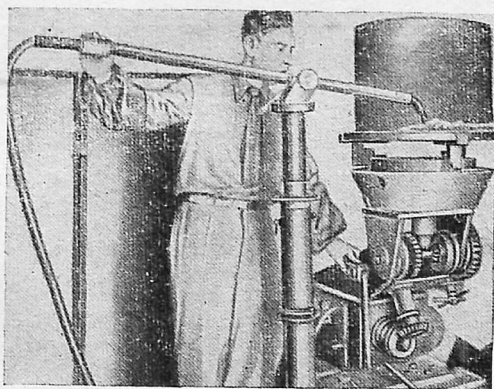


Рис. 6-11. Сварка под слоем флюса наружного кольцевого шва.

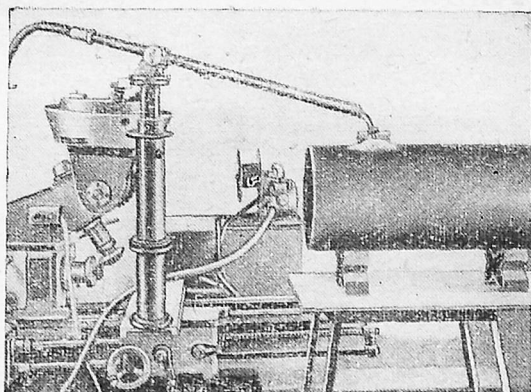


Рис. 6-12. Сварка прямого шва под слоем флюса на сварочном станке.

(плиту), установленный рядом со станком. Движение патрона в этом случае должно быть выключено; деталь остается неподвижной, а колонка с рабочей штангой перемещается вдоль шва механизмом самохода с заранее выбираемой скоростью.

Сварка прямого шва показана на рис. 6-12.

Таблица 6-4

Флюсы для автоматической сварки

| Марка флюса | Назначение |
|-----------------|---|
| ОСЦ-45, АН-348А | Сварка малоуглеродистой стали проволокой 3—6 мм на переменном или постоянном токе |
| АН-348-АМ | То же тонкой проволокой (до 3 мм) и на постоянном токе |
| ОСЦ-45М | То же |
| АНФ-5, АНФ-8 | Сварка аустенитной стали на переменном и постоянном токе |
| АН-10 | То же |
| ФЦ-4, ФЦ-6 | Сварка малоуглеродистой стали больших толщин |
| АН-20 | Сварка легированной стали и меди |
| ФЦЛ-1, ФЦЛ-2 | Сварка хромоникелевой стали аустенитного класса и хромистой стали |
| АН-26 | Сварка высоколегированной стали аустенитного класса |
| АН-1 | Сварка сплава АМц проволокой АМц |
| К-8 | Сварка стали 1Х18Н10Т проволокой Св-0Х18Н10Т |

Прямолинейные швы, так же как и кольцевые, можно сваривать на станке как снаружи, так и изнутри детали. Внутренние швы можно сваривать в деталях с поперечником от 150 мм и выше.

На подобных установках могут с успехом применяться любые современные сварочные полуавтоматы.

Сварка с применением полуавтомата может вестись электродной проволокой диаметром 0,5—2 мм. Могут свариваться детали из малоуглеродистой или нержавеющей стали разных толщин. Сварку ведут постоянным током при обратной полярности.

Средняя скорость сварки углеродистой и нержавеющей стали для мелких и средних узлов равна 0,45 м/мин. Она колеблется в за-

Таблица 6-5

Режимы сварки под флюсом электродной проволокой диаметром 2 мм (для углеродистой и нержавеющей стали)

| Скорость подачи электродной проволоки, м/ч | Сварочный ток, а | Напряжение дуги, в | Толщина материала, мм | Скорость сварки, м/мин |
|--|------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|
| 79 | 190—210 | 30—32 | 3,5 | 0,55 |
| 101 | 230—250 | 30—32 | 4,0 | 0,45 |
| 156 | 280—300 | 32—34 | 5,0 | 0,40 |
| 191 | 320—350 | 32—34 | 6,0 и более | 0,36—0,20 |

висимости от толщины свариваемого металла. Скорость подачи электродной проволоки устанавливается путем смены ведущей и ведомой шестерен подающего механизма.

При сварке можно применять флюсы марок, указанных в табл. 6-4. В табл. 6-5 приведены примерные режимы сварки под флюсом стали электродной проволокой диаметром 2 мм.

6-7. АРГОНО-ДУГОВАЯ СВАРКА

Как мы видели раньше, при сварке обмазанными электродами или под слоем флюса наилучшие результаты обеспечены тогда, когда обмазка или флюс при расплавлении и частичном сгорании могут создать надежную защиту зоны дуги от кислорода и азота воздуха. Правда, обмазка и флюсы играют не только защитную роль. Во многих случаях обмазка или флюс активно участвуют в металлургических процессах, протекающих в зоне сварки, и воздействуют на металл химически. Но без защиты шва от действия кислорода и азота воздуха плотных швов получить было бы невозможно.

Наиболее высококачественные соединения различных сталей, меди и алюминия, а также алюминиевых сплавов и других металлов могут быть получены методом дуговой сварки в защитной среде инертных газов. Газодуговая сварка и наиболее распространенная ее разновидность — аргоно-дуговая основана на применении защиты зоны сварки газам.

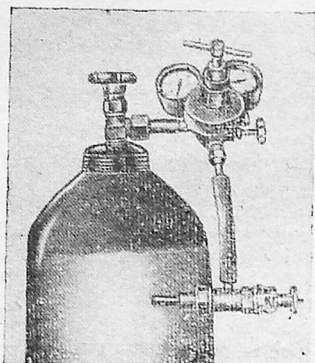


Рис. 6-13. Натекатель, смонтированный последовательно с редуктором.

Сварка в среде аргона является наилучшим методом для соединения нержавеющей стали небольших толщин (от 0,5 до 5 мм) для вакуумных целей.

Аргон (Ar) — инертный газ, не вступающий ни в какие химические соединения, бесцветный, не имеющий запаха. Аргон тяжелее воздуха в 1,38 раза. Его плотность равна $1,7833 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$. Аргон содержится в воздухе в количестве 0,9325% по объему, или 1,2862% по массе. Аргон добывается из воздуха при сжижении. Жидкий аргон кипит при температуре $-185,8^\circ\text{C}$. Аргон выпускается промышленностью разных степеней очистки (ГОСТ 10157-62):

состав А (99,99% Ar, 0,01% N, 0,003% O₂, 0,03 г/м³ H₂O);

состав Б (99,96% Ar, 0,04% N, 0,005% O₂, 0,03 г/м³ H₂O);

состав В (99,86% Ar, 0,1% N, 0,005% O₂, 0,93 г/м³ H₂O).

Для сварки нержавеющей стали вполне пригоден чистый аргон составов А и Б, для сварки меди или алюминия — состав А. Аргон может употребляться прямо из баллонов.

Аргон отпускается в баллонах под давлением в 150 кгс/см². Геометрический объем баллона 40 л. Емкость баллона 6 м³ газа. Окраска аргоновых баллонов — серая с зеленой полосой.

Газ из баллона подается в горелку по облегченному кислородному шлангу под давлением около 0,02—0,1 кгс/см².

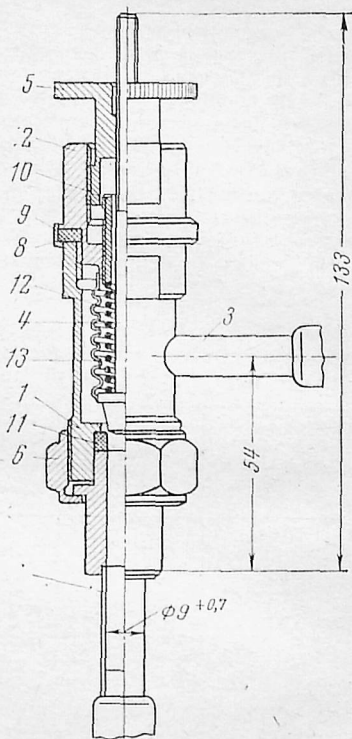


Рис. 6-14. Устройство натекателя Б-23-Х-8.

1 — корпус; 2 — крышка; 3 — выходной патрубок; 4 — клапан (игла); 5 — головка; 6 — гайка; 7 — входной патрубок; 8 — уплотнитель; 9 — обойма уплотнителя; 10 — регулирующая муфточка; 11 — седло; 12 — пружина; 13 — сильфон.

Требуемое давление для каждого случая сварки сварщик может установить на основании опыта по расходу газа, измеряемому ротаметром.

Для подачи аргона из баллонов существуют газовые редукторы ДЗР-1-57, имеющие пределы регулирования давления на выходе от 1,5 до 0,05 *кгс/см²* (окраска редуктора черная). Для большей устойчивости газового потока, что обеспечивает лучшую защиту сварочной зоны, желательнее включить два редуктора последовательно.

Иногда второй редуктор может быть заменен натекателем, например, типа Б-23-Х-8 (рис. 6-13 и 6-14). Натекатель отличается от редуктора тем, что регулирует количество протекающего газа гораздо тоньше редуктора и может устойчиво работать в области весьма малых давлений и небольших количеств газа, но не может автоматически поддерживать заданного уровня низкого давления; следовательно, натекатель можно применять только для подачи газа напроход.

6-8. СВАРКА НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Как указывалось выше, существуют два способа газодуговой сварки: неплавящимся (вольфрамовым) электродом и плавящимся электродом.

Для аргоно-дуговой сварки алюминия неплавящимся электродом рекомендуется переменный ток. При сварке на переменном токе в среде аргона для стабилизации дуги применяется наложение на сварочный ток промышленной частоты тока повышенной частоты и высокого напряжения от сварочного осциллятора. Наложенный ток частотой 200—300 *кГц* при напряжении 2500—3000 *в* безопасен для сварщика. Он может вызвать лишь ощущение легкого покалывания. В то же время благодаря высокому напряженному току осциллятора легко пробивает воздушный промежуток в 2,5—3 *мм* между нагретым вольфрамовым электродом и металлом изделия, непрерывно создавая ионный мостик и не давая сварочной дуге погаснуть, если сварщик держит правильный зазор между электродом и изделием. Примерные режимы сварки на переменном токе указаны в табл. 6-6.

Долгое время считалось, что вакуумно-плотную сварку стали также лучше вести на переменном токе. Но в связи с усовершенствованием источников питания и некоторых дополнительных устройств аргоно-дуговая сварка стали неплавящимся электродом на постоянном токе стала не хуже и проще, чем сварка на переменном токе.

Источники питания с широкими пределами регулирования тока, сварочный осциллятор, включаемый в сварочную цепь постоянного тока, горелки с водяным охлаждением, применение электродов из лантанированного вольфрама, заточка их на острие, применение щитков, направляющих струю аргона и уменьшающих диффузию кислорода и азота воздуха в защитную струю аргона или гелия, — все это дало возможность перехода на постоянный ток при сварке подавляющего большинства конструкций из нержавеющей стали и никелевых сплавов.

Однако сварка на постоянном токе имеет одну неприятную особенность: при сварке оплавлением кромок шов получается с небольшим подрезом (на стыковых и тавровых соединениях), что делает этот метод неудобным для стыковой и тавровой сварки стали малых

Режимы ручной аргоно-дуговой сварки алюминия и его сплавов неплавящимся электродом для материалов различных размеров

| Толщина материала, мм | Диаметр электрода, мм | Сварочный ток, а | Расход газа, л/ч |
|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| 0,6 | 1,0—1,2 | 20—30 | 200—360 |
| 0,8 | 1,0—1,2 | 25—50 | 200—360 |
| 1,0 | 1,2—1,6 | 30—60 | 200—360 |
| 1,2 | 1,6 | 50—100 | 280—400 |
| 1,6 | 1,6—2,0 | 60—120 | 280—420 |
| 2,0 | 2,0 | 80—130 | 300—450 |
| 2,5 | 2,0—2,5 | 120—180 | 340—480 |
| 3,0 | 2,5—3,0 | 130—220 | 350—500 |
| 5,0 | 4,0 | 200—320 | 400—600 |
| 0,6 | 1,2 | 10—30 | 160—300 |
| 0,8 | 1,2 | 15—35 | 160—300 |
| 1,0 | 1,6 | 20—40 | 160—300 |
| 1,2 | 1,6 | 25—60 | 220—350 |
| 1,6 | 1,6—2,0 | 30—60 | 220—350 |
| 2,0 | 2,0—2,5 | 40—80 | 220—350 |

толщин (меньше 1,5—2 мм) без присадки. Соединения же с отбортовкой или торцовые можно варить постоянным током даже при толщинах 0,5+0,5 мм.

Для сварки постоянным током материала малой толщины промышленность выпускает выпрямитель ВССГ-70 и установку УДГ-101, имеющие пределы регулирования тока от 2 до 85 а. Для сварки металла большой толщины выпускаются выпрямители серий ВСС и ВС: ВСС-120-3, ВСС-300-3, ВС-200, ВС-400 [Л. 25], а также выпрямители ВД-304 и ВДГ-301. Они имеют достаточно широкие диапазоны регулирования тока и могут применяться без балластных реостатов.

Без балластного реостата можно обойтись при сварке тонкого металла и при использовании генератора СМГ-2г-11, но с небольшой переделькой: щеткодержатель переводится за предельное положение наименьшего тока, для чего нужно снять ограничитель. При таком положении щеток можно варить тонкую сталь от 1 мм благодаря расширению пределов регулирования тока.

Для стабилизации дуги постоянного тока в сварочную цепь включается осциллятор (табл. 6-7). Кроме того, для этой цели применяются электроды из лантанированного вольфрама, которые при оплавлении дугой почти не образуют на конце

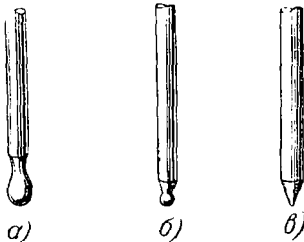


Рис. 6-15. Характер обгорания вольфрамовых электродов.

а — вольфрам чистый и торированный; б — вольфрам лантанированный; в — заточка лантанированного электрода.

электрода шарика, как это происходит с электродами из чистого вольфрама, а обгорают, образуя подобие усеченного конуса (рис. 6-15). Лантанированные электроды затачиваются на конус, и заточка эта периодически восстанавливается (шлифовкой) по мере подгорания конуса. Это увеличивает плотность тока на острие электрода, чему способствует работа на прямой полярности: плюс на изделии и минус на электроде. При такой полярности максимум тепла выделяется на изделии и электрод обгорает меньше. Этому способствует и водяное охлаждение горелки.

Таблица 6-7

Основные свойства сварочных осцилляторов

| Тип осциллятора | Первичное напряжение, в | Вторичное напряжение, в | Потребляемая мощность, квт |
|-----------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| ТУ-2 | 65; 220 | 3 700 | 0,225 |
| ТУ-77 | 65; 220 | 1 500 | 1,0 |
| ТУ-177 | 65; 220 | 2 500 | 0,4 |
| ОСЦН | 220 | 2 300 | 0,4 |
| М-2 | 110; 220 | 2 600 | 0,14 |
| М-3 | 40; 65 | 2 500 | 0,075 |
| ОС-1 | 65 | 2 500 | 0,13 |
| ОСМ-2 | 220; 127; 36 | 3 000 | 0,14 |

Для изготовления неплавящихся электродов следует брать лантанированный вольфрам марки ВЛ по техническим условиям ВТУ 245-62.

Хорошие результаты дает также применение торированного вольфрама марки ВТ-15 с содержанием окиси тория от 1,5 до 2,5%. Однако использование торированного вольфрама связано с определенной вредностью и требует обязательного соблюдения ряда условий безопасности, изложенных в Санитарных правилах за № 367-61.

Допускаемые значения силы тока для вольфрамовых электродов различного диаметра приведены в табл. 6-8.

Приводим диаметры выходного отверстия наконечников горелок в зависимости от диаметра применяемого вольфрамового электрода:

| Диаметр вольфрамового электрода, мм | Диаметр выходного отверстия наконечников горелок, мм |
|-------------------------------------|--|
| 1,0—1,5 | 5,0—6,0 |
| 2,0—2,5 | 6,0—8,0 |
| 3,0—4,0 | 8,0—12,0 |

Завышение выходного отверстия не улучшает газовой защиты, а лишь приводит к перерасходу газа и удорожанию сварки.

Сварку нержавеющей стали малой толщины (менее 2 мм) можно вести на переменном токе. Шов, выполненный дугой переменного тока, даже при оплавлении кромок не дает подрезов и получается очень гладким.

Интересно отметить, что сварка титана в газонаполненной камере на постоянном токе также дает очень гладкий шов без всяких следов подреза.

Допускаемые значения сварочного тока для вольфрамовых электродов, *a*

| Диаметр электрода, мм | Переменный ток | Постоянный ток, прямая полярность | Диаметр электрода, мм | Переменный ток | Постоянный ток, прямая полярность |
|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------|-----------------------------------|
| При сварке в среде чистого аргона | | | При сварке в среде чистого гелия | | |
| 1,0 | 55 | 75 | 1,0 | 60 | 100 |
| 1,6 | 100 | 140 | 1,6 | 110 | 160 |
| 2,0 | 135 | 190 | 2,0 | 150 | 210 |
| 2,5 | 180 | 250 | 2,5 | 190 | 260 |
| 3,0 | 220 | 320 | 3,0 | 230 | 330 |
| 3,5 | 250 | 360 | | | |

Сварку алюминиевых сплавов неплавящимся электродом, как уже говорилось ранее, необходимо вести переменным током и обязательно принимать меры для уничтожения составляющей постоянного тока, появляющейся при сварке алюминия в аргоне и гелии переменным током (явление частичного выпрямления тока). Об этом явлении подробно говорится в работах [Л. 26, 27].

Дуга постоянного тока не может в достаточной степени разрушить оксидную пленку на поверхности алюминия, и сварка такой дугой идет плохо. Дуга переменного тока, попеременно вдавливая и вспучивая оксидную пленку на сварочной ванне жидкого металла, лучше разрушает эту пленку и создает лучшие условия для сплавления кромок свариваемых деталей. Но и при этих условиях сварка алюминия и его сплавов с вакуумной плотностью далеко не проста. Она достигается легче при сварке в среде гелия, где выделяется при тех же токах больше тепла и за этот счет происходит более полное расплавление оксидной пленки. В аргоне же часто остаются нерасплавленными кусочки окиси алюминия, включения которых в шве (видные иногда на глаз) служат причиной образования трещин. Для снижения толщины оксидной пленки, повышения плотности шва свариваемые детали и присадочный материал перед сваркой хорошо подвергать электрополированию.

Но даже и этого недостаточно для получения действительно плотных швов при сварке алюминия и его сплавов. Адсорбированные пленки растворителей после обезжиривания или влаги, остающиеся после промывки, несмотря на просушивание, дают при сварке достаточно паров и газов для образования в теле шва мелких пор. В случаях, когда эти поры сливаются вместе, образуется раковина и трещина.

Лучшим средством избежать этого явления служит механическая очистка свариваемых кромок и прилегающих к кромкам поверхностей металла при помощи шабера. По наблюдению ряда исследователей такая очистка дает наилучшие результаты, если она производится после обезжиривания и травления непосредственно перед сваркой.

Источниками питания при сварке алюминия могут служить сварочные трансформаторы типа ИПК-120 с регулировкой тока от

30 а для малых толщин и типа ИПК-300 для больших толщин металла. Эти трансформаторы снабжены встроенными осцилляторами и устройствами для устранения явления выпрямления тока.

Для каждой детали или узла, изготовленных из алюминия или алюминиевых сплавов, в зависимости от толщины материала, условий теплоотвода, типа соединения приходится подбирать режим сварки и затем очень строго его придерживаться, так как даже небольшие отклонения приводят к потере вакуумной плотности. Очень важно выдерживать постоянство удельной энергии сварки, а следовательно, и постоянную скорость.

Мы рекомендуем варить алюминий в автоматизированных газонаполненных камерах или хотя бы на механизированных установках, так как на них гораздо легче выдерживать режим сварки с необходимой точностью.

На некоторых предприятиях практикуется сварка алюминия и его сплавов с предварительным флюсованием места соединения с обеих сторон.

Состав флюса, %:

| | |
|----------------------------|----|
| Калий хлористый | 50 |
| Натрий хлористый | 28 |
| Литий хлористый | 14 |
| Натрий фтористый | 8 |

Однако, как указывалось выше, всякое покрытие, даже и флюсовое, может служить причиной появления пор в теле шва.

Наиболее распространенными ручными горелками для аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом являются горелки типа АР (разработки НИАТ) и типа ЭЗР (разработка ВНИИавтогенмаш).

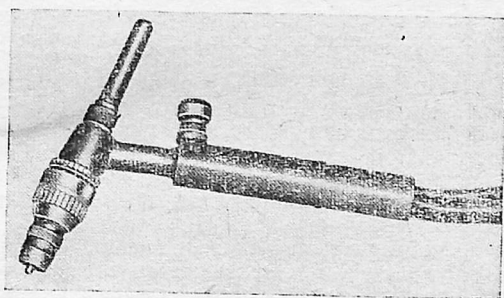


Рис. 6-16. Горелка ЭЗР-4.

Горелки АР-9 и ЭЗР-4 (рис. 6-16) имеют водяное охлаждение и стальной сменный наконечник, электрически изолированный от токоведущих частей, благодаря чему можно не опасаться замыкания в тесных местах. Одной и той же горелкой можно пользоваться для сварки металла разных толщин благодаря сменным цангам и наконечникам.

Горелка ЭЗР-5 снабжена кварцевым наконечником (рис. 6-17). Водяного охлаждения она не имеет, так как предназначена лишь для мелких работ на малых токах, так же как и совсем малые «карандашные» горелки (рис. 6-18).

Техника аргоно-дуговой сварки значительно отличается от техники газовой и электродной дуговой сварки. После установки

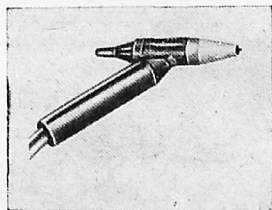
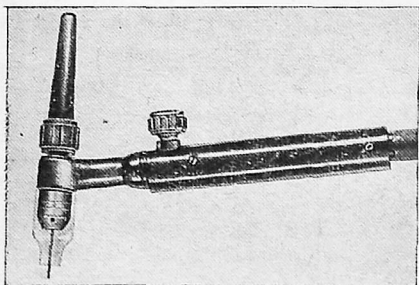


Рис. 6-17. Горелка ЭЗР-5.

Рис. 6-18. Карандашная горелка.

в нужном положении свариваемой детали сварщик открывает кран редуктора и устанавливает по ротаметру необходимый расход аргона, а также устанавливает силу тока. Дуга зажигается только после пуска защитного газа, т. е. когда вольфрамовый электрод защищен выходящим из горелки конусом инертного газа.

Необходимо помнить, что при аргоно-дуговой сварке нельзя прикасаться вольфрамовым электродом к металлу изделия или сварочного стола. При касании кончик электрода обволакивается свариваемым металлом и интенсивно обгорает. Вольфрамовый электрод стоек против обгорания в аргоне, если его конец совершенно чист.

Наложение высокочастотного тока от осциллятора содействует зажиганию дуги при приближении конца электрода на расстояние в несколько миллиметров от свариваемого металла. Если этого оказывается недостаточно, нужно зажечь дугу предварительно на куске графита или угольного электрода, положенном рядом с началом шва, а затем разогретый, светящийся электрод подносить к свариваемому металлу.

Электрод нужно держать почти вертикально, отклоняя не более чем на 10° при сварке без присадочного металла и на $20-25^\circ$ при сварке с присадкой. При большем наклонении электрода конус защитного инертного газа не будет правильно покрывать зону сварки, получатся завихрения и аргон будет смешиваться с воздухом. Вследствие этого сварочный шов образуется пористым, а электрод будет быстро сгорать.

В отличие от приемов обычной ацетиленовой и электродной сварки аргоно-дуговая сварка ведется прямолинейным перемещением горелки вдоль шва без зигзагообразных или мелких круговых движений.

Для сварки оплавлением кромок не нужно производить никакой их разделки. Обрезанный под прямым углом металл (при толщине

до 3 мм) плотно стыкуется, скрепляется прихватками (тем же методом сварки) через каждые 30—100 мм в зависимости от толщины металла и конструкции изделия или струбцинами, если изделие сложное. Затем производится сварка, причем во всех случаях нужно стремиться не прерывать шва без действительной необходимости.

Выбирая большую или меньшую скорость сварки при одинаковой плотности тока или меняя плотность тока при одной и той же скорости сварки, можно уверенно получать различную глубину про-

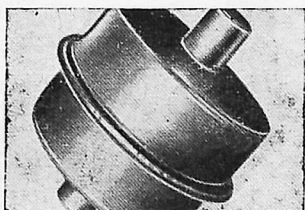


Рис. 6-19. Вакуумная газодуговая сварка алюминия с отбортовкой.

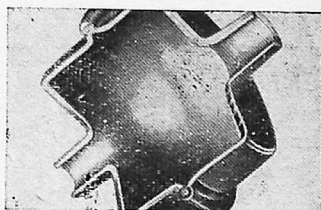


Рис. 6-20. Вакуумная газодуговая сварка алюминия с отбортовкой (разрез).

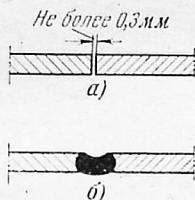


Рис. 6-21. Аргон-дуговая вакуумная сварка встык оплавлением кромок основного металла.
а — заготовка; б — выполненный шов.

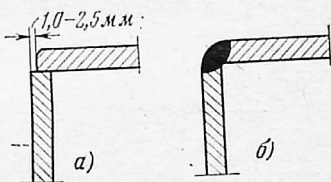


Рис. 6-22. Угловой шов без разделки кромок.
а — заготовка; б — выполненный шов.

вара вплоть до сквозного и даже с небольшим наплывом с тыльной стороны. Лицевая же сторона шва при этом способе сварки получается немного вогнутой. Для обычных вакуумных установок, работающих лишь под атмосферным давлением, такой шов является вполне прочным и имеет ряд преимуществ перед усиленными швами, а именно: возможность вальцовки, чистоту без всякой последующей обработки, наибольшую плотность и коррозионную устойчивость.

Сварка с присадкой ведется теми же приемами, но дуга направляется попеременно то на основной металл, то на конец присадочного прутка, который продвигается вместе с горелкой вдоль шва быстрее или медленнее для меньшей или большей наплавки металла в зависимости от желаемого усиления шва.

Под сварку с присадкой при толщинах свариваемого металла до 3 мм разделка кромок не нужна. При толщинах более 3 мм под сварку с присадкой следует делать небольшие скосы — на половину

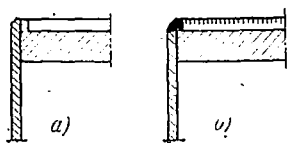


Рис. 6-23. Вварка дна аргон-дуговой сваркой с отбортовкой.

а — заготовка; б — выполненный шов.

толщины металла. При сварке с присадкой, варьируя скорость сварки, плотность тока и количество наплавляемого присадочного материала, можно также получать различную глубину провара и степень усиления шва как с лицевой, так и с тыльной его стороны.

Для аргон-дуговой сварки наиболее удобными являются швы с отбортовкой (рис. 6-19 и 6-20), стыковые швы (рис. 6-21), угловые без всякой разделки (рис. 6-22) или с отбортовкой (рис. 6-23).

Наименее удобными являются тавровые швы; поэтому там, где это возможно, рекомендуем проточкой кольцевой канавки делать на основной плоскости выступ-бортик (рис. 6-24) высотой и шириной в 2—3 мм, на который и направляется дуга при сварке. Оплавляясь, этот бортик заменяет присадочный материал и обеспечивает получение аккуратного галтельного шва без утяжки и прожогов даже при небольших толщинах металла. Если такого бортика не делать, шов получится значительно утянутым при сварке без присадки и не таким аккуратным при сварке с присадкой металла.

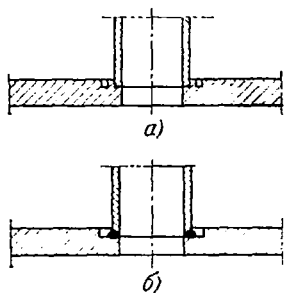


Рис. 6-24. Тавровая сварка тонкой стенки с толстой.

а — заготовка; б — выполненный шов.

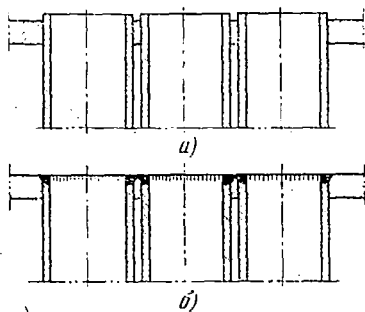


Рис. 6-25. Торцовые швы в тесных местах.

а — заготовка; б — выполненные швы.

Очень важно обращать внимание на конструкцию сварных соединений в тесных местах и при вварке патрубков и штуцеров.

Наличие наконечников на аргон-дуговых горелках часто затрудняет получение качественного сварного шва в труднодоступных местах или в местах между близко расположенными деталями. Поэтому рекомендуется в тесных местах выносить сварные швы на торцы деталей (рис. 6-25), не опасаясь ради этого сделать разъемный узел или лишний стыковой шов в легко доступной месте.

При сварке металла разных толщин необходимо приводить его в месте сварки к одинаковой толщине. Сварку тонкостенных деталей желательно производить на медных подкладках, плотно прижимая свариваемый металл к подкладке для лучшего отвода лишнего тепла и исключения прожога. Иногда во избежание приваривания формирующие подкладки нужно делать водоохлаждаемыми.

6-9. МЕХАНИЗАЦИЯ АРГОНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ

Аргоно-дуговая сварка в обоих своих видах сравнительно легко поддается механизации. Существует ряд различных полуавтоматических и полностью автоматизированных сварочных установок для изготовления разнообразных сварных деталей и узлов.

Механизация и автоматизация аргоно-дуговой сварки становятся выгодными даже при мелкосерийном производстве. Они особенно нужны для сварки деталей из тонкой нержавеющей стали, а также для сварки алюминия и его сплавов, где режим сварки очень строг и соблюдать его по-настоящему можно только лишь на механизированных установках.

Первой ступенью механизации является установка ручной горелки на роликовую каретку. Такой прием облегчает возможность поддерживать правильную длину дуги и позволяет сварщику обращать больше внимания на равномерность поступательного движения горелки вдоль шва. Устройство такой каретки ясно из рис. 6-26.

Более сложная механизированная установка для аргоно-дуго-

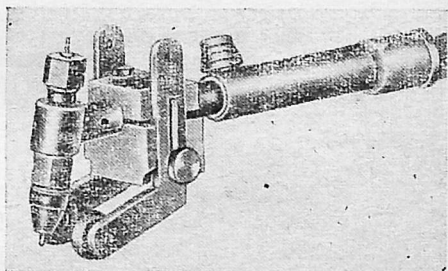


Рис. 6-26. Каретка на роликах для аргоно-дуговой горелки.

вой сварки состоит из горелки и суппорта. Эта установка может монтироваться на тракторах (сварочных) типа ПЛ или ПМ или другой конструкции. Горелка поворачивается как в плоскости шва, так и в перпендикулярной ему плоскости. Это дает возможность сваривать угловые и тавровые швы. Ролик, скрепленный с муфтой, несущей горелку, опирается на металл свариваемой детали и обеспечивает постоянную длину дуги на неплоской поверхности. При сварке прямых швов трактор с горелкой должен передвигаться по рельсам, положенным на соответствующей раме над деталью или рядом с ней. При сварке кольцевых швов трактор устанавливается над деталью, вращаемой каким-либо манипулятором.

Наиболее универсальным устройством для сварки крупных изделий может служить установка, смонтированная по схеме, показанной на рис. 6-27. Сварочная головка той или другой системы должна иметь возможность равномерного перемещения со скоростями, необходимыми для различных случаев сварки, по консоли, которую можно поднимать на нужную высоту в зависимости от размеров свариваемого узла.

На установках такого типа можно вести сварку как прямых, так и кольцевых швов. Для сварки последних изделие укладывается на тележке с принудительно вращающимися роликами. Обварка

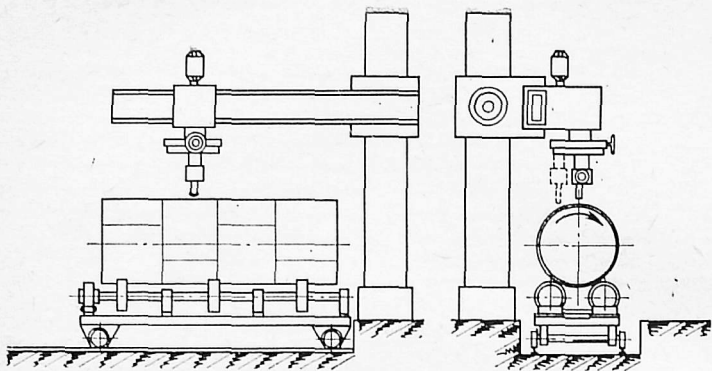


Рис. 6-27. Схема универсальной сварочной установки для сварки крупных узлов.

патрубокв возможна благодаря смещению сварочной головки по радиусу вращающегося диска вниз каретки.

Однако не только вольфрамовым электродом можно сваривать металл в защитной газовой среде на механизированных установках.

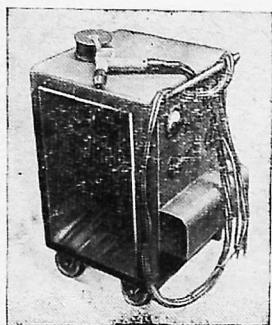


Рис. 6-28. Полуавтомат типа ПДА-180.

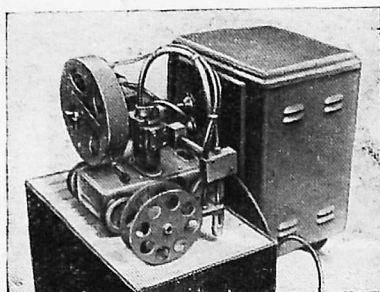


Рис. 6-29. Автомат типа АДПГ-500.

Сварка плавящимся электродом в такой же мере поддается механизации. Эта сварка производится обычно постоянным током.

На рис. 6-28 показан полуавтомат типа ПДА-180 для сварки плавящимся электродом алюминия и его сплавов толщиной от 4 мм и больше. Полуавтомат сваривает электродной проволокой диаметром 1 и 2 мм. Катушка для проволоки помещена на сварочном пистолете, в который вмонтирован и механизм ее подачи.

Автомат для такой же сварки (проволокой диаметром 1,2—2,5 мм) типа АДПГ-500 показан на рис. 6-29. Благодаря тому, что в нем механизирована не только подача проволоки, но и перемеще-

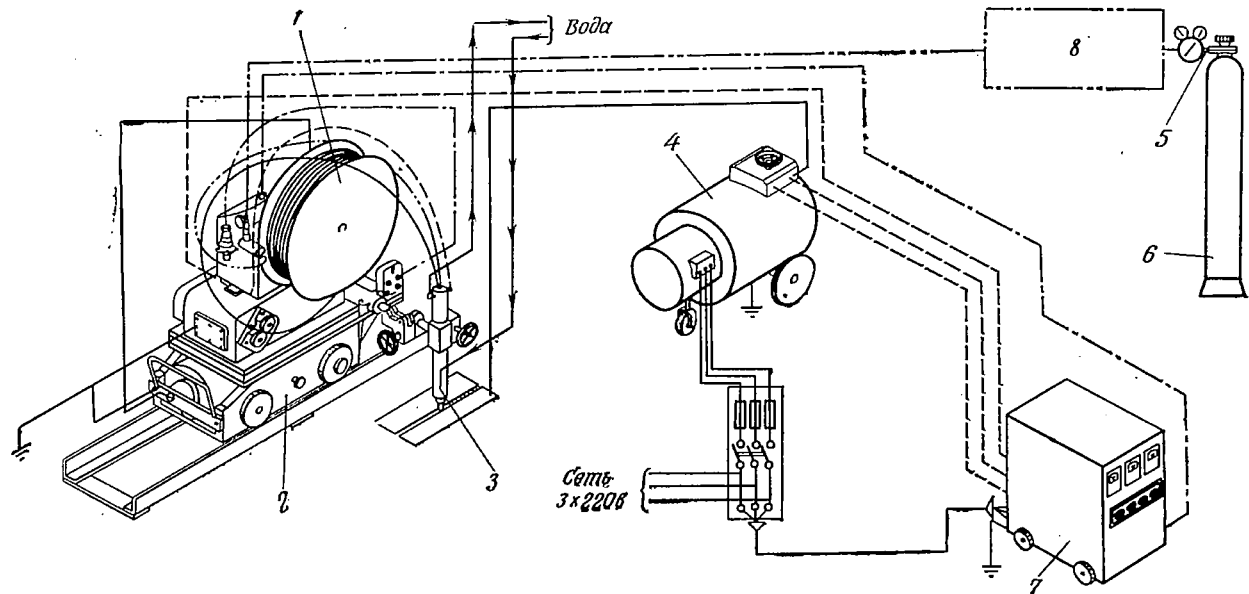


Рис. 6-30. Схема установки ГДУ-2А для сварки плавящимся электродом.

1 — механизм подачи; 2 — механизм передвижения автомата дуговой сварки; 3 — газодуговой электрододержатель (горелка); 4 — сварочный генератор или трансформатор с осциллятором; 5 — редуктор; 6 — баллон с аргоном или гелием; 7 — шкаф автоматки и блокировки; 8 — щит измерения расхода газа.

ные дуги вдоль шва, при его помощи можно сваривать алюминиевые сплавы толщиной от 1 мм.

На рис. 6-30 дана примерная схема соединений подобной установки с питанием не от выпрямителя, как это имеет место в установках ПДА и АДПГ, а от сварочного преобразователя.

Во многих случаях бывает выгодно применение плавящегося электрода в среде гелия. Во-первых, при сварке плавящимся электродом не нужно беречь электрод от расплавления, а следует, наоборот, быстро его плавить, следовательно, можно допускать гораздо большую плотность сварочного тока. Во-вторых, в гелии дуга выделяет почти вдвое больше тепла, чем в аргоне.

В совокупности это дает значительно большие скорости сварки, а также позволяет сваривать металлы при больших толщинах за меньшее число проходов.

6-10. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ АППАРАТОВ СВЕРХВЫСОКОГО ВАКУУМА

При изготовлении сверхвысоковакуумной системы оказываются пригодными уже не все виды сварки. Совершенно непригодна газовая, ацетилено-кислородная сварка, ограничена (применяется только в отдельных случаях) ручная электродуговая сварка.

Лучшими методами для получения сверхвысоковакуумных сварных соединений являются аргоно-дуговая и гелиево-дуговая сварка для металла малой и средней толщины, сварка автоматическая под слоем флюса для средних толщин и электрошлаковая сварка для металла больших толщин.

Для очень малых толщин (0,1—0,5 мм) следует применять сварку в газонаполненных камерах, а для деталей из активных и тугоплавких металлов можно пользоваться сваркой электронным лучом в вакуумной камере.

В отдельных случаях для сверхвысоковакуумной сварки хороши и метод холодной сварки пластической деформацией и метод сварки трением и диффузионная сварка в вакууме.

При сварке под слоем флюса и электрошлаковым методом конструктивные формы соединений остаются общими. Но следует внимательно следить за тем, чтобы нигде в соединениях не оставалось даже очень малых скоплений шлака. Если есть опасность его появления в корне шва, то заготовки должны делаться так, чтобы после сварки корень шва мог быть удален механической обработкой. Сварку под слоем флюса надо стараться

вести изнутри, из вакуумной полости. Это обеспечит получение соединений без внутренних щелей или неровностей, которые неизбежны на тыльной стороне шва. Если же необходимо варить наружным швом, то внутреннюю сторону соединения желательно обработать резанием, даже если для этого будет необходимо сделать лишний шов или лишнее разъемное соединение, или же сварку вести на формирующих прокладках.

Аргоно-дуговую сварку также необходимо вести изнутри, или на формирующих подкладках сквозным проваром во избежание оставления с обратной стороны

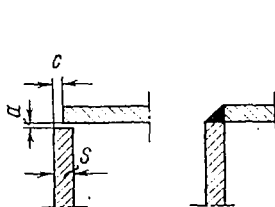


Рис. 6-31. Угловой шов для сверхвысоковакуумных установок.

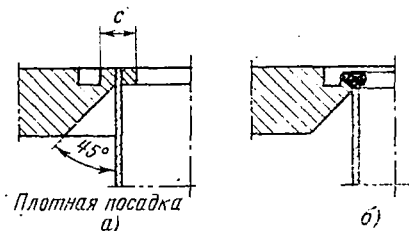


Рис. 6-32. Вварка тонкостенной трубки в толстую плиту.

шва хотя бы небольших щелей или неровностей.

Помимо ранее сделанных рекомендаций в отношении конструктивных форм сварных соединений, считаем необходимым обратить внимание на следующее. При угловых соединениях (рис. 6-31) величина c должна быть равна приблизительно $0,3 s$, чтобы обеспечить сквозной провар. Зазор a не должен превышать $0,3 \text{ мм}$.

Вварка тонкостенных трубок (цилиндров) в толстые плиты (фланцы, стенки) должна производиться, как это показано на рис. 6-32. При этом толщина c (суммарная) должна равняться $2—2,5 \text{ мм}$. Ширина и глубина канавки определяются обычно в зависимости от диаметра так, чтобы проходил резец, но глубина канавки не должна быть меньше высоты вложенного кольца. Если плиту (фланец) неудобно ставить на токарный станок, то канавку приходится делать на фрезерном станке.

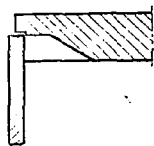


Рис. 6-33. Угловое сверхвысоковакуумное соединение тонкой стенки с толстой.

Угловое соединение толстого металла с тонким делается по схеме рис. 6-33 со стороны вакуума или сквозным проваром на формирующих шов подкладках, или с механической обработкой обратной стороны.

Наконец, приварку фланцев рекомендуется делать по схеме рис. 6-34 на формирующей подкладке K , причем толщина горловины S_1 должна быть на 1—1,5 мм

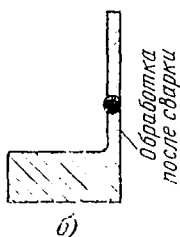
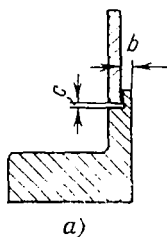
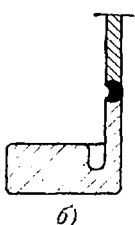
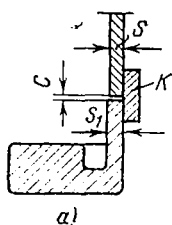


Рис. 6-34. Сверхвысоковакуумное соединение фланца с трубой. Сварка на подкладке.

Рис. 6-35. Замковый шов.

больше толщины стенки. Зазор c не должен превышать 0,3 мм. Если же после сварки возможна обработка изнутри, то лучше осуществлять приварку по рис. 6-35 (замковый шов). Здесь зазор c должен быть не более 0,5 мм, а толщина замка b — не менее 1,5 мм. Сварка замкового шва делается с присадкой. Присадочным материалом должна служить проволока той же марки, что и свариваемый металл, но с меньшим содержанием углерода для стали, а для меди и алюминия с содержанием раскислителей, которыми являются кремний, марганец, хром, цирконий.

Сварка установок сверхвысокого вакуума требует особо тщательного соблюдения чистоты и аккуратности в работе. Электродная проволока для сварки под флюсом и электрошлаковой сварки (или электродные стержни) должна быть очищена, протравлена и тщательно промыта и просушена. Флюс должен быть просеян и просушен. Аргон необходимо брать только марки А. Необходимо обращать самое серьезное внимание на сертификаты свариваемого металла и присадочной проволоки.

При обычной газодуговой сварке воздух диффундирует в защитный конус (струю) инертного газа и делает газовую защиту несовершенной. Кроме того, обратная сторона шва по большей части остается совершенно незащищенной от действия кислорода и азота воздуха, как остаются незащищенными и зона остывания сваренного металла и зона предварительного прогрева, образуемая впереди дуги вследствие теплопередачи. Все это делает обычные газодуговые сварные соединения хуже, чем они могли бы быть при полной защите инертным газом всей зоны термического влияния.

Полная защита создается в сварочных камерах, наполненных инертным газом. Эти камеры бывают двух видов: с рукавами (мягкими, газонепроницаемыми), позволяющими сварщику оперировать с деталями и горелкой внутри камеры вручную, и с автоматической установкой внутри, в которой перемещение дуги (или детали), зажигание дуги и ее гашение, смена деталей (при многопозиционной установке) и другие операции автоматизированы.

Камеры первого типа проще и универсальнее, но они требуют наполнения газом под избыточным давлением, так как иначе при движениях рук сварщика может происходить подсос воздуха из-за изменения свободного объема. Это приводит к значительно большему расходу газа.

Камеры первого типа могут быть металлическими, но могут быть и мягкими — из специальной баллонной ткани марки 500 или 618 [Л. 28] или синтетической пленки. На рис. 6-36 изображен общий вид камеры из баллонной ткани. Она имеет несколько рукавов, частью служащих рукавицами для сварщика, а частью

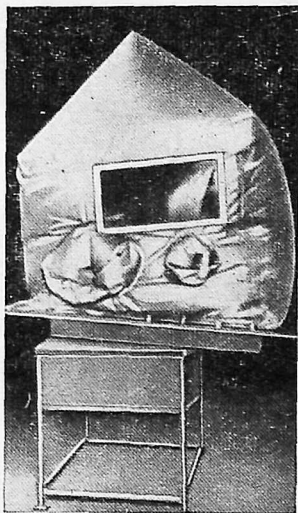


Рис. 6-36. Общий вид мягкой газонаполненной сварочной камеры.

играющих роль шлюзов для подачи и выдачи деталей и экономайзеров для аргона. Газ подается через перфорированный пол камеры, а выпускается через верхнее отверстие, что обеспечивает хорошую промывку камеры от воздуха. Камера имеет смотровые окна из плексигласа.

Сварка вручную не может обеспечить особенно тонких работ. Для их выполнения необходимо иметь камеры с автоматизированной сварочной установкой. Такие камеры лучше делать металлическими, так как для успешной сварки достаточно давления защитного газа в $0,1-0,15 \text{ кгс/см}^2$, что дает огромную экономию газа, но требует предварительной откачки камеры до 10^{-2} , а еще лучше до $10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ После откачки камера заполняется инертным газом до указанного давления и производится сварка. Загрузка и выгрузка деталей через шлюзы возможна, но сложна. Обычно для загрузки камера открывается (подъемом колпака или снятием крышки) и для нового производственного цикла вновь откачивается и заполняется газом.

Для ускорения откачки в целях увеличения производительности имеет смысл заполнять пустоты в камере алюминиевыми или стеклянными балластными массивами, что уменьшает объем откачиваемого воздуха. Для той же цели можно применить и вакуумный бак (ресивер), имеющий объем в 2—3 раза больше откачиваемой камеры и вакуумируемый теми же насосами в период выгрузки и загрузки камеры, а в начале откачки переключаемый на откачку воздуха из камеры, благодаря чему быстро удаляется большая часть воздуха.

Сварка в газонаполненной камере резко отличается по качеству от обычной газодуговой и дает возможность проводить очень тонкие сварные работы на любых металлах.

В газонаполненных камерах хорошо свариваются алюминий, медь, титан, прецизионные сплавы.

6-12. СВАРКА В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ

В высоком вакууме трудно зажечь сварочную дугу. Для появления дуги нужна ионизация газа, которого в высоком вакууме слишком мало. Однако очень большими токами, которыми пользуются в процессе

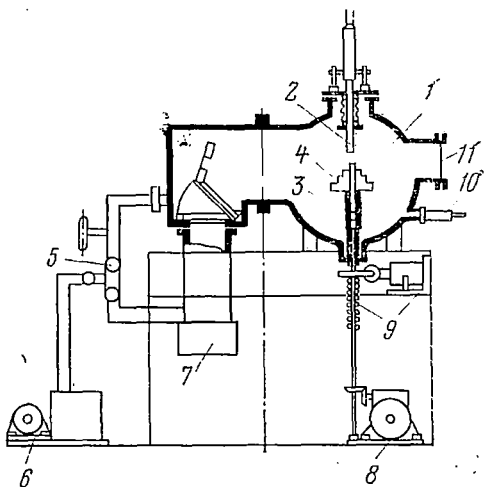


Рис. 6-37. Схема установки для сварки электронным лучом в вакууме.

1 — вакуумная камера; 2 — электронная пушка; 3 — держатель; 4 — свариваемая деталь; 5 — вакуумные краны; 6 — форвакуумный насос; 7 — диффузионный высоковакуумный насос; 8 — двигатель, вращающий деталь; 9 — узел перемещения детали по высоте; 10 — вакуумметр; 11 — смотровое окно.

вакуумной дуговой плавки, можно получить в месте зажигания дуги облачко паров и газов, выделяющихся из расплавляемого металла, и в нем зажечь и поддерживать дугу. Но такой процесс малопригоден для сварки, так как он слишком груб для тех конструкций, которые приходится сваривать в вакуумной камере.

В вакуумную камеру приходится помещать для сварки детали из химически активных и тугоплавких металлов (титан, цирконий, тантал, вольфрам, молибден и др.), которые в других условиях сваривать нельзя, а детали из них имеют обычно небольшие размеры и толщину стенок и требуют весьма тонкой технологии.

Такие детали могут с успехом свариваться в высоком вакууме электронным лучом. Лучшие сорта защитных газов имеют примеси кислорода, азота и влаги в количестве 0,01%, в то время как при давлении 10^{-5} мм рт. ст. в вакуумной камере этих примесей остается всего 0,0000013%. Кроме того, современное электронное сварочное оборудование (электронные пушки) позволяет фокусировать энергию на пятне диаметром 10—308

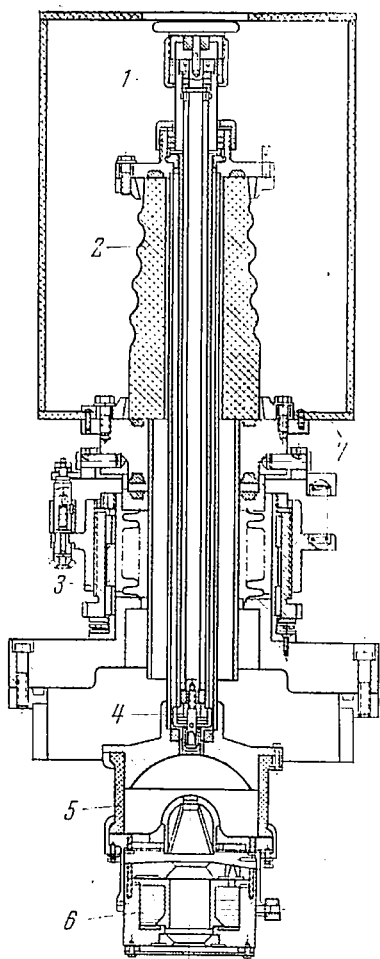


Рис. 6-38. Разрез промышленной электронной пушки.

необходимой длины и формы. Верхняя часть пушки закрыта изолирующим защитным кожухом 7.

Сфокусированный электронный луч направляется на свариваемую деталь, закрепленную в манипуляторе сварочной камеры. Камеры обычно делаются с боковыми приставками, позволяющими размещать и передвигать под электронным лучом довольно крупные детали как для прямой, так и для кольцевой сварки (напри-

менее 1,5 мм [Л. 29, 30] и сваривать самые тонкие детали с толщиной стенок 0,05—0,15 мм.

Лучом можно сваривать самые тугоплавкие материалы, практически не только не подвергая их воздействию кислорода или азота, но интенсивно обезгаживая зону сварки.

На рис. 6-37 приведена схема установки для сварки электронным лучом в вакууме, а на рис. 6-38 показан разрез промышленной электронной сварочной пушки.

Высокое напряжение (порядка 15 кв) подводится к штекеру 1, смонтированному на изоляторе 2, ниже которого находится механизм наклона и подъема пушки 3 (рис. 6-38). Катододержатель 4 помещен в верхней части коробки 5, в нижней части которой находится сферический анод, вытягивающий пучок электронов, испускаемых катодом. Магнитная линза 6 фокусирует пучок в электронный луч

мер, оболочки топливных элементов атомных реакторов) [Л. 31]. Общий вид установки для электронно-лучевой сварки некрupных деталей показан на рис. 6-39.

Другой вид сварки в вакуумной камере — это так называемая диффузионная сварка в вакууме. Метод этот основан на том, что при несильном сравнительно сжатии нагретых деталей в вакуумной камере происходит

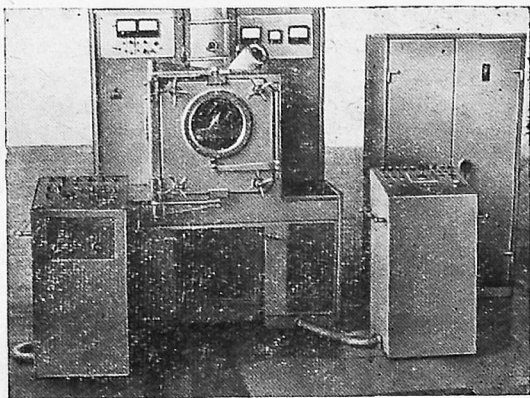


Рис. 6-39. Установка УЭЛС-1 для электронно-лучевой сварки небольших деталей.

взаимное смятие микронеровностей на контактных поверхностях, увеличение площади действительного контакта и взаимная диффузия, т. е. миграция атомов соприкасающихся поверхностных слоев и проникновение их в поверхностный слой сопряженной детали [Л. 32].

Необходимыми условиями осуществления такого процесса являются хорошая подгонка поверхностей друг к другу, чистота поверхностей, нагрев до температуры $T_{св} = 0,7 \cdot T_{плавл}$ и сжатие свариваемых деталей друг с другом с удельными усилиями, несколько превышающими предел упругости данного материала при температуре проведения процесса. Процесс сварки должен проводиться при таком вакууме, который не только не позволил бы соединяемым поверхностям окислиться, но и обеспечил бы возможно большую очистку их от адсорбированных слоев жидкостей и газов и частичное восстановление окислов.

В работе [Л. 32] приведены следующие примеры оптимальных режимов сварки.

Ст. 3: $T=1\ 000\ ^\circ\text{C}$, удельное давление сжатия $p=2\ \text{кгс/мм}^2$, время выдержки $t=5\ \text{мин}$, вакуум $10^{-5}\ \text{мм рт. ст.}$

Никель НП-1: $T=1\ 000\ ^\circ\text{C}$, удельное давление сжатия $p=1\ \text{кгс/мм}^2$, время выдержки $t=5\ \text{мин}$, вакуум $10^{-5}\ \text{мм рт. ст.}$

При таких малых давлениях сжатия практически не происходит искажения конструктивных размеров деталей, поэтому возможна сварка окончательно обработанных деталей. Метод диффузионной сварки позволяет соединять не только однородные, но в ряде случаев и совершенно разнородные материалы, которые не могут свариваться плавлением. При этом, правда, часто в зоне сварки образуются хрупкие интерметаллидные слои.

Метод этот имеет пока ограниченное применение в вакуумной технологии вследствие малой производительности при изготовлении сравнительно крупных узлов тонкостенных конструкций.

6-13. СВАРКА ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОК И СИЛЬФОНОВ

В технике высокого вакуума имеет большое значение надежное соединение, допускающее прогрев тонкостенных трубок и сильфонов. Охлаждаемые ловушки, счетчики излучений, сосуды Дьюара и другие узлы системы и вакуумные приборы не могут быть созданы без соединения тонкостенных деталей из нержавеющей стали, кобальта, никеля. Здесь, как и везде в вакуумной технике, сварка является самым надежным методом соединения. Тонкостенные трубки и сильфоны могут свариваться вакуумно-плотно аргоно-дуговой сваркой по схеме, приведенной на рис. 6-32, особенно при производстве такой сварки в газонаполненной камере или электронным лучом в вакууме, или же контактной шовной сваркой на аппаратах с игнитронными прерывателями, либо с конденсаторными дозаторами в соединении с игнитронными прерывателями.

Специальные испытания на многократный прогрев тех и других соединений сильфонов до температуры $450\ ^\circ\text{C}$ и на глубокое охлаждение в жидком азоте, а также на частые знакопеременные нагрузки сжатием и растяжением сильфона при одновременном нагреве узла до

450 °С показали, что все три метода сварки являются равноценными. То же самое относится и к сварке тонкостенных трубок.

На рис. 6-40 показаны сильфонные узлы, сваренные контактной шовной сваркой, а на рис. 6-41 — сваренные аргоно-дуговой сваркой. Как видно из этих рисунков, они и по внешнему виду мало отличаются друг от друга.

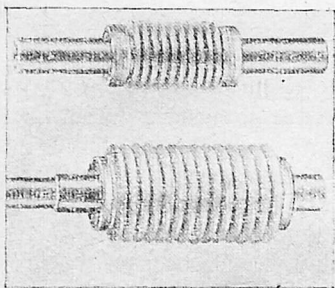


Рис. 6-40. Сильфонные узлы, сваренные контактной шовной сваркой.

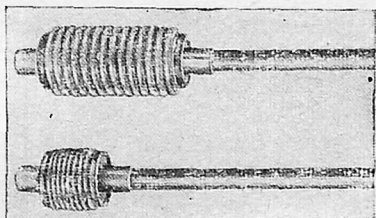


Рис. 6-41. Сильфонные узлы, сваренные аргоно-дуговой сваркой.

Импульсная шовная сварка дает возможность уверенно получать вакуумно-плотные сварные швы даже при толщине металла в 0,1 мм.

Импульсной шовной сваркой пользуются для вакуумных соединений главным образом деталей из нержавеющей стали, конструкционной стали, кобальта никеля.

Особенно ценным этот метод сварки является для приваривания сильфонов и тонких кобальтовых деталей. Внутренняя из свариваемых деталей (рис. 6-42) зажимается в патрон, или надевается на оправку (для кольцевой сварки), или крепится на контактной плите (для прямых швов), к которым подключается один полюс сварочной машины. Второй полюс подключен к нажимному сварочному ролику, который со значительным усилием нажимает на кромку наружной детали, наложенную внахлестку на месте свариваемого шва.

Весьма короткие импульсы сварочного тока большой силы (до 12 000—15 000 а) производят сварку плотно сжатых под роликом слоев металла. При шовной сварке импульсы подаются с частотой от 3 до 20 в 1 сек.

Длительность импульса составляет около 0,01 сек, так что детали не успевают разогреться и в месте сварки не получается ни коробления, ни окисления.

Частота вращения детали при шовной кольцевой сварке подбирается такой, чтобы сварные точки следовали одна за другой с некоторым взаимным перекрытием, чем и достигается вакуумный шов.

Для сварки сильфонов и тонкостенных трубок могут применяться сварочные машины, указанные в табл. 6-9, состоящие обычно из трансформатора, игнитронного прерывателя с конденсаторной батареей и выносного кронштейна, на котором могут монтироваться контактные щетки, шины или электроды (для точечной или линейной шовной сварки), механизм вращения с патроном и механизм подачи сварочного ролика.

На рис. 6-43 показан сварочный станок, который состоит из сварочной машины ОУ-56 (см. табл. 6-9), электрически соединенной через контактную щетку 1 на кронштейне 2 с патроном 3. Сварочный ролик 4 с пружиной в его державке смонтирован на подвижном суппорте. Он соединен гибкой шиной с вторым выводом трансформатора.

Игнитронный прерыватель 5, в данном случае типа УИП-1, подает импульсы тока в первичную обмотку трансформатора. Частота импульсов и сила тока регулируются ручками на кожухе прерывателя.

Частота вращения патрона с деталью меняется переброской приводного ремня 6 от электродвигателя и сменой пары шестерен на редукторе 7.

Контактный ящик 8 и кнопки управления 9 служат для включения электродвигателя и сварочного напряжения.

Методом роликовой шовной сварки следует присоединять более тонкостенные детали к более толстостенным, а не наоборот, т. е. непосредственно под роликом

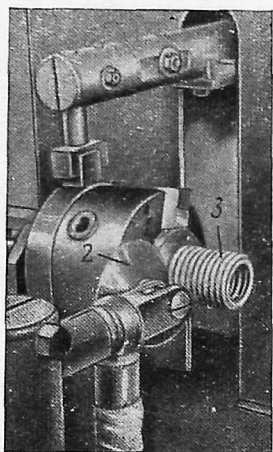


Рис. 6-42. Импульсная контактная шовная сварка сильфона с фланцем.

1 — фланец; 2 — ролик; 3 — сильфон.

Характеристики импульсных шовных сварочных машин

| Характеристика | Тип машины | | | | | | |
|--|----------------------------|------------------|------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------|
| | ОУ-56 | МР-4 | МШ-1001 | МШ-1601 | МШВ-6301 | МШК-3-2 | К-30 |
| Напряжение питающей сети, в | 220 | 380 | 220, 380 | 220, 380 | 220, 380 | 220 | 220 |
| Потребляемая мощность, квт | — | — | 27 | 61 | 600 | — | — |
| Толщина свариваемого металла, мм | 0,1—0,4 | 0,05—0,6 | $(0,2+0,2) \div (1+1)$ | $(0,25+0,25) \div (1,5+1,5)$ | $(0,3+0,3) \div (2,5+2,5)$ | 0,03—0,2 | 0,1—0,5 |
| Диаметр кольцевых швов, мм | В зависимости от станка | — | — | — | — | — | 6—60 |
| Число ступеней регулирования трансформатора | — | 4 | 8 | 8 | — | 2 | — |
| Пределы регулирования напряжения зарядки конденсаторов | — | — | — | — | — | 300—420 | 250—1 000 |
| Привод механизма сжатия | Педаля или винт с пружиной | Рычажно-грузовой | — | — | — | Пружинно-пневматический | Пружинно-рычажный |
| Усилие нажима ролика, кгс/см ² | 0—40 | 10—100 | 250 | 500 | 2 000 | 10—70 | До 200 |
| Скорость сварки, см/мин | 12—100 | 20—80 | 100—500 | 80—450 | 20—800 | 60—180 | 14—140 |
| Регулирование скорости | Ступенчатое | Ступенчатое | — | — | — | Плавное | Плавное |
| Номинальный вылет электродов, мм | — | — | 400 | 400 | 1 200 | — | — |
| Номинальный сварочный ток, а | — | — | 10 000 | 16 000 | 63 000 | — | — |

Должен находиться более тонкий металл, а более толстый металл зажимается в патрон и служит, так сказать, опорой. Толщина стенки привариваемой детали в месте сварки не должна превышать 0,4 мм. Деталь, зажатая в патроне без оправки, должна иметь в месте сварки стенку не тоньше 1 мм при малых диаметрах

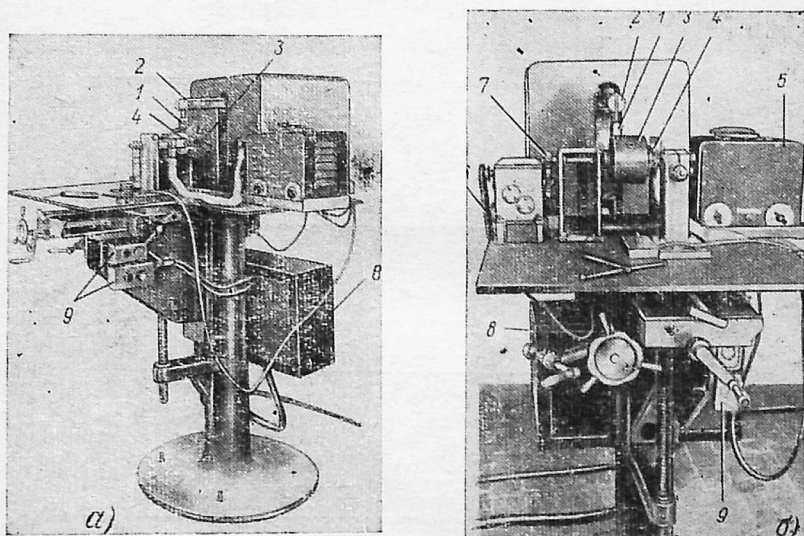


Рис. 6-43. Станок для игнитронной контактной роликовой сварки с машиной ОУ-56 и прерывателем УИП-1.
а — общий вид; б — механизм привода.

(до 20 мм) и не менее 10 толщин стенки привариваемого силфона или тонкостенной трубки при больших диаметрах во избежание прогиба под нажимом ролика. Если стенка недостаточно жестка или под ней нет жесткой оправки, то вакуумного шва получить не удастся. Когда свариваются две тонкостенные детали, то сварку нужно вести на медной оправке, зажимаемой в патроне. Оправка должна плотно входить в деталь.

Важным условием является также плотная посадка свариваемых деталей друг на друга в месте сварки. Если между свариваемыми деталями окажется зазор, тонкая стенка будет в конце шва сгофрена и шов не будет плотным.

Сварка обычно ведется с охлаждением тонкой струйкой спирта, пары которого служат также и газовой защитой от окисления шва в момент сварки. Перед сваркой детали должны быть тщательно очищены от окислов, обезжирены и промыты спиртом.

Сварочный ролик делается из хромистой бронзы марки БрХ08. Очень важно поддерживать всегда правильный рабочий профиль и чистоту его поверхности. Нельзя допускать и появления на рабочей поверхности ролика приваренных частиц окислы или металла от выплесков при местном перегреве и прожогах свариваемых деталей. За этим нужно внимательно следить и немедленно зачищать ролик и заправлять его рабочий профиль. Все поверхности роликов, включая и посадочные места, обрабатываются по $\nabla 8$. Радиус скругления рабочего профиля роликов рекомендуется делать от 2 мм для малых роликов (диаметром до 20 мм) до 5 мм для роликов диаметром 80 мм.

В табл. 6-10 приведены оптимальные размеры роликов и частота вращения в зависимости от диаметров свариваемой трубки или сильфона [Л. 45, 47].

Таблица 6-10

Оптимальная скорость сварки наружных швов в зависимости от его диаметра

| Диаметр по шву, мм | Диаметр ролика, мм | Время одного оборота детали, сек | Скорость сварки, см/мин |
|-----------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 5 | 20—25 | 6 | 15,7 |
| 10 | 20—25 | 10 | 18,8 |
| 15 | 25—30 | 13 | 21,7 |
| 20 | 25—30 | 15 | 25,1 |
| 25 | 30—35 | 17 | 27,6 |
| 30 | 35—40 | 19 | 29,65 |
| 35 | 40—45 | 22 | 29,9 |
| 40 | 45—50 | 26 | 29,0 |
| 50 | 50—55 | 30 | 31,35 |
| 60 | 55—60 | 36 | 31,35 |
| 70 | 55—60 | 41 | 32,1 |
| 80 | 60—65 | 45 | 33,4 |
| 90 | 60—65 | 49 | 34,55 |
| 100 | 65—70 | 54 | 34,8 |
| 110 | 65—70 | 58 | 35,6 |
| 120 | 70—75 | 63 | 35,8 |
| 130 | 70—75 | 69 | 35,4 |
| 140 | 75—80 | 74 | 35,6 |

6-14. СВАРКА МЕТОДОМ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Этот метод называется еще и холодной сваркой, так как здесь сварка производится без нагрева и без включения свариваемых деталей в электрическую цепь.

Если два куска листового алюминия сложить внахлестку и поместить между двумя пуансонами, как это показано на рис. 6-44, то при сильном вдавливании обоих пуансонов в алюминий последний будет между ними настолько плотно сжиматься, что пленка окиси, покрывающая металл, окажется разрушенной и выжатой в сторону от точки сварки, зерна металла одного куска будут сближены с зернами другого куска до расстояний атомного взаимодействия и произойдет свавивание, характеризующееся однородной структурой и прочностью, близкой к прочности основного металла. Таким образом, происходит холодная сварка металла

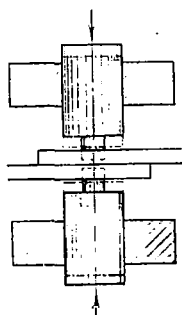


Рис. 6-44. Схема холодной сварки методом пластической деформации.

в результате его пластической деформации. Вакуумноплотные соединения таким методом до сих пор уверенно удавалось получить только для алюминия и меди.

То же самое происходит, если два прутка пластичного металла зажать в цанги и сжать их торцы с силой, значительно превосходящей предел текучести металла.

На рис. 6-45 видно, что при холодной сварке с металлом происходит по существу то же самое, что и при пластическом осаждении цельного куска в его середине. Волокна в обоих случаях располагаются совершенно одинаково, а окисные пленки, бывшие до сварки на торцах, должны быть вынесены в грат (наплывы), который затем обрезается. Таким образом, мы имеем здесь дело с явлением сращивания металла без всяких загрязнений, даже газообразных, что очень важно для техники высокого вакуума [Л. 49].

Для сварки листового алюминия требуется вдавливание пуансонов в металл на 0,8—0,9 его толщины.

Метод холодной сварки при всей своей приемности, ввиду полного отсутствия загрязнений является наименее универсальным, так как для каждой формы и размера детали требуются специальные пуансоны или цанговые приспособления. При массовом производстве и мелких деталях может оказаться выгодным оборудование мастерских такими приспособлениями, но в технологии вакуумного аппаратостроения холодная сварка применима

пока лишь в некоторых случаях. Так, например, вполне рациональной является холодная заварка медных или алюминиевых штенгелей — трубок, через которые производятся откачка вакуумных приборов, сварка токоведущих шин и приварка медных наконечников к алюминиевым шинам и т. п. [Л. 49, 51].

Медный или алюминиевый штенгель может быть пережат и при этом заварен в холодном состоянии под

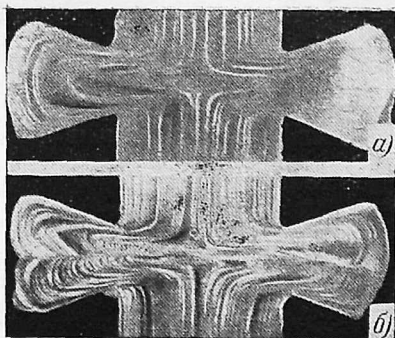


Рис. 6-45. Макроструктура среднего сечения алюминиевых образцов.

a — монолитного, осажженного в машине для стыковой сварки; *б* — составного, сваренного холодной сваркой. Степень деформации $\Psi = 75\%$; $\times 3$.

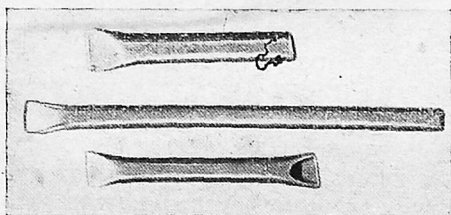


Рис. 6-46. Медные трубки, заваренные методом пластической деформации. Толщина стенки 1 мм.

вакуумом при помощи специальных приспособлений или клещей с фасонными губками. Трубка сжимается до откусывания, как показано на рис. 6-46 (толщина стенок трубки 1 мм).

Возможна также приварка крышек мелких сосудов или сварка трубок встык с отбортовкой при диаметрах

приблизительно до 80 мм. При такой сварке сжатие можно производить не только в рабочей зоне (непосредственно под пуансонами), но в периферийной зоне, т. е. под дополнительными пуансонами, сжимающими металл с меньшим вдавливанием вокруг рабочего пуансона (рис. 6-47). Сосуды и трубки свариваются встык по отбортовке при помощи кольцевых пуансонов.

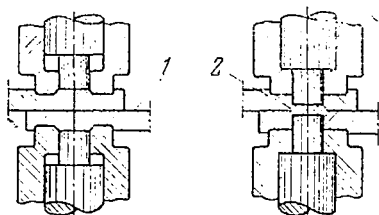


Рис. 6-47. Схема холодной сварки в двух зонах.

1 — периферийная зона; 2 — рабочая внутренняя зона.

Основными условиями успешной сварки методом пластической деформации являются совершенная чистота свариваемых поверхностей, полное отсутствие на них хотя бы малейших следов жира и грязи. Лучшими средствами для удаления грязи и обезжиривания поверхностей перед сваркой служат прокаливание при 350—400 °С с доступом воздуха, очистка вращающейся стальной щеткой (с тщательной промывкой и просушкой самой щетки) или трехкратная промывка в ксилоле и затем двукратная в эфире.

По последним исследованиям [Л. 33—35] степень сжатия, необходимая для надежной сварки методом пластической деформации, может быть весьма значительно снижена при условии производства операции сварки в высоком вакууме.

При этом наблюдается определенная зависимость усилия сжатия и степени деформации металла от величины остаточного давления в камере, где производится сварка, и от метода очистки поверхностей свариваемых деталей.

В случае очистки поверхности непосредственно перед операцией сварки внутри камеры под вакуумом усилие снижается тем больше, чем меньше остаточное давление газа. Замечено, что в этих случаях для сварки требуется тем меньшее усилие сжатия, чем меньше времени протекает от момента очистки поверхности до момента сжатия свариваемых деталей.

Это указывает на то, что на величину потребных для холодной сварки усилий влияют не только загрязнение поверхности и окисные пленки, но и пленка адсорбиро-

ванного газа. Эксперименты показали, что в сверхвысоком вакууме 10^{-9} мм рт. ст. при сжатии металлических образцов непосредственно после их очистки схватывание проходит даже при усилии сжатия всего в несколько граммов на квадратный миллиметр [Л. 35]. В таких условиях становится возможной холодная сварка и малопластичных металлов. Обязательным условием является безмасляная откачка камеры.

Эти изыскания еще не вышли из лабораторной стадии, но несомненно холодная сварка в глубоком вакууме имеет большое будущее.

6-15. СВАРКА ТРЕНИЕМ

Если два металлических стержня или две трубы привести в быстрое относительное вращение и соосно свести их концы с небольшим нажимом, то вследствие трения они нагреются до $T_{св} = 0,8 \div 0,85 T_{пл}$. Если затем быстро остановить их и сильно сжать вдоль оси, то они сварятся прочно и плотно с выдавливанием в стороны части металла в виде такого же грата, как и при холодной сварке. На рис. 6-48 показана макроструктура сечения образца из железа армко, сваренного трением. На этом образце видно, что металл в соединении очень плотен, что и требуется в вакуумной технике.

Такая сварка производится на специальных машинах. Сварке поддаются не только однородные металлы (сталь + сталь, алюминий + алюминий и т. д.), но и разные по своим основным свойствам материалы. Успешно производится сварка стали с латунию, нержавеющей стали с малоуглеродистой, латуни с медью, меди с алюминием. Размеры стержней, свариваемых этим методом, достигают 50—70 мм в диаметре, а труб — до 120 мм.

Методом сварки трением на машине типа МСТ-31 получены сварные соединения алюминия АД-1 со сталью:

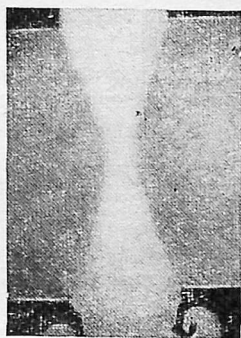


Рис. 6-48. Макроструктура среднего сечения образца из железа армко, сваренного трением.

Ст. 3 в стержнях диаметром до 40 мм и алюминия АД-1 с медью М1 в стержнях диаметром до 50 мм. При этом соединения алюминия со сталью выдерживали загиб до 180°, а соединения алюминия с медью — до 90° [Л. 48].

Разумеется, трением нерационально сваривать готовые детали, так как трудно рассчитать окончательные размеры их после сварки, но для изготовления заготовок из разноименных металлов этот метод может быть весьма перспективным.

Интересны также возможности приварки трубок и стержней к плитам и фланцам.

6-16. СВАРКА МЕДИ

Источниками затруднений в получении вакуумно-плотных швов при сварке меди являются наличие в большей части сортов меди кислорода и ее чрезвычайно высокая теплопроводность.

В толще поделочной меди кислород находится в связанном виде в составе закиси меди Cu_2O , равномерно распределенной в металле. При нагреве металла до сварочной температуры медь интенсивно поглощает кислород и увеличенное таким образом количество закиси образует с медью эвтектику, более легкоплавкую, чем сама медь, и скопляющуюся по границам зерен металла, что и служит причиной образования микротрещин и пор в теле сварного шва и в зоне термического влияния.

Исследования сварных соединений меди, полученных методами плавления, показали, что уверенно получать вакуумно-плотные соединения можно только из меди бескислородной или с содержанием кислорода менее 0,01%. При этом необходимо обеспечить усиленную защиту свариваемого участка меди инертным газом от воздействия кислорода воздуха. Этому условию удовлетворяет в первую очередь сварка в газонаполненной камере.

В тех случаях, когда все же приходится сваривать медь вне камеры, следует делать это с поддувом инертного газа с обратной стороны шва и с дополнительным обдуванием накаливаемого металла вне конуса защитного газа, исходящего из сопла горелки. Это возможно вы-

полнить путем установки второго сопла на той же горелке или установки на горелке щитков (электрически изолированных), удерживающих защитный газ от рассеивания и направляющих его на только что заваренный шов.

Помимо газовой защиты, при сварке меди рекомендуется применять раскисляющие присадки, которыми могут служить хромистая бронза, кремнемарганцовистая бронза или сплавы № 5 (содержащий цирконий) и 204. Наиболее активными, а следовательно, и лучшими раскислителями являются сплавы № 5 и 204. Кремнемарганцовистая бронза (БрКМц-3-1) дает более жидкотекучий металл, но при ее присадке чаще получают пористые швы. Хромистая бронза как раскисляющая присадка стоит ниже других, но как поделочный материал может с успехом заменить во многих случаях чистую медь, тем более что сваривается она надежнее меди.

Необходимо лишь знать, что хромистая бронза в сварных швах несколько теряет свои механические свойства и после сварки, если нужно восстановить прочность металла, следует закалить бронзу, нагревая ее в инертной среде до 1000°C и погружая в воду, а затем отпустить нагревом до 450°C в течение 5—6 ч в вакууме не хуже $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. При сварке в газонаполненной камере медь можно соединять и без присадки, оплавлением кромок. Образец такой сварки показан на рис. 6-49.

Высокая теплопроводность меди заставляет вести сварку ее постоянным током на прямой полярности в среде гелия. При этих условиях на свариваемом металле выделяется максимум тепла, но все же медь более или менее толстую (8 мм и выше) сваривать трудно. Известные перспективы в этом деле открывает сварка в среде гелия плавящимся электродом, которая позволяет в единицу времени внести в накладываемый шов много больше тепла. Однако этот метод в вакуумной сварке еще недостаточно испытан.

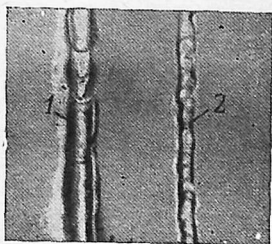


Рис. 6-49. Гелиево-дуговая сварка меди.

1 — с присадкой; 2 — с оплавлением кромок.

Примерный режим сварки меди в защитной среде гелия:

| | |
|---|-------------------------|
| Толщина свариваемой меди, мм | 2—3 |
| Диаметр вольфрамового электрода, мм | 2—2,5 |
| Диаметр отверстия сопла горелки, мм | 6 |
| Род тока | Постоянный |
| Полярность | Прямая на электроде (—) |
| Сварочный ток, а | 160—180 |
| Расход гелия, л/ч | 550—700 |
| Скорость сварки, м/ч | 20—24 |

6-17. СВАРКА ФТОРОПЛАСТА-4

Упомянем здесь же и о способе сварки одного неметаллического материала — фторопласта-4. Срезанные «на ус» концы зажимаются в пресс-форму или клещи (тиски) с пружинным компенсатором сжимающего усилия. Усилие сжатия не более 20 кгс/см².

Место зажима прогревается до температуры 380 + 5 °С с выдержкой в течение 25 мин. Затем все вместе охлаждают до 200 °С, вынимают фторопласт из зажима и быстро охлаждают в воде.

Эту операцию необходимо производить обязательно в вытяжном шкафу, так как при этом выделяются вредные пары фтора.

Глава седьмая

ВАКУУМНО-ПЛОТНАЯ ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

7-1. ОБЩИЕ УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМНО-ПЛОТНЫХ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Несмотря на исключительно важное значение, которое имеет сварка для вакуумной техники, она не исключает пайки как способа получения вакуумно-плотных неразъемных соединений как металла с металлом, так и металла с керамикой или стеклом. Разумеется, первое место по количеству и разнообразию паяных соединений в производстве вакуумной системы занимает пайка металла с металлом.

Как и в сварке, мы обозначаем в пайке термином «вакуумно-плотное соединение» такое соединение, на

всем протяжении которого не только отсутствуют видимые дефекты (непропаянные места, щели, трещины, раковины), но и не обнаруживается течей при испытании масс-спектрометрическим течеискателем. Соединение, в котором обнаруживается хотя бы незначительная течь, мы не считаем вакуумно-плотным.

Так же как и сварка, пайка вакуумно-плотных швов не представляет собой самостоятельного метода, неизвестного в других областях машиностроения. Вакуумно-плотная пайка производится в различных случаях разными способами, но с обязательным соблюдением некоторых условий и приемов, обеспечивающих получение надежных соединений.

В нашу задачу входит главным образом освещение тех сторон технологии пайки, которые имеют непосредственное отношение к вакуумной плотности паяных соединений. Теоретические же основы пайки и подробное описание различных ее видов читатель может найти в руководствах по паяльным работам.

Общие условия, соблюдение которых дает возможность получать вакуумно-плотные швы, относятся ко всем видам пайки, и мы приводим их ниже.

Для любого метода пайки детали должны тщательно очищаться и обезжириваться до применения флюса.

Детали должны быть правильно собраны и установлены в таких приспособлениях, которые обеспечивали бы их взаимную неподвижность в процессе пайки и остывания, открывая в то же время свободный доступ к швам.

Метод пайки, выбор припоя и флюса должны быть оправданы назначением спаянного узла и его конструкцией.

Зазоры в месте спая должны быть минимальными, но достаточными для проникновения расплавленного флюса и припоя на всю глубину спая. Выбору величины зазора для каждого узла следует уделять серьезное внимание, особенно при соединении деталей из металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения, с учетом изменения размеров вследствие нагрева в процессе пайки.

Исключительное значение имеют правильный нагрев деталей, скорость, температура и равномерность нагрева, а также порядок и скорость охлаждения спаянного узла.

Условия вакуумно-плотной пайки некоторых металлов и сплавов

Таблица 7-1

| Спаиваемый металл или сплав | Вид пайки | Припой | | | |
|--|-----------|---------------------------|----------------------------------|---|-------------------|
| | | с углеродистой сталью | | с нержавеющей сталью | |
| | | Припой | Флюс | Припой | Флюс |
| Углеродистая сталь | Мягкая | Олово ПОС-61 ПОС-40 | } Раствор хлористого цинка | ПОС-30 ПОС-40 ПОС-61 | } ЛМ-1 |
| | Твердая | ПСр-45 ПСр-72 Медь | | Бура; бура с борной кисло- той; 18В | |
| Нержавеющая сталь и высокохромис- тые сплавы | Мягкая | × | × | ПОС-61 ПОС-40 | ЛМ-1 |
| | Твердая | × | × | ПСр-45 ПСр-72 Медь | 209 18В 201 |
| Медь и ее сплавы | Мягкая | × | × | × | × |
| | Твердая | × | × | × | × |
| Никель | Мягкая | × | × | × | × |
| | Твердая | × | × | × | × |
| Серебро | Мягкая | × | × | × | × |
| | Твердая | × | × | × | × |
| Алюминий | Мягкая | × | × | × | × |
| | Твердая | × | × | × | × |

Примечание. ×—данные о припое и флюсе указаны в других графах таблицы.
— неспайваемость.

| и флюсы для пайки | | | | | | | |
|---------------------------|--|--------------------------|--------|---------------------------|--|----------------------------|-----------------------------------|
| с медью | | с никелем | | с серебром | | с алюми- нием | |
| Припой | Флюс | Припой | Флюс | Припой | Флюс | Припой | Флюс |
| Олово ПОС-61 ПОС-40 | } Раствор хлорис- того цинка; канифоль | ПОС-61 ПОС-40 | } ЛМ-1 | Олово ПОС-51 ПОС-40 | } Раствор хлорис- того цинка; ЛМ-1 | — | — |
| ПСр-45 ПСр-72 | | ПСр-45 ПСр-73 Медь | | Бура 18В 201 | | ПСр-45 ПСр-72 ПСр-53 | 18В 209 |
| ПОС-61 ПОС-40 | } ЛМ-1 | ПОС-61 ПОС-40 | } ЛМ-1 | ПОС-61 ПОС-40 | } ЛМ-1 | — | — |
| ПСр-45 ПСр-72 | | 201 18В | | ПСр-45 ПСр-72 Медь | | 209 18В 201 | ПСр-45 ПСр-72 |
| Олово ПОС-61 ПОС-40 | } Раствор хлорис- того цинка; ка- нифоль | ПОС-61 ПОС-40 | } ЛМ-1 | Олово ПОС-61 ПОС-40 | } Раствор хлорис- того цинка; ЛМ-1 | — | — |
| ПСр-45 ПСр-72 | | ПСр-45 ПСр-72 | | 18В 209 | | ПСр-45 ПСр-72 | 18В 209 |
| × | × | ПОС-61 ПОС-40 | } ЛМ-1 | ПОС-61 ПОС-40 | } Раствор хлорис- того цинка; ЛМ-1 | — | — |
| × | × | ПСр-45 ПСр-72 Медь | | 209 18В 201 | | ПСр-45 ПСр-72 | 209 18В |
| × | × | × | } ЛМ-1 | Олово ПОС-61 ПОС-40 | } Раствор хлорис- того цинка; канифоль | — | — |
| × | × | × | | ПСр-45 ПСр-72 | | 209 18В | 34-А |
| × | × | × | } ЛМ-1 | × | } Раствор хлорис- того цинка; ЛМ-1 | — | — |
| × | × | × | | × | | × | 93% Sn + +10% Sn Ультразвук |
| × | × | × | } ЛМ-1 | × | } Раствор хлорис- того цинка; ЛМ-1 | 34-А | 34-А |

11*

Флюс и припой не должны накладываться на шов в избытке. Лишние количества как флюса, так и припоя только вредят делу.

Конструкция и выполнение паяных соединений должны исключать возможность образования в них щелей, пустот, раковин, неровностей, которые могут служить местом скопления загрязнений или газов.

Готовый шов должен быть тщательно очищен и промыт от всех следов флюса. Флюс полезен только в момент лайки. В дальнейшем следы одних флюсов действуют на шов разрушающе и делают узел невакуумно-плотным, а следы других мешают достижению нужного разрежения.

7-2. СПАИВАЕМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Не все металлы и сплавы в одинаковой степени способны образовывать друг с другом вакуумно-плотные и достаточно долговечные спай. Все же способность образовывать вакуумно-плотные соединения через припой у металлов и их сплавов значительно выше, чем способность к свариванию. Многие разноименные металлы и сплавы, неспособные свариваться, могут быть спаяны достаточно качественно, чтобы одновременно служить материалом для вакуумной системы.

Так, например, могут быть спаяны сталь и латунь или алюминий и никель, сварить которые плавлением до сих пор не удалось. В то же время далеко не все припой достаточно хорошо смачивают, а следовательно, и паяют даже и химически близкие друг к другу металлы или сплавы.

Углеродистые и низколегированные стали, например, вполне хорошо лудятся и паяются чистым оловом, а нержавеющие стали не могут вакуумно-плотно паяться чистым оловом, но хорошо паяются так называемым третником (ПОС-30). В табл. 7-1 приведены данные о спаиваемости, почерпнутые из практики вакуумно-плотной пайки, для ряда ходовых металлов и сплавов и нескольких наиболее распространенных припоев как мягких, так и твердых.

Все же при изготовлении вакуумной системы следует руководствоваться правилом: паять только там, где нельзя сварить, и там, где пайка экономически выгоднее

сварки и повышает производительность труда. Это диктуется тем, что металл в сварных соединениях более однороден, а следовательно, и более плотен и более прочен, а при значительных изменениях температуры в эксплуатации установки металл сварных швов не подвержен таким частым и значительным изменениям, как металл паяных швов.

7-3. ФОРМЫ ВАКУУМНЫХ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Механическая прочность паяных швов в большинстве случаев ниже прочности соединяемых ими металлов и прочности сварных швов. Это обстоятельство не позволяет пользоваться в пайке некоторыми формами соединений, принятыми в сварке, так как они были бы недостаточно прочны и вакуумно-плотны.

С другой стороны, основные отличительные особенности пайки: смачивание паемого металла припоем, растекание последнего по поверхности детали и способность припоя заполнять капилляры — позволяют использовать в паяных высоковакуумных соединениях такие конструктивные формы, как, например, нахлесточные, что безусловно исключается в вакуумно-плотной сварке.

При конструировании паяных соединений следует руководствоваться правилом, говорящим, что надежным в отношении вакуумной плотности и достаточно прочным может быть только паяный шов, работающий на срез, при обязательном условии пропаяивания его на всю глубину (или ширину).

Следовательно, отпадают швы стыковые (рис. 7-1), угловые впритык (рис. 7-2). Не следует также применять впайку сильфонов или тонкостенных трубок в канавку, заливаемую припоем (рис. 7-3), так как в этом случае работает значительная масса литого припоя, что нерационально.

Рациональными конструктивными формами следует считать соответственно показанные на рис. 7-4—7-6.

Правильно выполненными являются соединения, указанные на рис. 7-7, в противоположность соединениям, приведенным на рис. 7-8.

Однако чрезмерное развитие поверхностей соприкосновения паяных деталей, на которых спай работает на срез, вредно, так как в этом случае может быть затруд-

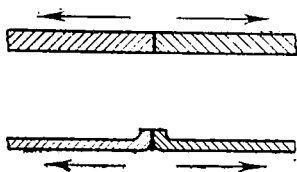


Рис. 7-1. Стыковые паяные швы ненадежные.

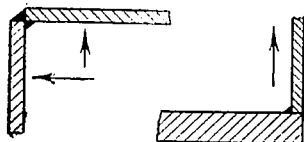


Рис. 7-2. Угловые паяные швы непрочные.

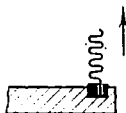


Рис. 7-3. Неправильная пайка сильфона.

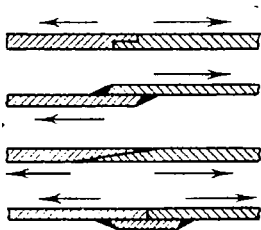


Рис. 7-4. Правильно сделанные паяные швы.

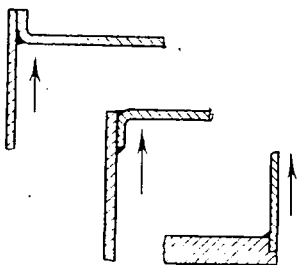


Рис. 7-5. Правильно сделанные угловые паяные соединения.

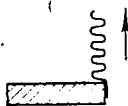


Рис. 7-6. Правильная пайка сильфона.

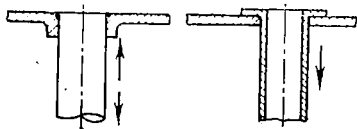


Рис. 7-7. Вакуумно-плотная вайка стержней и трубок в лист.

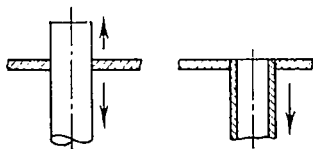


Рис. 7-8. Неправильная вайка стержней и трубок в лист.

нено флюсование всей площади сая и равномерное растекание припоя, необходимое для обеспечения сплошности шва.

Большой объем работ в вакуумной технологии приходится на напайку охлаждающих змеевиков. При напайке змеевиков со стороны атмосферы в процессе изготовления некоторых типов высоковакуумных насосов или технологических камер и колпаков требуется лишь обеспечить максимальный тепловой контакт при тщательном выполнении работы.

Совершенно иные требования предъявляются к пайке змеевиков внутри вакуумных установок. Здесь, по-

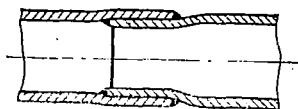
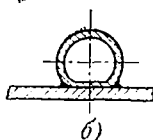
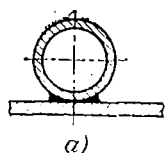


Рис. 7-9. Напайка охлаждающих трубок.

Рис. 7-10. Стык охлаждающей трубки.

мимо максимального теплового контакта, требуется полное отсутствие самых мелких щелей, раковин, отставания трубок (хотя бы и на малых участках), неровностей, в которых могли бы скапливаться загрязнения или растворители при промывке. Следовательно, на всем протяжении змеевика, которое нередко достигает десятков и даже сотен метров, требуются полный, сквозной пропай шва при полном смачивании металла припоем и однородная, гладкая внешняя поверхность его. Кроме того, необходимо тщательно промывкой удалить все следы флюса из готового сая. Все это требует особого внимания как к конструированию таких узлов, так и к их выполнению.

На рис. 7-9,а показана пайка круглой и на рис. 7-9,б сплющенной трубок змеевика.

Без особых пояснений можно видеть, что напайка сплющенной трубки технологичнее, так как угол схождения ее поверхности с поверхностью корпуса более тупой, чем в случае напайки трубки круглого сечения, и образование сплошного шва и галтели достигается легче и требует меньшего количества припоя при одинаковых площадях контакта.

Серьезного внимания требует также наращивание трубок для змеевиков и вообще стыкование трубок, помещаемых в вакуум, или трубок, из которых откачивается атмосферный воздух. Наиболее рационален стык с небольшой подкаткой конца одной из стыкуемых трубок и развальцовкой другой, как показано на рис. 7-10.

7-4. ОБОРУДОВАНИЕ ПАЯЛЬНОГО УЧАСТКА

Как и в сварке вакуумных установок, в их пайке большую роль играют аккуратность в работе, чистота в помещении паяльного участка и удобство работы.

Оборудование паяльного участка не представляет особой сложности, за исключением специальных печей для пайки в водороде и в вакууме и оборудования для пайки с нагревом токами высокой частоты. Эти печи и генераторы по большей части применяются

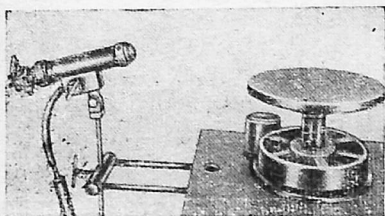


Рис. 7-11. Паяльный поворотный столик с горелкой «пушкой».

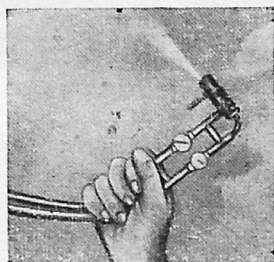


Рис. 7-12. Малая ручная газовая горелка.

для пайки мелких деталей. Мы упомянем о них ниже.

Для пайки более крупных узлов (если производство не является серийным) обычно применяются универсальные поворотные столики, подобные столикам в сварочных мастерских (рис. 7-11), металлические верстаки с обычными слесарными тисками, рихтовочные плиты и сборочные штативы.

Важнейшей частью паяльного оборудования являются нагревательные устройства. Часто для пайки в качестве нагревательных устройств используют газовые горелки разных систем и размеров, работающие на природном газе или на пропане в смеси с воздухом и кислородом. Если изготовление вакуумных аппаратов не носит характера серийного производства, то пайка более или менее крупных узлов производится, как правило, вручную на универсальных паяльных постах. Однако если позволяют условия, то пайку следует производить в водородных или вакуумных печах.

Каждое рабочее место должно быть снабжено одной, а для крупных изделий — двумя большими газовыми горелками и одной малой, ручной газовой горелкой (рис. 7-12).

Большие горелки крепятся шарнирно на конце штанги, пропущенной в ушки стола, снабженные столорными винтами. Это дает возможность установить горелку на разной высоте и под нужным

углом, направляя ее пламя во время работы в любую точку спаиваемого узла. Две горелки на одном посту необходимы для осуществления равномерного нагрева пояса соединения крупных деталей, особенно если они изготовлены из теплопроводного металла, так как при одной горелке тепло быстро уходит в сторону от линии шва.

Для равномерного нагрева детали одной горелкой нужно иметь также несколько стальных щитков разных размеров с внутренней обкладкой из листового асбеста.

Каждый паяльный пост должен иметь набор медных паяльников разных размеров и фасонов. При наличии газовых горелок нет необходимости в крупных электрических паяльниках. Они более громоздки и менее удобны, чем обычные медные, нагреваемые на горелках. В то же время мелкие паяльники для пайки электропроводки, мелких сильфонов и прочих мелких деталей желательнее электрифицировать. Удобны также полые паяльники средней величины, изготовленные из меди навинчивающиеся как наконечники на ручные газовые горелки.

При изготовлении арматуры и других узлов, идущих хотя бы мелкими сериями, выгодно паять в печах собранные целиком изделия, состоящие из нескольких деталей. Сборка осуществляется в приспосабливаемых, обеспечивающих постоянство взаиморасположения деталей в течение всего процесса пайки. Припой в виде пасты, проволоки или фольги закладывается в будущие швы при сборке.

Тип печи для пайки изделий в серийном производстве должен выбираться в зависимости от размеров изделия, характера пайки, требуемой температуры нагрева, веса деталей и тому подобных факторов. Для серийной работы печи должны быть оборудованы терморегуляторами, работающими автоматически, в определенных для каждой данной работы интервалах температуры.

Паяльный участок должен иметь хорошую приточно-вытяжную вентиляцию. При пайке выделяется много вредных газов и хорошая вентиляция является обязательной. На паяльный участок должна быть подведена вода, городской газ или пропан из привозных баллонов, сжатый воздух под давлением не более 2 кгс/см^2 , кислород также под давлением не более 2 кгс/см^2 и устроен канализационный слив.

На самом паяльном участке не должно стоять никаких баллонов. Если на предприятии нет централизованной подачи воздуха, газа и кислорода, то воздушный компрессор с ресивером и кислородные баллоны должны быть установлены в соседнем, изолированном помещении, на паяльный участок должны быть вынесены на отдельный щиток коммутационные краны и кислородный редуктор. Баллоны привозного пропана должны устанавливаться только в наружной специальной будке. Если предприятие не имеет городского газа и не имеет возможности получать привозной пропан в баллонах, следует соорудить карбюризаторную установку для получения бензинового газа.

Наихудшим видом топлива для вакуумной пайки следует считать ацетилен вследствие очень высокой температуры пламени, вызывающей местный перегрев металла, науглероживающей способности и взрывоопасности смесей ацетилена с воздухом. Работать с ацетиленовыми горелками разрешается только специально обученному персоналу. Для пайки же алюминия, например, ацетиленовое пламя вовсе непригодно. Пользоваться паяльными лампами не рекомендуется. Каждый паяльный пост должен быть снабжен инструментом для

очистки деталей при подготовке к пайке, а также для очистки спаиваемых узлов от флюса.

Кроме того, необходимо иметь несколько стержней из стали диаметром 3—6 мм, заточенных лопаточкой и хорошо облуженных серебром, служащих для разравнивания флюса и припоя на шве.

На паяльном участке обязательно должен быть крацевальный станок, т. е. круглая проволочная щетка на валу электродвигателя, являющаяся наилучшим средством для очистки деталей в месте спая. Флюсы и припой хранятся в металлическом шкафу. Флюсы в подавляющем большинстве случаев обладают очень высокой гигроскопичностью и должны храниться в банках с притертыми или резиновыми пробками или же с винтовыми крышками с резиновыми прокладками.

7-5. ПАЙКА МЯГКИМИ ПРИПОЯМИ

Для неразъемных соединений вакуумных установок, не подвергающихся при испытаниях или в эксплуатации нагреву выше 100—120 °С, можно с успехом применять самую обычную пайку оловом или оловянно-свинцовыми припоями. В тех случаях, когда требуется иметь не только вакуумно-плотное, но и прочное соединение (соединение несет значительную нагрузку), можно пользоваться так называемой комбинированной пайкой мягкими припоями. При комбинированной пайке нагрузка воспринимается механическими креплениями: резьбовым соединением, вальцовкой, заклепками, а пайка играет роль постоянного (неразъемного) вакуумного уплотнения.

Мягкая пайка известна всем, и нет надобности излагать здесь основы этого метода. В вакуумной технике она должна лишь отличаться аккуратностью выполнения. Под этим мы подразумеваем: тщательность пригонки и сборки спаиваемых деталей, чистоту металла, инструмента, припоя и рабочего места, чистоту рук и спецодежды рабочего, правильный подбор припоя и флюса, чистоту и активность флюса, достаточно сильный прогрев шва во время пайки, полную неподвижность деталей при застывании припоя в шве, тщательное удаление всех следов флюса из спая.

Зазоры между деталями в месте пайки должны быть в пределах 0,1—0,15 мм.

Лучшие результаты дает пайка с предварительным облуживанием мест соединения, тщательной промывкой и просушиванием облуженных деталей для удаления следов флюса и с последующей сборкой и пайкой уже облуженных деталей.

В некоторых случаях, как, например, при пайке полупроводниковых сильфонов, имеющих толщину стенки всего в 0,1—0,2 мм, такой метод пайки является обязательным. Сильфон и деталь, в которую впаявается сильфон, тщательно облуживаются припоем, затем весьма тщательно промываются, чтобы полностью удалить все следы соляной кислоты и хлористого цинка, просушиваются, а затем собираются и паяются паяльником или пламенем малой ручной горелки, с применением только бескислотного флюса, например канифоли. Если не соблюдать такой технологии, то в шве и около него останутся следы едкого флюса, которые дадут себя знать через некоторое время появлением течей в тонкостенных деталях.

Наиболее распространенным флюсом для пайки мягкими припоями малоуглеродистых сталей, меди и ее сплавов, никеля и его

сплавов является раствор хлористого цинка в воде (травления кислоты).

Необходимо обращать внимание на чистоту флюса. При пользовании флюсом, в котором имеются различные органические примеси, трудно ожидать надежных вакуумно-плотных швов. Для нанесения флюса на место спая лучше всего пользоваться кисточкой из фторопласта-4, сделанной из полоски, мелко расщепленной с одного конца.

Пользоваться ватными, тряпичными и тому подобными помазками нельзя. Также нельзя обтирать тряпками или ветошью облуженные поверхности. Лишний припой можно только стряхивать с горячей детали или снимать паяльником или чистым металлическим скребком.

При пайке узлов с очень тонкими стенками или неудобными для тщательной промывки после пайки пользование хлористым цинком допустимо только для предварительного облуживания деталей.

В качестве мягких припоев для указанных выше металлов и сплавов могут применяться как чистое олово, так и различные марки оловянно-свинцовых припоев. Лучше всего применять припой марок ПОС-61 и ПОС-40.

Таблица 7-2

Длительная прочность паяных соединений при комнатной температуре в зависимости от механического напряжения

| Тип соединений | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|
| ПОС-40 — медь МЗ | | ПОС-40 — латунь Л62 | | ПОС-40 — сталь 20 | | ПОС-30 — латунь Л62 | |
| Напряжение, кгс/мм ² | Время до разрушения, ч | Напряжение, кгс/мм ² | Время до разрушения, ч | Напряжение, кгс/мм ² | Время до разрушения, ч | Напряжение, кгс/мм ² | Время до разрушения, ч |
| 1,06 | 6 | 1,66 | 6 | 0,94 | 85 | 1,57 | 5 |
| 0,61 | 24 | 0,56 | 113 | 0,53 | 1 485 | 0,58 | 576 |
| 0,46 | 250 | 0,29 | 2 380 | 0,38 | 3 264 | 0,36 | 1 056 |
| 0,33 | 394 | 0,23 | 7 500 | 0,25 | 5 000 | 0,30 | 1 876 |
| 0,31 | 1 440 | — | — | — | — | 0,24 | 2 476 |
| 0,20 | 5 000 | — | — | — | — | 0,16 | 7 500 |

Примечание. Толщина слоя припоя 0,07—0,12 мм. В таблице приведены средние данные двух параллельных опытов.

Швы, паянные оловянно-свинцовыми припоями, имеют свойство ползучести, т. е. медленной деформации, большей или меньшей в зависимости от нагрузки, приводящей к разрушению шва. Поэтому следует различать прочность шва при кратковременной и постоянной его нагрузке. В табл. 7-2 приведены данные о долговечности паяных швов в зависимости от удельной нагрузки.

Таблица 7-3 содержит данные о вязкости швов мягкой пайки при низких температурах. В табл. 7-4 приведены данные по наиболее часто применяемым оловянно-свинцовым припоям.

Влияние низких температур на ударную вязкость оловянно-свинцовых припоев ПОС-40 и ПОС-30

| Марка припоя | Характеристика | Показатели при температуре испытания, °С | | | | | | |
|--------------|--|--|---------|---------|---------|-----------------|---------|---------|
| | | -196 | -183 | -96 | -60 | -30 | 0 | +30 |
| ПОС-40 | Образцы без надреза | | | | | | | |
| | Удельная работа разрушения, $кгс \cdot м/см^2$ | 0,4—1,0 | 0,5—1,0 | 0,7—1,8 | 1,7—3,7 | 4,0—7,8 | 6,2—7,7 | 6,4—7,5 |
| | Угол излома, град | 0 | 0 | 0 | 0 | — | 120 | 120 |
| | Характер излома | Хрупкий | Хрупкий | Хрупкий | Хрупкий | Вязкий, хрупкий | Вязкий | Вязкий |
| | Образцы с острым надрезом | | | | | | | |
| | Удельная работа разрушения, $кгс \cdot м/см^2$ | 0,4 | 0,4 | 1,7 | 1,8 | 2,1 | 2,5 | 3,0 |
| ПОС-30 | Деформация сечения, мм | 0 | 0 | 0,7 | 1,0 | 1,8 | 2,5 | 2,4 |
| | Угол излома, град | 0 | 0 | 0 | 30 | 30 | 100 | 120 |
| | Характер излома | Хрупкий | Хрупкий | Хрупкий | Хрупкий | Хрупкий | Вязкий | Вязкий |
| | Образцы без надреза | | | | | | | |
| | Удельная работа разрушения, $кгс \cdot м/см^2$ | 0,7—1,5 | 0,8—1,8 | 2,1—3,3 | 2,9—5,2 | 3,7—5,5 | 4,2—7,0 | 6,0—7,4 |
| | Угол излома, град | 20 | 20 | 30 | 35 | 60 | 120 | 120 |
| ПОС-30 | Характер излома | Хрупкий | Хрупкий | Хрупкий | Хрупкий | Вязкий, хрупкий | Вязкий | Вязкий |
| | Образцы с острым надрезом | | | | | | | |
| | Удельная работа разрушения, $кгс \cdot м/см^2$ | 0,6 | 0,6 | 1,9 | 1,9 | 2,1 | 2,3 | 3,0 |
| | Деформация сечения, мм | 0 | 0 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,5 | 2,7 |
| | Угол излома, град | 0 | 0 | 0 | 35 | 30 | 110 | 120 |
| | Характер излома | Хрупкий | Хрупкий | Хрупкий | Хрупкий | Хрупкий | Вязкий | Вязкий |

Оловянно-свинцовые припой

| Марка припоя | Химический состав, массовая концентрация, % | | | | | | Температура плавления, °С | |
|--------------|---|-----------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|---------------------------|-------|
| | Олово | Свинец | Сурьма | Медь не более | Висмут не более | Мышьяк не более | Начало | Конец |
| ПОС-30 | 29—30 | Остальное | 1,5—2 | 0,15 | 0,10 | 0,05 | 183 | 256 |
| ПОС-40 | 39—40 | | 1,5—2 | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 183 | 235 |
| ПОС-50 | 49—51 | | 0,8, не более | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 183 | 209 |
| ПОС-61 | 59—61 | | 0,8, не более | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 183 | 183 |
| ПОС-90 | 89—90 | | 0,15, не более | 0,08 | 0,10 | 0,05 | 183 | 222 |

Нержавеющие стали не следует паять чистым оловом. Чистое олово очень плохо смачивает поверхность хромистых сплавов, и получить вакуумно-плотные швы здесь невозможно. Припоями же марок ПОС-61 и ПОС-40 нержавеющие стали паяются хорошо. Флюсами при пайке мягкими припоями нержавеющей стали может служить смесь равных долей обычного раствора хлористого цинка с чистой соляной кислотой или же антикоррозионный флюс марки ЛМ-1.

Первый из этих флюсов может применяться для пайки достаточно толстостенных и крупных узлов, когда после пайки возможна тщательная промывка швов горячей водой. Иначе неминуемы интенсивная коррозия шва и его сравнительно быстрое разрушение, а в тонкостенных деталях — разъедание основного металла.

Флюс ЛМ-1 является антикоррозионным и в целях сохранения прочности не требует такой интенсивной промывки швов; при его употреблении достаточно обычных способов промывки вакуумных установок, но этот флюс оставляет темные пятна.

Для качественной пайки мягкими припоями нержавеющей стали следует стараться придать металлу в месте спая шероховатую поверхность, что может быть сделано или травлением в царской водке, или соответствующей механической обработкой.

В вакуумных установках часто встречаются внутренние охлаждающие (или подогревающие) змеевики из тонких трубок, напаянные на те или другие детали. Необходимо обращать особое внимание на тщательность пропайки швов с обеих сторон трубки во избежание образования внутренних карманов, которые обязательно будут иметь выход в вакуумную полость и часто довольно далеко от самого кармана. Такие карманы особенно опасны тем, что в них собираются остатки флюса, которые становятся затем источниками обильного газовыделения.

Для качественной напайки трубок необходимо предварительно аккуратно облудить как деталь, на которую напаяется трубка, так и трубку, а затем после тщательной промывки и просушки производить напайку.

При намотке змеевиков нужно следить за их плотным прилеганием к детали и закреплять трубки прихватками (пайкой) через каждые 50—100 мм.

Затем нужно вести пропайку по всей длине трубок равномерным галтельным швом, наблюдая, чтобы все пространство под трубкой было плотно залито припоем и нигде не образовывалось карманов или раковин, а также рубцов, наплывов или заусенцев, за которые могли бы цепляться волокна обтирочного материала.

После пропайки швов следует зачистить их крючковым шаблоном, а затем шкуркой и тщательно промыть холодной и горячей водой. Обнаруженные после зачистки раковины необходимо пропаять заново.

Если длина трубки в змеевике требует стыковки трубок, то стыковые швы должны выполняться серебряным припоем с развальцовкой одного из стыкуемых концов на длину не менее диаметра стыкуемых трубок. Развальцованный конец плотно надсадается на аккуратно подкатанный конец второй трубки и пропаявается твердым припоем при помощи малой ручной горелки. Стык должен быть очищен от всех следов флюса, облужен мягким припоем, и затем продолжается напайка змеевика, как указано выше.

Очень важную роль во всех случаях вакуумно-плотной пайки мягкими припоями играет правильный выбор размера и формы паяльника. Детали должны быстро и достаточно сильно прогреваться паяльником, чтобы припой становился жидкотекучим и хорошо смачивал детали, как можно меньше времени подвергаясь окислению на воздухе в расплавленном состоянии. По этой причине всегда лучше употреблять паяльник, чем пламя горелки.

7-6. ПАЙКА ТВЕРДЫМИ ПРИПОЯМИ

Наиболее распространенной твердой пайкой крупных узлов в вакуумной технике является пайка серебряными припоями на воздухе.

Чаще всего применяется припой ПСр-45. Это наиболее универсальный припой, содержащий сравнительно немного цинка, значительная часть которого в процессе пайки из припоя испаряется, и обладающий невысокой температурой плавления. В табл. 7-5 приведены сравнительные данные для разных марок серебряных припоев.

Для отпаянных приборов и систем сверхвысокого вакуума применим только эвтектический припой ПСр-72 (ПСрМ-72-28).

Припой ПСр-70 применяется там, где в спае необходимо иметь электропроводность, близкую к меди, а припой ПСр-50—в случаях высокого нагрева в работе и недопустимости присутствия цинка.

Большой интерес для вакуумной техники представляет припой марки ПСрМИн-63В, активизированный индием. Температура пайки этим припоем равна 730 °С. Выплавленный в вакууме этот припой получил широкое распространение в самых ответственных конструкциях.

Припой ПСр-40-КН рекомендуется применять в случае необходимости получения вакуумно-плотного и прочного соединения при невысокой температуре пайки и отсутствии нагрева системы в эксплуатации.

Серебряные припои

| Марка припоя | Химический состав, массовая концентрация, % | | | | | | | Температура плавления | | Примечание |
|--------------|---|---------|-----------|--------|-------|--------|--------|-----------------------|-------|------------------------------|
| | Медь | Серебро | Цинк | Свинец | Олово | Кадмий | Никель | Начало | Конец | |
| ПСр-1,5 | — | 1,5 | — | 83,5 | 15,0 | — | — | 265 | 370 | — |
| ПСр-2 | — | 2,0 | — | 63 | 30,0 | 5,0 | — | 225 | 285 | — |
| ПСр-2,5 | — | 2,5 | — | 92,0 | 5,5 | — | — | 295 | 305 | — |
| ПСр-10 | 50 | 10 | Остальное | 0,5 | ≤0,5 | ≤0,5 | ≤0,5 | 815 | 850 | ГОСТ 8190-56 |
| ПСр-12 | 36 | 12 | » | 0,5 | ≤0,5 | ≤0,5 | ≤0,5 | 750 | 800 | ГОСТ 8190-56 |
| ПСр-25 | 40 | 25 | » | 0,5 | ≤0,5 | ≤0,5 | ≤0,5 | 745 | 775 | ГОСТ 8190-56 |
| ПСр-45 | 30 | 45 | » | 0,3 | ≤0,8 | ≤0,2 | ≤0,2 | 660 | 725 | ГОСТ 8190-56 |
| ПСр-50 | 50 | 50 | — | — | — | — | — | 779 | 850 | ГОСТ 8190-56 |
| ПСр-70 | 26 | 70 | 4 | — | — | — | — | 730 | 755 | ГОСТ 8190-56 |
| ПСр-72 | 28 | 72 | — | — | — | — | — | 779 | 779 | ГОСТ 8190-56 |
| (ПСрМ-72-28) | | | | | | | | | | |
| ПСр-40-КН | 16 | 40,7 | 17 | — | — | 26 | 0,3 | 605 | 620 | ГОСТ 8190-56 |
| ПСр-62 | 28 | 62 | — | — | 10 | — | — | 660 | 700 | ГОСТ 8190-56 |
| ПСрМИн-63В | 27 | 63 | — | — | — | — | — | 685 | 710 | МСНХ ТУ215-57, индий 10 % |

Интересно заметить, что при определенных условиях спай, выполненный некоторыми припоями, с течением времени изменяются. Так, спай, выполненный припоем Ni+Cr+Mn на нержавеющей стали, при дальнейшем прогреве до 1200 °С в течение 6 ч растворяется полностью в основном металле без потери прочности соединения.

Флюсы для твердой пайки должны полностью расплавляться при температурах, несколько меньших, чем температура плавления припоя, но не выгорать и оставаться активными при наивысшей температуре плавления припоя. Для пайки углеродистой стали, меди, латуни, бронзы флюсом с успехом служит обезвоженная бура или смесь буры и борной кислоты.

Лучшим флюсом для вакуумно-плотной пайки нержавеющей сталей серебряными припоями является флюс 18В. Он длительное время остается активным даже при нагреве до 800 °С в отличие от флюса 209, который после расплавления очень быстро теряет активность, вследствие чего с ним можно надежно паять только мелкие детали.

Флюс замешивается с водой и в виде кашицы в небольшом количестве предварительно наносится на место спаивания равномерным тонким слоем. Нагрев деталей ведется уже с флюсом. Если флюса оказывается недостаточно, то перед нанесением на шов припоя флюс добавляется на нагретую деталь с помощью заточенного лопаткой стального прутка. В последнее время стал применяться флюс 18В не только для пайки нержавеющей сталей и жаростойких никелевых сплавов, но и для малоуглеродистых сталей, меди и ее сплавов и никеля. Дело в том, что бура и борная кислота оставляют после пайки стекловидный шлак, с большим трудом удаляемый с металла, а остатки флюса 18В легко удаляются непосредственно после пайки кипящей водой (15—20 мин).

Шлак после пайки с бурой и борной кислотой удаляется кипячением в воде в течение 20—30 мин, а затем обработкой последовательно в 2—3%-ном горячем растворе натриевого хромпика и холодном 1%-ном растворе такого же хромпика. Такая обработка длится также 30 мин, но все же ею снимается обычно не весь шлак и часть его приходится осторожно удалять механической обработкой шва.

Затем швы зачищаются мелкой шкуркой, а медные или латунные детали протравливаются в растворах азотной кислоты и тщательно промываются холодной, а затем горячей водой.

Следует помнить, что все эти операции совсем не заменяют и не исключают окончательной промывки, обычной для всех вакуумных установок, путем тщательного протирания и ополаскивания растворителями и дистиллированной водой. После любой промывки детали следует тщательно просушить в сушильном шкафу или путем длительного обдувания фильтрованным воздухом.

Для пайки нержавеющей стали медью и другими тугоплавкими припоями с температурой плавления выше 850 °С применяется флюс 201 или 200. Эти флюсы также наносятся на место спаивания до начала нагрева в виде кашицы, замешанной на воде (при нагреве горелкой или в печи) или на спирте (при индукционном нагреве токами высокой частоты).

При пайке тугоплавкими припоями необходимо особенно внимательно следить за степенью и порядком нагрева деталей, так как здесь особенно легко допустить перегрев металла, окисление и преждевременное разложение флюса.

7-7. НАГРЕВ

При твердой пайке, требующей нагрева деталей выше 600°C , важны метод и степень нагрева спаиваемых деталей.

Чем меньше времени основной металл в зоне шва будет соприкасаться с кислородом воздуха в нагретом состоянии и чем меньше он будет непосредственно омываться пламенем, тем меньше он окислится и тем лучшего качества шва можно ожидать. Не следует злоупотреблять кислородом для горелки и нужно стараться прежде всего прогреть наиболее массивные части деталей. Мелкие и тонкостенные детали следует ставить на медные болванки и прогревать сперва эти болванки, чтобы основную часть тепла детали получали от соприкосновения с ними. Это предохранит детали от пережога и излишнего окисления в зоне шва. Для каждого сорта припоя следует практически установить достаточную степень прогрева и его признаки. Если пайка производится в печи, то температура нагрева деталей должна быть на $15\text{--}20^{\circ}\text{C}$ выше температуры плавления припоя и выдерживаться на этом уровне в течение $3\text{--}5$ мин. Температура нагрева должна контролироваться термпарой или проверяться пробной пайкой, так как на истинный прогрев деталей оказывает очень большое влияние их расположение в печи относительно нагревательных элементов.

Для равномерного прогрева пламенем горелки деталь необходимо все время поворачивать, для чего и служат поворотные столики, или же так разместить кожух, чтобы пламя горелки, отражаясь от его стенок, равномерно нагревало деталь с разных сторон. Узлы из нескольких деталей следует нагревать в приспособлениях, обеспечивающих постоянство их взаимного расположения. На рис. 7-13 показаны, например, приспособления для пайки ребристых ловушек двух размеров.

Крупные детали и узлы бывает трудно прогреть целиком. Здесь нужно быть особенно внимательным в отношении способа нагрева. Во всех случаях, безусловно, необходимо одновременно и равномерно прогреть всю зону спаивания. Ширина полосы одновременного прогрева

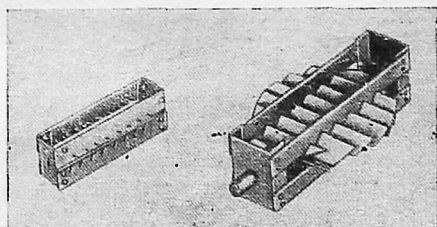


Рис. 7-13. Приспособление для твердой пайки азотных ловушек вакуумных установок.

должна быть продумана особо для каждой конструкции с учетом возможных поводов (коробления) от нагрева.

Попытки прогрева и пайки длинных швов по участкам редко приводят к желаемым результатам в отношении вакуумной плотности соединений: при прогреве второго и следующих участков в предыдущих, уже запаянных участках шва почти всегда образуются течи. То же самое происходит в большинстве случаев при подпайках на плохо сделанных соединениях. Вакуумно-плотную пайку нужно делать высококачественно сразу, в один прием.

Сборка деталей под пайку должна производиться без значительных зазоров, но не на прессовых и даже не на напряженных посадках. Зазоры должны составлять в месте спая в момент расплавления припоя 0,05—0,12 мм. Они необходимы, чтобы все соединяемые поверхности могли быть смочены расплавляемым в процессе пайки флюсом, а затем расплавленный припой, смачивая поверхности спая, мог по этим весьма малым зазорам проникнуть на всю глубину соединения. Проникновение припоя в глубину шва происходит под действием сил поверхностного натяжения, причем зазоры указанного выше порядка подобно капиллярной трубке содействуют лучшему заполнению шва жидким припоем. Для получения вакуумно-плотного шва необходимо, чтобы припой хорошо смачивал поверхность спаиваемого металла и диффундировал в его поверхностный слой не только внутри шва, но и на узких полосках вдоль всего шва снаружи, образуя между ними галтель.

В случае пайки деталей из однородного металла зазоры устанавливаются окончательно при сборке под пайку и для их сохранения (до заполнения припоем) следует лишь выдерживать равномерный нагрев всех частей спаиваемого узла.

Сложнее обстоит дело при соединении деталей из разных металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения и различной теплопроводностью. При определенной температуре плавления припоя нельзя спаять соединение, нагревая детали обратно пропорционально их температурным коэффициентам линейного расширения, что дало бы возможность сохранить зазор неизменным от начала до конца нагрева. Весь узел должен при пайке иметь одинаковую температуру, а, следовательно, детали будут по мере нагрева расширяться по-разному и зазор будет изменяться.

Если мы обозначим через D_B и α_B диаметр при сборке и температурный коэффициент линейного расширения вала (охватываемой детали); D_0 и α_0 диаметр при сборке и температурный коэффициент линейного расширения отверстия (охватывающей детали); $t_{\text{п}}$ температуру пайки, °C; t_c температуру деталей при сборке; $D_{B.H}$ диа-

метр вала, нагретого до температуры пайки и $D_{0.н}$ диаметр отверстия, нагретого до температуры пайки, то

$$D_{р.н} = D_в + D_в \alpha_в (t_п - t_c);$$

$$D_{0.н} = D_0 + D_0 \alpha_0 (t_п - t_c).$$

Чтобы в момент пайки не создавался натяг и флюс и припой могли проникнуть на всю глубину спая, величина $D_{0.н}$ должна превышать $D_{р.н}$ на 0,1—0,24 мм. При этом условии результаты пайки будут хорошими. Отсюда нетрудно определить и диаметры охватываемой и охватывающей деталей в месте спая при сборке до начала нагревания.

В некоторых случаях, когда диаметры спаиваемых деталей велики и температурный коэффициент линейного расширения у охватывающей детали значительно больший, чем у охватываемой, их окончательная сборка в холодном состоянии невозможна и приходится осуществлять посадку одной детали в другую уже в значительно подогретом состоянии.

Следует учитывать также и теплопроводность металла. Медные, алюминиевые, латунные, бронзовые детали быстро прогреваются во всей своей массе и расширяются почти равномерно. Если же детали сложной конфигурации сделаны из нержавеющей стали или никелевого сплава, то прогрев и потери тепла могут быть неравномерными и какой-то пояс может препятствовать полному температурному расширению детали в месте спая за счет внутренних напряжений металла. В таких случаях необходимо давать дополнительный подогрев детали.

7-9. ТЕХНИКА ПАЙКИ ТВЕРДЫМИ ПРИПОЯМИ

Для ручной пайки припой удобнее всего иметь в виде проволоки толщиной 0,5—2,0 мм. Если припой получен в виде пластин, то их приходится разрезать при помощи ножниц полосками в 2—3 мм шириной («лапшой»). Для удобства пайки такая полоска припаивается одним концом к концу толстой стальной проволоки или тонкому прутку под углом примерно 100—110°. Такой «кочергой» с концом из припоя удобно оперировать во время пайки.

Когда детали достаточно нагреты и предварительно наложенный флюс расплавился, пламя горелки перево-

дится на их наиболее массивные части, немного в сторону или ниже шва, а подогретый в пламени пруток припоя окунают концом в баночку с флюсом и затем проводят им точно вдоль шва. При этом конец прутка припоя быстро плавится, припой разогревается на детали, становится жидкотекучим и заполняет шов, очищенный флюсом от окислов.

Скорость этого прочерчивания припоем по шву зависит от многих условий: массы спаиваемых деталей, величины зазора в шве, степени прогрева детали и подогрева припоя, толщины прутка (или полоски) припоя и т. п.

Искусство паяльщика состоит главным образом в том, чтобы правильно нагреть детали и пруток припоя, уловить необходимую скорость прочерчивания припоем по шву и сделать это равномерно, без разрывов и остановок. Затем нужно быстро провести по всему шву заточенным и залуженным (тем же припоем) стальным прутком, разравнивая излишние скопления припоя в отдельных местах и ликвидируя прерывность шва, и быстро, но тщательно проверять, как лег припой по всей длине шва. Если припой лег ровной, непрерывной полоской, без разрывов и потеков и светится ровным блеском сквозь остатки флюса, четко вырисовываясь на основном металле, можно отвести горелку в сторону и оставить спаянный узел остывать.

Иногда следует продолжать не сильно подогревать отдельные части узла, чтобы не допустить резкого перепада температур при остывании и избежать возникновения температурных напряжений, а часто и трещин или разрывов шва.

7-10. ПАЙКА АЛЮМИНИЯ

Пайка алюминия мягкими припоями (кроме ультразвуковой) не дает сколько-нибудь надежных и долговечных вакуумно-плотных швов. Поэтому здесь мы не даем описания тех методов, которые часто рекомендуются в общем машиностроении. Ультразвуковая пайка описывается в гл. 8.

Твердая пайка алюминия в вакуумной технике распространена, наоборот, довольно широко. Следует предупредить, что надежно вакуумно-плотно паять можно

лишь алюминий и сплавы АМц и АМг, а не дюралюминий.

Вследствие исключительно быстрого образования на поверхности алюминия трудно растворимой, прочной окисной пленки, имеющей весьма высокую температуру плавления (свыше 2 000 °С), и легкоплавкости самого алюминия (658 °С) пайка его имеет некоторые особенности.

Припоем для твердой пайки алюминия служит сплав алюминия с медью и кремнием, носящий название 34-А.

Состав припоя, %:

| | |
|--------------------|----|
| Алюминий | 66 |
| Медь | 28 |
| Кремний | 6 |

Температура плавления припоя 525 °С, т. е. примерно на 125—130 °С ниже температуры плавления основного металла спаиваемых деталей. Поэтому искусство паяльщика здесь заключается в основном в умении правильно нагревать детали и вовремя уловить момент наступления достаточного, равномерного прогрева зоны шва.

Необходимо предупредить, что это затрудняется рядом обстоятельств.

При достаточном для пайки нагреве и даже при перегреве до температуры начала плавления алюминий не краснеет и не светится, как это происходит со сталью и другими металлами, а сохраняет свой обычный внешний вид и окраску.

Алюминий начинает плавиться не снаружи, а внутри, как бы в мешке из тугоплавкой и прочной, но эластичной окисной пленки. При перегреве металла деталь, не меняя окраски, вдруг начинает в отдельных местах оседать, терять форму, расплываться.

Теплопроводность алюминия в 2,5 раза больше, чем у стали.

Нагрев деталей можно вести только газовым или бензиновым пламенем. Ацетиленовые горелки непригодны. Нагрев нужно вести очень осторожно, постоянно и равномерно поворачивая детали, подогревая массивные их части и не задерживая пламя на одном месте при тонкостенных деталях.

Для контроля степени нагрева алюминиевых деталей служит достаточно длинная, чистая, деревянная палочка. Такой палочкой пробуют чертить по поверхности на-

греваемой детали, отводя, разумеется, в этот момент пламя горелки в сторону, чтобы палочка ни в коем случае не обугливалась и не закоптилась в пламени.

Когда деталь прогреется до 530—540 °С, т. е. до температуры несколько большей, чем температура плавления припоя, на чистой поверхности алюминия от палочки станут оставаться черные следы, как от мягкого карандаша или уголька. Это значит, что можно начинать пайку. Само собой разумеется, что такая степень нагрева, но не бóльшая, должна быть достигнута одновременно по всей линии спая.

Когда, таким образом, установлено, что алюминиевые детали, подлежащие пайке, достаточно прогреты, берут палочку припоя, подогревают ее в пламени горелки, окунают ее, горячую, в порошкообразный флюс (флюс обволакивает горячий конец палочки) и затем проводят припоем с флюсом вдоль шва. Скорость движения конца прутка припоя вдоль шва должна быть такова, чтобы припой плавился и проникал на всю глубину шва, образуя галтель с обеих сторон шва.

Если шов длинный, нужно повторно окунать прутки припоя во флюс, так как последний наносится на шов только с припоем. В отличие от прочих твердых паяк флюс при пайке алюминия предварительно на детали не наносится и нагрев деталей ведется без флюса.

Флюс 34-А плавится раньше припоя и интенсивно растворяет оксидную пленку как на деталях, так и на прутке припоя. Предварительное покрытие шва флюсом привело бы только к загрязнению шва, так как при длительном действии пламени горелки флюс 34-А разлагается. Подготовка деталей под пайку должна проводиться не менее, если не более тщательно, чем при пайках серебряными припоями.

Место спая должно очищаться стальными щетками и обезжириваться бензином или едким натром (10%-ным раствором). Конец палочки припоя перед окунанием в сухой порошкообразный флюс должен нагреваться до температуры начала оплавления.

Алюминий можно паять не только припоем 34-А¹, но и просто обычным силумином. Однако температура плавления силумина лежит около 577 °С, т. е. почти на

¹ Припой и флюс для пайки алюминия обозначаются одной маркой 34-А.

50 °С выше, чем у припоя 34-А, и паять силумином по этому значительно труднее.

Одной из особенностей флюса 34-А является его чрезвычайная гигроскопичность. Это свойство флюса вынуждает внимательно относиться к хранению его, так как увлажненный флюс для вакуумной пайки не пригоден. Это же свойство флюса делает совершенно необходимым тщательное удаление с деталей после пайки всех следов флюса.

Для этого место пайки должно быть хорошо промыто горячей и холодной проточной водой (лучше всего обмывать струей воды еще не остывшие детали непосредственно после пайки), а затем обязательно протравлено 3—5%-ным раствором азотной кислоты и снова хорошо промыто. Если такая обработка спая не будет сделана, спай будет недолговечным, так как следы флюса, интенсивно набирая влагу из воздуха, приводят шов к разрушению, а до этого чрезвычайно сильно снижают вакуумные свойства установки.

7-11. СЛОЖНЫЕ ПАЯНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Весьма часто вакуумные аппараты имеют неразъемные соединения с несколькими, близко друг к другу расположенными швами.

При мягкой пайке соединение сложного паяного узла начинается с пайки чистым оловом, имеющим температуру плавления 232 °С, или припоями ПСр-2,5 и ПСр-1,5. Следующие швы паяют оловянно-свинцовыми припоями, выдерживая разницу температур плавления между соседними припоями в 20—30 °С.

Разумеется, при этом нужно очень внимательно следить за степенью нагрева паяльников и временем их соприкосновения с деталью, так как даже и при различной температуре плавления припоев очень легко перегреть и подплавить соседний уже готовый шов.

При пайке сложных узлов твердыми припоями работа оказывается более трудной, так как хотя в распоряжении оператора и имеется обычно ряд припоев с более значительными интервалами в температурах плавления, удержаться при нагреве сложного узла в строгих границах определенных температур гораздо труднее при работе в области температур выше 700 °С, чем в области температур ниже 300 °С.

Поэтому рекомендуется по возможности вести пайку с одного нагрева, доводя сначала узел в области первой пайки или весь целиком до температуры, необходимой для наиболее тугоплавкого из выбранного ряда припоев, а затем по мере охлаждения узла и прохождения его через более низкие ступени температур быстро определять их и производить пайку одного шва за другим без повторных нагревов в порядке нисходящих температур плавления припоя. При этом необходимо подбирать пайку так, чтобы к моменту пайки следующего шва припой в предыдущем шве уже затвердевал.

Если такой метод по конструкции узла невозможен, так как он требует полной сборки всего узла до нагрева и начала пайки, то возможно при высокой квалификации паяльщика вести сложную пайку и с повторными нагревами. В этом случае, чем меньше каждый из швов будет подвергаться обработке пламенем горелки, тем больше надежды сохранить его вакуумную плотность.

Угроза нарушения плотности шва заключается не только в возможности расплавления его, но и в появлении других явлений: насыщения меди кислородом, температурных напряжений и т. п.

Сложные медные или латунные узлы при многократных нагревах для пайки могут обнаруживать течи не только в металле шва, но и рядом со швами в зонах нагрева и действия флюсов. В медных деталях многократный высокий прогрев вызывает образование крупных зерен закиси меди, приводящее к появлению течи. В латуни постепенно выгорает цинк.

Учитывая изложенное, следует предпочесть, если это осуществимо по конструкции узла, раздель-

ную пайку деталей в подузлы, а затем их соединение в общую конструкцию. Предпочтительно также применять для более мелких подузлов пайку медью в вакууме или в во-

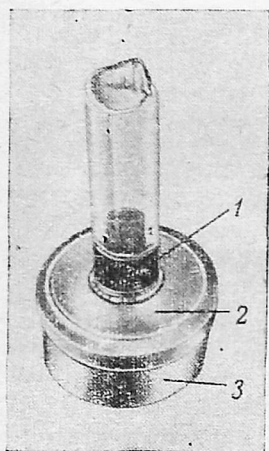


Рис. 7-14. Сложная пайка.

1 — коваровая втулка, спаянная со стеклом; 2 — никелевая крышка; 3 — алюминиевая коробка.

дороде с последующей однократной пайкой этих подузлов в одно целое серебряным припоем. В этом случае разница в температурах плавления припоя подузлов и припоя общей пайки составит свыше 300 °С, а нагрев на воздухе будет сведен к минимуму. Немалый интерес в вакуумной технике представляют сложные пайки, посредством которых можно осуществить почти непосредственное (при незначительных габаритах) соединение материалов, которые друг с другом прямо не соединяются ни пайкой, ни сваркой. Примером может служить изображенная на рис. 7-14 алюминиевая коробка с вакуумным переходом к стеклянной трубке.

Здесь алюминиевая коробка 3 спаяна припоем 34-А с никелевой крышкой 2, в которую впаяна серебряным припоем коваровая втулка 1, спаянная в свою очередь со стеклом.

Подбирая различные, надежно спаиваемые металлы и сплавы в определенном порядке и соединяя их соответствующими припоями, можно осуществлять самые разнообразные переходы.

Естественно, что в сложных пайках нужно выдерживать правильную последовательность спаев. Так, например, с детали, показанной на рис. 7-14, нужно сначала спаять никелевую крышку с коваровой втулкой, затем напаять стекло на ковар и как последнюю операцию произвести пайку никеля с алюминием.

7-12. ПАЙКА В ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ И НЕЙТРАЛЬНЫХ СРЕДАХ

Пайка в водороде. При нагреве большинства металлов в водороде их окислы восстанавливаются и поверхность деталей приобретает характер, наиболее благоприятный для смачивания припоем и для диффузии металла припоя в поверхностный слой основного металла, так как последний не только очищен от окисных пленок, но и обескислорожен. Этим пользуются для производства одного из самых высококачественных видов твердой пайки — пайки в водороде.

Однако не все металлы и особенно их сплавы могут паяться этим методом. В вакуумной технике метод пайки в водороде наиболее рационален для конструкционной стали, ковара, никеля, бескислородной меди, молибдена.

Совершенно непригодны для какой-либо пайки в во-

дороде сплавы, содержащие цинк, кадмий, фосфор. Нержавеющая сталь типа 18-8 и некоторые другие сплавы с хромом могут быть спаяны только в остроосушенном водороде.

Непригодна для нагрева в водороде и медь, содержащая хотя бы небольшие примеси кислорода, т. е. ма-

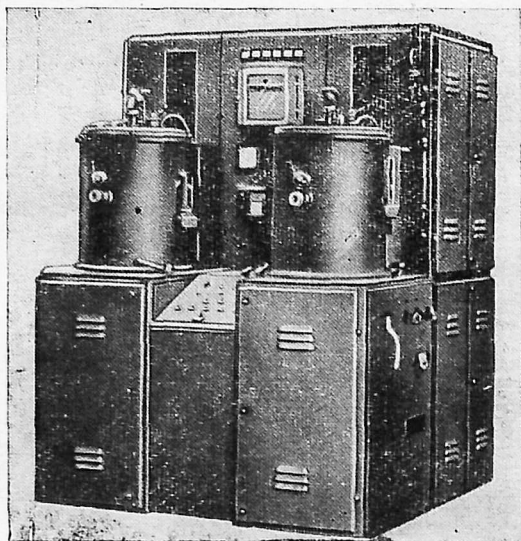


Рис. 7-15. Общий вид водородной печи типа СКБ-7001В.

рок М1, М2, М3. Соединяясь с водородом, кислород образует в толще металла водяные пары, что приводит к растрескиванию меди (так называемая «водородная» болезнь меди).

Припоями для пайки в водороде по большей части служат чистые металлы — медь, серебро или их эвтектический сплав (72% серебра и 28% меди).

Оборудование. Для пайки в водороде может служить любая водородная печь с температурой нагрева не менее 1200 °С.

На рис. 7-15 показана двухколпаковая водородная печь типа СКБ-7001В. Печь снабжена программным регулятором, поддерживающим заданный температурный

режим в течение всего технологического цикла. Благодаря имеющимся в комплекте этой печи эффективным теплообменникам время охлаждения значительно сокращено и печь имеет повышенную производительность. Перемещение колпаков и регулирование температуры автоматизированы. Безопасность эксплуатации печи обеспечивается соответствующими блокировками. Максимальная рабочая температура 1200°C . Размеры рабочего пространства: диаметр — 200, высота — 300 мм. Перед заполнением водородом печь продувается азотом. Расход водорода при полной загрузке печи — $0,7 \text{ м}^3/\text{ч}$. Потребляемая мощность — 27 квт.

Весь процесс пайки после загрузки выполняется автоматически.

При сборке деталей для пайки припой в виде ласты проволочных колец или кусочков фольги требуемого размера укладывается на место шва, и в таком виде детали устанавливаются в рабочее пространство печи на керамических подкладках.

Мелкие детали могут устанавливаться и в 2—3 этажа, обязательно с прокладкой керамики между этажами. В каждом этаже может быть также одна или несколько деталей в зависимости от их размеров. Никаких флюсов в большинстве случаев стараются при этом не применять, так как они сильно загрязняют печь.

После закладки деталей рабочее пространство вместе с нагревательными элементами закрывается тепловыми экранами — цилиндрическим и верхним плоским. В последнем имеется в середине смотровое отверстие, совпадающее со смотровым окошком в центре колпака. Через них ведется наблюдение за ходом пайки. Для контроля одна из деталей устанавливается так, чтобы через смотровое окошко можно было видеть часть спая, или же напротив окошка кладется на деталь пробный кусочек припоя. По его плавлению и растеканию определяется ход пайки.

Колпак перед пуском печи закрепляется на своем месте прижимами. Затем пускается вода охлаждения под давлением в $1 \text{ кгс}/\text{см}^2$. Продувка азотом и заполнение колпака водородом продолжаются около 5 мин. Это необходимо, чтобы полностью вытеснить из колпака воздух.

Нагрев до температуры пайки продолжается от 10 мин до 1,5—2 ч в зависимости от массы деталей и их

материала. В конце нагрева нужно внимательно следить за началом плавления припоя и его растеканием. Выдержка под полным нагревом с момента полного растекания припоя дается для конструкционной стали, кобальта, меди около 5 мин. Затем постепенно, но значительно быстрее, чем при нагревании, идет остывание печи. Водород подается все время до полного остывания деталей. Колпак снимается только тогда, когда детали остынут до 50—60°C. Перед снятием колпака подача водорода прекращается, контрольный факел гаснет, охлаждение выключается.

Рабочее давление водорода зависит от системы его подачи. Для пайки стальных деталей (из конструкционной стали) и кобальтовых, предназначенных для не особенно ответственных спаев со стеклом, можно подавать водород непосредственно из баллона. При этом на редукторе достаточно держать давление в 0,1—0,15 кгс/см². Следует помнить, что редуктор при таких давлениях работает неустойчиво и последовательно с ним необходимо включать второй редуктор.

При производстве ответственных спаев и при пайке нержавеющей сталей водород необходимо предварительно осушить до точки росы не выше —60°C.

Осушителем служит вакуумно-плотный резервуар с несколькими перегородками или концентрическими вкладными цилиндрами, имеющими решетку в разных концах для того, чтобы пропускаемый через осушитель газ совершал удлиненный путь. Резервуар засыпается алюмогелем или силикагелем, интенсивно отнимающими у пропускаемого газа влагу. При наличии осушителя, представляющего большое сопротивление для прохода газа, давление водорода на редукторе в зависимости от типа и размера осушителя приходится держать много выше — часто до 2,0—2,5 кгс/см². Во всех случаях рабочее давление контролируется высотой пламени контрольного факела, которая должна быть в пределах 50—100 мм.

Пайка в водороде нержавеющей сталей и высокохромистых сплавов стандартными серебряными припоями или медью затруднительна, так как весьма стойкие окислы хрома плохо смачиваются этими припоями. Пайка же с флюсами ведет к загрязнению печи и снижению качества спаев или к необходимости частой трудоемкой очистки камеры печи. Поэтому с флюсами можно произ-

водить только отдельные, разовые пайки. Флюсы можно применять те же, что и для пайки на воздухе

Без флюса нержавеющие стали можно паять припоем марки ПЖК-1000 при температуре около 1130°C . Смачивание нержавеющей стали медно-серебряными припоями в водороде можно улучшить добавкой в припой марганца или никеля (4%) или лития (до 0,5%). Нержавеющие стали возможно паять без флюса в аргоне сорта А (ГОСТ 10157-62) припоем ПСр-85-15 (850°C) или припоем марки ВПр (1150°C) или ПЖ-45-81 (1150°C).

В атмосфере очень сухого водорода и в вакууме возможно паять нержавеющие стали без флюса высокотемпературным припоем, содержащим 68% марганца и 32% никеля (1070°C).

Пайка в водороде нержавеющей стали медью без флюса требует, помимо применения хорошо осушенного водорода, также и более высокого нагрева — до 1200°C и более длительной выдержки — до 40 мин при расплавленном припое.

Сначала медь не смачивает нержавеющую сталь, а собирается каплями на отдельных участках шва и создает впечатление невозможности пайки. Однако после длительной выдержки при температуре 1200°C капли расплавленной меди начинают постепенно растекаться вдоль шва, затем сливаются друг с другом, смачивая основной металл и образуя нормальный шов. Для хорошей диффузии припоя в основной металл следует давать выдержку после заполнения расплавленной медью всего шва при той же максимальной температуре еще около 10 мин.

Ковар чрезвычайно чувствителен к малейшим примесям других газов в водороде и даже к малейшему загрязнению стенок печи, жадно поглощает все примеси и дает впоследствии пузыри в спаях со стеклом.

Пайку меди в водороде производят серебром или эвтектическим серебряным припоем.

Водородные печи необходимо содержать в полной чистоте.

Пайка в вакууме. Пайка в вакууме отличается от пайки в водороде более длительной подготовкой рабочего пространства печи и большей сложностью оборудования. С другой стороны, она выгодно отличается от пайки в водороде тем, что в вакууме можно паять и обыч-

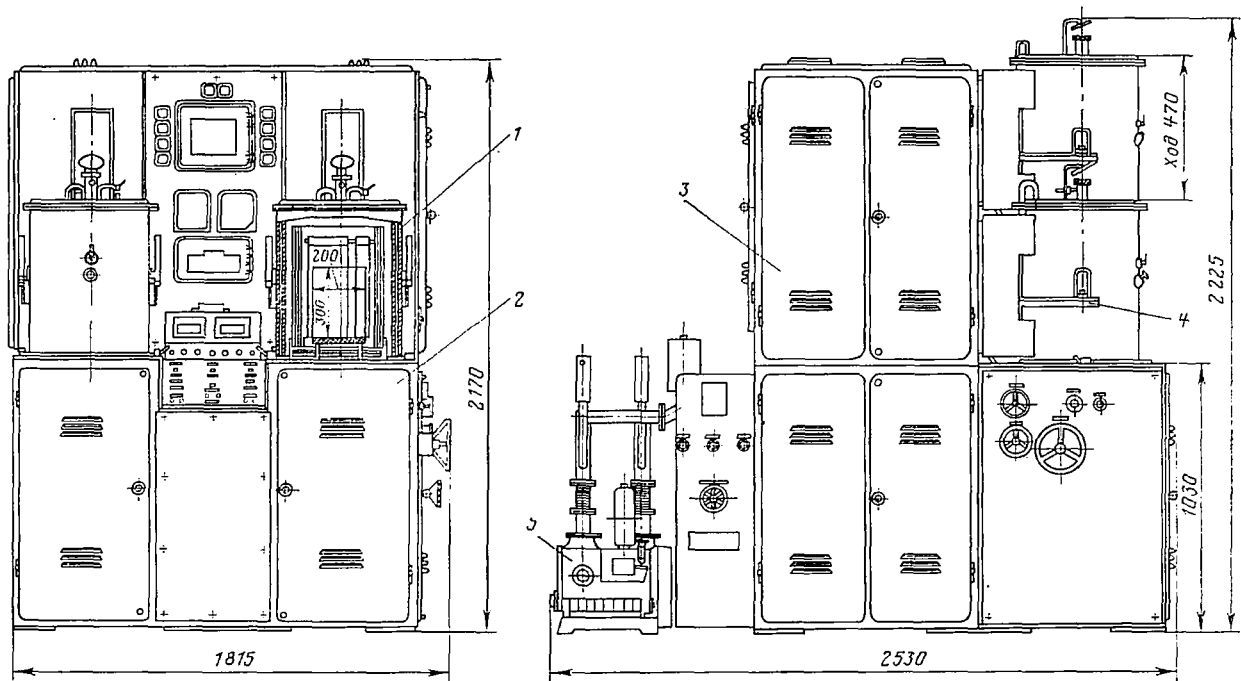


Рис. 7-16. Общий вид печи СГВ-2,3/15Э-М1 (габаритный чертёж).

1 — колпак; 2 — стол; 3 — шкаф управления; 4 — механизм подъёма колпака; 5 — вакуумная система.

новенную медь марок М0, М1, М2 без опасения растрескивания материала. Остальные поделочные материалы ведут себя при пайке в вакууме так же, как и при пайке в водороде. Припоями здесь также могут служить чистая медь, серебро или эвтектический серебряный припой, припой ВПр-4.

Для пайки нержавеющей стали медью и серебряными припоями в вакууме требуется большая выдержка при температуре 1 200 °С.

В вакууме можно паять нержавеющие стали и жаропрочные сплавы припоем ВПр4, содержащим 28% Мп, 28% Ni, 5% Co, 1% Si, 1% Fe, 0,2% В и небольшие количества (0,1—0,2%) Na, Li, К и Р, выполняющие роль флюса. Пайка ведется при температуре 1 000—1 050 °С (температура плавления припоя 940—980 °С).

Пайка может производиться не только в вакууме, но и в инертных газах, а с быстрым нагревом токами высокой частоты — на воздухе.

На рис. 7-16 показана одна из выпускаемых промышленностью вакуумных печей — двухколпаковая печь типа СГВ-2,3/15Э—М1 (СКБ-7019Б). Печь состоит из рабочих колпаков, вакуумного блока, шкафа управления, механизма подъема колпаков, трансформатора. Нагреватели — молибденовые, теплоизоляция — экранная. Каждый колпак имеет сверху и сбоку смотровые глазки для наблюдения за ходом процесса.

Вакуумная система печи, показанная на схеме рис. 7-17, состоит из двух механических вакуумных насосов ВН-2МГ, двух паромасляных диффузионных насосов Н5С-М1, двух азотных ловушек, двух вакуумных вентилях $D_v = 160$ мм и трубопроводов с вакуумными вентилями, обеспечивающих возможность откачки рабочих камер до заданного давления $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Печь снабжена программированным управлением тепловым процессом с регулируемым нагревом.

Максимальная рабочая температура в этой печи достигает 1 500 °С при затрате мощности на нагрев камеры 24 квт, при общей установочной мощности в 55 квт. Рабочее пространство под колпаком имеет диаметр 200 мм и высоту 300 мм. Напряжение на нагревателе до 12 в, напряжение питающей сети — 380 в.

Для пайки более крупных деталей и узлов промышленность выпускает вакуумно-водородные печи типов ОКБ-8085 и ОКБ-8086. Их габаритный чертеж показан

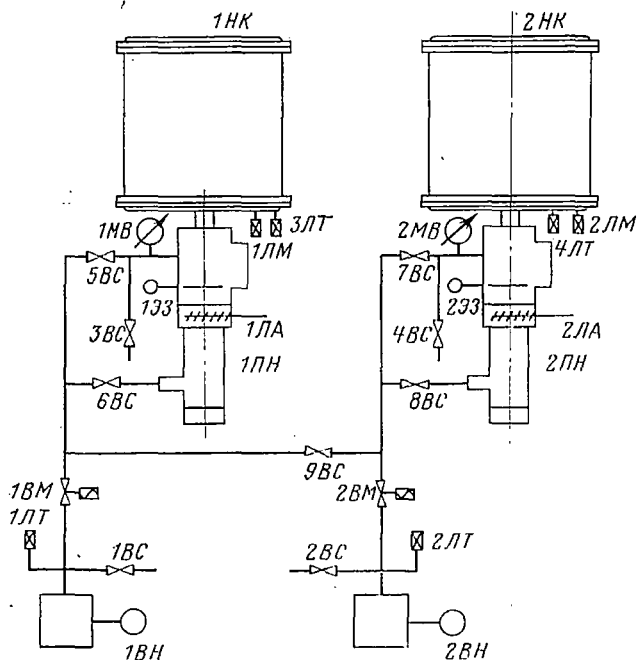


Рис. 7-17. Схема вакуумной системы электропечи СГВ-2,3/15Э-М1.

1HK, 2HK — нагревательные колпаки; 1ВН, 2ВН — вакуумные насосы ВН-2МГ; 1ПН, 2ПН — паромасляные насосы Н5С-М1; 1ЛА, 2ЛА — азотные ловушки; 1ЭЗ, 2ЭЗ — вакуумные затворы, $D_y=160$; 1МВ, 2МВ — мановакуумметры ЭКМ; 1ВМ, 2ВМ — вакуумные вентили с электромагнитным приводом; 5ВС, 9ВС — сильфонные вакуумные вентили, $D_y=50$; 1ВС, 4ВС — вакуумные вентили, $D_y=25$; 1ЛТ—4ЛТ — терморпные лампы ЛТ-2; 1ЛМ, 2ЛМ — манометрические лампы ЛМ-2.

на рис. 7-18, а техническая характеристика приведена в табл. 7-6. Печи эти одноколпаковые, причем колпак не поднимается, а опускается для загрузки под печи; смонтирован на двух подъемных винтах, работающих от электромеханического привода.

Вакуумная система состоит из двух механических вакуумных насосов ВН-1МГ и одного паромасляного диффузионного агрегата ВА-5-4ПР с азотной ловушкой и вакуумным вентилем.

Колпак печи сверху закрыт крышкой с аварийным взрывным клапаном на случай взрыва гремучей смеси. Клапан срабатывает при внутреннем давлении 2 кгс/см^2 .

Печь снабжена системой газонаполнения, состоящей

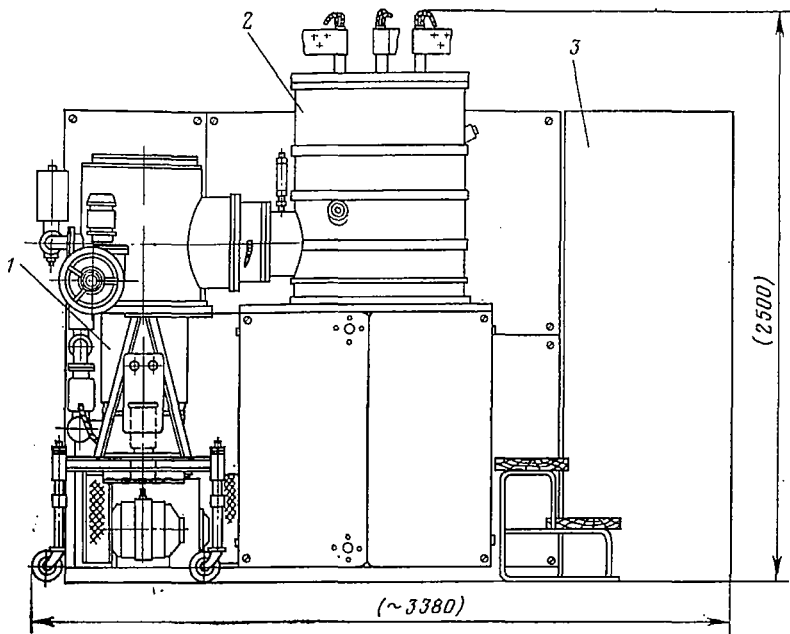


Рис. 7-18. Общий вид электропечей ОКБ-8085 и ОКБ-8086 (габаритный чертеж).

1 — вакуумная система; 2 — камера нагрева; 3 — силовой блок.

из блока газораспределения и высоковакуумных вентиляторов. Перед наполнением рабочей камеры водородом (при использовании печи в качестве водородной установки) производится продувка ее азотом. Система газонаполнения позволяет производить работу как с постоянной поддувкой водорода (проточный режим), так и при закрытом рабочем пространстве с постоянным подпором газа.

Вакуумные печи служат не только для пайки, но и для высококачественного отжига некоторых металлов перед их обработкой, а также металлических, графитовых деталей перед их сборкой и металлических деталей перед пайкой со стеклом или керамикой.

Пайка с нагревом токами высокой частоты. Беспламенный быстрый нагрев строго определенной зоны изделия токами высокой частоты при пайке деталей представляет для вакуумной техники чрезвычайно большой интерес.

Характеристика вакуумно-водородных печей

| Характеристика | Печь ОКВ-8085 | Печь ОКВ-8086 |
|---|--------------------|--------------------|
| Потребляемая мощность, <i>квт</i> | 103 | 103 |
| Напряжение питания, <i>в</i> | 380/220 с нулем | 380/220 с нулем |
| Давление, <i>кгс/см²</i> : | | |
| воды | 4—5 | 4—5 |
| водорода | 1,1 | 1,1 |
| азота | 1,1 | 1,1 |
| Расход на цикл, <i>м³</i> : | | |
| водорода | 1,8 | 1,8 |
| азота | 1,8 | 1,8 |
| Расход воды, <i>м³/ч</i> | 4 | 4 |
| Длительность цикла, <i>ч</i> | | |
| при работе на водороде | 2,5 | 2,5 |
| при работе в вакууме | 5 | 5 |
| Максимальная допустимая температура рабочей зоны, <i>°С</i> : | | |
| при водороде | 1 100 | 1 600 |
| при вакууме | 1 300 | 1 700 |
| Рабочая температура, <i>°С</i> : | | |
| при водороде | 900 | 1 400 |
| при вакууме | 1 100 | 1 600 |
| Предельный вакуум в холодной печи, <i>мм рт. ст.</i> | $2 \cdot 10^{-5}$ | $2 \cdot 10^{-5}$ |
| Масса садки, <i>кг</i> | 80 | 20 |
| Размеры рабочего пространства, <i>мм</i> : | | |
| диаметр | 470 | 310 |
| высота | 790 | 690 |
| Габариты печи, <i>мм</i> : | | |
| длина | 3 380 | 3 380 |
| ширина | 2 217 | 2 217 |
| высота | 2 500 | 2 500 |

Метод этот имеет ряд преимуществ перед всеми остальными способами нагрева деталей. Именно нагрев токами высокой частоты позволит технологу обеспечить высококачественную пайку различных металлов разными припоями.

Пайку с нагревом токами высокой частоты можно производить как в атмосфере воздуха, так и в вакууме или в восстановительной атмосфере водорода, или в защитной атмосфере инертного газа, и, наконец, в смешанной атмосфере (например, формиригазе, представляющем собой смесь 95% азота и 5% водорода).

Пайка с нагревом токами высокой частоты по характеру нагрева приближается к сварке деталей и особенно к газодуговой сварке. Следует, однако, иметь в виду, что такая пайка выгодна для небольших деталей и особенно в серийном производстве. Для крупных деталей необходимы были бы очень мощные генераторы, и здесь выгоднее сваривать, а не паять.

На рис. 7-19 показан чертеж общего вида вакуумной

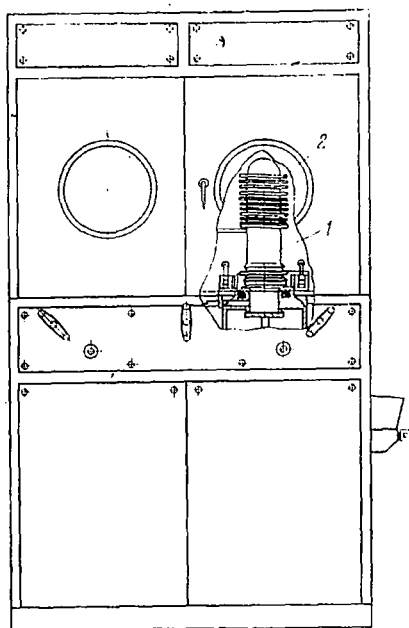


Рис. 7-19. Вакуумная печь с ВЧ нагревом.

1 — кварцевый колпак; 2 — индуктор.

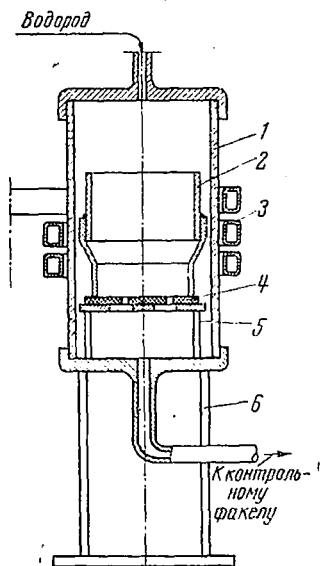


Рис. 7-20. Пайка в водороде с нагревом токами высокой частоты в кварцевой трубе.

1 — кварцевая труба; 2 — изделие; 3 — индуктор; 4 — керамическая подкладка; 5 — столжик; 6 — стойка.

установки с ВЧ-нагревом, предназначенной для отжига и пайки небольших деталей. Установка имеет два рабочих места, на которые устанавливаются стеклянные или кварцевые колпаки 1. Диаметр колпаков 75—80, а высота около 250 мм. Нагрев деталей, помещенных под колпаки, осуществляется одним внешним индуктором 2.

Максимальная температура нагрева деталей (при использовании стеклянных колпаков) достигает 1200°C .

Откачка рабочего колпака до давления $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. осуществляется последовательно, вначале механическим вакуумным насосом с защитной сорбционной ловушкой, а затем магниторазрядным насосом. При обильном газовыделении может быть включен дополнительный титановый сублимационный насос. Максимальная электрическая мощность, потребляемая установкой, составляет 30 квт.

Возможно также производить пайку в восстановительной (например, формиргаз) или инертной среде, пользуясь кварцевой трубой как упрощенной печной камерой (рис. 7-20). Через трубу с небольшими скоростями продувается газ, в струе которого и производится пайка. Индуктор охватывает трубу снаружи, но при необходимости может помещаться и вместе с паяемым изделием внутри трубы. Этот способ пайки весьма универсален, так как в трубе в отличие от закрытой камеры можно паять с флюсом не боясь загрязнения печи, и производительность здесь может быть очень высокой. Методом пайки с нагревом токами высокой частоты можно получать спай, не достижимые при других способах нагрева. Так, например, удается уверенно получить вакуумные спай кобальта или другого металла с алюминием через слой серебра или серебряного припоя. Для этого кобальтовую деталь серебрят гальваническим способом или покрывают серебряным припоем марки ПСр-70 или эвтектическим, смазывают флюсом 34-А, разведенным в спирте, и плотно вставляют в заточку алюминиевой детали на глубину не менее 5 мм. Нагрев производится индуктором, подобранным по кобальтовой детали и охватывающим ее у самого соединения с алюминием, но без захвата алюминия. Пайку можно вести на воздухе, а еще лучше в инертной среде (в аргоне или гелии). Кобальтовая деталь нагревается до светловишневого цвета. Нагрев выключается сразу при появлении первых признаков оплавления крошки алюминия. Толщина алюминиевой стенки в месте спая должна быть не менее 1,5 мм. После пайки детали должны быть обязательно протравлены, как и при обычной пайке алюминия.

Следует помнить, что для пайки с нагревом токами высокой частоты флюсы, в том числе и флюс 34-А для пайки алюминия, необходимо замешивать в виде каши-

цы на спирту. Флюсы, замешанные на воде, при данном методе пайки негодны, так как при весьма быстром нагреве, что характерно и ценно в этом методе, вода бурно вскипает и разбрасывает флюс, давая в результате пористый шов. Флюс накладывается на место спая предварительно в количестве значительно меньшем, чем при нагреве пламенем горелок.

7-13. ПАЙКА ТИТАНА

Титан — химически активный металл, и пайка его имеет ряд особенностей.

При температурах пайки на воздухе твердыми припоями титан покрывается слоем окисла, препятствующего смачиванию припоями. Кроме того, образуются и нитриды (с азотом воздуха).

Большинство стандартных припоев вызывает при пайке титана образование хрупких интерметаллических соединений.

Стандартные флюсы также не применимы для пайки титана, так как большинство из них образует с титаном химические соединения, которые служат помехой для пайки.

Эти особенности определяют условия, обязательные для качественной пайки титана: быстрый нагрев; припой, не содержащий составных частей, образующих хрупкие соединения с титаном; особо тщательная защита титана от кислорода и азота воздуха; применение специальных флюсов; пайка в защитной газовой среде высокой чистоты; лужение деталей перед пайкой; пайка в вакууме.

Пайку титана лучше всего вести при нагреве токами высокой частоты в высоком вакууме при давлении не выше 10^{-5} мм рт. ст. или в аргоне высшей очистки (сорт А).

В случае пайки в вакууме печь не должна загрязняться продуктами распада рабочих жидкостей насосов (лучшие результаты дает применение безмаслянных средств откачки), а в случае пайки в аргоне камера печи должна не продуваться аргоном, а предварительно откачиваться механическим вакуумным насосом по крайней мере до давления 10^{-2} мм рт. ст., а затем заполняться аргоном. Это необходимо во избежание перемешивания аргона с остатками воздуха: титан при высоких температурах столь интенсивно соединяется с кислородом и

азотом, что его применяют как насадку в очистительных устройствах для наивысшей очистки аргона и гелия.

При пайке на воздухе нагрев должен быть также насколько возможно быстрым, а в качестве защиты от окисления применяются специальные флюсы, состав которых приведен в табл. 7-7 [Л. 36].

Если нет возможности вести нагрев токами высокой частоты, то следует применять кислородо-ацетиленовое

Таблица 7-7

Химический состав флюсов для пайки титана, массовая концентрация, %

| Номер флюса | LiCl | AgCl | KCl | LiF | NaF | NaCl | MgCl ₂ | CuCl | KHF ₂ | SrCl | KF |
|-------------|------|------|-----|-----|-----|------|-------------------|------|------------------|------|----|
| 1 | — | 10 | 36 | 9 | — | 45 | — | — | — | — | — |
| 2 | — | — | — | 22 | — | 48 | 30 | — | — | — | — |
| 3 | 50 | — | — | — | 2 | — | — | 1 | — | 1 | 46 |
| 4 | 2 | 6 | 46 | 48 | — | — | — | — | — | — | — |
| 5 | — | — | 33 | 30 | — | — | — | — | 37 | — | — |
| 6 | 22 | — | — | — | — | 48 | 30 | — | — | — | — |

пламя или аргоно-дуговую горелку с вольфрамовым электродом. При этом рекомендуются флюсы № 1, 3, 5 и 6. Флюсы, указанные в табл. 7-6, применяются и при пайке в аргоне или гелии, если используют газы не очень высокой чистоты.

Пайка титана мягкими припоями производится после лужения оловом путем прогрева металла под слоем хлористого олова при 400°C. При этом обильно выделяется белый дым (TiCl₄), так что эту операцию необходимо производить в вытяжном шкафу. Вторым методом лужения титана является погружение его в расплавленное олово при температуре 620°C не менее чем на 15 мин.

Обязательным условием для всех видов пайки служит предварительная механическая или химическая очистка поверхности титана от окислов и нитридов, которая производится непосредственно перед пайкой или лужением.

ПАЙКА МЕТАЛЛОВ СО СТЕКЛОМ И КЕРАМИКОЙ

8-1. ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМНО-ПЛОТНОГО СПАЯ

Получение вакуумно-плотного спая двух металлов, которые являются кристаллическими веществами, более или менее близкими (в большинстве случаев) по температурам плавления, требует соблюдения ряда обязательных условий и высокой квалификации рабочего. Тем более вакуумно-плотная пайка металла со стеклом или с керамикой, резко отличающимися от металла структурой, тепловыми свойствами, химическим составом и механическими свойствами, требует особого внимания и неуклонного соблюдения ряда технологических требований.

При высокой температуре стекло пластично, а при остывании становится хрупким. Поэтому для возможности спаивания стекла с металлом важно, чтобы стекло и металл имели близкие тепловые свойства. Иначе стекло при остывании спая как материал менее прочный, будучи деформируемо спаянным с ним металлом, не выдерживает возникающих в спае напряжений и растрескивается или отделяется от металла.

Спаи металла и стекла с равными или очень близкими температурными коэффициентами линейного расширения называются согласованными и являются наиболее надежными. Спаи, в которых металл и стекло значительно различаются по тепловым свойствам, называются напряженными или несогласованными. В конструкциях согласованных спаев нет надобности прибегать к особым ухищрениям, чтобы сохранить их целостность при остывании и в дальнейшей их работе.

Несогласованные надежные спаи возможно осуществить только в том случае, если металлическая часть соединения задумана и выполнена так, что она без опасных для стекла напряжений будет поддаваться тем деформациям, которые будет претерпевать стеклянная часть в результате остывания или нагрева.

Большая часть сортов технического стекла имеет температурный коэффициент линейного расширения в пре-

делах от $3 \cdot 10^{-6}$ до $10 \cdot 10^{-6}$ мм/(мм·°С). Для стекла этот коэффициент закономерно зависит от химического состава и может быть вычислен исходя из температурных коэффициентов линейного расширения входящих в состав стекла окислов и их относительного количества.

Температурный коэффициент линейного расширения стекла с повышением температуры возрастает. При этом он сначала растет медленно, а в области 450—550°С кривая роста имеет для большинства сортов резкий перелом кверху. Поэтому нужно обращать внимание на то, к какой температуре относится данное значение коэффициента.

Стекло способно принимать закалку, т. е. переходить в напряженное состояние при быстром охлаждении. Эти температурные напряжения в стекле остаются и после окончательного остывания и нередко служат причиной растрескивания его при самых незначительных внешних воздействиях и даже, на первый взгляд, без видимых причин.

При медленном охлаждении затвердевшего стекла в определенных режимах остывания или при повторном нагревании до 450—550°С с последующим медленным охлаждением явления закали, т. е. термические напряжения, снимаются и стекло приобретает нормальные механические свойства.

Присутствие в стекле температурных напряжений можно определить при помощи полярископа — прибора, действующего по принципу использования явления двойного лучепреломления в напряженном стекле.

Многое из этого можно сказать и о спаях металла с керамикой, за исключением закали, способность к которой у керамики, по-видимому, выражена менее отчетливо и не может определяться с помощью полярископа.

Вакуумная плотность спаев металла со стеклом зависит также от состояния поверхности металла и степени насыщенности его газами или содержания в нем элементов, способных образовывать газ в процессе пайки со стеклом или при остывании спая.

Существует несколько гипотез, по-разному толкующих природу спайвания металла со стеклом [Л. 37]. На наш взгляд, наибольшей убедительностью обладает окисная гипотеза. Стекло представляет собой сплав окислов различных металлов, и нам кажется весьма вероят-

ным, что именно с окисной пленкой на поверхности металла оно сцепляется наиболее прочно и плотно.

Для получения надежных вакуумно-плотных спаев обычно необходимо, чтобы металл был покрыт тонким и ровным слоем плотного окисла.

Если металл покрыт рыхлыми окислами, хотя бы и местами, то сколько-нибудь надежного спая получить нельзя. Некоторые случаи безокисного спаивания металла со стеклом, как, например, пайка в вакууме, в действительности, вероятно, все же являются пайкой по окислу, так как давления диссоциации окислов большинства металлов при температурах пайки со стеклом лежат далеко за пределами давлений в вакуумной печи и за время пайки вряд ли возможно приведение поверхности металла за счет диссоциации в абсолютно чистое от окиси состояние. А растворение окисла, которым обычно объясняется очистка поверхности металла при прогреве в вакууме, может идти в момент пайки безрезультатно, так как вместо растворившейся пленки окисла может возникнуть новая за счет кислорода, выделенного из стекла.

При температуре пайки стекло в вакууме выделяет значительное количество H_2O в виде пара, часть которого должна диссоциировать на поверхности металла и вновь образовывать окисную пленку.

Насыщенность металла (а также и стекла) газами выше некоторого предела вызывает появление в спае большого количества мелких пузырьков, могущих не только снизить механическую его прочность, но и вызвать появление трещин или свищей.

Условия вакуумно-плотной пайки металла с керамикой изучены мало и зависят, вероятно, от многих причин.

В отличие от аморфного стекла керамика имеет зернистую структуру. Температура плавления керамики обычно более высокая, чем у спаиваемого с нею металла. При пайке керамика не размягчается и не обволакивает металл, как это делает стекло. Керамика может спаиваться с металлом только при помощи припоя, как и металл с металлом. Керамика в обожженном виде имеет стекловидные компоненты; судя по тому, что многие спай керамики с металлом после многократных прогревов теряют вакуумную плотность, можно предположить, что часто эти компоненты находятся в относитель-

Но при этом теле и в случае их видоизменений в пограничном слое плотность спая может нарушиться.

Следовательно, для получения надежного вакуумно-плотного спая керамика должна иметь однородную плотную структуру, как на поверхности, так и в глубине или же метод пайки должен быть таким, при котором припой проникает на некоторую глубину в толщу керамики, уплотняя ее. При этом припой не должен в дальнейшем претерпевать изменений, делающих соединение газопроницаемым.

8-2. ПОДГОТОВКА МЕТАЛЛА ДЛЯ ПАЙКИ СО СТЕКЛОМ

Для получения качественного спая металла со стеклом чрезвычайно важна правильная подготовка металлических деталей. При этом разные металлы требуют разной подготовки.

Коваровые детали перед пайкой со стеклом отжигаются в осушенном водороде или в вакууме при температуре 1000—1150 °С с медленным нагревом, выдержкой при указанной температуре в течение 10—20 мин и последующим медленным охлаждением примерно в течение 1 ч. Для отжига применяются водородные или вакуумные печи любой конструкции.

Водород для отжига кобальта лучше всего пропускать через осушитель с алюмогелем или силикагелем.

Баллоны со сжатым водородом имеют обычно большое количество конденсата. Перед началом пуска газа в печь необходимо спустить из баллона конденсат, перевернув баллон (вне здания) и дав конденсату стечь вниз в течение 10 мин, а затем осторожно приоткрыть ключом вентиль баллона. Количество конденсата иногда достигает 4 л. Давление водорода под колпаком печи регулируется по величине контрольного факела, как и для пайки в водороде.

Для качественного отжига необходимо, чтобы рабочая камера печи была совершенно чистой. Особенно важно, чтобы под колпаком ни откуда не выделялась углекислота, так как ковар ее поглощает, а металлостеклянные спая особенно чувствительные к ее присутствию в металле.

Медные трубчатые детали могут быть спаяны со стеклом как в окисленном виде (до появления равномерного слоя красной закиси меди), так и остеклованные в пла-

мени горелки бурой. При окислении меди необходимо внимательно следить за тем, чтобы на ней не появилась черная окись меди. Она образуется при недостаточной температуре окисления (ниже 750°C). Красная пленка закиси меди образуется при быстром нагреве меди выше 750°C на воздухе и при дальнейшем охлаждении ее без доступа воздуха или кислорода. Выгоднее всего операцию окисления производить во время пайки как первый ее этап. Тогда охлаждение меди в месте спая будет происходить уже под слоем стекла.

Для остеклования бурой медные детали смачиваются горячим (70°) водным раствором буры, который затем спекается в печи при 700°C за 5—10 мин. Медь предварительно обезжиривается, травится и слегка окисляется (при 350°C).

Молибден лучше спаивать со стеклом в очищенном виде после отжига в водороде при температуре 1100°C . Образование необходимой для спаивания со стеклом тонкой окисной пленки коричневого цвета происходит в процессе пайки.

Малоуглеродистая сталь в пламени горелки быстро покрывается рыхлыми окислами, непригодными для пайки. Тонкая черная, плотно соединенная с металлом окисная пленка образуется только при умелом окислении в слабоокислительном пламени. Пайку с подготовленной таким образом сталью нужно вести в защитной, инертной газовой среде.

Часто прибегают к гальваническому покрытию стали тонким слоем серебра или меди, который затем сплавляется с основным металлом в инертной среде, а во время пайки окисляется и хорошо спаивается со стеклом. Другой метод заключается в предварительном термодиффузном хромировании стали с последующим окислением хрома во время пайки.

Хорошая спаиваемость окислов хрома со стеклом определяет широкое применение в этих спаях высокохромистой стали (марки X18ТФМ и др.). Окисление ее рекомендуется проводить в среде влажного водорода до появления пленки зеленого цвета, который должен сохраняться и в готовом спае. Черная окисная пленка как и на меди, говорит о переокислении и служит признаком брака.

Титан подготавливается к пайке со стеклом нагревом на воздухе до температуры 1100°C в течение не более

5 мин с последующей зачисткой наждачной шкуркой, промывкой в горячей воде и легким окислением в пламени горелки. Образующаяся при этом наружная пленка особо активно сплавляется с легкоплавкими стеклами.

8-3. ОКОШЕЧНЫЕ СПАИ

Рассмотрим спай нескольких наиболее широко применяемых в вакуумной аппаратуре видов. Для наблюдения за всевозможными операциями, производимыми внутри вакуумных аппаратов, необходимы смотровые окна. В непрогриваемых аппаратах они делаются на резиновых уплотнениях. В прогреваемых системах их стекла приходится впаивать в металлические оправы.

Подходящие для этой цели окошечные спаи показаны на рис. 8-1 [Л. 37.] Спаи конструкции на рис. 8-1,а

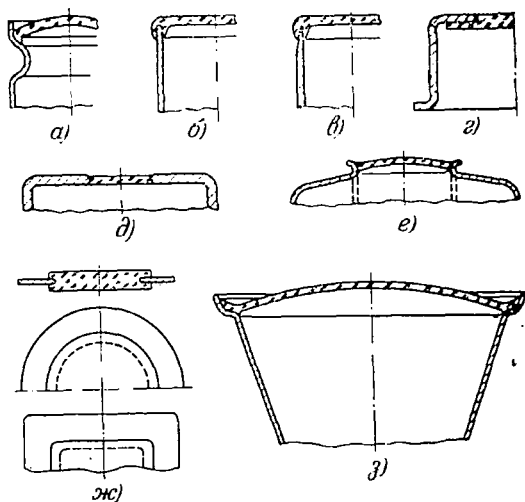


Рис. 8-1. Конструкция окошечных спаев.

е и з пригодны для более крупных окон. Спаи конструкции на рис. 8-1,б, в, г и д рекомендуются для окон малого диаметра. Спаи конструкции на рис. 8-1,ж предназначены для окон прямоугольного очертания. Такие спаи в основном должны быть согласованными, так как размеры их довольно значительны и разница в температурных коэффициентах линейного расширения здесь сказывается особенно резко.

Для высокотемпературного прогрева в работе пригодны только конструкции на рис. 8-1, а, е и з, так как плоские стекла при температуре свыше 350°C не обладают необходимой прочностью. Спай с выпуклыми стеклами производится в соответствии с технологией спаивания экранов кинескопов с одновременным прогревом по всей окружности на многогорелочном станке (рис. 8-2) [Л. 37] с легким поддувом снизу. После спайки окна, впаянные в оправу из стали Х18ТФМ, проходят сложную термообработку. После загрузки в печь при 600°C

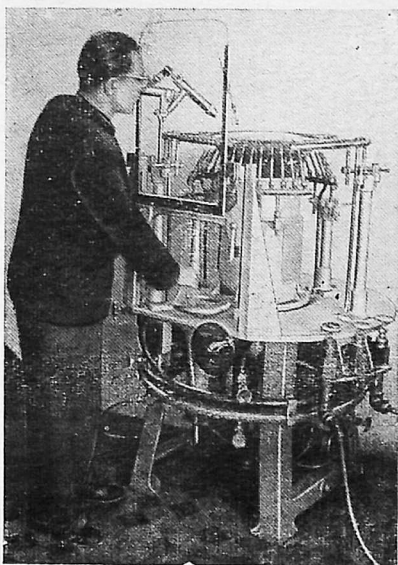


Рис. 8-2. Станок для впаивания экранов в металлические колбы.

изделие охлаждается за 15—20 мин до 525°C и при этой температуре выдерживается 15 мин. Затем идет дальнейшее равномерное охлаждение до 400°C в течение 45—50 мин. При температуре 400°C изделие вынимается из печи и помещается для окончательного медленного охлаждения под горячий металлический колпак, изолированный от атмосферы асбестом и стоящий на асбестовой подстилке.

Уместно заметить, что в качестве смотровых окон для прогреваемой установки с успехом могут быть использованы экраны электронно-лучевых трубок металлоглазной конструкции в их металлической оправе, обрезанной на нужную длину.

8-4. ТРУБЧАТЫЕ СПАИ

Для целого ряда вводов в вакуумные установки приходится спаивать стеклянные трубки с металлическими (рис. 8-3).

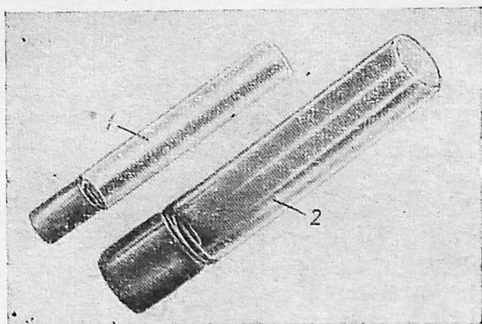


Рис. 8-3. Трубочатые спай стекла с металлом.

1 — спай с коваром; 2 — спай с медью.

Такие спай разделяются на так называемые согласованные рантовые спай и лезвенные спай (несогласованные рантовые). Последние получили свое наименование от заточенной в виде лезвия кромки металла,

входящей в спай и обеспечивающей необходимую податливость металла.

Наиболее технологичные согласованные рантовые спай показаны на рис. 8-4. Такие спай лучше всего выполнять при нагреве токами высокой частоты (индукционный нагрев), но их возможно выполнять и на газовых горелках вручную и на станках с газопламенным нагревом.

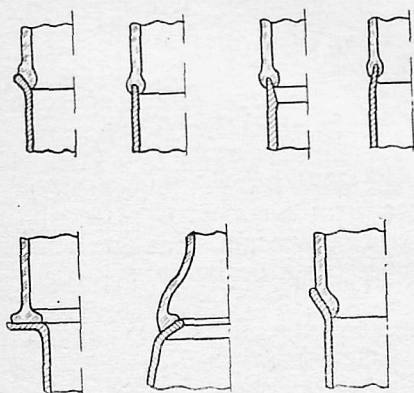


Рис. 8-4. Рантовые спай.

При индукционном нагреве индуктор должен располагаться на линии будущего спая [Л. 37], зазоры между нагреваемым изделием и индуктором обычно составляют 5—10 мм не более. Конструкция и число витков индуктора подбираются в зависимости от материала, формы и размера изделия.

Для пайки мелких узлов обычно применяются простые штативные станки, один из которых показан на рис. 8-5 и 8-6. Для соединений больших размеров используются более сложные станки, вплоть до многопозиционных автоматов. Это оборудование широко применяется в электровакуумном производстве.

Теми же методами осуществляются и лезвенные спаи, показанные на рис. 8-7 [Л. 37].

Двусторонние швы (рис. 8-7,а, б) требуют подбора размеров металлической заготовки и стеклянной трубки

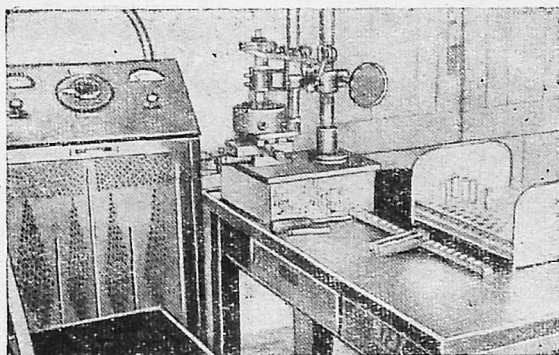


Рис. 8-5. Станок для трубчатых соединений стекла с металлом с нагревом током высокой частоты. Общий вид.

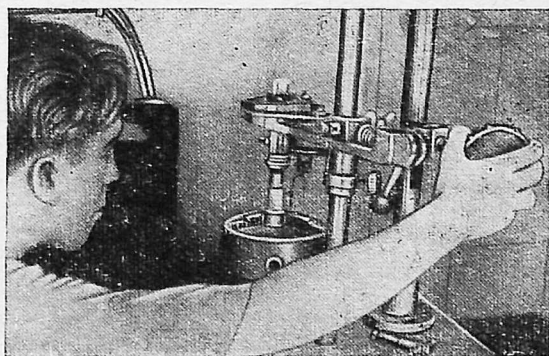
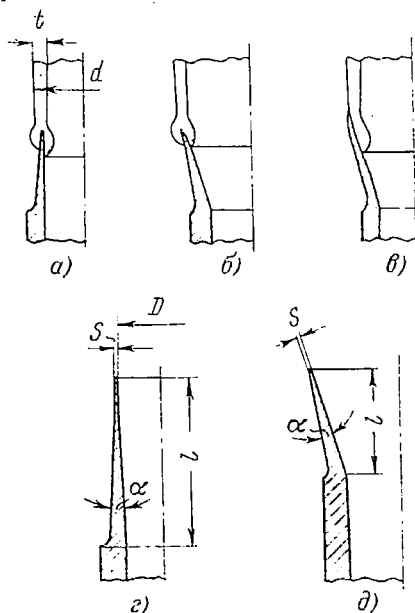


Рис. 8-6. Рабочая головка станка.

Исходя из соотношения

$$d = D + (0,6 \div 0,8)t,$$

так как внутренний наплыв должен быть длиннее на 1—3 мм и массивнее наружного во избежание отлипания металла. Дело в том, что лезвиевыми спаями пользуются главным образом для пайки стекла с медью, т. е. там, где тепловое расширение металла значительно больше, чем у стекла. Поэтому при остывании лезвия, изгибающегося вокруг края внутреннего наплыва, оно может отстать от внешнего, если наплывы равны.



Спай конструкции на рис. 8-7, в осуществляется с металлической трубкой, раскатанной, как показано на рис. 8-7, д. На рис. 8-7, г показана заготовка трубки для прямого спая (рис. 8-7, а).

Спай конструкции на рис. 8-7, в осуществляется с металлической трубкой, раскатанной, как показано на рис. 8-7, д. На рис. 8-7, г показана заготовка трубки для прямого спая (рис. 8-7, а).

Рис. 8-7. Лезвиевые спай.

Длина лезвия в зависимости от диаметра должна составлять:

| Диаметр D , мм | Длина l , мм |
|------------------|--------------------|
| До 10 | $(1,5 \div 1,8) D$ |
| 10—15 | $(1,0 \div 1,5) D$ |
| 15—25 | $(0,8 \div 1,0) D$ |
| 25—60 | $(0,5 \div 0,8) D$ |
| Свыше 60 | $(0,3 \div 0,5) D$ |

Угол заострения лезвия α должен быть равен 2—3°, а толщина кромки не более 0,2 мм (желательно доводить ее до 0,1 мм). Заострение лезвия производится на токарном станке или методом давления из точеной заготовки. Однако последним методом можно пользоваться лишь при наличии давилыщика высокой квалификации, так как при неумелом давлении деталей столь ма-

лой толщины есть опасность расслоения металла и образования свищей или кольцевых трещин.

Перед пайкой двусторонним швом торец стеклянного цилиндра необходимо подшлифовывать, иначе шов может оказаться неравномерным и невакуумно-плотным.

Разновидностью лезвенных спаев являются по существу так называемые сжатые спай, в которых лезвие делается с более толстой (до 0,5 мм) кромкой, а шов выполняется более длинным и только внутренним. Таким образом, в них стекло оказывается сжатым в металлической оправе, т. е. работает в наиболее выгодных для него условиях.

8-5. ТЕХНИКА ПАЙКИ

При осуществлении стержневых впаев металла в стекло (электрических вводов) металлический стержень предварительно обматывается стеклом, т. е. на него напаяется слой стекла, либо путем обматывания стеклянным прутом при температуре сильного размягчения стекла (обычно 700—900 °С) и сплавления намотанного стекла в ровный слой, либо путем надевания на металл при такой же температуре стеклянной трубки и последующего ее спаивания с металлом. Остеклованные таким образом металлические стержни затем впаиваются в стекло (рис. 8-8). Иногда на остеклованный стержень напаяется стекло в виде местного утолщения стеклянного слоя («слезка»), а затем это утолщение впаивается в металлическую трубку, шайбу или листон, которые в свою очередь впаиваются либо ввариваются в различные металлические узлы или же вставляются в грибковые уплотнения.

При спаивании трубчатых и окошечных спаев металлическая деталь нагревается возле места спая сильнее, чем стекло. При температуре сильного размягчения стекла (для меди и кобальта 800—900 °С, а для высокохро-

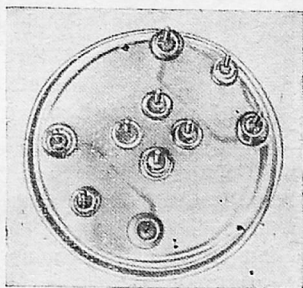


Рис. 8-8. Металлические вводы, впаянные в стеклянную тарелку.

Мистой стали до 1200°C) делается посадка стекла на кромку металла или металлической детали в стекло в зависимости от их размеров и формы с легким нажимом, обеспечивающим необходимое утапливание металла в стекло.

Для трубчатых спаев меди со стеклом двусторонним швом лучше сначала остекловать медный переходник по

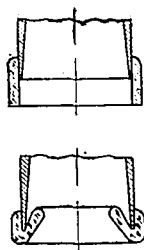


Рис. 8-9. Схема остеклования лезвия.

его конусу. Нагрев пламенем производится в более толстой части переходника. Нагретый переходник сначала вставляют в стеклянную трубку на длину шва, затем отрезают конец трубки так, чтобы свободного стекла за кромкой лезвия оставалось на 3—5 мм больше, чем надето на лезвие, а потом сильно размягченное свободное стекло (рис. 8-9) завертывается внутрь лезвия и оправками прижимается к металлу до надежного спаивания.

Нагрев в пламени горелки и спаивание следует производить при непрерывном вращении деталей для достижения равномерного прогрева. После посадки необходимо выдерживать некоторое время детали неподвижно относительно друг друга с постепенным уменьшением нагрева до температуры отвердевания стекла.

Во время пайки от стеклодува требуется большая осторожность, так как нередко нагрев тонких кромок металлических деталей вследствие наличия посторонних включений или волосных трещин становится неравномерным, появляются отдельные яркие перегретые точки, в которых может произойти выплавление или прогорание металла.

Все кромки металла, идущие в спай, не должны иметь острых углов, а должны обязательно скругляться и иметь плавные переходные линии. Даже лезвия, насколько позволяет их малая толщина, должны скругляться.

Чистота обработки кромок металла под пайку должна быть не хуже $\nabla 7$. При этом необходимо избегать полировки с пастами или обработки наждачной шкуркой, заменяя ее при чистовой отделке стеклянной бумагой или стеклянным полотном.

После пайки производится медленное охлаждение спая в печи или в специальных приспособлениях.

Следует подчеркнуть, что путем правильного подбора скорости и порядка охлаждения металла и стекла, иногда умышленно неравномерного, можно получить спай с весьма малыми температурными напряжениями, особенно в спаях ковара со стеклом. С другой стороны, при непродуманном режиме охлаждения можно получить сплошной брак даже в самых лучших конструкциях и при вполне подходящих материалах.

Дать определенные рецепты охлаждения в кратком наставлении нельзя из-за чрезвычайного разнообразия конструкций спаев, сортов стекла и металла и различия их тепловых свойств. Для достижения высоких качеств спая необходимо знать тепловые характеристики применяемых материалов и в соответствии с ними подобрать и испытать режимы охлаждения спаев.

8-6. ПАЙКА КЕРАМИКИ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Если в пайке стекла речь идет только о непосредственном соединении его с металлом, то пайка керамики с металлом осуществляется при помощи припоев и, как и в пайке металлов, здесь существует и мягкая и твердая пайка.

Мягкая пайка керамики появилась сравнительно недавно и осуществляется с помощью ультразвука. Собственно ультразвуком производится лужение керамики, делающее возможным дальнейшее соединение ее с керамикой или с металлом обычными приемами мягкой пайки. Заметим здесь же, что совершенно теми же приемами с помощью ультразвука можно паять и алюминий мягким припоем.

Как известно, при воздействии ультразвука на металл через слой жидкости возникают весьма сложные явления кавитации, т. е. мгновенных микроразрывов массы жидкости с образованием множества мельчайших пузырьков и последующим их захлопыванием, причем на границе жидкости и твердого тела мгновенно возникают микроскопические области сверхвысоких давлений. Помимо давления здесь, очевидно, возникают и электрические и химические явления и все это вместе оказывает сильнейшее воздействие на поверхность металла или керамики, подвергающихся обработке ультразвуком. На

алюминий ультразвук разрушает окисную пленку, мешающую пайке, а с поверхности керамики снимает тончайший слой опудривающих ее частиц и вскрывает все микropopы основного материала.

Действие кавитации на любые, даже самые твердые материалы настолько сильно, что там, где материал подвергается ей более или менее продолжительное время, происходит не только очистка поверхности, но и интенсивное разрушение основного материала. Поэтому процесс облуживания нужно вести быстро и осторожно.

Керамику (алюминий, абразивы, ферриты) облуживают с помощью ультразвука припоем, состоящим из 80—90% олова и 10—20% цинка с температурой плавления 199—205 °С. Ультразвук действует на материал через жидкость, следовательно, припой в момент облуживания должен быть в жидкой фазе. Поэтому до начала облуживания очищенные, как обычно для пайки, детали должны быть прогреты до 240—250 °С, чтобы прутки припоя быстро и с достаточным перегревом плавился на детали. Нагрев деталей можно производить в муфельных печах или на любом достаточно мощном электрическом нагревателе.

Самый процесс облуживания нагретых деталей лучше также производить на закрытой электрической плите, чтобы детали не могли преждевременно остыть.

Крупные детали во время облуживания можно подогревать горелкой.

Облуживание производится ультразвуковым паяльником. В настоящее время промышленность выпускает несколько типов паяльников, например УП-21 (отечественного производства), Mullard.

Схема ультразвукового паяльника показана на рис. 8-10. Рабочий наконечник 1 нагревается обмоткой 2. Ультразвуковые колебания, передающиеся наконечнику, возбуждаются в магнитострикционном элементе 4 при помощи катушки 3, на которую подается от генератора ток ультразвуковой частоты.

При облуживании наконечник включенного паяльника погружают в слой жидкого припоя, покрывающего облуживаемый материал, и проводят им по поверхности материала, не останавливаясь на одном месте.

Очистка поверхности и разрушение окислов происходит под действием ультразвука очень быстро. Очищенная поверхность надежно облуживается расплавлен-

ным припоем, а остатки окислов и все частицы, мешающие пайке, всплывают поверх припоя тонким слоем шлака, который удаляется с излишками припоя шпателем или тампоном. Никакого флюса при этом применять не следует.

После облуживания на детали можно нарастить (при необходимости) любое количество мягкого припоя, или

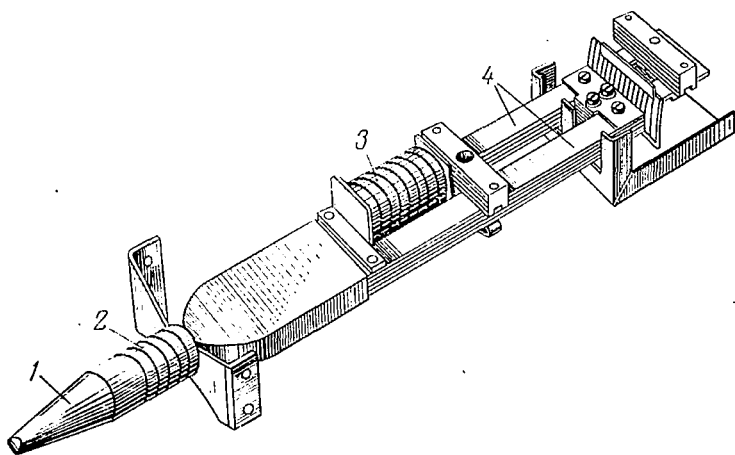


Рис. 8-10. Схема устройства ультразвукового паяльника.

же их можно немедленно спаивать друг с другом путем легкого сжатия с небольшим дополнительным подогревом, если они начали остывать.

При пайке очень тонких алюминиевых деталей бывает достаточно тепла ультразвукового паяльника.

Вторым методом облуживания служит погружение мелких деталей в ультразвуковую ванночку с расплавленным припоем. Действие такой ванны аналогично облуживанию паяльником, но оно охватывает всю погруженную часть детали.

8-7. ПАЙКА ТВЕРДЫМИ ПРИПОЯМИ. МЕТОД МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Пайка керамики с металлами твердыми припоями, способными выдерживать в работе нагрев до 500—800 °С, производится в основном двумя методами: с пред-

варительной металлизацией керамики и методом активного припоя (в одну операцию). Наиболее надежные и температуростойкие соединения получаются по первому методу. Но надежность спая зависит также и от сорта керамики. Лучшие спай можно получить между металлом и высокоалюмооксидными сортами керамики (например, марки миналунд, 102, 22ХС).

Металлизация основана на явлении восстановления и вжигания металла на поверхности керамики из нанесенного на нее слоя металлических окислов при нагреве в восстановительной или защитной среде. Таких же результатов можно достигнуть применяя для вжигания очень тонкие порошки некоторых металлов. Исследования показали [Л. 12, 38—41], что частицы металла скрепляются на поверхности керамики стекловидными составляющими, которые во время вжигания образуют на поверхности керамики жидкую фазу, цементирующую частицы металла.

Наиболее широко в настоящее время применяется металлизация с использованием паст, содержащих смеси тонких порошков молибдена и марганца с добавлением стекла. Такова, например, паста № 5 (марка П-5), рекомендуется среди других в работе [Л. 12]. Она состоит из 75% Мо и 20% Мп с добавкой 5% стекла марки С-48-2. Эта паста универсальна, так как позволяет металлизировать как миналунд, так и керамику типа стоал и искусственные сапфир и рубин.

Вжигание пасты П-5 производится при температуре 1 280—1 300 °С во влажной [точка росы +18 ÷ +26 °С] смеси азота с водородом. При этом паста П-5 допускает широкое изменение соотношения азота и водорода в рабочей смеси от 3:1 до 1:3. Может использоваться также и диссоциированный аммиак [Л. 12].

Спай металла с высокоалюмооксидной керамикой, полученные на основе пасты П-5, способны выдерживать термоудары от 800 до 20 °С без потери вакуумной плотности. Их механическая прочность при статическом изгибе составляет до 1 500 кгс/см².

Пасты для металлизации готовятся из порошков металла при крупности зерен менее 1 мкм — 60%, 1—3 мкм — 40%. Стекло должно быть размолото так же мелко. Паста замешивается на биндере из нитроклетчатки, растворенной в амилацетате (2,6 г нитроклетчатки в 100 мл амилацетата).

Некоторые авторы рекомендуют после молибден-марганцевой металлизации керамики наносить на нее и вжигать вторым слоем никель или железо. Они наносятся так же, как и молибдено-марганцевые пасты, замешанными на биндере или гальваннчески.

Припоями для пайки металлов с керамикой могут служить медь марки МБ, серебро и эвтектический припой ПСр-72. При пайке серебром керамики с деталями из ковара или сплавов фени последние необходимо предварительно меднить слоем 25—30 мкм и вжигать этот слой в водороде при 900 °С во избежание растрескивания металла вследствие межкристаллитного внедрения припоя.

Обязательным условием пайки является абсолютная чистота всех компонентов соединения (металлические детали, керамика, припой), инструмента, приспособлений и печи.

На рис. 8-11 изображены схемы основных типов металлокерамических спаев [Л. 12]. Наиболее предпочтительными из них являются конические спаи (рис. 8-11,б), наиболее затруднительно выполнение плоских соединений (рис. 8-11,д, е, ж, з), а также цилиндрических (рис. 8-11,а, в, г), в которых даже небольшая несогласованность по коэффициентам расширения приводит к нарушению соединения. Поэтому в плоских спаях приходится прибегать к целому ряду конструкторских приемов, также рекомендованных в работе [Л. 12] и приво-

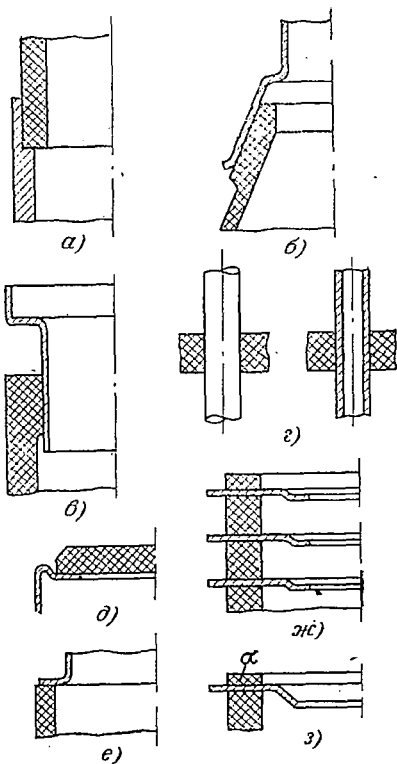


Рис. 8-11. Элементарные конструкции спаев металла с керамикой.

данных нами на рис. 8-12. В них часто применяется вайка металла между основной керамической деталью и накладным керамическим кольцом *а* (рис. 8-11,з). Этот же прием виден и на рис. 8-12,в и г. Применяется и обратный прием: вайка керамики между двумя симмет-

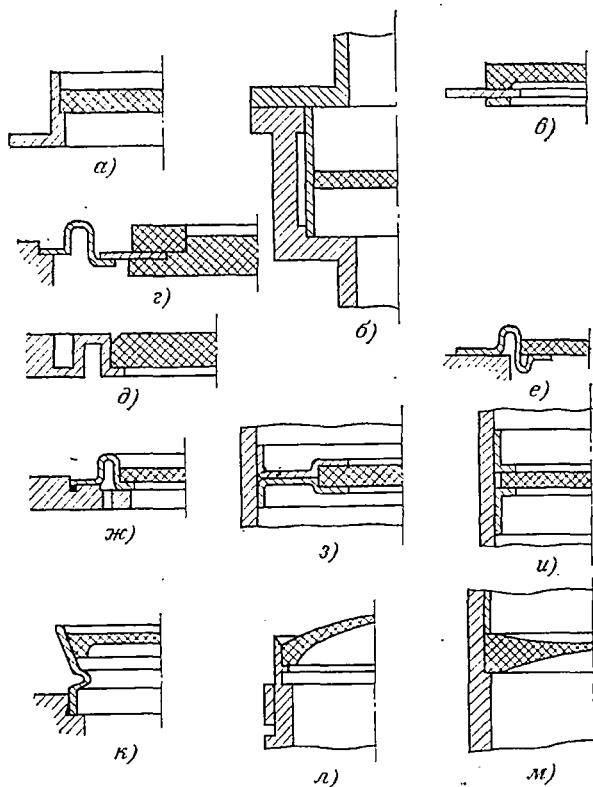


Рис. 8-12. Конструкции плоских спаев металлокерамических узлов.

рично расположенными металлическими деталями (рис. 8-12,з, и, м). Спаи (рис. 8-12,к и л) наиболее легко выполнимы. Спаи (рис. 8-12,д и е) также технологичны, так как металлическая оправа здесь имеет форму компенсатора. Спаи (рис. 8-12,а и б) наименее технологичны.

Пайка керамики активными припоями. Этим методом можно паять керамику и монокристаллы синтетического

сапфира и рубина с металлом, строго согласованным с керамикой по тепловой характеристике.

Активизаторами припоя являются титан или цирконий, которые смешиваются с припоем различными способами: изготовлением биметаллической проволоки, смешением порошкообразных материалов, нанесением на место спая под припой флюсующей обмазки на основе гидридов титана или циркония.

Припоем обычно служит медно-серебряная эвтектика (ПСр-72). При изготовлении биметаллической проволоки титан или цирконий в виде проволоки или порошкового наполнителя закладывается внутрь тонкой трубки из припоя. Содержание активизатора должно составлять 7—12% массы припоя. Флюсующие обмазки состоят из гидрида титана или гидрида циркония, замешанного на биндере, состоящем из 3% нитроклетчатки (нитроцеллюлозы), растворенной в амилацетате. Обмазка должна иметь определенную вязкость. Гидриды активных металлов берутся только свежие с крупностью зерен не более 2 мкм. Обмазка наносится очень ровным слоем 10—12 мкм, просушивается 2—3 ч при комнатной температуре, а затем 30 мин при 140°C в сушильном шкафу.

Пайка производится в вакуумной печи с защитой от попадания масла при 820—830°C. Скорость нагрева и выдержка при температуре пайки должны регулироваться в зависимости от масс соединяемых деталей, но должны обеспечивать поддержание в печи давления не выше $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

8-8. СОЕДИНЕНИЕ ТЕРМОКОМПРЕССИОННЫМ МЕТОДОМ

Особое место среди методов соединения керамики с металлом занимает термокомпрессионный метод [Л. 42—43], являющийся комбинацией из пайки и диффузной сварки в вакууме.

Сущность метода заключается в том, что чистая керамика (стеатитовая, форстеритовая или содержащая более 85% Al_2O_3) при нагреве в водороде до 1000°C плотно и прочно соединяется с медью, если последнюю прижать к шлифованной поверхности керамики с удельным давлением 1,6—1,8 кгс/мм², выдержать 10 мин в таком состоянии, а затем медленно охладить.

Лучшие результаты при этом получаются с керамикой 22ХС. Некоторые керамики, в том числе сорт 102, требуют нанесения на поверхность соединения тонкого слоя марганца.

Через медный переходник (медная фольга) можно получать таким же методом соединения с коваром, нержавеющей сталью и некоторыми другими сплавами. Соединения керамики с титаном получаются не в водородной, а в вакуумной печи.

Перед «пайкой» керамика шлифуется (соединения делаются по торцу плоские), промывается в горячей мыльной воде, ацетоне и спирте. Металлические детали предварительно травятся, обезжириваются и отжигаются в сухом (точка росы -30°C) водороде, медные — при 600°C , а коваровые — при 800°C .

Пайка производится в сравнительно влажном водороде: точка росы от $+5^{\circ}\text{C}$ до -5°C .

Соединения, выполненные этим методом, показали большую механическую прочность и термостойкость, нежели паянные методом металлизации.

Глава девятая

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФЛЮСОВ И ПРИПОЯ 34-А

9-1. ФЛЮСЫ

Флюс 18-В: для пайки нержавеющей сталей, сплавов типа нихрома, никеля и его сплавов серебряными припоями с температурой плавления до 800°C .

Состав флюса, %:

| | |
|--|----|
| Фтористый калий (обезвоженный) | 40 |
| Борная кислота | 60 |

Способы приготовления. *Способ 1.* 1. Фтористый калий до отвешивания обезвоживать путем прокалывания при температуре $250-300^{\circ}\text{C}$ в плоской чашке или на противне из нержавеющей стали в течение 5—6 ч.

2. Отвесить обезвоженный фтористый калий и борную кислоту по рецепту.

3. Тщательно смешать компоненты и расплавить в кварцевой или фарфоровой чашке.

4. Расплавленный флюс размешать фарфоровым или кварцевым стержнем и разлить тонким слоем на чистой чугуниной плите.

5. Застывший флюс разбить на кусочки и сохранять в герметичной посуде (флюс весьма гигроскопичен).

6. Перед пайкой растирать флюс в фарфоровой ступке в мелкий порошок. Употреблять, замешивая кашицей на воде или спирте.

Способ II. 1. Обезводить фтористый калий, как было указано ранее.

2. Отвесить обезвоженный фтористый калий и борную кислоту в той же пропорции, что и при способе I приготовления.

3. Растворить отвешенные компоненты в кипящей воде и затем выпарить раствор до консистенции густого желе. Растворять и выпаривать в фарфоровой посуде или чашках из нержавеющей стали.

Следует иметь в виду, что впаренный флюс с течением времени затвердевает и при этом крепко схватывается с фарфором. Поэтому его следует в начале затвердевания измельчать и в виде мелких кусков хранить в стеклянной герметичной посуде.

Флюс, имеющий консистенцию желе, кладется на место спая стальным узким шпателем. Затвердевший флюс размалывается в порошок и замешивается перед употреблением в кашицу на воде или на спирте.

Флюс 209: для пайки серебряными припоями с температурой плавления от 600 до 800 °С изделий из конструкционной и нержавеющей стали, жаропрочных сплавов, меди и медных сплавов.

Состав флюса, %:

| | |
|--|----|
| Борный ангидрид | 35 |
| Фтористый калий (обезвоженный) | 42 |
| Фторборат калия | 23 |

Способ приготовления. 1. Обезводить фтористый калий прокаливанием в течение 5—6 ч при температуре 250—300 °С в посуде из нержавеющей стали.

Непосредственно после обезвоживания горячий фтористый калий раздробить в ступке на мелкие кусочки и хранить в банке с резиновой пробкой.

2. Раздробить борный ангидрид в ступке кусочками не более 6 мм в поперечнике, а затем размолоть в фарфоровой шаровой мельнице до состояния пудры. Хранить в банке с резиновой пробкой.

Борный ангидрид можно получить из борной кислоты, расплавив ее в фарфоровом тигле.

3. Приготовленные указанным образом мелкодробленый фтористый калий, пудру из борного ангидрида и фторборат калия отвесить по рецепту, смешать и размолоть вместе в фарфоровой мельнице до состояния тонкой пудры. Молоть в течение 5—6 ч.

4. Высыпать размолотый флюс немедленно в стеклянные банки с резиновыми пробками и хранить плотно закупоренными.

Флюс 209 употребляется как в виде кашицы, замешанной на воде, спирте или четыреххлористом углероде, так и в виде сухого порошка (при нагреве токами высокой частоты).

Флюс 201: для пайки тугоплавкими серебряными припоями, латунью и медью изделий из конструкционной стали, нержавеющей стали и жаростойких сплавов. Флюс сохраняет активность в интервале температур 850—1100 °С.

Состав флюса, %:

| | |
|-----------------------------------|-----|
| Борная кислота | 80 |
| Бура | 14 |
| Кальций фтористый | 5,5 |
| Лигатура (Al — Cu — Mg) | 0,5 |

В пересчете на обезвоженные компоненты, %:

| | |
|-----------------------------------|----|
| Борный ангидрид | 77 |
| Бура плавления | 12 |
| Кальций фтористый | 16 |
| Лигатура (Al — Cu — Mg) | i |

Состав лигатуры (Al—Cu—Mg), %:

| | |
|--------------------|----|
| Алюминий | 48 |
| Медь | 48 |
| Магний | 4 |

Приготовление лигатуры. Алюминий расплавляют с перегревом приблизительно до 700 °С. В нем при непрерывном подогреве растворяется медь. Затем при той же температуре около 700 °С при помощи колокольчика (рис. 9-1) из нержавеющей стали вводится магний при интенсивном размешивании. Когда смесь расплавится, снимают шлак с поверхности и выливают сплав на стальную чистую плиту. Застывший сплав хрупок. Его размалывают в порошок.

Способ приготовления.

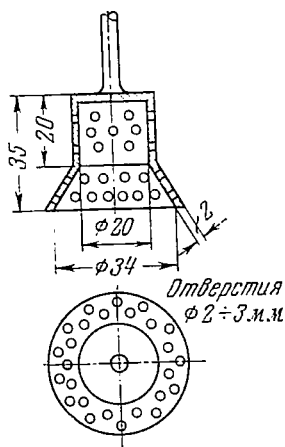
1. Разбить борный ангидрид в ступке на кусочки не более 6 мм в поперечнике и размолоть в пудру при помощи фарфоровой шаровой мельницы. Хранить в банке с резиновой пробкой.

2. Отвесить приготовленную пудру борного ангидрида и остальные компоненты по рецепту и тщательно растереть все вместе в фарфоровой шаровой мельнице до состояния пудры.

3. Высыпать размолотый флюс в стеклянные банки с резиновыми пробками и хранить плотно закупоренными.

Флюс 201 употребляется в виде густой кашицы, замешанной на воде или спирте, а при нагреве деталей токами высокой частоты можно применять его в виде сухого порошка.

Рис. 9-1. Колокольчик из нержавеющей стали для внесения в расплавы легкоплавких компонентов.



Флюс 34-А: для пайки алюминия с алюминием и алюминия с никелем или серебром припоем 34-А при температуре 525—530 °С или силумином при температуре около 580 °С. Выпускается отечественной химической промышленностью.

Состав флюса, %:

| | |
|----------------------------|----|
| Хлористый литий | 32 |
| Фтористый натрий | 10 |
| Хлористый цинк | 8 |
| Хлористый калий | 50 |

Способ приготовления. 1. Обезводить хлористый литий и фтористый натрий прокаливанием на противне из нержавеющей стали при температуре 250—300 °С в течение 5—6 ч.

2. Обезводить хлористый цинк путем плавления его в фарфоровом тигле при температуре 300 °С.

3. Обезводить хлористый калий прокаливанием при температуре 150 °С.

4. Отвесить обезвоженные компоненты по рецепту.

5. Смешать хлористый литий, фтористый натрий и хлористый калий и расплавить их в фарфоровой или кварцевой чашке или тигле.

Нельзя готовить флюс в металлической посуде, так как в расплавленном виде он растворяет почти все металлы.

6. Расплавить хлористый цинк в фарфоровом тигле и добавить его в горячий расплав остальных составляющих при температуре 700 °С.

Нельзя добавлять неравнплавленный хлористый цинк в расплавленную смесь остальных трех составляющих, так как это вызовет бурное разбрызгивание горячей смеси и может привести к тяжелым ожогам. Расплавленную смесь размешать фарфоровой палочкой.

7. Вылить готовый флюс на совершенно сухую и чистую массивную стальную или чугунную плиту.

8. Разбить затвердевший, но еще горячий флюс на куски, растолочь и немедленно высыпать в банки с резиновой или притертой пробкой.

Флюс 34-А крайне гигроскопичен и быстро воспринимает влагу из воздуха. Поэтому даже в короткие перерывы в работе с ним банки следует закрывать герметично. Флюс 34-А употребляется в виде сухого порошка, в который окунается горячая (при температуре ~ 500 °С) палочка припоя непосредственно перед нанесением припоя на шов.

Флюс ЛМ1: антикоррозионный флюс для пайки мягкими, оловянно-свинцовыми припоями изделий из нержавеющей стали, никеля, хрома, а также конструкционной стали, меди и ее сплавов.

Состав флюса:

| | |
|--|---------|
| Ортофосфорная кислота плотностью 1,6—1,7 см ³ | 100 |
| Этиленгликоль или спирт этиловый, см ³ | 350—400 |
| Канифоль, г | 40—60 |

Способ приготовления. В смеси ортофосфорной кислоты с этиленгликолем или спиртом растворяют мелко истолченную канифоль при частом, интенсивном размешивании.

Канифоль растворяется медленно, поэтому раствор не следует ни отстаивать, ни фильтровать, а применять, размешивая осадок нерастворившейся еще канифоли.

9-2. ПРИПОЙ 34-А ДЛЯ ТВЕРДОЙ ПАЙКИ АЛЮМИНИЯ

Припой 34-А имеет температуру плавления 525—530 °С. Применяется для вакуумной пайки алюминия и алюминия с никелем или серебром.

Состав припоя, %:

| | |
|--------------------|----|
| Алюминий | 66 |
| Медь | 28 |
| Кремний | 6 |

Кремний берется в составе силумина. В зависимости от содержания кремния в данной партии силумина (по сертификату) расчетом определяется, сколько следует добавить чистого алюминия.

Способ приготовления припоя. 1. Расплавить в тигле (графитовом, керамическом или из нержавеющей стали) алюминий и силумин с перегревом приблизительно до 700 °С.

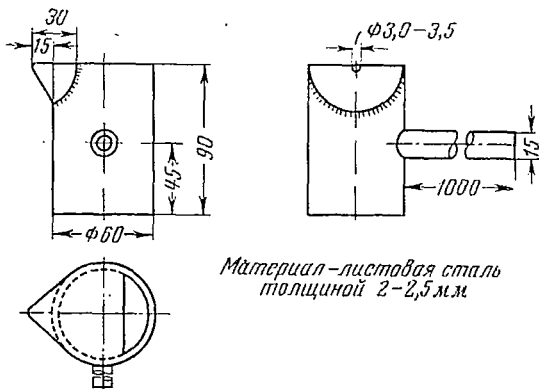
2. Растворить в расплавленном алюминии с силумином при непрерывном подогреве медь, нарезанную мелкими кусками, при той же температуре около 700 °С. Размешать припой стержнем из нержавеющей стали и снять шлаки.

3. Бросить в тигель на поверхность расплавленного припоя 3—5 г флюса 34-А.

4. Разлить при помощи разливочного ковша, показанного на рис. 9-2, припой на тонкие прутки на гладкой, массивной стальной или чугунной плите.

Разливочный ковш перед зачерпыванием припоя из тигля подогревается до 700 °С. Разливку производят равномерным прямолинейным движением, лучше всего от себя, выливая припой несильной струей. Удобно делать прутки длиной 600—650 и толщиной 4—5 мм.

Разливка припоя требует небольшой тренировки. Необходимо все время поддерживать нагрев расплава в тигле около 700 °С и не забывать подогревать разливочный ковш. Исходные материалы и тигли должны быть совершенно чистыми, без следов масла или коррозии.



Материал — листовая сталь
толщиной 2—2,5 мм

Рис. 9-2. Ковш для разлива припоя.

СБОРКА. ВАКУУМНАЯ ГИГИЕНА. ПОКРЫТИЯ

10-1. ОБЩИЕ ПРАВИЛА

Сборка высоковакуумной аппаратуры требует большой тщательности как в пригонке деталей под сварку и пайку, так и в правильности выполнения всех разъёмных соединений и соблюдения безусловной чистоты материалов, деталей, помещения, рабочего места, рук, промывочных и обтирочных материалов и одежды рабочего.

На всех стадиях обработки и особенно сборки должна неуклонно соблюдаться вакуумная гигиена, т. е. весь комплекс мероприятий и технологических приемов, обеспечивающий получение изделий с максимальной вакуумной плотностью их объемов и минимальным газовыделением стенок, соединений и заключенных в них механизмов.

Меры к соблюдению вакуумной гигиены должны приниматься начиная со склада материалов и даже еще ранее, с завоза материалов на склад. Необходимо оберегать материалы от внешних повреждений при транспортировке, погрузке и выгрузке. Забоины, царапины на металле, полученные при перевозке и перегрузке, увеличивают трудоемкость обработки и далеко не всегда удается вывести их целиком. А каждый дефект поверхности является в работе аппарата источником газа, т. е. снижает его качество. Недопустимо хранение материалов в сырых помещениях, что вызывает на большей их части появление окислов; часть материалов под влиянием влаги приходит в негодное для вакуумной техники состояние.

В предварительную сборку (по узлам) могут поступать только заготовки и детали, выполненные из качественного материала и надлежащим образом обработанные. На каждом этапе сборки, будь то сборка заготовок под сварку узла или сборка окончательно обработанных деталей в готовое изделие или его часть, все элементы конструкции должны тщательно очищаться от грязи, промываться и просушиваться. Только чистые детали могут поступать в сборку под сварку или пайку.

После сварки и пайки каждая сварная или паяная деталь или узел должны снова промываться, и если нужно, протравливаться с особо тщательной последующей промывкой и просушиванием. Затем сварные или паяные детали обязательно проходят испытание на вакуумную плотность и только тогда могут передаваться в окончательную обработку (если она требуется по технологии), снова в промывку и сушку и в дальнейшую сборку. Из сказанного видно, что при сборочном цехе обязательно должна быть хорошо оборудованная моечная с сушильным отделением.

Далее готовые, испытанные на вакуумную плотность чистые детали поступают в окончательную сборку уз-

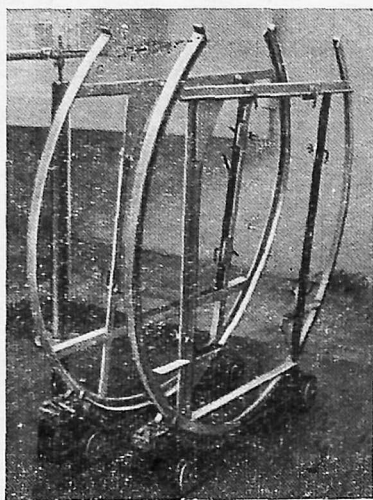


Рис. 10-1. Передвижное сборочное приспособление.

лов или целых изделий. В зависимости от принятой на данном производстве схемы организации работ детали могут поступать непосредственно на рабочее место сборщика, у которого должен быть шкаф или стеллаж для хранения деталей до их установки в изделие. Если детали хранятся на стеллажах, то их помещают в мешки из синтетической пленки для предохранения от пыли и влажного воздуха. Шкафы должны закрываться плотно и быть совершенно чистыми. Очень практичны металлостеклянные шкафы.

В правильно организованном производстве собираемые готовые детали должны быть выполнены по определенным допускам и стыковаться без всякой слесарной подгонки. Ручная и даже станочная индивидуальная подгонка — это уже исправление брака (конструкторского или технологического), и она влечет за собой возможность появления мест, легко загрязняемых или невакуумно-плотных, а потому должна быть тщательно

проверена мастером. Каждая подгонка влечет за собой обязательную промывку и просушку подгонявшихся деталей.

Сборка узлов, а затем и целых изделий производится на различно оборудованных рабочих местах, начиная от простого, но удобного слесарного верстака с параллельными тисками и кончая различного рода конвейерами. В зависимости от размеров и конструкции узлов или изделий для сборки их пригодны манипуляторы, показанные на рис. 6-2, 6-4, 6-6, или, например, приспособление, изображенное на рис. 10-1, в котором зажатое между дугами изделие может наклоняться или опрокидываться в соответствии с порядком сборочных операций, а также и передаваться с одного рабочего места на другое.

Собранные полностью изделия испытываются целиком на вакуумную плотность, правильность нагрева (если это прогреваемые аппараты), правильность работы (вхолостую) отдельных механизмов, но это еще не окончательные испытания.

Окончательные испытания, выборочные или сплошные, должны производиться на испытательной станции. Поступившие на станцию из цеха изделия разбираются на узлы, промываются и просушиваются согласно инструкции, утвержденной для данного производства, не взирая на промывки и чистки, сделанные в сборочном цехе, и испытываются по техническим условиям на изготовление данного изделия.

10-2. ПОМЕЩЕНИЕ СБОРОЧНОГО ЦЕХА

Не во всяком помещении можно обеспечить достаточно качественную сборку высоковакуумной системы. Обычные цеховые помещения машиностроительных заводов с открытыми фермами перекрытий, асфальтовыми или цементными полами, естественной вентиляцией через фрамуги окон, входными дверями и воротами без тамбуров для высоковакуумного производства не годятся.

Сборочные помещения на лучших предприятиях размещаются в герметизированных корпусах с перекрытиями чердачного типа; непылящими полами (мраморными, гранитноплитными, метлахскими, синтетическими), с мою-

щимися стенами и потолками, с подачей кондиционированного воздуха.

Если же на предприятии нет возможности полностью обеспечить такие условия, то во всяком случае необходимо принять все меры к предотвращению запыления помещения и излишней влажности воздуха и к устройству хорошего освещения цеха. Перекрытия должны быть только с гладким потолком, вентиляция приточно-вытяжная с фильтрацией и подсушиванием подаваемого воздуха. Полы необходимо делать не хуже метлахских в отношении пылеобразования. Все заточные, крацевальные станки, мойки, сушилки должны размещаться в отдельных, самостоятельно вентилируемых помещениях.

Ворота и входные двери должны быть с вентилируемыми тамбурами в целях снижения пропуска пыли и влаги извне. Освещение должно осуществляться люминесцентными светильниками дневного света.

10-3. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Вопросы механической обработки внутренних поверхностей, необходимой для достижения заданного предельного давления, в литературе почти не освещены, а среди конструкторов и технологов-вакуумщиков эти вопросы дискутируются, и единых оценок различных методов обработки еще нет.

Основными требованиями, предъявляемыми техникой высокого вакуума к внутренним поверхностям аппаратов, являются:

наибольшая гладкость, необходимая для того, чтобы остаткам растворителей и частицам протирочного материала при промывке негде было застревать, наименьшая запыленность поверхности какими-либо испаряющимися веществами и наименьшая насыщенность газами поверхностных слоев в процессе обработки.

Выполнения этих требований, обеспечивающих качество аппаратов, можно добиваться двумя путями. Первый из них — это обработка поверхности заготовки или детали любыми способами, могущими дать требуемый класс чистоты обработки, и последующее обезгаживание путем длительного нагрева в вакууме.

На рис. 4-2—4-4 показаны графики газовыделения полированных образцов — первоначального (непосредст-

венно после полировки) и вторичного, того же образца (обезгаженного однажды при высокой температуре), пролежавшего в сухом атмосферном воздухе 10 суток и вновь нагретого в вакууме до 395 °С.

Следует учесть, что механическая полировка является одним из наиболее загрязняющих обрабатываемую поверхность методов обработки. В процессе полировки металл подвергается усиленному натиранию материалом полировальных кругов и жировыми связующими полировальных паст.

Графики показывают, что вторичное газовыделение после обезгаживания в 10—20 раз (и более) менее обильно, чем первичное. Следовательно, можно использовать это обстоятельство и в производстве, но это дорогой путь, так как он требует наличия крупных вакуумных печей и занимает много времени (20—30 ч обезгаживания).

Второй путь заключается в применении такого метода обработки, который сразу давал бы достаточно гладкую и вовсе незагрязненную поверхность. Этот путь требует меньших затрат времени; оборудование для его осуществления, очевидно, должно быть проще и дешевле за счет исключения вакуумных печей или тренировочных постов, но в ряде случаев он требует еще экспериментальной проверки.

Лучшим методом обработки является чистое резание металлическим или алмазным инструментом. Это доказано практикой заготовки коваровых деталей для спая со стеклом. Такие спай являются своего рода индикатором, весьма чувствительным к малейшим загрязнениям поверхности металла. Заготовки, обработанные с применением полирующих паст или абразивов (кроме стеклянной бумаги), т. е. методами, при которых на металле могут оставаться инородные для стекла ча-

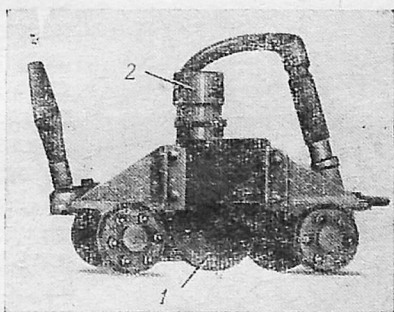


Рис. 10-2. Пневматический шлифующий трактор.

1 — абразивный круг; 2 — двигатель.

стицы, дают в спае пузыри, в то время как тот же металл, обработанный только резанием, дает плотный чистый спай.

В гл. 4 мы уже указывали, какие методы механической обработки предпочтительны для вакуумной технологии. Указывались также и некоторые химические и электрохимические методы. Здесь мы приведем еще некоторые рекомендации.

Для обработки сварных швов применяется шлифующий трактор, показанный на рис. 10-2. На самоходной или ручной тележке смонтировано шлифовальное приспособление, абразивный круг которого может уста-

навливаться на различной высоте по отношению к поверхности, по которой катается тележка. При желании постоянство нажима круга на обрабатываемую поверхность может поддерживаться пружиной, грузом или магнитом.

На этих же приспособлениях (или станках) можно заменять круги проволочными щетками. Замечено, что наилучшие результаты получаются при последовательной обработке стальными щетками после абразивных кругов или пескоструйной обработки с целью повышения чистоты обработки на 1—2 класса. Одна пескоструйная обработка влечет за

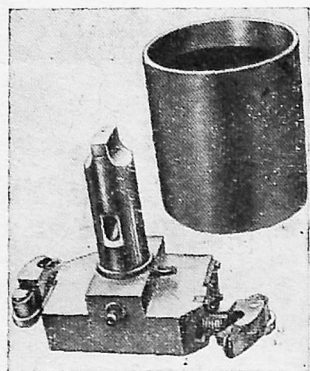


Рис. 10-3. Приспособление для обкатки роликами внутренних поверхностей.

собой значительное, трудно отмываемое запыление поверхности с большим газовыделением при прогреве в вакууме.

Обработанные на токарном станке детали после тщательного обезжиривания, а еще лучше после отжига в вакууме при 500 °С можно подвергать обкатке роликами с целью повышения чистоты обработки на 1—2 класса.

Приспособление для внутренней обкатки показано на рис. 10-3. Устройство его несложно и не требует особых пояснений. Обработка может производиться на токарном или крупном сверлильном станке.

10-4. ОБРАБОТКА УПЛОТНЯЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Наиболее тщательно должны обрабатываться поверхности валов, проходящих через уплотнения вакуумных вводов движения. Эти валы должны быть отшлифованы с целью обеспечения правильной цилиндрической формы и затем отполированы до чистоты поверхности не менее $\nabla 8$.

Детали соединений с металлическими уплотнениями (медными, алюминиевыми, никелевыми прокладками) обрабатываются с чистотой не ниже $\nabla 8$.

Уплотняемые поверхности соединений сверхвысокого вакуума должны обрабатываться с чистотой $\nabla 8$. Окончательная их зачистка может производиться мелкой шкуркой.

Стыковые поверхности деталей с резиновыми уплотнениями требуется обрабатывать не ниже $\nabla 6$.

Самыми грубыми могли бы остаться стыковые поверхности соединений, уплотняемых фторопластом-4, который в силу некоторых своих особых свойств способен уплотнить даже и соединение с необработанными, черными поверхностями.

Однако не следует на практике пользоваться этим. Плохо обработанные поверхности в вакуумной технике становятся неизбежно местом загрязнения.

Поэтому любые внутренние поверхности в вакуумной технике должны обрабатываться с чистотой не ниже $\nabla 5$.

10-5. ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ

В производстве вакуумных систем очистка поверхностей деталей и узлов важна не только как подготовка для химической или электрохимической обработки, но и как главнейшая операция, обеспечивающая соблюдение вакуумной гигиены.

Основным методом очистки в вакуумной технике является промывка поверхностей растворителями. Лучшими растворителями служат четыреххлористый углерод, трихлорэтилен, ацетон и бензин. Первые два не горят, а два последних легко воспламенимы. Поэтому предпочтение должно быть отдано первым, но необходимо знать, что четыреххлористый углерод сильно токсичен и применение его допустимо только с соблюдением правил безопасности: работы при эффективном отсосе его паров и минимальном соприкосновении его с кожей рук, т. е. при усло-

вни пользования кистью или щеткой, а для удерживания детали — щипцами.

Трихлорэтилен менее токсичен, но его пары в присутствии открытого пламени образуют фосген. Поэтому с трихлорэтиленом можно работать только в вытяжном шкафу или при интенсивном отсосе паров. Для промывки также следует пользоваться кистью или щеткой. Сравнительно мелкие детали лучше всего после очистки щеткой с трихлорэтиленом кипятить в нем, а затем споласкивать в чистом растворителе.

В трихлорэтилене и в четыреххлористом углероде нельзя промывать детали, имеющие в своем составе щелочные или щелочноземельные металлы, с которыми эти растворители способны образовывать сильно взрывчатые вещества. В трихлорэтилене не следует промывать алюминиевые детали и детали, загрязненные мылом или мыльными эмульсиями.

Ацетон и бензин могут применяться для очистки любых металлов, но они легко воспламенимы и в обращении с ними необходимо соблюдать строжайшие противопожарные правила. Кроме того, ацетон и бензин оказывают и токсическое действие, вследствие чего работа с ними допустима только при наличии эффективного отсоса паров.

В целях обезжиривания деталей применяются также щелочные и мыльные растворы и керосино-мыльная эмульсия. Последняя имеет состав: керосин 4 л, хозяйственное мыло 400 г, вода 6 л. После обработки в этой эмульсии следует промыть детали в проточной воде и 2%-ном растворе кальцинированной соды, после чего снова промыть в горячей воде и просушить.

Детали из цветных металлов хорошо обезжириваются в ванне следующего состава, подогретой до 90 °С: тринатрийфосфат 20 г/л, мыло хозяйственное 20 г/л.

Стальные детали или выполненные из никелевых сплавов можно обезжиривать в 5%-ном растворе едкой щелочи с добавкой 1% жидкого стекла. Последнее улучшает обезжиривание и защищает поверхность металла от перетравливания.

10-6. ХИМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Обработка в травильных, химических металлизующих и электрохимических ваннах может преследовать различные цели: придание поверхности антикоррозионных свойств, сглаживание поверх-

ности (декоративное или для изменения отражающей способности или способности излучения), наивысшая степень очистки поверхности, снижение коэффициента трения (особенно в вакууме), повышение износостойкости. Иногда удается достижение нескольких из этих целей в одном процессе.

Операция травления, химического или электрохимического, обычно преследует цель очистки поверхности детали от окислов, остатков флюса или особо стойких загрязнений, которые не поддаются другим видам очистки. Травление производится обычно в кислотах или в едких щелочах. В зависимости от состава ванны, времени обработки и концентрации активных составляющих при травлении можно получить как блестящую, так и матовую поверхность. Травление выявляет структуру чистого металла детали.

Химическое и электрохимическое полирование металла дает возможность получать поверхности более высокого класса чистоты, не преследует цели выявления структуры металла, но придает поверхности некоторую стойкость против атмосферного воздействия за счет образования тонкой пассивирующей окисной пленки.

Как химический, так и электрохимический метод дает возможность покрывать детали различными металлами или сплавами в декоративных или защитных целях. Особенно разнообразные покрытия можно получать электрохимическим методом (гальваностегия). Защитные покрытия могут иметь различные назначения: защиту детали от коррозии, от механического износа, от воздействия электрического тока на контакты.

Большое значение имеют металлические покрытия и для получения возможности осуществлять надежные паяные соединения как на металлах (например, алюминии, коваре), так и на керамике. В ряде случаев для целей пайки гальваническое покрытие приходится еще и оплавлять, так как само по себе оно является недостаточно плотным. Всем видам химической и электрохимической обработки должны предшествовать тщательная очистка деталей от загрязнений и обезжиривание поверхностей, так как для эффективной и равномерной обработки необходимо, чтобы активные вещества имели свободный доступ ко всем участкам обрабатываемой поверхности.

10-7. ТРАВЛЕНИЕ

Малоуглеродистая сталь травится в 15—20%-ной соляной кислоте. Более дешевый способ травления в 15%-ной серной кислоте не дает такой чистой поверхности металла, как первый способ. Травить сталь в более крепких кислотах не рекомендуется.

Высоколегированные стали рекомендуется травить в ванне следующего состава: соляная кислота 13%, серная кислота 4%, азотная кислота 9%, вода 74% при температуре 80—85°C.

Медь и медные сплавы (латуни) можно травить в азотной кислоте или в смеси из одной части азотной кислоты, одной части серной кислоты и 1% соляной ки-

слоты. Увеличение содержания в этой смеси соляной кислоты приводит к бурой окраске металла.

Ковар травится в смеси из равного количества 10% соляной и 10% азотной кислоты. Сильно окисленный ковар травится в горячей концентрированной соляной кислоте.

Алюминий и его сплавы травятся в 10%-ном растворе едкого натра, причем в случае содержания в сплаве меди следует дополнительно обрабатывать детали 20%-ной азотной кислотой.

Весьма стойкие окислы вольфрама и молибдена снимаются в горячих ваннах из сильнодействующих реактивов. Для травления вольфрама применима смесь в равных частях фтористой и азотной кислот. Для молибдена применяется ванна из расплавленного едкого калия с 10% азотнокислого натрия [Л. 66].

10-8. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ ПОЛИРОВАНИЕ

Электрохимическое полирование. Очень высокая степень чистоты и некоторое повышение коррозионной стойкости деталей из малоуглеродистой стали достигаются электрическим полированием в ванне из уксусной кислоты (80 массовых частей) и хромового ангидрида (20 массовых частей) при плотности тока 50—200 a/dm^2 в течение 10—15 мин.

Вообще электрополирование замечательно тем, что в процессе его проведения с поверхности металла срываются все загрязнения и сглаживаются острые вершины микровыступов и углов на рисках и царапинах. Таким образом, электрополирование служит одним из лучших средств очистки металла (уступает, пожалуй, лишь ультразвуковой обработке) и значительно смягчает микрорельеф поверхности, хотя и не придает ей зеркального блеска, а наоборот, иногда нарушает таковой (если произвести электрополирование после механического полирования с пастами), так как вскрывает местами ложную чистоту механического полирования, полученную за счет затирания пастами и отходами кругов неровностей металла. Но для вакуумной техники важнее действительная чистота, чем блеск.

Второй способ электрополирования малоуглеродистой стали заключается в обработке ее при 60°C в течение

20 мин в ванне следующего состава, %:

| | |
|------------------------------------|-----------|
| Ортофосфорная кислота | 65—70 |
| Серная кислота | 10—15 |
| Хромовый ангидрид | 5—6 |
| Вода | Остальное |
| Плотность раствора | 1,74 |
| Плотность тока, a/dm^2 | 35—50 |

Сначала надо растворить в воде хромовый ангидрид, затем понемногу добавлять серную кислоту, потом ортофосфорную. Затем следует выпарить раствор при 100—110 °С до нужной плотности и проработать при 25—30 a/dm^2 .

Для сталей типа 18-8 рекомендуется состав ванны, %:

| | |
|------------------------------------|-----------|
| Серная кислота | 15—20 |
| Фосфорная кислота | 63—67 |
| Вода | Остальное |
| Плотность тока, a/dm^2 | 10—50 |

Свинцовая ванна может использоваться как катод.

Предварительное механическое полирование затрудняет электрополирование.

Для электрополирования алюминия рекомендуется состав ванны, г:

| | |
|---|----------|
| Фосфорная кислота (плотность 1,6) | 1 000 |
| Хромовый ангидрид | 180 |
| Плотность тока, a/dm^2 | Около 15 |

Сначала растворить, затем проработать или выпарить до плотности 1,72. Ток реверсировать: 10 сек изделие на аноде, 2—5 сек — на катоде. Общее время 5 мин и более при температуре раствора 60—80 °С. Процесс ведется с алюминиевыми вспомогательными электродами.

Химическое полирование. Химическое полирование металлов позволяет снимать определенную величину слоя равномерно по всей поверхности независимо от формы изделия, чего не удастся сделать при электрополировании.

Химическое полирование никеля производится в ванне следующего состава (объемные части):

| | |
|--|---------|
| Азотная кислота | 150 |
| Фосфорная кислота | 750 |
| Время обработки при температуре 100—110 °С | 2—3 мин |

Ванна для кобальта содержит (объемные части):

| | |
|--|---------|
| Фосфорная кислота | 850 |
| Азотная кислота | 150 |
| Время обработки при температуре 15—30 °С | 1—3 мин |

Для меди рекомендуется состав ванны (объемные части):

| | |
|--|---------|
| Азотная кислота | 200 |
| Фосфорная кислота | 600 |
| Уксусная кислота | 200 |
| Мочевина, г/л | 0,2 |
| Время обработки при температуре 15—25 °С | 5—7 мин |

Для нержавеющей стали типа 18-8 рекомендуется соответствующий состав ванны с добавлением небольшого количества фурфуrolа (объемные части):

| | |
|-----------------------------|-----|
| Вода | 750 |
| Фосфорная кислота | 150 |
| Азотная кислота | 20 |
| Соляная кислота | 50 |
| Серная кислота | 50 |

10-9. ПОКРЫТИЯ

Для высокого вакуума подвергать детали глянцевому никелированию и хромированию не рекомендуется, так как при подготовительной и окончательной полировке на кругах с различными пастами во все изъяны полируемой поверхности забиваются частицы пасты, клея и материала полировальных кругов, которые затем могут быть закрыты слоями металлического покрытия. Эти «склады» грязи могут так и не очиститься в процессе дальнейшей обработки и оказать весьма вредное влияние при эксплуатации системы. Лучше иметь чистую матовую поверхность, чем блестящую, но глубоко загрязненную.

Хорошие результаты для деталей непрогреваемых вакуумных систем дает химическое никелирование.

Ванна для химического никелирования (один из многих рецептов), г/л:

| | |
|-----------------------------------|---------|
| Гипофосфит натрия | 30 |
| Никель хлористый | 25 |
| Уксуснокислый натрий | 20 |
| Глицин | 30 |
| Величина рН | Около 5 |
| Температура, °С | 95 |
| Наращивание слоя, мкм/ч | 10 |

Другой рецепт ванны, г/л:

| | |
|----------------------------------|-------|
| Хлористый никель | 30 |
| Гипофосфит натрия | 10 |
| Гликолевокислый натрий | 10 |
| Величина рН | 4,5÷5 |

Покрытие плотное, блестящее (без предварительного механического полирования), износостойкое с твердостью $H_B=580$. Сцепление с поверхностью металла прочное. В слое покрытия содержится до 14% фосфора. Слой покрытия равномерный даже на деталях сложной формы и на внутренних поверхностях.

Диффузионное хромирование. Весьма прочным, надежным и чистым покрытием стали разных сортов является диффузионное хромирование. При нагреве стали до $1\ 000^\circ\text{C}$ в присутствии паров хрома последние диффундируют в поверхностные слои металла. Однако этот метод требует наличия крупных печей.

10-10. СУЛЬФИДИРОВАНИЕ

Действие вакуума на трущиеся детали во многом похоже на действие высокой температуры на трущиеся пары. Характер этого явления нами в общих чертах был описан ранее. Но есть случаи, когда механизмы, работающие в вакууме с трением, подвергаются еще и нагреву до $450\text{--}500^\circ\text{C}$. К ним относятся прогреваемые затворы, механизмы автоматических линий по производству напыляемых деталей электронных приборов и многие другие. Кроме того, стягивающий крепеж разъемных прогреваемых соединений сверхвысокого вакуума, например, подвергается систематическому многократному прогреву до 500°C и выше при высоких механических нагрузках. Все такие детали, если не принимать определенных мер, быстро начинают заедать и выходить из строя, а механизмы, в которые они входят, оказываются неработоспособными.

Одним из наиболее простых и во многих случаях действительным методом упрочнения и предохранения от заедания поверхностей в вакууме при систематических прогревах оказалось сульфидирование трущихся поверхностей. Этот метод пригоден для деталей из стали всех сортов, хромистых и никелевых сплавов и чугуна.

Его следует применять для обработки резьбовых соединений, гаек ходовых винтов, шарнирных соединений (штулки и пальцы), работающих в вакууме и при повышенных температурах с большими нагрузками.

Для незакаливаемых деталей применяется высокотемпературное сульфидирование ($560\text{--}580^\circ\text{C}$), а для закаленных — низкотемпературное ($180\text{--}200^\circ\text{C}$).

Детали подготавливаются для сульфидирования очисткой от следов коррозии и загрязнений и обезжириванием в 5%-ном растворе едкого натра с последующей промывкой в горячей воде и просушиванием.

Высокотемпературная ванна для сульфидирования, %:

| | |
|--|----|
| Мочевина (CON_2H_4) | 50 |
| Поташ (K_2CO_3) | 45 |
| Сернистый натрий (Na_2S) или сернистый калий от общей массы компонентов | 2% |

Мочевина и поташ небольшими порциями сплавляются в тигле из нержавеющей стали со стенками не тоньше 6 мм, подогретом предварительно до 350—380 °С. Реакция идет очень бурно с интенсивным выделением аммиака и углекислого газа, так что операцию можно производить только в вытяжном шкафу. В результате сплавления количество готового расплава по массе составит лишь половину от количества взятых компонентов. Готовый расплав подогревается до 500 °С и в него, тоже небольшими порциями, добавляется сернистый натрий, после чего вся ванна подогревается до 580 °С.

Сульфидируемые детали нагреваются до 150—200 °С и на решетке осторожно опускаются в ванну. Чтобы расплав мог свободно циркулировать, между деталями следует оставлять промежутки около 5 мм. Ванну необходимо закрыть крышкой и поддерживать температуру 580 °С в течение 1 ч. Глубина сульфидирования получается около 0,2 мм.

Извлеченные из ванны изделия следует охладить на воздухе до 80—90 °С и в течение 15 мин промывать горячей (80—90 °С) водой. Нельзя опускать в воду детали при температуре их выше 90 °С, так как при этом остатки солей бурно разбрызгиваются. Промытые детали высушиваются и окунаются в горячее веретенное или вакуумное масло, после чего просушиваются окончательно и поступают на сборку. Сульфидирование дает увеличение размеров примерно на 10 мкм на сторону. Это нужно учитывать в допусках на деталь. После сульфидирования допускаются обкатка роликом, полировка, доводка, но не шлифование и не обточка или фрезерование.

В процессе работы ванна истощается, причем в ней накапливается поташ. Для регенерации вводят свежие мочевины и поташ в соотношении 2:1 или одну мочевины в количествах, определяемых анализом. Через каждые 10—14 ч работы в ванну добавляется сернистый натрий в количестве до 2% от общей массы солей.

Обработанные маслом и просушенные сульфидированные детали должны иметь ровный черный цвет без цветов побежалости. Твердость их поверхности должна составлять около H50R_c.

Сульфидированные детали служат в вакууме во много раз дольше. Сульфидированные шпильки и гайки для стягивания прогреваемых фланцевых соединений с мегаллическим уплотнением исключают заедание даже после многократных прогревов.

10-11. ТВЕРДЫЕ СМАЗОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Еще более эффективным является метод нанесения на поверхности, работающие с трением в высоком вакууме и особенно с прогревом твердых смазочных покрытий, содержащих дисульфид молибдена.

Покрyтия с дисульфидом молибдена рекомендуются для работающих в вакууме подшипников всех видов, резьбовых соединений, ходовых винтов, шлицевых валов и т. п.

Твердые смазочные покрытия образуются при полимеризации пленкообразователя, в котором взвешен антифрикционный наполнитель — дисульфид молибдена. Для вакуумных систем рекомендуется пользоваться суспензиями ВНИИ НП-209 (ТУ НП 45-61) или ВНИИ НП-213 (ВТУ НП 119-62), или ВНИИ НП-229 (ВТУ НП 140-63). Суспензии наносятся на трущиеся поверхности деталей пульверизацией подобно лакокрасочным покрытиям, для чего можно применять небольшие пистолеты-распылители, например, типов 0-45, 0-31А и подобные им.

Правильно нанесенное покрытие должно иметь толщину 15—25 мкм и быть однородным на всей поверхности трения. Суспензия напыляется на детали, предварительно подогретые до 50 °С, а суспензия ВНИИ НП-229 требует предварительного подогрева деталей до 100 °С. Распыление суспензий производится воздухом при рабочем давлении 3—3,5 кгс/см². Оптимальное расстояние между соплом распылителя и деталью 20 см. Продолжительность напыления для получения слоя нужной толщины определяется опытным путем.

После напыления производится полимеризация пленки. Суспензии 209 и 213 просушиваются при комнатной температуре около 20 мин, а затем нагреваются до 150 °С и выдерживаются нагретыми 30 мин, после чего измеряется толщина полученного слоя. На этой стадии обработки покрытие еще может быть смыто бутилацетатом. В дальнейшем оно может быть удалено только механической обработкой.

Покрытие, оказавшееся при промере удовлетворительным, подвергается далее отверждению при 300 °С в течение 3 ч. Следует остерегаться перегрева.

Суспензия ВНИИ НП-229 требует особо тщательной термообработки. До промера толщины детали медленно, в течение 30 мин, нагревают до 50 °С, а затем еще в течение 1 ч доводят до 100 °С и выдерживают нагретыми 40 мин. После промера годные детали отверждают при температуре 150 °С в течение 3 ч [Л. 75].

Для нанесения покрытий детали должны быть соответствующим образом подготовлены. Стальные, медные и алюминиевые детали обезжириваются растворителями,

а детали из нержавеющей стали и титана обезжириваются щелочным методом. После обезжиривания следы коррозии удаляются травлением.

Следующим этапом подготовки является матирование поверхности. Для обычных конструкций оно производится пескоструйной обработкой, но для высокого вакуума этот метод нежелателен и приходится прибегать к матовому травлению.

Затем детали из малоуглеродистой стали фосфатируют, алюминиевые — анодируют, а детали из нержавеющей стали травят в царской водке, после чего производится нанесение покрытия.

Твердые смазочные покрытия с молибденом работают без замены или дополнения до износа деталей по поверхностям трения.

10-12. ПОКРЫТИЯ НАПЫЛЕНИЕМ

В вакуумной технике нередко встречается потребность в нанесении на поверхность детали термостойкого или химически стойкого плотного покрытия, обладающего наименьшим собственным газовыделением. Этим требованиям пока могут удовлетворить только металлические покрытия.

В настоящее время помимо химических и электрохимических методов нанесения металлических покрытий существуют и методы напыления металлов на поверхность детали.

Метод термовакuumного напыления, подробно описанный в работе [Л. 2], заключается в осаждении на поверхность детали испаренного в вакууме металла. Весь цикл протекает в высоком вакууме. Испарение металла происходит под действием электронной бомбардировки или электронного луча. Осаждение металла на поверхности покрываемой детали происходит по законам, схожим с законами освещения прямыми лучами света, что необходимо учитывать. Этим методом можно наносить различные металлические покрытия на самые разнообразные материалы. При этом могут быть получены и очень тонкие и равномерные покрытия.

Другим методом напыления является нанесение на поверхность детали металла, распыленного в плазменном факеле, перенесенного на деталь и вжигаемого в ее поверхность. Этим методом можно получить наиболее стой-

кие против механических воздействий покрытия, но только на деталях из достаточно термостойких материалов.

Промышленностью выпускается универсальная плазменная установка модели УПУ-3М для напыления тугоплавких металлических покрытий. Установка содержит плазменную горелку типа ГН-5М для напыления металла из проволоки, горелку типа ГН-5Р для напыления порошковых материалов, порошковый питатель, шкаф управления и источник питания типа ИПН-160/600Ш.

Установка может напылять в час до 10 кг металла (по вольфраму). Плазмообразующий газ — аргон. Ток в цепи дугового разряда — до 1 000 а.

10-13. ПОКРЫТИЯ ВНЕШНИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СИСТЕМЫ

Для внешних поверхностей систем следует различать три вида покрытий: антикоррозионные, декоративные и уплотняющие.

К первым покрытиям относятся гальванические покрытия, чаще всего глянцевое никелирование и глянцевое хромирование и окраска эмалевыми красками. Наибольшее распространение получили эмали № 64, У-416, УЭ и «молотковая» эмаль № 29. Под все эмалевые краски окрашиваемая поверхность подготавливается зачисткой шкуркой и тщательной промывкой ацетоном или бензином.

Затем все неровности, щели, шероховатости сравниваются шпатлевкой марки НЦ-008, изделие просушивается в течение 24 ч и покрывается грунтом марки ГФ-032, после чего сушится в сушильном шкафу (рис. 10-4) при 110—120 °С.

Эмаль наносится ровным тонким слоем при помощи пульверизатора. Эмаль № 64 сушится 24 ч на воздухе, а «молотковая» эмаль № 29 требует сушки в сушильном шкафу при 120—150 °С в течение 40—60 мин.

Детали, подвергающиеся значительному нагреву (печи, кипятильники диффузионных насосов, автоклавы, прогреваемые вентили и пр.), лучше всего окрашивать серебристой краской, составленной из 6 массовых частей алюминиевой пудры и 94 массовых частей

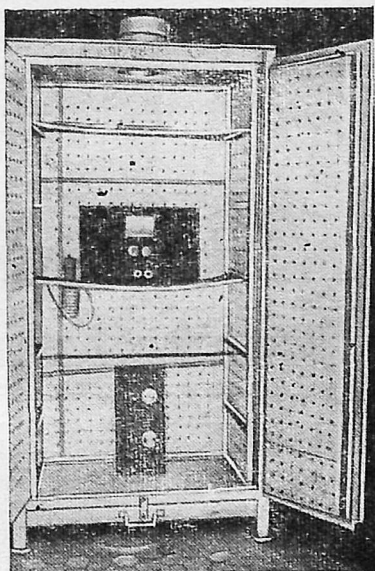


Рис. 10-4. Сушильный шкаф с электронными нагревателями в стенках для малярной.

кремнийорганического лака ФГ-9. Такая краска не дает потемнения даже при довольно длительном нагреве до 350—400 °С.

Крепеж и мелкие фланцы, накидные гайки, штоки вентиля и т. п. рационально подвергать сульфидированию.

Особо ответственные детали можно хромировать или же покрывать эпоксидной смолой с различными красителями. 100 массовых частей эпоксидной смолы марки ЭД-5 или ЭД-6 смешиваются с 10 массовыми частями полнэтилениоллинамина (отвердитель) и 10—20 массовыми частями дибутилфталата (пластификатор) перед самым применением. Красители (алюминиевая пудра, молотая эмаль и т. п.) добавляются в зависимости от желаемого цвета в количествах 5—15 массовых частей.

Тщательно очищенные и обязательно обезжиренные детали покрываются ровным слоем смеси и сушатся в шкафу при 80—100 °С, а еще лучше инфракрасными лучами.

Уплотняющими покрытиями пользуются при изготовлении и монтаже узлов форвакуумной системы, в которых общий поток газа заведомо велик по сравнению с газовыделением покрытия. Для таких покрытий пригодны глифталевый и шеллачный лаки и особенно описанное выше эпоксидное покрытие, которое имеет наименьшее газовыделение.

Глава одиннадцатая

УПЛОТНЕНИЯ С УПРУГИМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

11-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Уплотнениями в вакуумных системах обычно называются устройства, при помощи которых вакуумно-плотно соединяются разъемные соединения или вводы как неподвижные, так и подвижные (валы, штоки).

Вопросы вакуумно-плотных соединений и вводов в вакуумной технике имеют чрезвычайно важное значение, и для правильного их разрешения необходимо ясно представлять физическую сущность процессов, связанных с уплотнением.

Ранее мы указывали, что в технике высокого и сверхвысокого вакуума решающее значение имеют ничтожные на первый взгляд количества газа, проникающие через микроскопические каналы или отверстия. Так, через одну риску глубиной 0,25 мкм, не заполненную материалом уплотнителя, происходит натекание атмосферного воздуха, равного 10^{-7} л·мк/сек, что уже определяется как течь масс-спектрометрическим теческателем [Л. 46].

Понятно, что для разных систем с различным предельным давлением могут и должны применяться и раз-

личные уплотняющие устройства. Однако все они должны в максимально возможной степени приближаться к одной цели: сравняться по газопроницаемости с цельными стенками соединяемых ими узлов или деталей.

Для изготовления уплотняющих деталей и уплотнителей (уплотняющих прокладок) применяются материалы, имеющие сами по себе, особенно в сжатом состоянии, достаточно малую газопроницаемость. Следовательно, задача состоит в том, чтобы достигнуть такой же малой, а если возможно и еще меньшей, газопроницаемости по поверхностям соприкосновения деталей соединений.

Практика показывает, что как бы чисто ни были обработаны две металлические плоскости и как бы сильно (в пределах возможности реальных конструкций вакуумных соединений) они ни сжимались, без смазки они не могут дать вакуумно-плотного соединения. Однако притертые и смазанные металлические плоскости могут образовать соединения настолько плотные, насколько смазка может противостоять диффузии газа.

С другой стороны, доказано, что хорошо (не ниже 8 класса чистоты) обработанные и подобранные сухие поверхности стальных конусов с углом при вершине конуса 20—30°, вдвинутых один в другой с усилием, практически достижимым в соединениях, могут создать первичное (до прогрева) высоковакуумное уплотнение. При прогреве вакуумная плотность такого соединения нарушается.

Это естественно, так как неизбежные неровности даже очень чисто обработанных поверхностей служат достаточно широкими каналами для проникновения газа. Механически обработанные поверхности фланцев, которые в основном являются рабочими деталями вакуумных соединений, имеют три вида неровностей: шероховатость, волнистость от обработки (дробление) и волнистость от прогиба, вызванная зажимами, короблением от прогрева и т. п.

Шероховатость поверхности образуется следами режущего инструмента и представляет собою довольно правильно расположенные мелкие канавки, разделенные гребешками. Гребешки эти никогда не имеют гладкой поверхности и равной высоты. Таким образом, шероховатость образует перекрестные каналы неправильной фор-

мы и переменного сечения. Это обстоятельство затрудняет математическое моделирование, необходимое для построения расчетных схем и вывода формул.

Волнистость, получаемая при обработке, является следствием дефектов оборудования или инструмента, при помощи которых изготавливается деталь. Шаг и амплитуда такой волны невелики, но очень сильно отражаются на качестве соединений с металлическими уплотнителями, так как эта волна не может быть выправлена при стягивании фланцев и ее впадины должны быть заполнены материалом прокладки за счет перемещения его частиц. Влияние неровностей этого вида также трудно моделируется.

Третий вид неровностей — волна с гораздо большим шагом, появляющаяся в результате излишних усилий зажима в патроне или на столе станка, в результате старения металла или его прогрева в работе. Такие волны выправляются при достаточно сильном стягивании фланцев, если конструкция их правильно разработана и стягивающие элементы поставлены достаточно часто.

Нет никакой вероятности, что все эти неровности совпадут так, что все выступы одной из соединяемых деталей попадут точно в выемки ответной, и соединение окажется замкнутым вакуумно-плотно.

Следовательно, задача уплотнения состоит в том, чтобы при помощи уплотнителя, т. е. прокладки из соответствующего материала или промазки соответствующей пастой, смазкой, компаундом, перекрыть все существующие между уплотняемыми поверхностями зазоры и каналы и удержать уплотнитель во все время работы соединения в таком контакте с уплотняемыми поверхностями, который обеспечил бы необходимую вакуумную плотность.

В какие же условия должны быть поставлены уплотнители, чтобы соединение было вакуумно-плотным?

Вязкие жидкости и расплавленные металлы могут заполнить микронеровности уплотняемых поверхностей и удерживаются в них при условии хорошего смачивания ими материала уплотняемых деталей и достаточно больших сил поверхностного натяжения, способных противостоять выдавливанию внешней атмосферой. С повышением температуры вязкость всех жидкостей быстро падает, а диффузия и растворимость газов в них быстро по-

вышаются и, следовательно, повышается газопроницаемость такого уплотнителя. Кроме того, и масла и расплавленные металлы под действием собственной тяжести стекают с вертикальных и наклонных поверхностей. Жидкостные уплотнители в подавляющем большинстве случаев пригодны лишь для горизонтальных соединений.

Густые (консистентные) смазки, замазки, пасты и компаунды требуют сжатия уплотняемых поверхностей с небольшими усилиями, но, хорошо заполняя микронеровности стыков, они имеют почти полностью те же недостатки, что и жидкости: резкое изменение свойств в зависимости от температуры, значительная диффузия газов, наличие летучих составляющих.

Более удобными представляются на первый взгляд уплотнители из высокоэластичных упругих материалов, таких как вакуумная резина или некоторые пластики. Но здесь для получения и сохранения вакуумной плотности требуется соблюдение ряда условий.

Естественно, что первым из них является газонепроницаемость материала, вторым — наименьшее содержание летучих составляющих. Современные сорта вакуумной резины в значительной мере отвечают этим требованиям, так же как и некоторые пластмассы.

Далее следует требование упругой текучести материала, т. е. свойства заполнять все неровности формы, но не расплываться, а восстанавливать свои первоначальные форму и размеры при снятии нагрузки.

Высокая степень упругости необходима для постоянного поддержания контактного давления между уплотнителем и соприкасающимися с ним деталями уплотняемого соединения. В противном случае всякое изменение температуры, вибрация, одностороннее повышенное давление могут послужить причиной отставания прокладки от уплотняемых поверхностей и раскрытия уплотнения.

Только при наличии таких свойств упругий материал может служить высоковакуумным уплотнителем. Упругий материал сам по себе под действием собственной тяжести или сил поверхностного натяжения не растекается по поверхности уплотняемой детали и не заполняет ее неровностей. Его нужно загнать в эти неровности, заставить заполнить их и перекрыть доступ газа по ним в вакуумную полость, как это показано на рис. 11-1, или хотя бы надежно изолировать отдельные неровности, как

показано на рис. 11-2. Дело в том, что упругие уплотнители при сжатии ведут себя в значительной мере подобно очень вязким жидкостям; они не смачивают сжимающих их поверхностей, и растекание уплотнителя по всем неровностям уплотняемой поверхности идет тем труднее, чем более резкими изломами очерчена эта поверхность. Неглубокие выемки со скругленными краями заполняются уплотнителем легко, но узкие глубокие риски с острыми

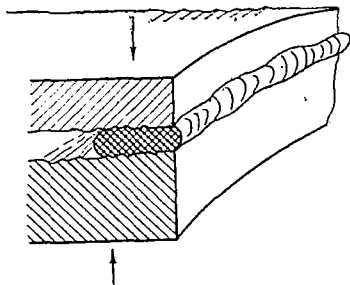


Рис. 11-1. Схема работы упругого уплотнителя. Заполнение микронеровностей.

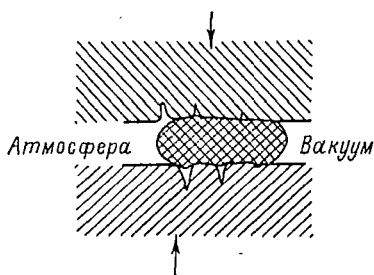


Рис. 11-2. Схема работы упругого уплотнителя. Часть неровностей изолируется без заполнения.

краями могут быть заполнены лишь под большим давлением.

В силу этих причин, несмотря на очень высокую эластичность вакуумной резины, требуется тщательная обработка уплотняемых поверхностей по высоким классам чистоты.

По этим же причинам рационально применять для обработки уплотняемых поверхностей электрополирование, так как при этом сглаживаются все острые выступы и притупляются острые кромки микрорельефа обрабатываемой поверхности. Однако обработка по классам чистоты выше девятого не приносит пользы. Это связано очевидно с тем обстоятельством, что в ограничении растекания материала уплотнителя (если в конструкции фланцев не имеется ограничителей такого растекания) значительную роль играет трение и чрезмерно снижать его не следует. Поэтому рекомендуется обрабатывать уплотняемые поверхности по 6—8-му классу чистоты.

Кроме того, в ряде случаев требуются замкнутые канавки, из которых уплотнитель не мог бы вытекать при больших сжимающих усилиях.

11-2. ВИДЫ УПЛОТНЕНИЙ

Наибольшее распространение в вакуумной технике получили уплотнения следующих видов: стыковые уплотнения с резиновыми уплотнителями; стыковые уплотнения с уплотнителями из пластических масс; прогреваемые стыковые уплотнения с металлическими уплотнителями; уплотнения телескопических соединений и грибковых вводов с резиновыми и пластмассовыми уплотнителями; сальниковые уплотнения подвижных штоков и валов.

Применение того или другого материала для уплотнителя влечет за собой и характерное конструктивное решение стыка или ввода и некоторые особенности технологии.

В этой главе мы кратко рассмотрим стыковые уплотнения с резиновыми и пластмассовыми уплотнителями, телескопические и сальниковые уплотнения. Остальные виды уплотнений будут кратко освещены в двух последующих главах.

11-3. МЕХАНИЗМ УПЛОТНЕНИЯ УПРУГОЙ ПРОКЛАДКОЙ

Преобладающим видом разъемных вакуумных соединений являются фланцевые соединения. Анализируя их работу, можно представить себе с большой степенью приближения к истине механизм уплотнения разъемных соединений вообще.

Все тела, находящиеся в нормальной воздушной атмосфере, даже очень чисто промытые, покрыты весьма тонким слоем газа и влаги (адсорбированные слои). При сборке разъемного соединения с уплотняющей прокладкой эти слои размещаются между прокладкой и фланцами, образуя тончайшие газопроницаемые прослойки с обеих сторон прокладки. Следовательно, если бы мы имели даже оптически гладкие поверхности фланцев и прокладки без малейших неровностей, то и тогда простое соприкосновение прокладки с фланцем не могло бы достигнуть вакуумной плотности. Происходил бы обмен частиц газа между внешней атмосферой и откачанным пространством через адсорбированные слои, т. е. установился бы поток газа из атмосферы в вакуум.

Для достижения практической газонепроницаемости соединения необходимо удалить эти слои или совсем,

или в такой степени, чтобы остающийся поток газа был меньше определяемого существующими контрольными приборами. Это достигается приложением к соединению больших или меньших сжимающих, стягивающих усилий, приводящих к частичному выдавливанию адсорбированных слоев газа и влаги и максимально возможному сближению поверхностей собственно прокладки и фланца.

В действительности газ проникает не только по адсорбированным слоям, но и через многочисленные мельчайшие каналы, прямые и лабиринтные, образованные сетью рисок и волнистостью соприкасающихся поверхностей. Постепенно мягкую прокладку между твердыми фланцами можно настолько деформировать, что ее материал заполнит все каналы, выжмет из них газ и влагу и настолько плотно прижмется во всех точках контакта к поверхностям фланцев, что прекратит практически доступ газа в вакуум.

При сжатии прокладки форма ее поперечного сечения в зависимости от конструкции фланцев более или менее изменяется. При этом уменьшается высота прокладки, а объем ее благодаря практически незначительной сжимаемости материала можно считать неизменным. Перемещающийся при этом материал прокладки, естественно, течет в направлении наименьшего сопротивления, т. е. в ту сторону, с которой не имеется ограничений или где имеется наибольший зазор. Это продолжается до тех пор, пока силы внутреннего сцепления и трение по контактирующим с прокладкой поверхностям в сумме не окажутся в состоянии остановить бесполезное растекание материала прокладки. Тогда начнется затекание материала в микронеровности уплотняемых поверхностей и перекрытие упомянутых выше каналов.

Эти явления, изложенные здесь схематично, обуславливают необходимую для каждого случая степень сжатия прокладки и соответствующее ей давление уплотнения. Это давление, замеренное в определенных условиях сжатия прокладки, можно считать мерой уплотняющей способности того или другого материала, применяемого для изготовления уплотняющих прокладок, которые в вакуумной технике обычно называются уплотнителями. Чем меньше усилий требуется для достижения вакуумноплотного соединения, тем выше уплотняющая способность материала, тем рациональнее и экономичнее мо-

жет быть конструкция уплотнения. Удельное давление в большинстве случаев может быть заменено, как критерий уплотняющей способности, величиной степени сжатия, необходимой для уплотнения.

Однако в реальных соединениях усилие сжатия зависит не только от уплотняющей способности материала уплотнителя. На его величину влияет целый ряд факторов: наличие или отсутствие ограничителей растекания уплотнителя, чистота обработки уплотняемых поверхностей, форма сечения уплотнителя, технологические допуски, рабочая температура, агрессивность среды, соблюдение чистоты при монтаже, правильность сборки.

Под нагрузкой все материалы в большей или меньшей степени подвержены ползучести, т. е. имеют свойство очень медленно, но непрерывно уступать действию внешних сил. Чем выше температура, тем сильнее сказывается ползучесть. Для упругих материалов это свойство выражается в постепенном снижении сопротивления, оказываемого телом, сжимающим его внешним силам и накоплении остаточных деформаций. В уплотнениях это приводит к снижению контактного давления между уплотнителем и фланцами. Поэтому, чем выше упругость материала, тем надежнее уплотнение.

При уменьшении сжимающего усилия упругий материал уплотнителя стремится восстановить свою первоначальную форму и в определенный момент начинает вытягиваться из каналов, которые он заполнил при уплотнении. Следствием этого является постепенно нарастающая газопроницаемость соединения.

Пластмассы, пригодные для изготовления вакуумных уплотнителей, также относятся к разряду упругих материалов, но их упругость сильно отличается от упругости резины. Если хорошая резина, кратковременно сжатая даже на 50% своей толщины, при снятии нагрузки быстро восстанавливает почти полностью свои первоначальные размеры, то большинство пластмасс восстанавливает свою толщину только после сжатия на 1—2%, а при большем сжатии сразу получает остаточную деформацию.

Совершенно другими свойствами среди упругих материалов обладает фторопласт-4. Ему присуща высокая ползучесть, соединенная со значительной упругостью. На рис. 11-3 видно, как изменяется толщина фторопластового уплотнителя под длительной нагрузкой и после

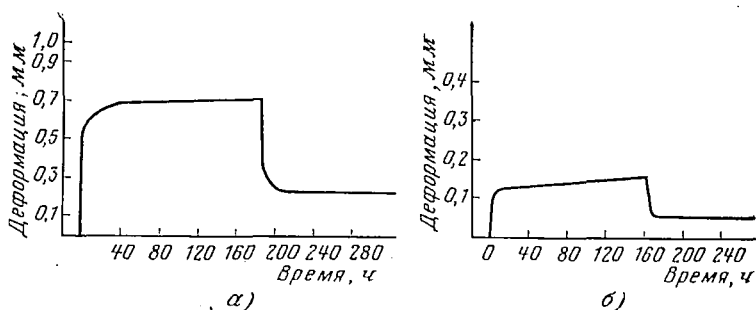


Рис. 11-3. Изменение толщины фторопластового уплотнителя под нагрузкой и после снятия ее.

а — тефлон, нагрузка 70 кгс/см²; б — фторопласт-4, нагрузка 150 кгс/см².

снятия ее. Вначале быстро уступая нажиму, фторопласт затем в течение 160 ч медленно приближается к равновесию с нагрузкой, а после снятия последней почти также медленно восстанавливает большую часть утраченного размера [Л. 53].

11-4. СТЫКОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ С РЕЗИНОВЫМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

Как сказано ранее, стыковые уплотнения с резиновыми уплотнителями имеют наибольшее распространение в тех установках, которые не работают с агрессивными веществами и не подвергаются значительному прогреву, или когда место стыка разрешается искусственно охлаждать. Эти условия здесь необходимы потому, что уплотнителями в данном случае служат прокладки из вакуумной резины, лучшие термостойкие сорта которой не допускают длительного прогрева свыше 200 °С и стойки против далеко не всех агрессивных жидкостей и паров.

Термостойкими, т. е. допускающими более или менее продолжительный прогрев до 200 °С, являются сорта резины: ИРП-1345, ИРП-1399, ИРП-2043 и 51-1433. Остальные сорта вакуумной резины не рекомендуется прогревать в течение многих часов свыше 70 °С, хотя помещенная в высокий вакуум резина сорта 7889 и выдерживает без разрушения температуру в 120 °С. При доступе атмосферного воздуха эта резина при такой температуре разрушается.

В случаях, когда на уплотнитель попадает масло или он может подвергаться действию органических растворителей, следует применять резину одного из маслостойких сортов: 9024, ИРП-1015, ИРП-1345 или ИРП-2043.

В настоящее время нормализованные конструкции соединений с резиновыми уплотнителями предусматривают стыковку фланцев без зазора в отличие от существовавших ранее соединений с утолщенными прокладками, оставлявшими между фланцами зазор в 1—1,5 мм.

Согласно действующим еще нормам один из фланцев имеет канавку для размещения уплотнителя с небольшим натягом по внутреннему диаметру канавки. Второй фланец имеет плоскую уплотняемую поверхность. Предусматривается применение уплотнителей круглого сечения, цельных, прессованных, заводского изготовления. Размеры нормальных фланцев с канавками и соответствующих уплотнителей приведены в табл. 11-1 и 11-2. Типовая конструкция соединения с резиновым уплотнителем показана на рис. 11-4.

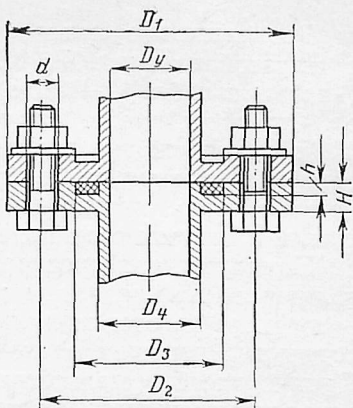


Рис. 11-4. Типовая конструкция соединения с резиновым уплотнителем.

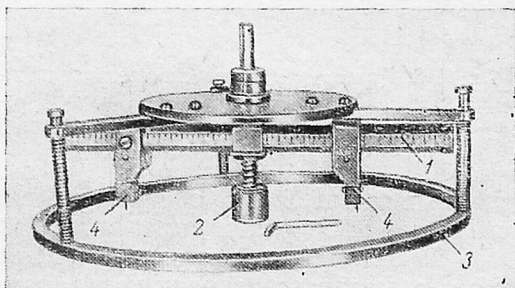


Рис. 11-5. Приспособление для вырезания резиновых уплотнителей из листа.

1 — штанга со шкалой; 2 и 3 — прижимы для удержания резинового листа; 4 — ножи.

Все стыковые поверхности следует обрабатывать с чистотой не ниже $\nabla 6$. Соединения, размеры которых указаны в табл. 11-1, при монтаже стягиваются до упора, что обеспечивает сжатие уплотнителя по высоте до 40%. Такое сжатие создает весьма большой запас надежности, так как действительно необходимая для уплотнения степень сжатия уплотнителей из резин упомянутых нами марок составляет 12—15%.

Наиболее распространенными в настоящее время являются прессованные уплотнители круглого сечения заводского изготовления. Они наиболее надежны и выгодны в отношении расхода резины и трудовых затрат. Однако часто в мелкосерийном и индивидуальном производствах уплотнители изготавливают из листовой или шнуровой резины.

Уплотнители для соединения небольших диаметров могут быть вырезаны из листовой резины с помощью приспособления, показанного на рис. 11-5. Два ножа 4 передвигаются по градуированной штанге 1 и могут закрепляться на ней в положениях, соответствующих обработке листа по внутреннему и наружному диаметрам

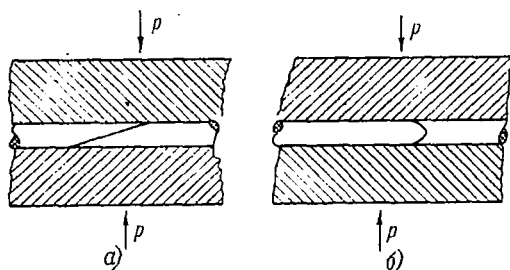


Рис. 11-6. Положение стыка склеенного уплотнителя.

a — правильное; *b* — неправильное.

уплотнителя. Прижимы 2 и 3 обеспечивают неподвижность листа во время операции вырезания. Приспособление ставится на сверлильный станок, а под резину кладется лист фанеры или деревянная доска, предохраняющая ножи от порчи. Прокладки малых диаметров вырезаются на токарных станках в простых приспособлениях-прижимах. Уплотнители при этом получают прямоугольного сечения.

Размеры фланцев с канавкой для резиновых уплотнителей, мм (рис. 11-4)

| Условный проход сечения D_y | Внешний диаметр D_1 | Диаметр болтовой окружности D_2 | Внешний диаметр канавки D_3 | Внутренний диаметр канавки D_4 | Толщина фланца H | Глубина канавки h | Диаметр болтового отверстия d | Число болтов |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------|--------------|
| 10 | 46 | 34 | 22,5 | 13,5 | 5 | 1,8 | 6 | 4 |
| 15 | 52 | 39 | 27,5 | 18,5 | 5 | 1,8 | 6 | 4 |
| 20 | 62 | 48 | 32,5 | 23,5 | 6 | 1,8 | 7 | 4 |
| 25 | 70 | 55 | 38 | 29 | 6 | 1,8 | 7 | 4 |
| 32 | 78 | 62 | 45 | 36 | 8 | 1,8 | 7 | 4 |
| 40 | 85 | 70 | 53 | 44 | 8 | 1,8 | 7 | 4 |
| 50 | 110 | 90 | 69 | 55 | 10 | 3 | 9 | 4 |
| 60 | 120 | 102 | 79 | 65 | 10 | 3 | 9 | 4 |
| 85 | 145 | 125 | 105 | 91 | 10 | 3 | 9 | 4 |
| 100 | 170 | 145 | 120 | 106 | 10 | 3 | 12 | 4 |
| 125 | 195 | 170 | 146 | 132 | 10 | 3 | 12 | 4 |
| 150 | 220 | 195 | 172 | 158 | 10 | 3 | 12 | 8 |
| 160 | 235 | 210 | 188 | 168 | 12 | 4,2 | 12 | 8 |
| 200 | 275 | 250 | 228 | 208 | 12 | 4,2 | 14 | 8 |
| 250 | 330 | 300 | 278 | 258 | 12 | 4,2 | 14 | 8 |
| 260 | 340 | 308 | 288 | 268 | 12 | 4,2 | 14 | 8 |
| 300 | 380 | 350 | 328 | 308 | 14 | 4,2 | 14 | 8 |
| 350 | 430 | 400 | 380 | 360 | 14 | 4,2 | 14 | 8 |
| 380 | 460 | 430 | 410 | 390 | 16 | 4,2 | 14 | 8 |
| 400 | 490 | 455 | 430 | 410 | 16 | 4,2 | 18 | 8 |
| 450 | 550 | 515 | 480 | 460 | 18 | 4,2 | 18 | 8 |
| 500 | 600 | 565 | 530 | 510 | 20 | 4,2 | 18 | 8 |

Для соединений большего диаметра уплотнители могут склеиваться из резиновых шнуров прямоугольного или круглого сечения. Концы шнура срезаются под углом в 20—25° и склеиваются резиновым клеем ГОСТ 2199-66. При этом следует внимательно следить за тем, чтобы шнур не был перевернут и склеенный стык не располагался в плоскости, перпендикулярной фланцам (рис. 11-6), иначе при стягивании фланцев он может раскрыться. С этой целью при изготовлении уплотнителя шнур необходимо уложить в канавку до склеивания и производить срезы и склеивание концов на месте, вынимая из канавки только концы шнура и не перекручивая их.

Размеры резиновых уплотнителей круглого сечения для фланцевых соединений, мм

| Условный проход соединения D_y | Внутренний диаметр уплотнителя D | Диаметр поперечного сечения d |
|----------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| 10 | 12,5 | 3 |
| 15 | 17,5 | 3 |
| 20 | 22,5 | 3 |
| 25 | 28 | 3 |
| 32 | 35 | 3 |
| 40 | 43 | 3 |
| 50 | 54 | 5 |
| 60 | 64 | 5 |
| 85 | 90 | 5 |
| 100 | 105 | 5 |
| 125 | 131 | 5 |
| 150 | 157 | 5 |
| 160 | 166 | 7 |
| 200 | 206 | 7 |
| 250 | 256 | 7 |
| 260 | 266 | 7 |
| 300 | 306 | 7 |
| 350 | 358 | 7 |
| 380 | 388 | 7 |
| 400 | 408 | 7 |
| 450 | 458 | 7 |
| 500 | 508 | 7 |

Клееные уплотнители делаются с расчетом минимального натяга по внутреннему диаметру канавки. Для шнура прямоугольного сечения его поперечные размеры подбираются из расчета заполнения 90% сечения канавки при сжатии уплотнителя на 25—30% по высоте. Для круглого шнура его диаметр можно брать по табл. 11-2.

В соединениях прямоугольной формы и в соединениях очень больших размеров бывает выгодно заменять канавки накладными на винтах рамками, фиксирующими положение уплотнителя на плоских фланцах.

11-5. КРУПНОГАБАРИТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ С РЕЗИНОВЫМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

Для уплотнения очень крупных крышек, как, например, вакуумных сушильных шкафов, достигающих 12—15 м в поперечнике, обычные конструкции уплотнений малопригодны, так как они рассчитаны на обрабо

такие на станках корпуса и крышки к ним. Для обработки же крышек, фланцев и тому подобных деталей шкафов, упомянутых выше размеров или подобных им камер требуются уникальные станки в цехах с мощным крановым оборудованием и специальные транспортные средства. Крышки таких камер, если они не обработаны на станке, вследствие сварочных паводок и прогибов при транспортировке имеют значительные отступления от плоскостности и не поддаются уплотнению болтами. Кроме того, болтовые соединения таких размеров трудоемки в обслуживании, а если болты заменить пневматическими или гидравлическими прижимами, то резко возрастает стоимость соединений.

Однако большие размеры уплотняемых соединений дают возможность использовать давление внешней атмосферы в качестве уплотняющей силы, если обеспечить равномерное сжатие уплотнителя по всему периметру

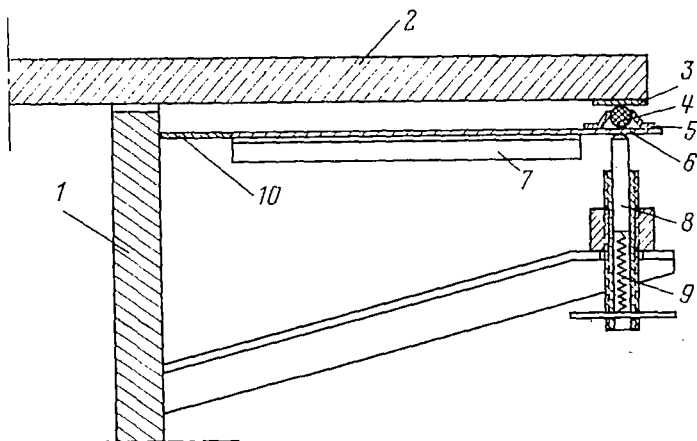


Рис. 11-7. Безболтовое уплотнение очень больших камер.

уплотнения. Для того чтобы внешнее атмосферное давление начало сжимать уплотнитель, необходимо начать откачку камеры при обязательном соприкосновении крышки с уплотнителем по всему ее периметру.

Система уплотнения, схематически изображенная на рис. 11-7, позволяет герметизировать очень большие камеры без обработки уплотняемых поверхностей на стан-

ках. Это дает возможность собирать всю систему уплотнения на месте эксплуатации из легко транспортируемых деталей, т. е. делает ее технологичной даже при самых крупных габаритах.

Крышка камеры 2 свободно ложится на борт (стенку) камеры 1, причем в любых местах между ними могут оставаться зазоры, величина которых не имеет значения. По нижнему краю крышки вакуумно-плотно приваривается окантовка 3 из тонкого полированного листа нержавеющей стали. К этой окантовке в процессе уплотнения прижимается уплотнитель 4 из резинового шнура диаметром поперечного сечения 10—15 мм. Уплотнитель закреплен в держателях 5, приваренных к гибкой консоли 6. Консоль изготовлена из листовой нержавеющей стали толщиной 3 мм и вакуумно-плотно приварена к корпусу камеры по всему ее периметру. Снизу консоль ужесточена уголками 7.

Ниже консоли на полке размещается устройство для первоначальной настройки уплотнения, состоящее из толкателей 8, поджимаемых регулируемыи пружинами 9. Толкатели размещены вдоль всего внешнего края консоли на расстоянии около 200 мм друг от друга.

Действие всей системы основано на том, что при откачке камеры откачивается также и пространство, ограниченное крышкой 2, уплотнителем 4 и консолью 6. Вследствие разницы давлений в этом пространстве и снаружи консоль 6 будет под давлением атмосферного воздуха прижимать уплотнитель к крышке и уплотнять камеру. Для получения хорошего уплотнения необходимо, чтобы уже в начале откачки уплотнитель везде касался крышки с минимальным поджатием. Это достигается первоначальной настройкой уплотнения, т. е. легким поджатием уплотнителя (с усилием около 1 кгс/см погонный) к крышке при помощи толкателей 8. При последующих укладываниях крышки эта настройка сохраняется благодаря наличию пружин 9. В случае постепенного коробления крышки при эксплуатации настройка время от времени возобновляется.

Ребра на нижней стороне консоли служат для того, чтобы консоль не прогнулась посередине, а качалась бы на переходнике 10 и передавала на уплотнитель усилие, равное половине суммарного давления атмосферы на консоль. Держатели 5 делаются не длиннее 100 мм и привариваются к консоли с промежутками в 1—2 мм, чтобы

не лишать консоль продольной (вдоль уплотнителя) гибкости.

При такой конструкции консоль «следит» за всеми искривлениями крышки камеры и делает уплотнение вполне надежным даже при условии постепенного изменения прогибов крышки вследствие старения или провеса.

11-6. СТЫКОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ С ПОЛИМЕРНЫМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

Из числа упругих полимерных материалов (пластмасс) наименьшим газовыделением в вакууме при достаточной пластичности, чтобы служить прокладочным материалом, обладают фторопласт-4, полиэтилен и полиимид. Поскольку полиэтилен не обладает достаточной термостойкостью, он может иметь лишь ограниченное применение в вакуумной технике. Полиэтиленовые уплотнители могут применяться вместо резиновых в тех случаях, когда аппаратура не подвергается прогреву свыше 40 °С. Прокладки из полиэтилена не могут сравниться с резиновыми по долговечности, но полиэтилен дешевле и не дефицитен.

В настоящее время одним из лучших уплотняющих материалов для высоковакуумных систем является фторопласт-4 благодаря чрезвычайно высокой химической стойкости, большому диапазону рабочих температур, а также еще некоторым его специфическим свойствам.

Среди многих специалистов-вакуумщиков распространено мнение, что фторопласт-4 нехорош тем, что с течением времени уплотнители, сделанные из него, вытекают в зазоры, теряют упругость и требуют подтяжки соединений.

Мы не можем согласиться с этим, так как наш опыт показал, что при правильном применении фторопласта-4 он не только не отстает от уплотняемых поверхностей, но с большим трудом удаляется из гнезд и канавок, настолько надежно он «присасывается» к металлическим поверхностям.

Правда, в технике высоких давлений, когда фторопласт-4 находится под постоянным воздействием давлений более 30 кгс/см², он будет медленно наращивать остаточные деформации, т. е. будет происходить медленное течение уплотнителя. Но в подавляющем большин-

стве вакуумных систем уплотнитель подвергается однократному монтажному сжатию, а затем вследствие своих свойств «упругой текучести» получает такие площади соприкосновения (опоры) с металлом, которые соответствуют равновесию между усилиями от стягивающих элементов соединения и упругостью уплотнителя.

Фторопласт-4 имеет высокий температурный коэффициент линейного расширения, на порядок больший, чем у металлов, но это свойство вредно сказывается лишь при излишне больших размерах сечения уплотнителя, которых следует избегать. При нормальных размерах упругость материала вполне компенсирует его термическое расширение или сжатие.

Химическая стойкость фторопласта-4 выше, чем у золота и платины. Его можно смело применять в любых агрессивных средах и совершенно не бояться набухания или разложения при любых видах смазки, так как никакие органические растворители на него не действуют.

Следует заметить, что при температурах 150—250 °С фторопластовые прокладки должны заключаться в канавки, закрываемые выступами противоположной стыковой поверхности, чтобы вокруг прокладки не было зазоров для ее выдавливания, превышающих 0,1 мм. При температурах же до 150 °С фторопластовые уплотнители не вытекают даже и через зазор в 1 мм, если не подвергаются чрезмерно высокому усилию сжатия.

Фторопласт-4 выдерживает усилия сжатия до 30 кгс/см² без остаточных деформаций. Этого предела и следует придерживаться при монтаже уплотнений. Практически это соответствует легкому затягиванию гаек стандартным гаечным ключом. Уплотняющая способность у фторопласта-4 выше, чем у резины, так как он пластичнее, хотя и менее упруг. Вследствие этого фторопласт-4 может вакуумно уплотнять даже плохо обработанные, шероховатые поверхности.

Коэффициент трения по металлу у фторопласта-4 много меньше, чем у резины, и при трении со сталью равен 0,1. Вследствие этого возможно уплотнение не только стягиваемых в осевом направлении стыков, но и поверхностей, поворачивающихся одна относительно другой в момент уплотнения, что невозможно ни с каким другим уплотнителем.

Прокладки из фторопласта-4 нет необходимости вырезать в виде цельных колец. Можно отрезать полоску

толщиной 2 и шириной 3-5 мм такой длины, чтобы ее можно было согнуть в кольцо необходимого диаметра. Концы полоски срезаются под углом 15° и накладываются друг на друга с перекрытием концов на 1—3 мм, как показано на рис. 11-8. Такую прокладку укладывают в канавку или обойму без склеивания концов и зажимают в уплотняемом соединении. Разрезная прокладка такого вида вакуумно-плотно уплотняет и стыки с взаимно поворачивающимися при монтаже поверхностями при условии движения уплотняемых поверхностей к направлению «усов» прокладки.

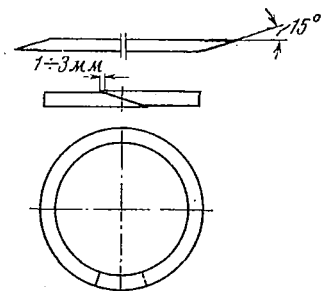


Рис. 11-8. Разрезной уплотнитель из полоски фторопласта-4.

При аккуратном изготовлении дегалей соединения без перекосов и коробления толщина уплотнителей более 2 мм является излишней и даже вредной. Фланцы для стыков с фторопластовыми уплотнителями делаются такими же, как и для резины, но с канавками меньшей глубины.

Все сказанное относится и к уплотнителям из других марок фторопласта.

Уплотнители больших диаметров и для фланцев некруглой формы вырезаются из пластины по спирали, а затем распрямляются или изгибаются по форме фланца. Можно изготовлять и разрезные прокладки из нескольких кусков, стыкованных, как указано выше.

Следует обратить внимание на то, что склеивать концы фторопластовых уплотнителей весьма трудно (требуется специальная предварительная обработка) и не имеет смысла.

В зарубежной практике в последние годы широкое распространение получили уплотнители из фтороэластомеров «витон А» и «витон В», являющихся сополимерами герсафторпропена и фтористого винилидена. По литературным данным [Л. 44] они применимы при рабочих температурах до $+250^\circ\text{C}$ (кратковременно). В СССР ближайшим подходящим к витону материалом является вакуумная термостойкая резина марки ИРП-2043, хотя

она не по всем параметрам аналогична американскому материалу.

Следует остановиться на сообщениях о применении за границей полиимида в качестве материала для изготовления уплотнителей прогреваемых высоковакуумных соединений. По материалам Манчестерского вакуумного конгресса полиимидные прокладки, применяемые в США, Англии и других странах, могут выдерживать прогрев до 450°C . Однако литературные данные, даже рекламные, не подтверждают этих сведений. В работе [Л. 15] указывается, что полиимид, применяемый в качестве прокладочного материала, является твердоупругим материалом, относительно гигроскопичным, с собственным газовыделением (при 20°C), средним между медью и витоном и пригоден для систем, прогреваемых не выше 300°C .

11-7. УПЛОТНЕНИЕ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И ГРИБКОВЫХ ВВОДОВ

Бесфланцевые соединения телескопических (с изменяемой длиной) трубопроводов делаются обычно по образцу, показанному на рис. 11-9. Резиновый или пластмассовый уплотнитель 1 под действием нажимной гайки 2 сжимается и уплотняет соединение. Фигурная шайба 3 служит для предохранения уплотнителя от неправильных деформаций (провертывания).

По такой же схеме осуществляются и наиболее распространенные уплотнения различных вводов в вакуумные полости, называемые обычно грибковыми.

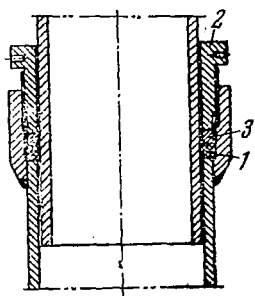


Рис. 11-9. Телескопическое уплотнение.

1 — уплотнитель; 2 — нажимная гайка; 3 — шайба.

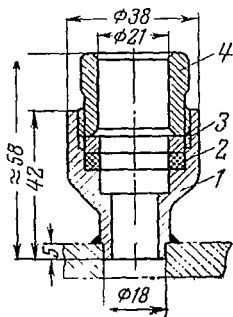


Рис. 11-10. Грибковое уплотнение.

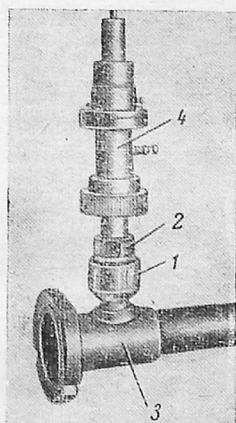


Рис. 11-11. Внешний вид сварного грибка со вставленным в него надетателем.

1 — грибок; 2 — гайка; 3 — трубопровод 4 — надетатель.

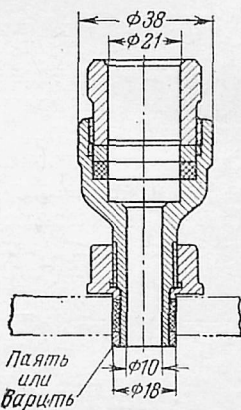
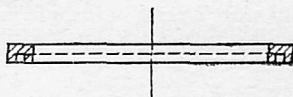


Рис. 11-12. Грибок, укрепленный в стенке установки при помощи уплотнителя из резины или фторопласта.

Здесь уплотнитель 2 (рис. 11-10), расположенный между стенками корпуса грибка 1 и вводимой деталью, под давлением нажимной гайки 4 и шайбы 3 плотно при-

Рис. 11-13. Фторопластовый уплотнитель в форме манжеты.



жимается к корпусу грибка и обжимает вводимую деталь, уплотняя ее. Поверхности трения между гайкой 4 и шайбой 3 должны обрабатываться по $\nabla 8$.

Корпус грибка может вариться или вплавляться в стенку установки (рис. 11-11), а в толстых стенках может монтироваться, как показано на рис. 11-12.

Для уплотнителей этих соединений пригодны все сорта вакуумной резины и фторопласт-4. Фторопластовые уплотнители рекомендуется делать в виде манжет (рис. 11-13).

11-8. САЛЬНИКОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ ВВОДОВ ДВИЖЕНИЯ

На рис. 11-14 показано сальниковое уплотнение— устройство, обеспечивающее вакуумную плотность ввода в вакуумный аппарат вращающегося вала или поступательно движущегося штока. Уплотнения такого вида имеют весьма широкое применение для валов с малыми скоростями движения и удельными нагрузками.

Для их нормальной работы необходимо прежде всего, чтобы та часть вала или штока, которая может нахо-

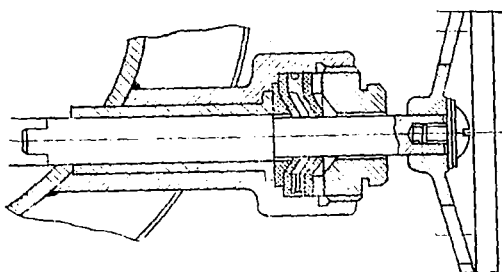


Рис. 11-14. Сальниковое уплотнение.

даться в уплотнении, имела правильную цилиндрическую форму без ступеней, конуса, лысок и поясков и была бы хорошо заполирована.

Вал (шток) нужно делать из стали повышенной твердости (сталь Ст.45 и выше), закаливать и шлифовать. После шлифовки его поверхность тщательно полируется и хромируется.

Сальниковое уплотнение с резиновыми манжетами работает удовлетворительно только со смазкой. Поэтому резиновые уплотнители для него должны делаться из маслостойкой резины, например, сорта 9024.

Смазкой может служить вакуумное масло, но лучше пользоваться консистентной смазкой, приготовляемой по рецепту, массовые части:

| | |
|----------------------------|---|
| Масло марки ВМ-1 | 2 |
| Парафин | 1 |

После плавления парафина в масле при температуре не выше 70 °С смеси дают охладиться до комнатной температуры при непрерывном размешивании.

ПРОГРЕВАЕМЫЕ СТЫКОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

12-1. МЕХАНИЗМ УПЛОТНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОКЛАДКОЙ

Ни один сорт резины, ни один вид упруго-пластичного полимерного материала не обладает достаточной термостойкостью, чтобы полностью удовлетворить требованиям техники сверхвысокого вакуума, когда вакуумный аппарат подвергается прогреву свыше 300 °С. В этих случаях эффективным оказывается только уплотнение металлическими прокладками (уплотнителями).

Хотя принцип действия уплотняющей прокладки (заполнение всех неровностей уплотняемых поверхностей материалом относительно мягкой прокладки) остается неизменным для всех материалов, все же механизм уплотнения металлом значительно отличается от механизма уплотнения резиной или полимером. Если наиболее ценное для уплотнения качество резины (упругость) обычно совпадает в достаточной степени с ее мягкостью, то у металлов, наоборот, наиболее упругие материалы являются и наиболее твердыми, т. е. наименее пригодными для изготовления прокладок. Наиболее же подходящие для этой цели пластичные, относительно мягкие металлы обладают весьма малой упругостью.

В то же время оба вида прокладок имеют общие черты поведения при сжатии их между уплотняемыми поверхностями: способность растекаться в стороны наименьшего сопротивления, т. е. вытекать в наибольшие зазоры до тех пор, пока силы поверхностного натяжения и трение по контактным поверхностям не превзойдут слагающих, направленных в плоскости разъема соединения, а также способность сохранять вакуумную плотность соединения при частичном снятии сжимающего (уплотняющего) усилия.

Однако последнее свойство у резиновых прокладок является следствием запаса упругости, полученной обычно в результате сжатия, большего, чем необходимо для наступления вакуумной плотности, а у металла проклад-

ки.— это следствие отсутствия упругости, следовательно, инертности частиц, перекрывших каналы натекания и остающихся в них даже при некотором ослаблении сжатия.

Для уплотнения металлическими прокладками могут быть применены сжимающие прокладку (уплотняемые) поверхности трех основных видов: плоские, конические и разного рода фасонные (с уступами, выступами, с канавками, рифленые и т. п.). На практике любые уплотняемые поверхности не бывают идеально гладкими, как не бывает и идеально гладких уплотнителей. Следовательно, процесс уплотнения заключается в деформации контактирующих поверхностей, продолжающейся до тех пор, пока более пластичный материал не примет форму, в точности соответствующую рельефу более жестких поверхностей. В большинстве случаев более твердыми являются фланцы или вообще стыкуемые детали, а более мягкими — прокладки. По существу здесь происходит штамповка прокладки.

Для заполнения всех микроканалов, образуемых следами обработки уплотняемых поверхностей, приходится сжимать уплотнитель с усилиями, далеко превосходящими предел текучести его материала, так как поверхностные слои материала-уплотнителя должны быть доведены до состояния высокой пластичности, подобной жидкотекучести. Отсюда следует, что в уплотнениях с металлическими прокладками выгодно по возможности уменьшать площадь, по которой происходит смятие прокладки, чтобы при высоком удельном давлении иметь возможно меньшее суммарное сжимающее усилие. Это наводит на мысль, что при плоских или конических уплотняемых поверхностях рациональны проволочные уплотнители, а при использовании плоских ленточных уплотнителей выгодно иметь на фланцах или на прокладках узкие выступы, по ширине которых будет осуществляться уплотнение. Нельзя, однако, забывать при этом, что проволочные уплотнители малых размеров не технологичны, а при больших размерах требуют наличия цилиндрических посадочных мест, на которые их можно было бы натягивать, ибо уложенная, но не натянутая проволока крайне неудобна в монтаже.

Что касается плоских прокладок, зажатых между выступами, то узкий выступ действует здесь как нож, хотя и тупой. Металл прокладки стремится вытечь из-под

выступа, если не имеет каких-либо ограничителей (например канавки, в которую уложен уплотнитель).

Помимо следов обработки в виде рисок на уплотняемых поверхностях часто присутствует мелкая волнистость, также являющаяся следами обработки (дробление). Заполнить эти углубления возможно только прикладывая дополнительные значительные сжимающие прокладку усилия.

Как уже отмечалось, в большинстве случаев металлические уплотнители применяются в прогреваемых вакуумных системах. Вследствие анизотропности материалов и несимметричности конструкции при прогревах фланцы в большей или меньшей степени коробятся. Величина прогиба при этом соизмерима с толщиной уплотнителя, так как толстыми уплотнители делать нельзя во избежание вредного влияния разницы в коэффициентах термического расширения материалов фланцев и уплотнителя. Для повторного уплотнения необходимо или выправлять фланцы, или не позволять им коробиться. Последнее достижимо только при условии, что стягивающие элементы соединения настолько мощны, что не дадут фланцам в результате прогрева отстать от уплотнителя даже на доли микрона.

Надежность уплотнения в значительной степени зависит и от материала уплотнителя и от того, в каком состоянии находится этот материал: нагартованном или отожженном. Нагартованный материал недостаточно пластичен и требует для уплотнения добавочных усилий. Слишком пластичный материал легко растекается, прежде чем перекроет каналы и уплотнит соединение. Лучшие результаты достигаются с уплотнителями, у которых мягкие поверхностные слои облегают относительно твердую сердцевину. Последняя не дает материалу растекаться, а пластичная обкладка хорошо заполняет углубления в контактных поверхностях.

При прогреве разные материалы в различной степени способны к взаимной диффузии, а иногда и к химическому взаимодействию. Эти явления в некоторых случаях полезны, повышают надежность и долговечность уплотнения за счет некоторого спекания деталей соединения, но в ряде случаев приводят к их разрушению при демонтаже. Например, алюминиевые уплотнители при прогреве выше 350°C и при давлениях, необходимых для уплотнения, частично привариваются к стальным фланцам,

причем приварившиеся частицы окиси алюминия чрезвычайно тверды и могут быть удалены только вместе с поверхностными слоями стали. Медь также приваривается к стали при прогреве свыше 500°C , но в интервале $300\text{—}450^{\circ}\text{C}$ медные уплотнители, нагартованные монтажным сжатием, в значительной мере отжигаются и в соединениях некоторых конструкций могут быть использованы повторно. Никелевые уплотнители могут использоваться при температурах до 700°C без опасности приваривания к фланцам. Опыт показал, что слабо окисленные уплотняемые поверхности деталей из нержавеющей стали менее подвержены опасности сваривания с уплотнителями.

Большое значение для надежности уплотнения имеет одинаковое температурное расширение всех элементов соединения. Если стягивающие болты, например, будут при нагреве удлиняться в большей степени, чем будет расширяться при той же температуре фланец, то стягивание соединения ослабнет и вследствие коробления фланцы местами отстанут от уплотнителя, уплотнение нарушится. Поэтому все детали соединения должны делаться из металлов, имеющих одинаковый или близкий коэффициент термического расширения. Если же материал уплотнителя значительно отличается по температурному коэффициенту линейного расширения (КТР) от материала остальных деталей соединения, то его уплотнитель следует делать возможно более тонким, чтобы эта разница сказывалась в меньшей степени.

Как видно из изложенного, эффективность и надежность уплотнения при помощи металлических уплотнителей определяется многими факторами. Этим объясняется то обстоятельство, что до сих пор не разработана методика расчета вакуумных уплотнений (это следует отнести и к уплотнению резиной). Все эти попытки приводят к таким сложным расчетам, что использование их теряет смысл, если учесть настоятельную необходимость унификации присоединительных деталей. Не подлежит сомнению, что эти расчеты следует использовать только как поверочные при разработке стандартов, которыми и надлежит пользоваться при конструировании вакуумных систем.

Фланцевые соединения с металлическими уплотнителями могут быть классифицированы, как было указано выше, по форме уплотняемых поверхностей (эти поверхности часто называют уплотняющим профилем) или

по форме поперечного сечения уплотнителя. Соединения малых и средних размеров, примерно до 300 мм в диаметре, могут быть уплотняемы с одинаковым успехом при использовании многих существующих конструкций уплотнения. Более крупные соединения, до 750 мм в диаметре, уже с большим трудом поддаются уплотнению, и надежных уплотнений здесь существует меньше. Для уплотнения же металлом соединений, имеющих в поперечнике несколько метров, пригодны только немногие конструкции.

12-2. УПЛОТНЕНИЯ С ПЛОСКИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

Этот вид уплотнений в прогреваемых высоковакуумных системах наиболее распространен. В них плоская ленточная прокладка, по большей части медная, зажимается между фасонными уплотняемыми поверхностями фланцев. Поперечное сечение этих поверхностей (уплотняющий профиль) имеет в разных конструкциях соединений самую разнообразную форму, но все эти конструкции имеют целью создать уплотнение на возможно более узкой полоске из всей ширины уплотнителя, чтобы получить на этой полоске наибольшие удельные давления при возможно меньшем суммарном уплотняющем усилии. Остальная ширина уплотнителя используется в некоторых конструкциях как упор, ограничивающий сближение фланцев, а во всех случаях необходима для удобства обращения с уплотнителем.

Необходимость деформации узкой полоски уплотнителя (шириной не более 2,0 мм) делает обязательным точное изготовление фланцев по жестким технологическим допускам. Это затрудняет применение ленточных уплотнителей в соединениях больших размеров, например свыше 700 мм в диаметре, и в соединениях некруглых очертаний.

Во многих странах наибольшее распространение получило уплотнение типа «Conflat», запатентованное фирмой «Varian», схематически изображенное на рис. 12-1.

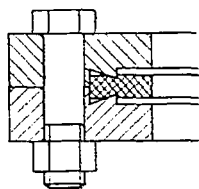


Рис. 12-1. Уплотнение «Conflat».

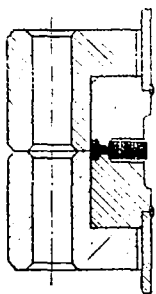


Рис. 12-2. Схема уплотнения с ножевидными выступами.

В нем плоский толщиной 1,5—2,0 мм медный уплотнитель зажимается между симметричными фланцами, имеющими кольцевые выступы в сечении подобные зубьям храпового колеса с одной вертикальной кромкой и второй — скошенной под углом в 20° к плоскости соединения. Эти выступы должны вдавливаться в уплотнитель на 0,3—0,4 мм. При этом фланцы сходятся до упора. Конструкция эта весьма надежна и выгодна ввиду симметричности фланцев, но требует очень точного изготовления. Несоосность выступов или недостаточная их высота делают невозможным уплотнение фланцев. Стяжные болты размещены с шагом 22—25 мм и имеют диаметр 8 мм. По рекламным данным в этом соединении уплотнитель может использоваться повторно. Однако это может осуществиться только в том случае, если предыдущее уплотнение было произведено не до смыкания фланцев, а с некоторым зазором. Дело в том, что при достаточном для уплотнения соединении сжатии уплотнителя в нем отпечатываются все неровности уплотняемых поверхностей фланцев и для повторного уплотнения необходимо перештамповать уплотнитель заново (при новом монтаже соединения попасть в прежнее положение всех элементов практически невозможно), а для этого необходимо углубить выступы в уплотнитель больше, чем в предыдущий раз.

Распространены уплотнения со встречными кольцевыми выступами на фланцах, схематически показанные на рис. 12-2. Выступы имеют в сечении форму трапеции или прямоугольника с высотой 0,7—1,0 мм и шириной по уплотняющей кромке 0,25—1,0 мм. Выступы должны вдавливаться в толстый медный уплотнитель на глубину до 0,4 мм.

Подобная конструкция была разработана в СССР еще в 50-х годах для крупных разборных радиоламп. Она же применяется некоторыми отечественными предприятиями и в настоящее время. Так же как и ранее описанные конструкции, эта система требует весьма точного исполнения деталей и тщательного монтажа и, кроме того, она весьма чувствительна к малейшим повреж-

дениям или дефектам изготовления на уплотняемых поверхностях. Материал уплотнителя, деформируемый между выступами и не ограниченный в радиальном направлении, легче вытекает в сторону, чем заполняет сколько-нибудь значительный дефект.

Наиболее распространена конструкция канавочно-клинового уплотнения, в которой на одном из фланцев имеется кольцевой выступ клиновидного сечения, а на втором соответствующая по размерам и форме кольцевая канавка (рис. 12-3). Плоская ленточная прокладка из алюминия, меди или никеля толщиной 0,4—0,5 мм зажимается между этими фланцами, причем уплотнение происходит не острием клиновидного выступа, а по одной из боковых конических поверхностей (наружной или внутренней) в зависимости от использования поля допуска. Клиновидный выступ имеет по бокам малые по размерам (0,3 мм), но очень важные заплечики, назначение которых ограничить растекание металла прокладки и обеспечить вакуумную плотность соединения при неравномерных прогревах, когда фланцы могут приобрести неодинаковое искажение очертаний. При этом явление линия уплотнения может местами переходить, например, с внешнего конуса выступа и канавки на внутренний или обратно. Без указанных заплечиков уплотнение при этом не обеспечивается.

Основная идея канавочно-клинового уплотнения (нормаль НПО.002.025) заключена в том, что сравнительно тонкие фланцы, защищенные легко деформируемым компенсирующим поясом от вредного воздействия корпуса при короблении последнего и стянутые часто поставленными стяжными шпильками достаточного диаметра, не могут отделиться от прокладки даже при короблении

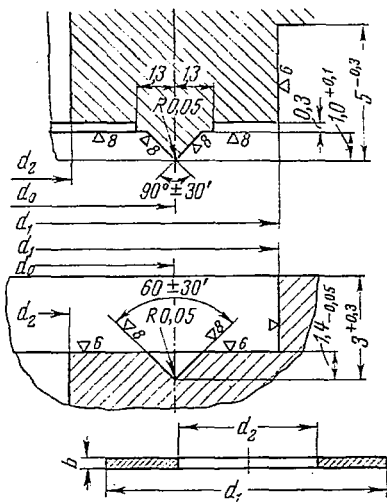


Рис. 12-3. Канавочно-клиновой профиль.

вследствие прогрева. В то же время клиновидный выступ с углом заострения 90° создает уплотнение не по всей конической боковой поверхности, а по более узкой полоске, что дает возможность снизить уплотняющие усилия.

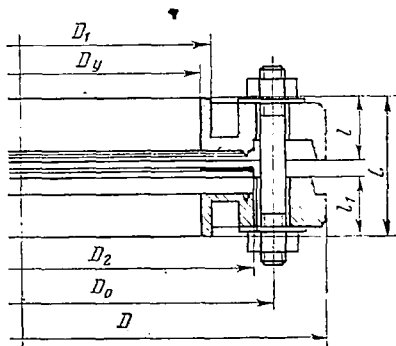
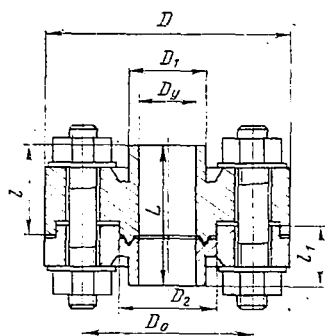


Рис. 12-4. Канавочно-клиновое уплотнение. Тип I.

Рис. 12-5. Канавочно-клиновое уплотнение. Тип II.

Испытания этих соединений показали высокую степень их надежности даже при неравномерных прогревах и при больших скоростях нагрева или охлаждения. Эти обстоятельства дали основания для нормализации их

Таблица 12-1

Основные размеры соединений с канавочно-клиновым уплотнением, мм (рис. 12-4)

Тип I

| Условный проход соединения D_y | Внешний диаметр трубы D_1 | Внешний диаметр фланца D | Диаметр болтовой окружности D_0 | Внешний диаметр уплотнителя D_2 | Габарит соединения по оси L | Толщина фланца с выступом l | Толщина фланца с канавкой l_1 | Число стяжных шпилек n | Стяжные шпильки |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------|
| 10 | 15 | 58 | 40 | 20 | 35 | 26 | 10 | 4 | M8×1 |
| 15 | 20 | 65 | 45 | 25 | 35 | 26 | 10 | 4 | M8×1 |
| 20 | 25 | 78 | 55 | 30 | 37 | 26 | 12 | 4 | M10×1,25 |
| 25 | 30 | 85 | 62 | 35 | 37 | 26 | 12 | 4 | M10×1,25 |
| 32 | 37 | 92 | 70 | 45 | 37 | 26 | 12 | 4 | M10×1,25 |
| 50 | 56 | 120 | 90 | 60 | 39 | 27 | 14 | 8 | M12×1,25 |
| 60 | 66 | 130 | 100 | 70 | 40 | 27 | 14 | 8 | M12×1,25 |

в ряде отраслей промышленности и патентованная за границей. Отраслевые нормы 1963 г. охватывают соединения с диаметрами условного прохода от 10 до 750 мм, причем они разделены на три типа в зависимости от степени возможного влияния коробления корпуса на состояние фланца. Тип I, $D_y = 10 \div 60$ мм, имеет неглубокую проточку (на диаметре D_1), так как предназначен для приваривания к трубам, не имеющим существенной асимметрии и при прогреве не вызывающим коробления фланца (рис. 12-4, табл. 12-1). Тип II имеет односторон-

Таблица 12-2

Основные размеры соединений с канавочно-клиновым уплотнением, мм (рис. 12-5)

Тип II

| Условный проход соединения D_y | Внешний диаметр трубы D_1 | Внешний диаметр фланца D | Диаметр болтовой окружности D_0 | Внешний диаметр уплотнителя D_2 | Габарит соединения по оси L | Толщина фланца с выступом l | Толщина фланца с канавкой l_1 | Число стяжных шпилек n | Стяжные шпильки |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------|
| 80 | 86 | 175 | 28 | 110 | 31 | 18 | 18 | 12 | M12×1,25 |
| 85 | 92 | 180 | 134 | 115 | 31 | 18 | 18 | 12 | M12×1,25 |
| 100 | 106 | 200 | 148 | 130 | 31 | 18 | 18 | 12 | M12×1,25 |
| 125 | 132 | 225 | 175 | 150 | 33 | 20 | 20 | 12 | M14×1,5 |
| 160 | 168 | 280 | 215 | 195 | 34 | 21 | 21 | 16 | M14×1,5 |
| 200 | 208 | 320 | 255 | 235 | 35 | 21 | 21 | 20 | M14×1,5 |

нюю проточку и толщину стенки компенсирующего пояса 3—4 мм; он предназначен для диаметров условного прохода 70—225 мм (рис. 12-5, табл. 12-2). Тип III имеет компенсирующий пояс, образованный двумя проточками, выполняемыми одна с наружной стороны фланца, другая — с внутренней. Толщина стенки компенсирующего пояса 4—6 мм. Этот тип предназначен для соединений с диаметрами условного прохода 250—750 мм (рис. 12-6, табл. 12-3). Следует обратить внимание на поднутрение одной из проточек, образующих компенсирующий пояс фланца с канавкой уплотнения типа III. Назначение этого поднутрения — служить местом для загиба усиков прокладки (рис. 12-7) и фиксации с их помощью прокладки при монтаже.

Основные размеры соединений с канавочно-клиновым уплотнением, мм (рис. 12-6)

Тип III

| Условный проход D_y | Внешний диаметр обечайки D_1 | Диаметр болтовой окружности D_0 | Внешний диаметр фланцев D | Габарит соединения по оси L | Внешний диаметр уплотнителя D_2 | Толщина фланца с выступом l | Толщина фланца с канавкой l_1 | Число стяжных шпилек n | Стяжные шпильки |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------|
| 260 | 268 | 342 | 420 | 31 | 320 | 19 | 19 | 28 | M16 1,5 |
| 300 | 308 | 382 | 475 | 31 | 360 | 19 | 19 | 32 | M16×1,5 |
| 380 | 388 | 462 | 560 | 34 | 440 | 21 | 21 | 36 | M16×1,5 |
| 450 | 458 | 532 | 625 | 38 | 510 | 23 | 23 | 44 | M16×1,5 |
| 500 | 508 | 588 | 680 | 38 | 565 | 23 | 23 | 48 | M16×1,5 |
| 600 | 610 | 698 | 800 | 42 | 672 | 25 | 25 | 52 | M18 1,5 |
| 700 | 710 | 798 | 900 | 42 | 772 | 25 | 25 | 60 | M18×1,5 |

Наличие пластичного компенсирующего пояса, помимо исключения вредного влияния коробления корпуса, дает возможность приварить фланцы к корпусам или трубам в окончательно обработанном виде, так как все сварочные поводки или гасятся на этом поясе, или свободно выбираются при стягивании фланцев и не мешают уплотнению соединения.

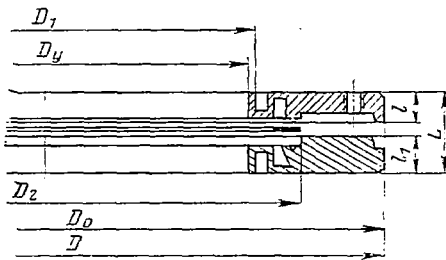


Рис. 12-6. Канавочно-клиновое уплотнение. Тип III.

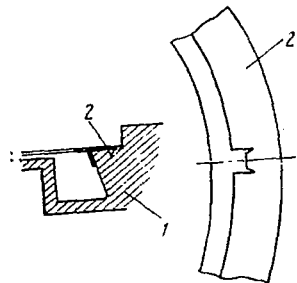


Рис. 12-7. Крепление ленточной прокладки в канавочно-клиновом уплотнении отгибаемым усиком.
1 — тело фланца; 2 — металлическая прокладка.

Как видно из рис. 12-6, фланцы смыкаются по двум окружностям: на уплотнителе и по внешней окружности. Между этими линиями соприкосновения фланцев в соединении имеется зазор, своего рода камера, окружающая уплотнитель. Один из фланцев имеет резьбовые отверстия, через которые подается внутрь упомянутой камеры гелий при испытаниях на вакуумную плотность. В эти же отверстия ввертываются отжимные болты, имеющие назначение облегчить демонтаж соединения в случае спекания уплотнителя с фланцами при случайных перегревах, а также служить предохранителями от случайных ударов и повреждений уплотнителя при монтаже крупных соединений. Так как уплотнения с металлическими прокладками в большинстве случаев предназначаются для сверхвысоковакуумных систем, фланцы этих соединений почти всегда изготавливаются из нержавеющей стали и реже из никелевых сплавов.

Уплотнители диаметром до 250 мм обычно делают цельными из широкополосной или листовой меди, алюминия или никеля, путем вырезания на токарных станках по шаблонам-прижимам. При серийном производстве уплотнители делают на вырубных штампах. Для соединений диаметром более 250 мм выгоднее делать уплотнители из медной или никелевой ленты соответствующей ширины и толщины. Лента вальцуется на ребро в приспособлении, подобном изображенному на рис. 12-8, по нужному диаметру, разрезается на кольца так, чтобы концы перекрывали друг друга на 10—15 мм. Концы тщательно зашлифовываются на ус, чтобы при соединении концов не получалось существенного утолщения. Прокладка отжигается, протравливается, концы ее спаиваются чистым оловом в зажиме, а затем спай зачищается и полируется заподлицо с остальной прокладкой.

Отжиг медной прокладки производится в вакуумной печи или на воздухе при температуре 700 °С, а никелевой — в вакуумной или водородной печи при температуре 900 °С в течение 20 мин.

Если не имеется готовой полоски необходимой ширины, то заготовки для прокладок нарезаются из широкой ленты. Ручное приспособление для этой операции показано на рис. 12-9.

Наличие в соединениях выступов, которые должны определенным образом совпасть при уплотнении с встреч-

ными выступами или канавками при малой ширине полосы, по которой происходит собственно уплотнение, приводит к жестким технологическим допускам, обязательным при изготовлении деталей таких соединений.

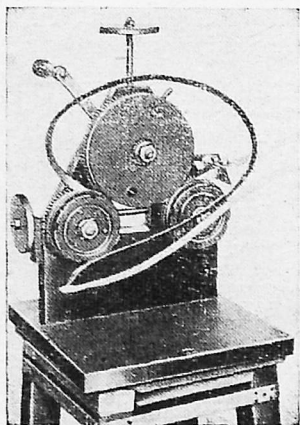


Рис. 12-8. Приспособление для вальцовки на ребро медной ленточки.

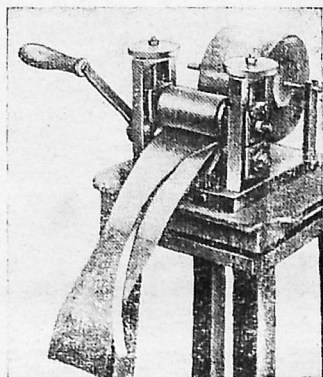


Рис. 12-9. Приспособление для разрезания медной полосы на ленточки для уплотнителей.

Только плоским поверхностям безразлично на каком именно участке плоскости произойдет перекрытие доступа газа в вакуумную полость. Наиболее рациональные

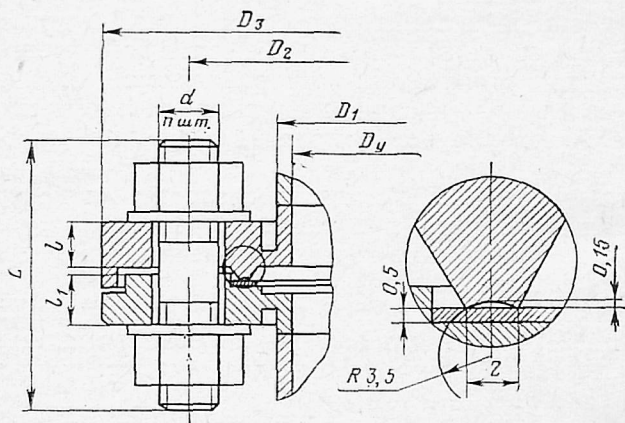


Рис. 12-10. Схема соединения с «серповидным» уплотнением.

современные конструкции уплотнений и построены на использовании плоских уплотняемых поверхностей.

Одна из таких конструкций с плоским уплотнителем схематически изображена на рис. 12-10. Один фланец в ней плоский, а второй имеет кольцевой выступ с слегка вогнутой уплотняемой поверхностью, которой он и прижимает уплотнитель к плоскому ответному фланцу. Вогнутая поверхность выступа фокусирует контактные силы, деформирующие уплотнитель, не дает материалу его вытекать в радиальном направлении и позволяет надежно уплотнять соединение, избегая в то же время жестких допусков.

Эта конструкция позволяет уплотнять соединения с несколько меньшим сжимающим усилием, чем требуется для канавочно-клинового уплотнения, а также уменьшить массу и размеры фланцев. Конструкция предназначена для соединений с диаметрами условных проходов от 10 до 225 мм. Уплотнители делаются из меди или никеля толщиной 0,3—0,5 мм. Для систем, подвергающихся прогреву не свыше 100°C, но требующих особой чистоты остаточной газовой среды или стойкости против излучений, например для ускорителей элементарных частиц, могут быть рекомендованы медные уплотнители с индиевым покрытием с обеих сторон.

Таблица 12-4

Основные размеры соединений с „серповидным“ уплотнением, мм (рис. 12-10)

| Условный проход D_u | Внешний диаметр трубы D_1 | Диаметр болтовой окружности D_0 | Внешний диаметр фланцев D | Габарит соединения по оси L | Толщина плоского фланца l_1 | Толщина фланца с выступом l | Число стяжных шпилек n | Стяжные шпильки |
|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------|
| 10 | 15 | 40 | 58 | 36 | 8 | 10 | 4 | M8×1 |
| 15 | 20 | 45 | 64 | 36 | 8 | 10 | 4 | M8×1 |
| 20 | 25 | 52 | 75 | 47 | 10 | 12 | 4 | M10×1 |
| 25 | 30 | 58 | 80 | 47 | 10 | 12 | 4 | M10×1 |
| 32 | 37 | 64 | 90 | 47 | 10 | 12 | 6 | M10×1 |
| 50 | 56 | 82 | 105 | 47 | 10 | 12 | 8 | M10×1 |
| 85 | 92 | 130 | 165 | 50 | 10 | 14 | 12 | M12×1,25 |
| 100 | 106 | 145 | 180 | 50 | 10 | 14 | 12 | M12×1,25 |
| 125 | 132 | 170 | 205 | 50 | 10 | 14 | 12 | M12×1,25 |
| 160 | 168 | 205 | 240 | 54 | 12 | 16 | 16 | M12×1,25 |
| 200 | 208 | 245 | 280 | 54 | 12 | 16 | 20 | M12 1,25 |

Эти уплотнения (условно названные конструкторами «серповидными») выгодно отличаются еще и тем, что в них прокладки могут быть использованы повторно несколько раз, для чего прокладки нужно каждый раз переворачивать на другую сторону.

Основные размеры фланцев этих соединений даны в табл. 12-4.

12-3. УПЛОТНЕНИЯ С КОНИЧЕСКИМИ УПЛОТНЯЕМЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Уплотнения таких типов отличаются способом фиксации проволочной прокладки на охватываемом конусе соединения. Если делать конус, на который надевается уплотнительная прокладка, ровным от начала до конца, не принимая мер для удержания прокладки в нужном положении в процессе монтажа и деформации ее, то почти неизбежен сдвиг прокладки на одну сторону и, следовательно, плохое уплотнение.

Конструкция конического уплотнения, изображенная на рис. 12-11, имеет на конусе заточку, играющую роль седла для размещения проволочного уплотнителя. Угол между осью и образующей конуса составляет обычно $12-17^\circ$. Уплотнения такой конструкции для соединений с D_y до 250 мм выдержали испытания многократным прогревом до 450°C .

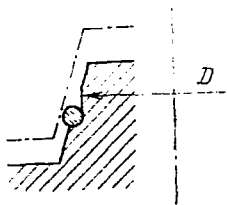


Рис. 12-11. Схема конического соединения с проволочным уплотнителем.

Другая конструкция уплотнения имеет цилиндрические участки у основания конуса и у его свободного конца. На последний участок и натягивается проволочный уплотнитель. Цилиндрический участок у основания конуса служит посадочным местом для центрирования соединения при стягивании фланцев. Авторы конструкции рекомендуют применять ее для соединений с D_y до 150 мм, хотя выпущенные ими нормали охватывают соединения с D_y до 500 мм (рис. 12-12).

Конические уплотнения с проволочными уплотнителями соединяют в себе выгодную силовую схему с воз-

возможностью использовать для уплотнения явление некоторого «затираания» микронеровностей уплотняемых поверхностей при осадке уплотнителя по конусу от меньшего диаметра к большему. Выгодным является и расположение уплотняемых поверхностей по отношению к крепежным деталям, делающее возможным сокращение габаритов соединений.

Однако у всех модификаций конических уплотнений имеются и общие отрицательные стороны, на которые

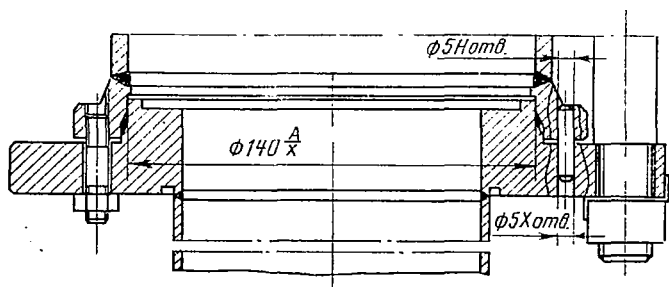


Рис. 12-12. Соединение с коническим уплотнением $D_y = 100$ мм.

необходимо обращать особое внимание при изготовлении деталей соединения. К этим отрицательным сторонам относится в первую очередь требование изготовления деталей по очень жестким допускам. Незначительные отклонения по диаметрам охватывающего и охватываемого конусов, если они ведут к более свободной посадке, приводят к значительной просадке соединения по оси и к недостаточной деформации уплотнителя. Разноугольность конусов также может привести к невозможности уплотнения.

Конические уплотнения требуют также особой тщательности монтажа *во избежание перекосов фланцев*, так как соединение обязательно стягивается не до упора, а с определенным зазором между фланцами. Кроме того, требуется и прогрев с определенными скоростями нагрева и строгой равномерностью прогрева обоих фланцев: если охватывающий фланец прогреется несколько сильнее, чем охватываемый, то контактные усилия уменьшаются и уплотнение нарушается.

КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ПРОГРЕВАЕМЫЕ УПЛОТНЕНИЯ

13-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Анализ известных конструкций уплотнений позволяет сделать несколько выводов, подтверждаемых контрольными испытаниями.

Соединения малых размеров, примерно до $D_y = 250$ мм, могут с успехом уплотняться самыми различными типами металлических уплотнений.

подавляющее большинство известных конструкций требует применения жестких технологических допусков по размерам и весьма строгого соблюдения геометрии уплотняемых поверхностей.

Большинство типов фланцевых соединений допускает только равномерный прогрев и ограниченную скорость нагрева.

Простое распространение на крупногабаритные соединения даже самых надежных видов уплотнителей и уплотняющих профилей малых соединений не может дать положительных результатов. Прогрев крупногабаритных корпусов и их фланцевых соединений вызывает такие изменения их формы, по большей части необратимые, которые не только способствуют течи в уплотнениях, но и делают невозможным уплотнение после переборки со сменой уплотнителя.

Таким образом, становится ясным, что разработка более крупных соединений должна идти не по пути подбора более совершенных уплотнителей и уплотняющих профилей, а по пути создания наиболее рационального комплекса всех элементов соединения с учетом всех явлений, имеющих место при его изготовлении и эксплуатации.

В СССР созданы и испытаны уплотнения с проводочными уплотнителями [Л. 79, 80], позволяющие уплотнять вполне надежно фланцевые соединения как круглого, так и других очертаний (прямоугольных, овальных и т. п.) любых практически применяемых размеров. Успешно выдержали длительные испытания при многократных прогревах до 450°C (и даже до 600°C) круглые фланцевые соединения с диаметрами

условного прохода 1 600, 2 200, 2 500 мм и прямоугольные до размера 3 000 × 1 500 мм.

Анализ этих конструкций и результатов испытаний дает основания думать, что они будут столь же надежно служить и в соединениях значительно больших габаритов, вплоть до 10—15 м в поперечнике. Разница здесь, очевидно, будет лишь в технологии сборки и сварки фланцев.

В настоящей главе приводится описание этих конструкций и даются краткие рекомендации по их эксплуатации.

13-2. УПЛОТНЕНИЯ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЙ $D_y = 250 \div 1\ 500$ мм С ПРОВОЛОЧНЫМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

Ранее мы уже говорили, что надежным может быть только соединение, в котором степень сжатия уплотнителя, а следовательно, и контактные усилия при прогреве и охлаждении системы остаются постоянными, т. е. не зависят от возможных термических короблений как корпуса, так и самих фланцев.

Руководствуясь этими соображениями, удалось разработать весьма надежные прогреваемые соединения с плоскими тонкими металлическими уплотнителями и канавочно-клиновым уплотняемым профилем. Соединения эти, нормализованные для диаметров условного прохода 10—750 мм, оказались настолько надежными, что в них можно применять стыкованные, паяные ленточные уплотнители. Однако для размеров более 750 мм в диаметре они не являются наиболее технологичными, так как по посадочным местам и фасонному профилю требуют довольно жестких допусков (0,14 и 0,25 мм соответственно).

Несомненно, что эти недостатки присущи всем уплотняющим профилям с неплоскими, фасонными уплотняемыми поверхностями. Их можно избежать, только зажимая уплотнитель между двумя плоскостями или в соединении с одной плоской уплотняемой поверхностью, когда сдвиг одной уплотняемой поверхности относительно другой на 0,5—1,0 мм или небольшие смещения уплотнителя относительно уплотняемых поверхностей не имеют решающего значения. При этом самым удобным видом уплотнителя явилась бы проволока.

Препятствием к уплотнению крупногабаритных соединений проволочными уплотнителями между плоскостями являлось то обстоятельство, что проволочный уплотнитель необходимо натягивать на какой-либо выступ, а наличие последнего требует ответного углубления во втором фланце, что приводит к жестким допускам, так как сколько-нибудь значительные зазоры недопустимы: в них потечет материал уплотнителя, что сделает соединение совершенно ненадежным.

Выход из этого положения был найден в создании так называемого «утапливаемого» выступа, как бы исчезающего по мере стягивания фланцев, но все время удерживающего на месте натянутый на него уплотнитель. Поскольку выступ отступает под нажимом ответного фланца, для него, очевидно, не требуется ответной выемки, а значит, не может быть и вредных зазоров и не нужны жесткие допуски.

В соединениях с круглым проходным сечением в качестве утапливаемого выступа применяется разрезное кольцо, помещенное в канавку силовой развязки одного из фланцев. Высота кольца меньше глубины канавки,

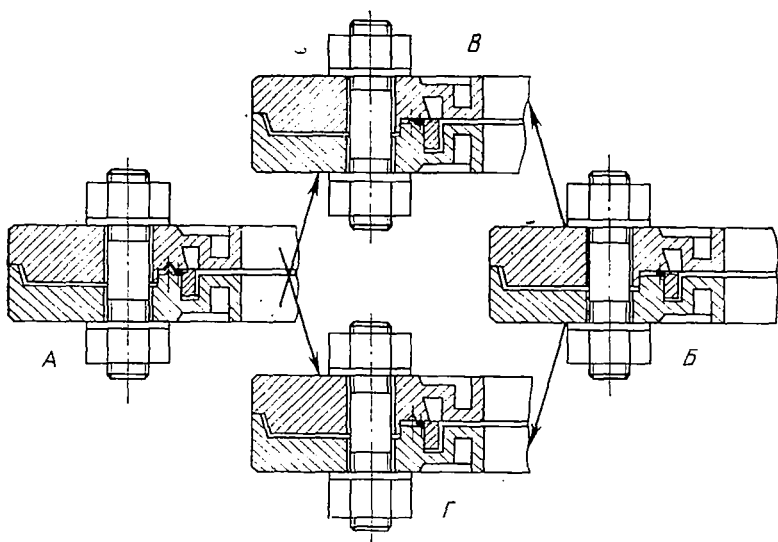


Рис. 13-1. Уплотнение соединений $D_y=250 \div 700$ мм проволочным уплотнителем с применением утапливаемого кольца.

А — канавочно-клиновое соединение; Б — плоскостное соединение; В, Г — комбинированные соединения.

и оно не может помешать уплотнению. Кольцо расклинивается в разрезе и плотно прижимается к стенке канавки.

При разработке конструкции учитывалось, что канавочно-клиновые соединения получили уже широкое распространение в отечественном вакуумном оборудовании. Поэтому для соединений с проволочными уплотнителями 250—270 мм была разработана конструкция, позволяющая стыкование с канавочными или клиновыми фланцами на проволочных уплотнителях. Варианты такой стыковки показаны на рис. 13-1 [ОСТ.11.ПО.293.001].

В этом случае еще имеется посадочное место, но допуск по нему может быть уже более свободным, так как само уплотнение происходит между плоскими поверхностями. Посадочное место здесь нужно только для совмещения с канавочным или клиновым фланцем.

В соответствии с этим предложены две группы соединений. Первая группа 250—700 мм упомянутой выше конструкции, вторая 800—1500 мм, имеющая несколько упрощенный профиль фланца, в котором вовсе отсутствует посадочное место. Поперечное сечение обоих фланцев второй группы имеет одинаковое очертание, и фланцы отличаются друг от друга лишь шириной уплотняемой поверхности и наличием в одном из них нескольких нарезных отверстий для отжимных болтов. Ширина и толщина фланцев остаются постоянными для всех условных проходов группы. Шаг болтовых отверстий около 45 мм.

На рис. 13-2 изображены фланцы первой группы, а в табл. 13-1 даны их основные размеры. На рис. 13-3 показаны фланцы второй группы.

Таблица 13-1

Размеры фланцев, мм (рис. 13-2)

| D_y | D | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 | D_5 | D_6 | d | n | b | b_1 | b_2 | f_1 | t_2 | f_3 | C |
|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| 260 | 420 | 342 | 320 | 304 | 290 | 268 | 282 | 18 | 28 | 19 | 8 | 7 | 11 | 13 | 10 | 5 |
| 300 | 475 | 382 | 360 | 344 | 330 | 308 | 322 | 18 | 32 | 19 | 8 | 7 | 11 | 13 | 10 | 5 |
| 380 | 580 | 462 | 440 | 424 | 410 | 388 | 402 | 18 | 36 | 21 | 9 | 8 | 13 | 15 | 11 | 6 |
| 450 | 625 | 532 | 510 | 494 | 480 | 458 | 472 | 18 | 44 | 23 | 9 | 8 | 15 | 17 | 13 | 6 |
| 500 | 680 | 588 | 565 | 548 | 532 | 508 | 524 | 18 | 48 | 23 | 9 | 8 | 15 | 17 | 13 | 6 |
| 600 | 800 | 698 | 672 | 652 | 636 | 610 | 626 | 20 | 52 | 25 | 9 | 8 | 16 | 18 | 14 | 6 |
| 700 | 900 | 798 | 772 | 752 | 736 | 710 | 726 | 20 | 60 | 25 | 9 | 8 | 16 | 18 | 14 | 6 |

В обоих случаях утапливаемое кольцо расклинивается в разрезе медным клином. Для натягивания уплотнителя кольцо должно выступать над уплотняемой поверхностью на 5—8 мм и удерживаться в этом положении на временных опорных винтах, ввернутых в резьбовые отверстия, имеющиеся в кольце. При разборке соединения при помощи этих же винтов колец извлекается из гнезда. После натягивания уплотнителя

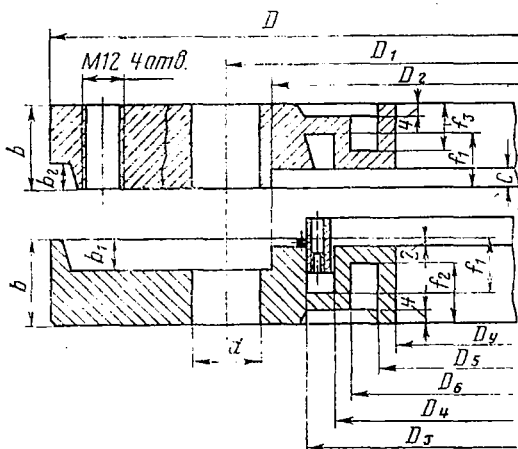


Рис. 13-2. Фланцы для проволочного уплотнения $D_y = 250 \div 700$ мм.

После натягивания уплотнителя, имеющиеся в кольце. При разборке соединения при помощи этих же винтов колец извлекается из гнезда. После натягивания уплотнителя

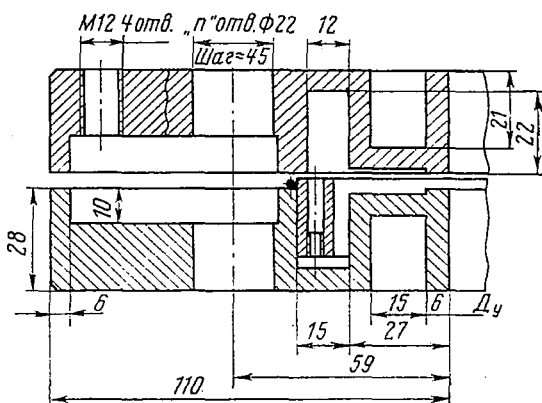


Рис. 13-3. Фланцы для проволочного уплотнения $D_y = 800 \div 1500$ мм.

опорные винты удаляются, и кольцо вместе с уплотнителем удерживается в нужном положении силами трения. При стягивании фланцев кольцо постепенно утапливается в гнездо, все время удерживая уплотнитель на его месте и ограничивая с одной стороны его растекание.

Уплотнитель делается в зависимости от температуры прогрева из алюминиевой (до 200 °С), медной (до 450 °С) или никелевой (до 600 °С) проволоки диаметром 2 мм, свариваемой встык на стыковых электросварочных машинах, например, модели АСИФ-5 или МС-202, или методом пластической деформации (алюминий, медь). Медная проволока отжигается предварительно при 700 °С в вакууме или на воздухе с последующим травлением в азотной кислоте и промывкой в воде. Никелевая проволока отжигается при 900 °С в вакуумной или водородной печи в течение 20 мин. Облой после сварки зачищается вручную.

Длина готового уплотнителя должна быть на 0,2—0,5% менее расчетной, чтобы при монтаже уплотнитель мог плотно натянуться на утапливаемое кольцо и надежно на нем удерживаться при любом положении фланцев.

Вакуумная плотность соединений проверяется масс-спектрометрическим теченскателем. При испытании пробное вещество через отверстия для отжимных болтов подается в кольцевую полость, окружающую все уплотнение. Экспериментально установлено, что правильно собранное соединение описанной конструкции с длиной уплотнителя до 5 пог. м не обнаруживает течи более 10^{-6} л·мкм/сек.

13-3. УПЛОТНЕНИЯ ДЛЯ СОЕДИНЕНИЙ D_y СВЫШЕ 1 500 мм

Во фланцах D_y более 1 500 мм устойчивость утапливаемого кольца из-за малой его кривизны уменьшается. Более рациональным становится применять утапливаемые штифты, размещенные равномерно на уплотняемой поверхности одного из фланцев.

Применение штифтов вместо кольца потребовало определенных изменений конструкции фланцев, не нарушивших общей схемы соединения. В первую очередь изменилась ширина уплотняемой плоской поверхности

фланца. При использовании утапливаемого кольца уплотнитель по всей окружности приближен вплотную к кольцу и расплывается при сжатии в одну сторону. При замене кольца штифтами натянутый на них уплотнитель располагается по многоугольнику с числом сторон, равным числу штифтов. Поэтому, чтобы весь уплотнитель оставался на уплотняемой поверхности, последняя должна определяться описанной вокруг этого многоугольника окружностью и второй, вписанной в него, с учетом диаметра штифтов и припуском на обе стороны на раздавливание уплотнителя, а также на возможное несовмещение (в пределах принятых допусков) фланцев.

Значительное увеличение ширины уплотняемой поверхности недопустимо из-за того, что стягивающие

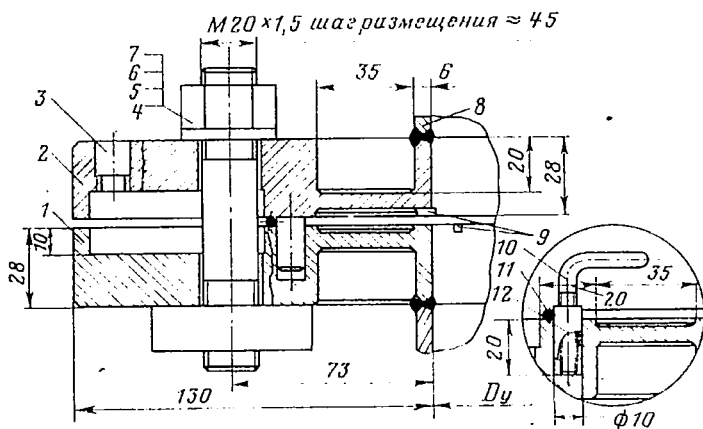


Рис. 13-4. Конструкция и размеры фланцевых венцов для проволочного уплотнения крупногабаритных соединений.

1, 2 — фланцы; 3 — отверстие отжимного болта; 4—7 — крепежные детали; 8 — обечайки; 9 — пазы для откачки; 10 — временная винтовая опора; 11 — уплотнитель; 12 — утапливаемый штифт.

шпильки при этом слишком отдалились бы от уплотнителя в середине сторон многоугольника, что крайне невыгодно в отношении использования действующих сил. С другой стороны, недостаточная ширина уплотняемой поверхности заставляет увеличивать число сторон многоугольника, т. е. число утапливаемых штифтов, что осложняет условия эксплуатации соединений. Проведенный анализ позволил выбрать оптимальную ширину уплотняемой поверхности равной 20 мм,

Изменен также компенсирующий пояс. Замена утапливаемого кольца штифтами позволила ликвидировать канавку, в которую входило кольцо. Компенсирующий пояс стал более простым и технологичным.

На рис. 13-4 показана конструкция и даны основные размеры фланцевых венцов для соединений с диаметром условного прохода более 1500 мм. В соединении один фланец отличается от второго только наличием гнезд для штифтов и нарезных отверстий для отжимных болтов. Размеры всех элементов фланцевого венца сохраняются неизменными для всего ряда от $D_y = 1500$ мм до практически требующихся в настоящее время $D_y = 5 \div 6$ м. По-видимому, для еще больших соединений следует несколько увеличить ширину компенсирующего пояса, оставляя размеры остальных элементов венца неизменными.

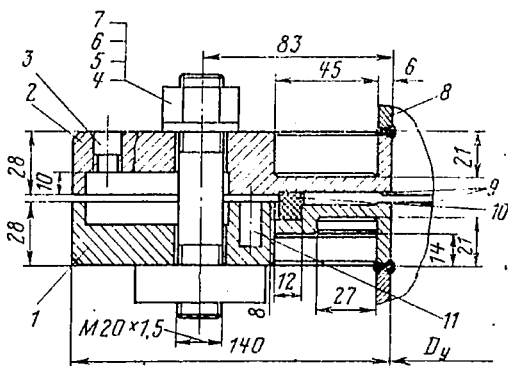


Рис. 13-5. Конструкция и размеры фланцевого венца для комбинированного проволочного и резинового уплотнения крупногабаритных соединений.

1, 2 — фланцы; 3 — отверстие для отжимного болта; 4—7 — крепежные детали; 8 — обечайка; 9 — пазы для откачки; 10 — резиновый уплотнитель; 11 — гнездо для утапливаемого штифта проволочного уплотнения.

На рис. 13-5 показан фланцевый венец для комбинированного уплотнения. В нем предусмотрена возможность использования либо проволочного, либо резинового уплотнителя. Применение таких соединений целесообразно в многоцелевых установках, когда в зависимости от поставленной задачи выгодно использовать тот

или другой уплотнитель, или в установках, требующих частых переборок, без прогрева в процессе отладки.

При использовании резинового уплотнителя количество стягивающих шпилек можно уменьшить в 2—3 раза. Затяжка должна производиться до смыкания внешних кромок фланцев.

Минимальное количество n штифтов, устанавливаемых в соединении, определяется по следующим формулам.

Для фланцев по рис. 13-4

$$n = \frac{180}{\arccos \left(\frac{D_y + 88}{D_y + 112} \right)}. \quad (13-1)$$

Для фланцев по рис. 13-5

$$n = \frac{180}{\arccos \left(\frac{D_y + 108}{D_y + 138} \right)}, \quad (13-2)$$

где D_y — диаметр проходного отверстия, мм.

В зависимости от условий работы уплотнитель можно изготовить из алюминиевой, медной или никелевой проволоки диаметром 2 мм. Алюминиевая проволока применяется в установках, не требующих значительного прогрева (не выше 200 °С).

Наилучшие результаты получаются при изготовлении фланцев и шпилек из стали типа Х18Н9Т и уплотнителя из медной проволоки. Медный уплотнитель позволяет производить многократные (100 и более) прогревы соединения до 450—500 °С без дополнительной подтяжки шпилек. Разуплотнение не происходит даже и при прогреве до 700 °С, но при такой температуре происходит диффузионная сварка меди со сталью и восстановить чистоту уплотняемых поверхностей бывает затруднительно.

Уплотнитель из никелевой проволоки допускает более высокие прогревы соединений до 600 °С, хорошо отделяется от фланцев при переборках соединений, но требует больших стягивающих усилий.

Расчетная длина уплотнителя ($L_{расч}$) определяется по следующим формулам.

Для фланцев по рис. 13-4

$$L_{расч} = (D_y + 112) n \sin \frac{180}{n}. \quad (13-3)$$

Для фланцев по рис. 13-5

$$L_{\text{расч}} = (D_y + 132) n \sin \frac{180}{n}. \quad (13-4)$$

Обозначения в формулах (13-3) и (13-4) те же, что и в (13-1) и (13-2).

Фактическая длина уплотнителя должна быть на 0,15—0,25% менее расчетной. Это необходимо для того, чтобы при монтаже уплотнитель был надет на штифты с некоторым натяжением и надежно удерживался на месте при любом положении фланцев.

Используя систему монтажа уплотнителя на утапливаемых штифтах, можно с успехом уплотнять фланцевые соединения некруглых очертаний. На рис. 13-6 показано прямоугольное фланцевое сверхвысоковакуумное соединение, имеющее внутренние размеры 300×600 мм с проволочным уплотнителем, который натягивается на утапливаемые штифты, расположенные по углам уплотняемой поверхности фланца. Самые фланцы, однако, в том виде, как показаны на рис. 13-6, в случае больших их размеров не являются вполне рациональными. Дело в том, что при изготовлении прямоугольных фланцев из цельной заготовки уплотняемые поверхности фланца должны обрабатываться фрезерованием, а это делает неизбежным образование множества рисков, направленных поперек уплотнителя. Такое направление следов обработки усложняет процесс уплотнения соединения, вызывая необходимость повышать уплотняющие усилия. Избежать этого можно, применяя в соединениях некруглых очертаний секционные фланцы, речь о которых пойдет ниже.

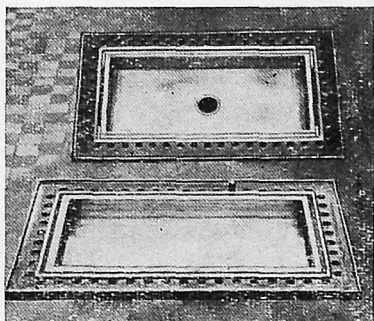


Рис. 13-6. Прямоугольные фланцы с проволочным уплотнением, выполненные из цельных заготовок.

Необходимо коротко сказать об особенностях монтажа соединений с утапливаемыми штифтами. Характерной их особенностью является отсутствие посадоч-

ных мест. Фланцы проектируются так, что при постановке стягивающих шпилек гарантируется совпадение уплотняемых поверхностей в необходимых пределах. Однако для более удобного совмещения крепежных отверстий направляющие приспособления все же желательны. Они могут быть постоянными или съемными. В обоих случаях вначале в один из фланцев ввертываются отжимные болты так, чтобы при сближении фланцев между ними обеспечивался зазор в 8—10 мм. После натягивания уплотнителя на штифты, положение которых зафиксировано сначала временными винтовыми опорами, опоры эти удаляются и фланцы сближаются, насколько позволяют ввернутые отжимные болты. Затем совмещаются крепежные отверстия, вставляются шпильки и на них от руки наворачиваются гайки. После этого постепенно вывинчиваются отжимные болты и подтягиваются стяжные шпильки.

В качестве крепежных элементов обычно применяются шпильки и гайки, подвергнутые сульфидированию, во избежание заедания гаек после прогрева. С одного (менее доступного) конца шпилек рекомендуется ставить фасонные гайки (квадратные или удлиненные) такого размера, чтобы они удерживались соседними гайками от провертывания. Это дает возможность вести затяжку шпилек усилиями одного человека. Для окончательного уплотнения необходима затяжка шпилек ключом с рукояткой длиной около 1 000 мм.

Все остальные правила сборки и проверки соединений аналогичны правилам для соединений меньшего размера.

13-4. СЕКЦИОННЫЕ ФЛАНЦЫ ДЛЯ ПРОГРЕВАЕМЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Постройка очень крупных экспериментальных и промышленных вакуумных систем часто вызывает необходимость изготовления фланцевых соединений, превосходящих по своим размерам возможности типового станочного оборудования и обычных транспортных средств. К таким установкам можно отнести имитаторы космического пространства, шкафы для пропитки и сушки мощного энергетического оборудования, установки для разделения изотопов и для исследований в области

термоядерной энергии, установки большой химии и многое другое.

Помимо больших размеров, в таких установках часто бывает невыгодно, а иногда и невозможно обойтись только круглыми очертаниями люков, крышек и других соединений. Часто применяются прямоугольные, овальные и другой формы фланцы, изготовление которых

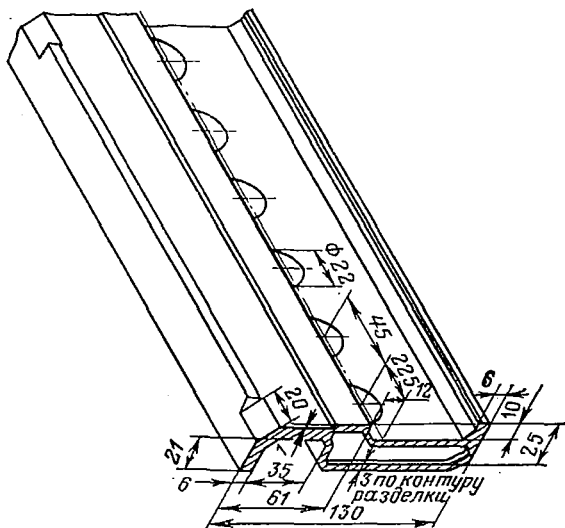


Рис. 13-7. Форма прямой секции. Сварка по заштрихованному контуру.

при весьма жестких требованиях техники высокого вакуума к чистоте уплотняемых поверхностей представляет значительные трудности. Изготовление их на фрезерных станках не только весьма трудоемко и требует в большинстве случаев наличия уникальных станков, но и приводит к появлению на уплотняемых поверхностях множества рисок, расположенных поперек уплотнителя.

Секционные фланцы собираются и свариваются из окончательно обработанных прямых и радиальных секций удобной длины, изготавливаемых на типовых строгальных и токарных станках. Форма секций весьма проста, что ясно из рис. 13-7 и 13-8. Разработка таких фланцев позволила устранить перечисленные затруднения в изготовлении некруглых соединений, особенно при

их больших размерах, так как окончательно обработанные секции доставляются пакетом на место окончательной сборки системы и там свариваются в целые фланцы и соединения.

При изготовлении прямых секций на строгальных станках, а радиальных секций — на токарных все следы обработки (риски) направлены вдоль уплотнителя, что создает наиболее благоприятные условия для уплотне-

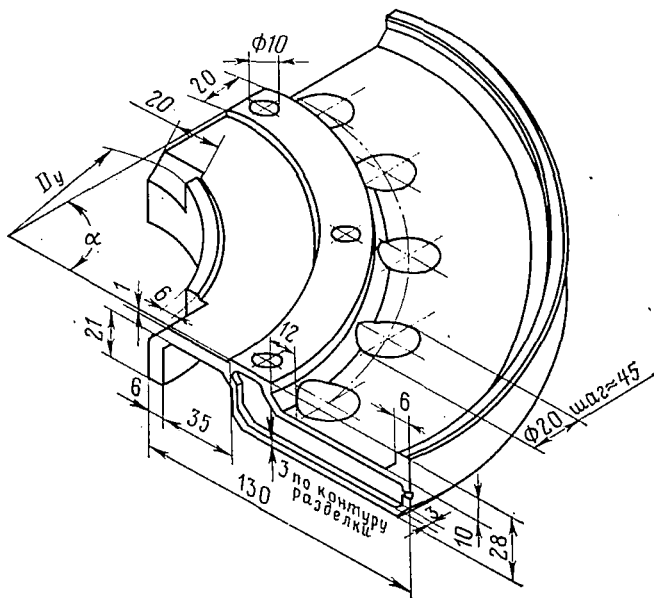


Рис. 13-8. Форма радиальной секции.

ния соединений и требует меньших усилий сжатия. Как показал опыт, при соблюдении весьма несложных технологических приемов сборки, изложенных далее, сварные швы между секциями несколько не ухудшают качества соединений. Так как в торцах всех секций выфрезерованы углубления в их утолщенной части, соседние секции соприкасаются друг с другом по контуру сечения, по которому и производится сварка секций между собой. Это обеспечивает наименьшие сварочные коробления фланца и легкость обработки швов в точках пересечения их с уплотнителем и соприкосновения фланцев друг с другом и с обечайками корпусов.

Опыт показал, что такой обварки стыков по контуру

с проваром на глубину 3 мм с минимальным усилением шва, с применением аргоно-дуговой сварки с присадкой вполне достаточно для придания фланцу прочности, необходимой при всех монтажных операциях и при стягивании соединения в процессе уплотнения.

Используя прямые секции произвольной длины и радиальные секции различного радиуса кривизны, составляющие требуемые части окружности, можно собирать и сваривать фланцы самых разнообразных очертаний и размеров. Имеется возможность также и сборки фланцев из одних прямых секций путем стыкования соседних секций под тупым или даже прямым углом. Таким методом можно строить и многоугольные фланцы для очень больших цилиндрических камер, вводя плоские переходники от многоугольника к окружности. При этом всегда можно выбрать такие размеры и формы секций, которые позволят вести их обработку на имеющихся в наличии станках.

Сборка и сварка фланцев из готовых секций производится на плоской раме или сборном стапеле. Примером такого стапеля может служить приспособление, собранное из коротких кусков двутавровой балки № 18 и двух листов стали толщиной 10 мм, примененное при сборке и сварке соединения размером 3 000×1 500 мм, каждый из фланцев которого был собран из 10 секций (рис. 13-9).

Секции пары фланцев должны быть подобраны и подогнаны по длине попарно (соответственно лежащие друг против друга в соединении). Отверстия для стяжных шпилек в каждой паре секций сверлятся по согласованной разметке или совместно, чтобы после сварки они совпадали. Затем секции одного фланца раскладывают на стапеле, прижимают к нему накладками, оставляя стыки доступными для сварки, сперва схватывают, а затем обваривают по стыкам (рис. 13-9).

Благодаря жесткому креплению секций на стапеле проварку стыков можно производить в удобных положениях, поворачивая стапель (рис. 13-10). Стыковые швы должны иметь усиление не более 2 мм по высоте. Утяжка швов (подрез) не допускается. Удобно прямо на стапеле приваривать к готовому фланцу его горловину или первые листы стенок, что придает всему узлу необходимую для дальнейших операций жесткость. Снятие усилений стыковых швов в точках, где швы должны

пересекаться с уплотнителем или обечайкой корпуса, зачистка и полировка участков уплотняемой поверхности производятся, как правило, вручную, что совсем не затруднительно ввиду малости этих участков (рис. 13-11).

Конечно, при сварке секций между собой и приварке фланца к корпусу неизбежны некоторые коробления фланца. Наличие в конструкции фланца легко деформируемого компенсирующего пояса допускает такие

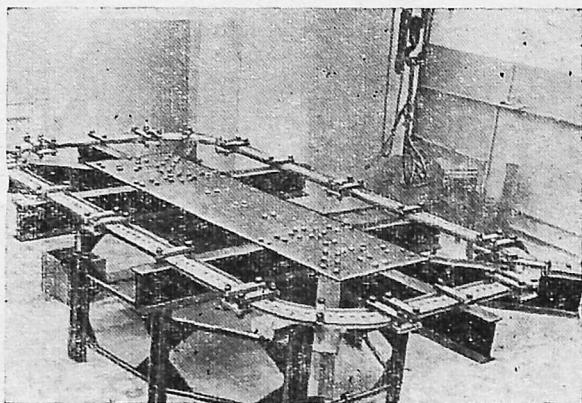


Рис. 13-9. Сборный стапель с разложенным секционным фланцем.

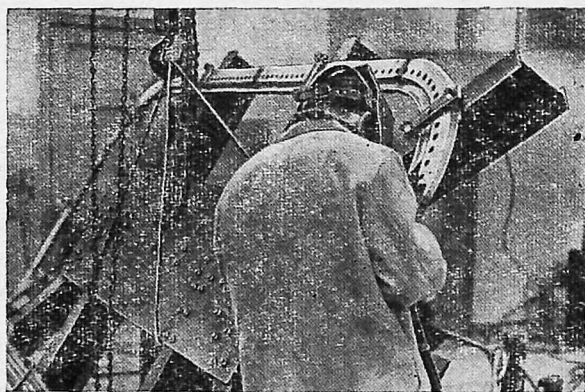


Рис. 13-10. Сварка секционного фланца с поворотом стапеля в удобное положение.

коробления без вреда для будущего уплотнения, однако в известных пределах. Поэтому торцы обечаек (стенок корпуса) должны быть подогнаны так, чтобы в будущем фланцевом соединении зазор между фланцами не превосходил 5 мм, а отклонения от плоскости были плавными и не превышали 2 мм на погонный метр уплотнения. Ступенчатые отклонения не допускаются.

Фланцы данной конструкции не имеют посадочных мест, что облегчает их изготовление и монтаж. Совпадение уплотняемых поверхностей пары фланцев гарантируется в необходимых пределах расположением стягивающих шпилек и допусками на размеры и расположе-

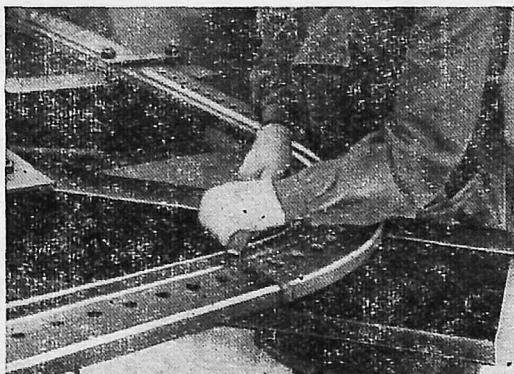


Рис. 13-11. Снятие усиления стыковых швов на секционном фланце.

ние отверстий для них. Совмещение крепежных отверстий при монтаже обеспечивается простейшими приспособлениями (типа струбцин или направляющих стержней). Первоначально фланцы сближаются до расстояния в 5—7 мм, что обеспечивается отжимными болтами, ввернутыми на нужную глубину в соответствующие резьбовые отверстия одного из фланцев. Отжимные болты служат предохранителями от случайных толчков и ударов, могущих сместить уплотнитель или повредить поверхности. Затем вставляются на свои места стягивающие шпильки и производится стягивание фланцев с постепенным вывинчиванием отжимных болтов. С одного конца стягивающих шпилек рекомендуется ставить фасонные гайки, способные удержать соседние гайки от провертывания. Это значительно облегчит монтаж. Для

окончательной затяжки соединения необходимо применить ключ с удлиненной до 1 000 мм рукояткой. Все остальные правила монтажа, проверки вакуумной плотности и эксплуатации аналогичны правилам соединений с цельными фланцами.

По принципу действия уплотнение соединений с секционными фланцами аналогично описанному в предыдущем параграфе уплотнению с утапливаемыми штифтами и проволочным уплотнителем. Штифты размещаются на закруглениях или на углах или в местах изменения направления уплотнителя, причем крайние штифты, прилегающие к прямым участкам, должны быть расположены так, чтобы уплотнитель на прямом участке находился посередине уплотняемой поверхности. На прямых участках штифты размещаются только в случае необходимости, например для предотвращения провисания горизонтального участка проволочного уплотнителя при вертикальном положении больших фланцев. Штифты должны размещаться так, чтобы уплотнитель на всем протяжении удерживался не ближе 3 мм от края уплотняемой поверхности.

Минимальное количество штифтов, устанавливаемых на скругленных участках некруглых фланцев (рис. 13-8), определяется по формуле

$$n = \frac{\alpha}{2 \arccos \left(\frac{2R + 88}{2R + 112} \right)}, \quad (13-5)$$

где n — число штифтов на одном участке; R — внутренний радиус скругления, мм; α — центральный угол участка, град.

В зависимости от условий работы уплотнитель может быть изготовлен из алюминиевой, медной или никелевой проволоки толщиной 2 мм. Алюминиевый уплотнитель применяется в установках, требующих прогрева не свыше 200 °С. При более высокой температуре прогревов вследствие значительной разницы в величинах температурных коэффициентов линейного расширения алюминия и стали происходит постепенная температурная раскочка уплотнения и после нескольких циклов нагрева соединение может разуплотниться.

Наилучшие результаты достигаются при применении медной отожженной проволоки. Медный уплотнитель позволяет производить многие десятки циклов прогрева до 450 °С без промежуточных подтяжек крепежа и без

потери вакуумной плотности. Разуплотнения не наступает и при более высоком прогреве, но тогда возможна сварка уплотнителя с фланцами, что приводит к серьезной порче уплотняемых поверхностей.

Применение никелевых уплотнителей позволяет прогревать соединения до 600°C и даже несколько выше, но при этом требует больших стягивающих усилий.

Расчетная длина уплотнителя определяется по формуле

$$L_{\text{расч}} = \Sigma l_1 + \Sigma l_2, \quad (13-6)$$

где l_1 — длина уплотнителя на скругленных участках; l_2 — длина прямого участка.

Целесообразно все скругленные участки фланцев выполнять одним и тем же радиусом. Тогда формула (13-6) принимает вид:

$$L_{\text{расч}} = (2R + 112) n \sin \frac{180^{\circ}}{n} + \Sigma l_2, \quad (13-7)$$

где $L_{\text{расч}}$ — длина уплотнителя, мм; R — внутренний радиус скругленных участков; n — суммарное число штифтов на всех скругленных участках.

Фактическая длина уплотнителя должна быть на 0,15—0,25% менее расчетной, чтобы при монтаже придать уплотнителю определенный натяг.

13-5. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА МОНТАЖА И ОБСЛУЖИВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ

Все соединения с металлическими уплотнителями предназначаются для систем сверхвысокого вакуума или для высоковакуумных систем с повышенными требованиями к чистоте среды в откачанных объемах. Следовательно, монтаж соединений должен производиться особенно тщательно с соблюдением высокой степени чистоты рабочего места, всех деталей, инструмента и рук сборщика.

Детали соединения должны быть тщательно промыты и просушены. При сборке соединения, разобранного после прогрева, необходимо уплотняемые поверхности фланцев очистить от следов окисления уплотнителя при помощи мелкой шкурки. Очистку производить движениями вдоль уплотнителя, не допуская образования поперечных рисок.

Металлические уплотнители, как правило, применяются однократно. Некоторые конструкции уплотнения допускают повторное и даже многократное использование одного и того же уплотнителя, но при обязательном условии стягивания соединения каждый раз не до конца, а только до прекращения натекания, определяемого течеискателем. Как указывалось выше, при уплотнении происходит своего рода штамповка уплотнителя и вторично попасть фланцем-штампом точно во все микродетали рисунка первой штамповки невозможно. Поэтому для эффективного вторичного уплотнения необходимо иметь возможность дополнительного сплющивания уплотнителя с заполнением снова всех микронеровностей.

Поверхности медного уплотнителя, к которым имеет доступ атмосферный воздух, после прогрева покрываются обычно черной рыхлой окисью меди. При разборке соединения и повторном монтаже следует осторожно удалять ее и следить, чтобы частицы ее не попали на уплотнитель.

При стыковке фланцев с утапливаемым кольцом необходимо соблюдать их параллельность и избегать толчков и ударов во избежание преждевременного смещения кольца и освобождения незажатого уплотнителя. Рекомендуется использовать отжимные болты как временные упоры при сближении фланцев, чтобы между кольцом и ответным фланцем оставался зазор 5—8 мм, который затем выбирается одновременным вывертыванием отжимных болтов и подтягиванием стяжных шпилек.

Уплотнение соединений производится постепенной равномерной затяжкой гаек по кругу в несколько проходов. Поворот ключа при каждом проходе должен быть не более 45°. Полное уплотнение осуществляется за 6—8 проходов. Затяжка производится усилием одного человека вначале стандартным ключом, а затем торцовым ключом с удлиненной рукояткой: для крепежа диаметром 16 мм — длиной 450 мм, для крепежа диаметром 18 мм — длиной 600 мм и для 20 — около 1 000 мм.

Правильно изготовленное и собранное фланцевое соединение работоспособной конструкции после прогрева и при эксплуатации не требует дополнительной подтяжки крепежа. Если же соединение собрано плохо или изготовлено неаккуратно, то при прогреве в точке образовавшейся течи уплотнитель окисляется и подтяжка кре-

нежа в этом случае пользы не приносит: через слой окисла газ будет поступать несмотря на самое сильное сжатие.

При транспортировании и хранении деталей фланцевых соединений необходимо обеспечить сохранность их от случайных повреждений. Особенно тщательно следует сохранять уплотняемые поверхности.

Небольшие повреждения фланцев, полученные в процессе эксплуатации, в некоторых случаях могут быть исправлены. Наиболее характерными повреждениями являются забоины и царапины на уплотняемых поверхностях, а также появление трещин в местах сварки заготовок.

Мелкие забоины и царапины устраняются зачисткой шабером и мелкой шкуркой. Более крупные повреждения и трещины завариваются аргоно-дуговой сваркой с присадкой металла. Трещины перед заваркой должны быть разделены на глубину 2,5—3,0 мм. После заварки повреждений излишки наплавленного металла удаляются напильником и место заварки зачищается вровень с основным металлом мелкой шкуркой движениями вдоль уплотнителя.

Глава четырнадцатая

ИСПЫТАНИЯ НА ВАКУУМНУЮ ПЛОТНОСТЬ

14-1. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЯ

Обязательной операцией в процессе изготовления любой вакуумной установки или прибора является испытание его отдельных узлов, а затем и всей установки в сборе на вакуумную плотность.

Из существующих многочисленных методов обнаружения течей в корпусах и трубопроводах аппаратов и в их соединениях мы остановимся только на некоторых, имеющих наиболее широкое практическое применение в производственных условиях, достаточно универсальных и обладающих необходимой степенью чувствительности.

Метод течения должен позволять применять его при работе с различными материалами, из которых изготавливается вакуумная система; при помощи этого метода нужно определять не только наличие и величину течи, но и точно устанавливать место ее, хотя бы последняя и не могла быть различима даже вооруженным оптическими приборами глазом. Кроме того, производственный метод испытаний должен быть быстрым и не требовать от оператора высокой квалификации и длительной подготовки.

Такими методами являются: опрессовка для определения грубых течей; испытание галогенным течеискателем; испытание масс-спектрометрическим течеискателем.

14.2. ИСПЫТАНИЕ ОПРЕССОВКОЙ

Метод опрессовки в вакуумном производстве применяется для первоначальной грубой проверки или в случаях, когда имеется течь такой величины, которая может привести к образованию на погруженной в воду поверхности заметно возрастающих пузырьков.

Метод опрессовки заключается в следующем: деталь, небольшой узел или прибор, герметически закрытые, за исключением одного входного отверстия, присоединяются этим отверстием к шлангу воздухопровода или воздушному насосу и накачиваются воздухом до повышенного давления $1,5-2,0 \text{ кгс/см}^2$, после чего погружаются в ванну с чистой водой, если это позволяют размеры испытываемого изделия, или же смачиваются во всем швам, соединениям или подозрительным местам мыльным раствором. В том и другом случае на поверхности металла образуются воздушные пузыри не только в местах течей, но и по всей поверхности.

Задача заключается в том, чтобы суметь различать среди большого числа пузырьков растущие пузырьки на месте течи. Этому помогает медленное, аккуратное протирание поверхности изделия под слоем жидкости, снимающие пузырьки адсорбированного поверхностно изделия воздуха, но не уничтожающее пузырьки, вырастающие на месте течи.

Чувствительность этого метода определяется способностью рабочего обнаружить растущий пузырек. Предельно малый обнаруживаемый рост пузырька соответствует натеканию примерно $1,7 \cdot 10^{-3} \text{ л-мм в ст/сек}$. С увеличением испытательного давления через ту же течь проходит больше воздуха, пузырек растет быстрее и, следовательно, чувствительность повышается.

Однако повышение давления внутри испытываемой установки сопряжено с опасностью ее разрушения. При этом, так как испытание ведется сжатым газом, а не жидкостью, разрушение установки может сопровождаться взрывным эффектом со всеми вытекающими отсюда последствиями. Повышение внутреннего давления допустимо только в случае, когда тщательным поверочным расчетом установлена достаточная прочность аппарата и приняты все меры безопасности: погружение в глубокую ванну с водой и прочные защитные ограждения для исключения возможности травмирования работающих людей и повреждения оборудования. Поэтому под давлением выше 2 кгс/см^2 допустимо испытывать только детали весьма малых размеров.

Особо следует упомянуть об испытании на течь сквозь цельный металл деталей, изготовленных из конструкционной стали, часто имеющей дефекты, о которых мы упоминали в гл. 2, 3.

Целью такого испытания, производимого иногда также опрессовкой, является установление в первую очередь количества течей на детали, их расположения и размеров, чтобы на основании этих данных решить вопрос о возможности исправления детали заваркой или гайкой и пригодности ее к дальнейшей обработке или сборке.

Для этих испытаний необходимо давление газа в $10-15 \text{ кгс/см}^2$, а следовательно, требуются прочные приспособления для зажима и уплотнения детали, а также необходимо соблюдать повышенную осторожность, так как при разрыве детали рабочий может получить травму. Газ подводится к испытываемой детали не обычным шлангом, а медной трубкой со змеевиковыми компенсаторами (для гибкости всей системы) или дюритовым шлангом высокого давления. Деталь под давлением помещается в глубокую ванну с чистой водой. Испытанию должен предшествовать поверочный расчет на прочность.

Большие камеры в целях экономии времени рекомендуется до окончательного испытания более точным методом проверять опрессовкой под небольшим давлением воздуха ($1,3-1,5 \text{ кгс/см}^2$) с промыванием всех швов и соединений мыльным раствором. Только в том случае, если испытание опрессовкой не покажет течи, можно проводить испытание камеры теческателем, предварительно тщательно промыв и просушив ее.

14-3. ИСПЫТАНИЯ ГАЛОГЕННЫМ ТЕЧЕСКАТЕЛЕМ

Положительная эмиссия поверхности накаливаемой платины сильно увеличивается в присутствии газов, содержащих галогены (фтор, хлор, бром, йод). На использовании этого явления основан галогенный теческатель ГТИ-3. Основным элементом его является датчик, схематически показанный на рис. 14-1.

Внутренний платиновый электрод (анод) находится под напряжением $+240 \text{ в}$ по отношению к внешнему электроду — коллектору ионов. В центре помещается нагреватель, разогревающий внутренний электрод до $800-900^\circ \text{C}$.

Миниатюрный вентилятор удаляет воздух, оставшийся в пространстве между электродами. Если поступает чистый воздух, от внутреннего электрода к внешнему протекает слабый положительный ионный ток. Если же к воздуху примешан галогид, ионный ток датчика сразу значительно увеличивается, что немедленно отмечается выходным прибором (с которым соединен щуп), измеряющим силу тока и дающим звуковой сигнал при его усилении. Тон звукового сигнала зависит от силы тока, а следовательно, соответствует и концентрации галогенсодержащих газов в воздухе.

Для испытания этим теческателем испытываемый объем наполняется смесью воздуха с пробным газом, которым обычно является безвредный фреон (CF_2Cl_2), или другим газом, содержащим галогид в небольшой безопасной для людей концентрации, под избыточным давлением $0,3-6,0 \text{ кгс/см}^2$. Зависимость чувствительности метода от давления та же, что и при опрессовке. Затем щупом проводят по всем соединениям и подозрительным местам поверхности. Если «пробный» газ где-либо вытекает наружу, он будет втянут щупом и

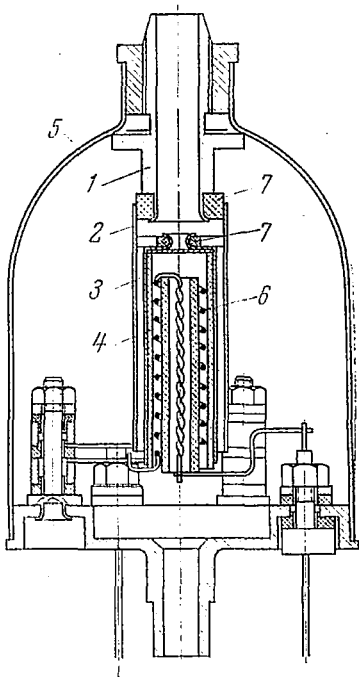


Рис. 14-1. Датчик галогенного теческателя.

1 — входной патрубок; 2 — внешний электрод; 3 — внутренний электрод; 4 — корпус нагревателя (керамика); 5 — кожух; 6 — спираль нагревателя; 7 — изолятор.

теченийскатель подаст звуковой сигнал и отметит сравнительную величину течи. Галогенным теченскателем часто пользуются для испытания холодильных установок, заполненных фреоном, и длинных труб.

Для чисто вакуумных систем, часто не рассчитанных на повышенное давление, под которым производится испытание галогенным теченскателем, последний малопригоден. Недостаточна и его чувствительность для испытания высоковакуумных систем: она составляет приблизительно 10^{-4} л·мм·рт. ст/сек.

Дальнейшим развитием галогенного теченскателя являются аппараты ВАГТИ-4 (вакуумно-атмосферный галогенный теченскатель) и БГТИ-5 (батарейный галогенный теченскатель) [Л. 46].

Первый из них имеет два датчика, работающих по тому же принципу, что и датчик ГТИ-3. Один датчик вмонтирован в щуп и предназначен для улавливания снаружи пробного газа, проникающего через течь изнутри проверяемого объема, а другой встраивается в вакуумную систему откачки испытываемого объема при методе обдувания пробным газом. Дело в том, что при впуске пробного газа внутрь установки и прощупывании течей снаружи предъявляются высокие требования к вентиляции помещения, в котором проводятся испытания.

Чем выше чувствительность теченскателя, тем меньше концентрации пробного газа он регистрирует и тем большей помехой является «фон», т. е. концентрация этого газа в помещении. Правда,

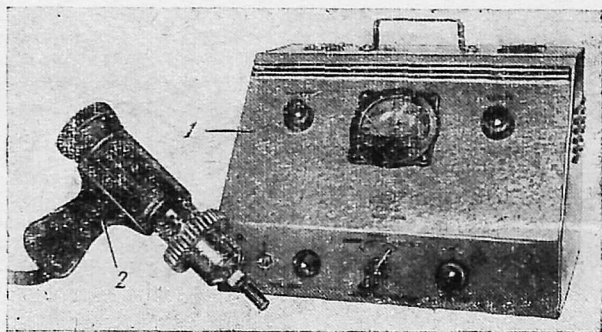


Рис. 14-2. Галогенный теченскатель ГТИ-3.
1 — измерительный блок; 2 — выносной щуп.

в новых теченскателях стараются регистрировать не абсолютную концентрацию газа, а ее изменение, но все же требования к вентиляции очень высоки. При работе же с откачкой объема и обдуванием его пробным газом (вакуумный датчик) фон газа в помещении играет меньшую роль.

Вакуумный датчик ВАГТИ-4 может работать, если он находится в вакууме в диапазоне давлений 10^{-1} — 10^{-3} мм рт. ст. Если давление в системе ниже, то необходимо повышать его до указанного путем впуска в испытываемый объем чистого воздуха. Обычно это делается через искусственную калиброванную течь из отдельного баллона, чтобы при этом не попадал снаружи «фонозный» пробный газ.

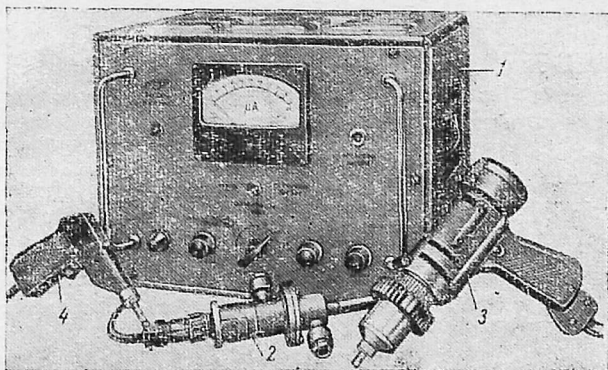


Рис. 14-3. Вакуумно-атмосферный галогенный теческатель ВАГТИ-4.

1 — измерительный блок; 2 — вакуумный датчик; 3 — шуп с атмосферным датчиком; 4 — обдуватель.

На рис. 14-2 показан внешний вид шупа и выходного прибора (измерительного блока) теческателя ГТИ-3. На рис. 14-3 изображен комплект ВАГТИ-4.

Теческатель БГТИ-5 представляет собой портативный аппарат с батарейным питанием и удобен для испытания объектов большой протяженности (газопроводы и т. п.). Чувствительность его меньше, чем аппаратов ГТИ-3 и ВАГТИ-4.

14-4. ИСПЫТАНИЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ ТЕЧЕСКАТЕЛЕМ

Наибольшей чувствительностью обладают масс-спектрометрические теческатели, для которых пробным веществом служит гелий. Они работают по принципу определения в откачанном объеме изменения весьма малых концентраций гелия.

Серия передвижных теческателей ПТИ, позволяющих определять практически с достаточной точностью как сравнительную величину течи, так и ее место в высоковакуумных системах, состоит из нескольких моделей: ПТИ-6, ПТИ-7 и ПТИ-7А, принципиальные схемы которых мало отличаются.

На передних панелях сосредоточено управление электрической схемой теческателя и включение измерительных приборов. На боковую панель выведены рукоятки вентиля, предназначенных для байпасной (помимо пароструйного насоса) откачки масс-спектрометрической камеры, соединения пароструйного насоса с форвакуумным, откачки электрометрического каскада и впуска атмосферного воздуха в форвакуумную линию. Теческатель ПТИ-6 позволяет определить поток гелия величиной до 10^{-7} л·мм·рт. ст/сек, что соответствует отсчету в 20 мв по шкале выходного прибора, или обнаружить $1/20\,000\,000$ часть гелия в воздухе при работе по методу опрессовки с применением шупа (см. § 14-5).

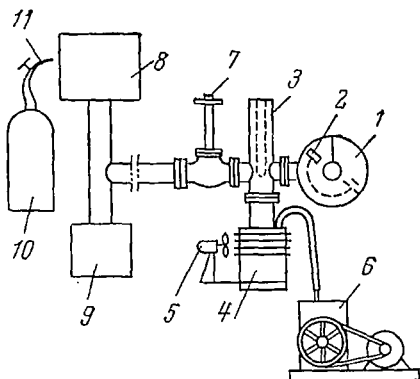


Рис. 14-4. Схема вакуумной системы масс-спектрометрического течеискателя.

1 — камера масс-спектрометра; 2 — ионизатор; 3 — ловушка; 4 — диффузионный насос; 5 — вентилятор; 6 — форвакуумный насос; 7 — дросселирующий клапан; 8 — испытываемый объем; 9 — откачка испытываемого объема; 10 — газ; 11 — форсунка (обдуватель).

Еще более чувствительным прибором является течеискатель ПТИ-7, в котором чувствительность увеличена в 10 раз за счет конструктивных изменений масс-спектрометрической камеры и электрического каскада усилителя. В модернизированном течеискателе ПТИ-7А применен новый метод повышения чувствительности за счет дросселирования откачки масс-спектрометрической камеры. При этом максимальная чувствительность прибора составляет $2 \cdot 10^{-9}$ л·мм.к.·рг. ст/сек. Для этой цели в вакуумную систему течеискателя введен дополнительный клапан, установленный между азотной ловушкой и пароструйным насосом. Наличие клапана позволяет изменять быстроту откачки масс-спектрометрической камеры и тем самым уменьшать скорость откачки гелия. Этот метод дает возможность провести предварительные испытания проверяемого объекта при малой инерционности прибора, а затем осуществить быстрый переход (путем частичного перекрытия дополнительного клапана) к режиму высокочувствительных испытаний.

Следует отметить, что метод дросселирования откачки неприменим при испытаниях объемов с большим собственным газовыделением.

Устройство и действие масс-спектрометрических течеискателей. Вакуумная система течеискателя состоит из небольшого диффузионного масляного вакуумного насоса с воздушным охлаждением, соединенного с механическим вакуумным насосом, создающим необходимое предварительное разрежение (рис. 14-4). Диффузионный насос через азотную ловушку и дросселирующий клапан присоединяется к испытываемому объему. К вакуумной системе течеискателя присоединена и масс-спектрометрическая камера — основной узел установки.

Камера (плоская, цилиндрическая коробка) имеет ионный источник, в котором под действием потока электронов, испускаемых катодом, ионизируются газы, поступающие в камеру через вакуумную систему из откачиваемого испытываемого объема.

Выходящие из источника ионы разгоняются (ускоряются) в электрическом поле напряжением 300—400 в, приложенным между коробкой источника и диафрагмой, установленной перед ним с целью вытягивания лучка ионов из источника.

Пучок ионов попадает затем внутри камеры в магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом, между полюсами которого поме-

щается масс-спектрометрическая камера. Магнитное поле отклоняет пучок ионов и заставляет их лететь по круговым траекториям с радиусами кривизны, соответствующими их массам. Таким образом, ионы разных газов здесь разделяются и, встречая на своем пути диафрагму коллектора, частью проникают через щель на самый коллектор, а частью задерживаются стенкой диафрагмы.

Электрическое поле, ускоряющее ионы, и магнитное поле, разделяющее их на различные потоки, согласованы таким образом, что через щель на коллектор проникают только положительные ионы гелия.

Попадание ионов гелия на коллектор вызывает протекание в его цепи весьма слабого электрического тока, достаточного, однако, для того, чтобы с помощью электронных блоков течеискателя не только отмечать попадание гелия в прибор, но и измерять относительные количества гелия, попавшего в камеру течеискателя.

Присоединяемая к вакуумной системе течеискателя через дроссельный вентиль испытываемая деталь или сосуд должны откачиваться отдельным механическим вакуумным насосом. Приведя в рабочее состояние течеискатель и откачав испытываемый объем отдельным насосом, следует, открывая дроссельный вентиль, пустить часть откачиваемого из сосуда газа в вакуумную систему течеискателя.

Если теперь обдуть гелием испытываемый сосуд, то проникший в него через течь гелий обязательно частично попадает через дроссельный вентиль в масс-спектрометр и будет отмечен прибором.

Минимальная течь обнаруживается в том случае, когда испытываемый сосуд может быть полностью откачан вакуумной системой самого течеискателя, т. е. когда удастся полностью открыть дроссельный вентиль и отключить вспомогательный насос. В этом случае в течеискатель попадает весь гелий, прошедший через течь.

В тех случаях, когда из-за большой течи в испытываемом сосуде невозможно полностью открыть дроссельный кран и отключить насос, чувствительность оказывается меньшей. Приблизительно она может быть оценена как $1/10\,000$ того количества газа, который удаляется вспомогательным насосом из испытываемого сосуда.

Более подробное описание течеискателя можно найти в [Л. 46].

Техника испытаний. На рис. 14-5 показан обычный испытательный пост с масс-спектрометрическим течеискателем. Кроме течеискателя, пост имеет стол для испытаний мелких деталей и небольших узлов, механический вакуумный насос для предварительной откачки, ряд мелких приспособлений: несколько слесарных струбцин разной величины; набор различных фланцев, глухих и со штуцерами для откачки; вакуумные шланги разного диаметра и несколько переходников к ним; резиновые пробки разных размеров, глухие и с отверстиями для вставки трубок; несколько зажимов для шлангов; пережимы рычажные (рис. 14-6) и винтовые (рис. 14-7) для шлангов; 10—15 хомутиков (рис. 14-8) для крепления шлангов на трубках и баллон с гелием с натекателем и обдувателем (рис. 14-9).

Баллон для гелия обычно берется легкий, малого размера, от огнетушителя.

Вместо баллона может применяться обычная кислородная подушка, наполняемая гелием.

В испытываемых деталях, узлах и готовых установках при помощи фланцев и пробок вакуумно-плотно закрываются все отверстия, кроме одного, через которое вакуумным шлангом испытываемый объем соединяется с течеискателем (рис. 14-10).

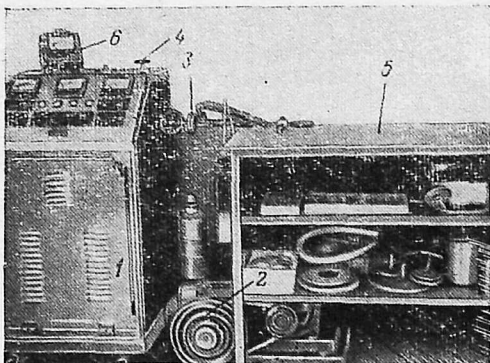


Рис. 14-5. Испытательный пост с теченскателем типа ПТИ.

1 — прибор ПТИ; 2 — механический насос предварительной откачки; 3 — вентиль механического насоса; 4 — дросселирующий вентиль; 5 — рабочий стол; 6 — выносной прибор.

При закрытом вентиле 1 включается механический вакуумный насос 2 предварительной откачки. Примерно через 1 мин после этого постепенно начинают приоткрывать вентиль 1, следя за тем, чтобы механический вакуумный насос не выбрасывал масла.

Вакуумная система теченскателя должна быть заранее включена, разогрета и откачана предварительно, но не менее как за 40 мин до начала испытаний.

Когда испытываемый объем хорошо откачан, включают манометрический преобразователь теченскателя, заливают азот в ловушку

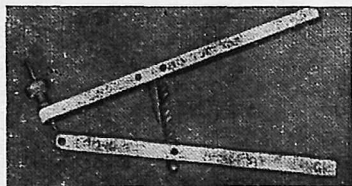


Рис. 14-6. Рычажный пережим для вакуумных шлангов.



Рис. 14-7. Винтовой пережим для вакуумных шлангов.

и проверяют давление в вакуумной системе теченскателя. При хорошем состоянии всей системы в ней может быть получено давление около $5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. (при закрытом дросселирующем вентиле 3). Этому давлению соответствует отклонение стрелки манометра в пределах первого деления шкалы (рис. 14-10).

Затем осторожно открывают дросселирующий вентиль теченскателя, наблюдая при этом за изменением показаний манометра. Дросселирующий вентиль должен открываться лишь настолько, чтобы стрелка манометра показывала не больше 20 делений шкалы, что соответствует давлению около $2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. (Это и есть максимальное рабочее давление в вакуумной системе теченскателя, при котором можно производить испытание.)

Когда манометрический преобразователь показывает установившееся давление в пределах первых 20 делений шкалы, можно включить разгоняющее напряжение и накал катода, а затем через несколько минут включить необходимую для данного испытания степень чувствительности прибора 4 и начать испытание.

Испытание сварных и паяных конструкций следует производить по мере сварки или пайки каждой пары детали, а также после сварки или пайки каждой пары деталей. Это

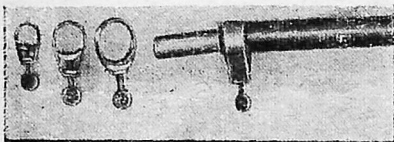


Рис. 14-8. Хомутики для закрепления вакуумных шлангов на отливках и трубках.

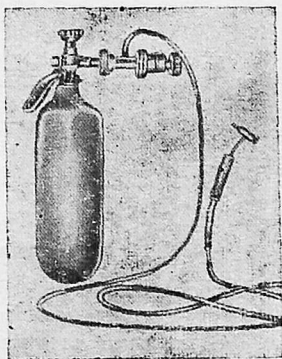


Рис. 14-9. Баллон для гелия с натекателем.

очень важно, если испытывать сразу несколько соединений, близко расположенных и ранее не проверенных, то бывает трудно определить место течи или даже нескольких течей, так как гелий легко может попадать в течь, расположенную и не в том шве, который в данный момент проверяется. Это может серьезно исказить результаты и затянуть испытания.

Проверку необходимо начинать с верхних швов детали или узла, так как гелий много легче воздуха.

Обдувание ведется при помощи обдувателя 5 (рис. 14-10), соединенного резиновым шлангом с баллоном 6 (или газовой подушкой). Если гелий подается из баллона, пуск и перекрывание производятся натекателем 7 на баллоне, если же подача гелия идет из подушки, газ перекрывается краном обдувателя.

Обдувание испытываемых аппаратов следует вести вдоль швов и соединений со скоростью около 0,5—1 м/мин.

Струя гелия должна быть слабой в целях экономии гелия и более точного определения места течей. Касаться обдуванием поверхности аппаратуры не следует, чтобы не засорять тонкого отверстия обдувателя пылью, краской, маслом.

Опытный испытатель уже по степени разрежения, достигнутого в испытываемом объеме, может уверенно определить, есть ли в нем более или менее значительные течи, но действительную вакуумную плотность можно определить только после тщательного обдувания гелием.

Для проверки на вакуумную плотность мелких узлов, как, например, корпусов вентиляей, сильфонных узлов и т. п., выгодно применять трубчатые гребенки с вентилями на отрезках и короткими вакуумными шлангами для присоединения деталей.

В случаях серийного производства рационально применять специализированные приспособления для быстрой и надежной установки изделий на испытание.

Иногда, особенно при испытании крупных узлов и сложных установок, приходится проводить его в несколько приемов, так как обнаруженные течи лучше всего устранять капитально и немедленно. Чем меньше протекание, тем точнее испытание, и не следует увлекаться

различными временными способами устранения течей в погоне за мнимой экономией времени.

Испытателю следует научиться на практике отличать газовыделение внутри испытываемого аппарата, значительно повышающее иногда давление, от внешнего протекания. Газовыделение часто путает картину испытаний, поэтому необходимо тщательно промывать и просушивать детали перед сборкой.

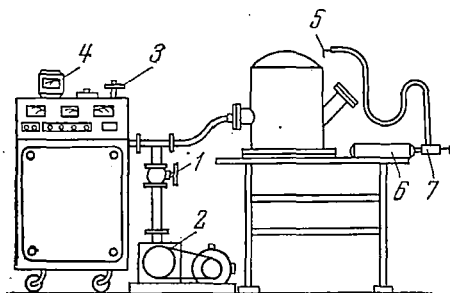


Рис. 14-10. Схема соединения испытываемого объема с теченскателем ПТИ.

Следует также помнить, что не только внутреннее, но и внешнее загрязнение объема может спутать картину испытания. Стоит потерпеть дальцем место очень малой течи, как она может перекрыться на минуты, а иногда и на часы, влагой и жиром, перешедшими с рук на металл, но через некоторое время течь вновь появится.

Как уже было показано, самый процесс испытания на вакуумную плотность при помощи масс-спектрометрических теченскателей всех типов состоит в общих чертах из одних и тех же операций. Однако испытание сверхвысоковакуумных систем обдуванием не всегда бывает достаточно надежным, так как весьма малые течи легко при этом пропустит. Поэтому целесообразно в ряде случаев использовать так называемый метод гелиевой камеры.

Метод заключается в том, что испытываемая установка или узел целиком (при малых габаритах) или по частям (если размеры его велики) накрывается колпаком или мешком из сравнительно мало проницаемого для газа материала. Под колпак при испытании впускается гелий. Особой герметичности от таких колпаков или мешков не требуется, так как для испытания достаточно создать вокруг подозрительных участков поверхности более или менее богатую смесь гелия с воздухом на сравнительно короткое время. В атмосферном воздухе гелий присутствует в количестве 1/200 000 доли, так что даже 10%-ная смесь гелия с воздухом будет в 20 000 раз более концентрированной и припикновение гелия из нее в проверяемый объем сразу будет обнаружено теченскателем.

При испытании методом гелиевой камеры возможность пропуска течи исключается, но место ее нахождения не определяется. Следовательно, нужно сначала методом гелиевой камеры определить, есть

ли какая бы то ни было течь, а потом уже, если она имеется, методом обдувания найти, в каком именно месте она расположена. Если же испытание в камере покажет хорошую вакуумную плотность, то необходимость обдувания отпадает сама собой.

14-5. ИСПЫТАНИЯ МЕТОДОМ ЩУПА

Если проверяемую на герметичность систему по каким-либо соображениям нельзя откачивать, то ее можно проверить при помощи того же масс-спектрометрического теченскателя, заполняя проверяемый объем смесью воздуха с гелием под избыточным давлением и отыскивая место течи. Такой метод испытания называется методом щупа.

Для осуществления этого метода к входному фланцу теченскателя присоединяется гибкий вакуумный трубопровод, на конце которого имеется щуп-натекатель. Всасывающее отверстие щупа должно быть настолько мало, чтобы при полностью открытом дросселирующем вентиле теченскателя в последнем устойчиво сохранялось давление $2 \cdot 10^{-4}$, необходимое для нормальной работы прибора.

Медленно проводя щупом вдоль всех мест, в которых может быть течь, можно обнаружить ее, так как в точке вытекания гелиевой смеси щуп засосет его и теченскатель отметит повышение концентрации гелия в его вакуумной системе.

Решающую роль в эффективности этого метода играют конструкция щупа и качество гибкого трубопровода. Последний должен быть достаточно гибким; чтобы ощупывание им поверхности проверяемого аппарата происходило равномерно, он должен быть нечувствительным к внешнему давлению атмосферы и его собственное газовыделение должно быть минимальным.

Обычные резиновые вакуумные шланги непригодны для присоединения щупа. Металлические гофрированные вакуумные шланги следует тщательно промывать и просушивать.

Конструкция щупа должна позволять регулировать величину всасывающего отверстия и выдерживать минимальное расстояние между проверяемым изделием и входным отверстием щупа. В противном случае концентрация гелия, особенно при малых течах, будет резко снижаться еще до засасывания в щуп. В то же время необходимо предотвратить возможность засорения входного отверстия, а потому щуп не должен соприкасаться со стенкой проверяемого изделия. В этих целях на конец щупа надевается слегка углубленный колпачок, выдерживающий в работе постоянное минимальное расстояние между щупом и изделием и позволяющий щупу засасывать газ с большой поверхности.

Чувствительность метода зависит от нескольких факторов: давления пробного газа внутри изделия, скорости перемещения щупа, собственного газовыделения шланга и т. п. При всех условиях чувствительность в этом случае меньше по сравнению с ранее описанными испытаниями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Королев Б. И. Основы вакуумной техники. Изд. 4-е. М., «Энергия», 1964.
2. Векшинский С. А. Новый метод металлографического исследования сплавов. М.—Л., Гостехиздат, 1944.
3. Машиностроение. Энциклопедический справочник. Т. 4. М., Машгиз, 1947.
4. Бабаков А. А. Нержавеющие стали. М., Госхимиздат, 1956.
5. Нехендзи Ю. А. Стальное литье. М., Metallurgizdat, 1956.
6. Повышение качества легированных сталей путем электрошлакового переплава. Под ред. акад. Б. Е. Патона. Москва—Киев, Машгиз, 1960.
7. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. Т. 1, М., Госэнергоиздат, 1960.
8. Смирягин А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы. М., Metallurgizdat, 1956.
9. Справочник машиностроителя. Т. 2. М., Машгиз, 1952.
10. Неметаллические материалы (справочник). Москва—Свердловск, Машгиз, 1962.
11. Богородицкий Н. П. и др. Радиокерамика. М., Госэнергоиздат, 1963.
12. Керамика и ее сплав с металлом в технике. Под ред. проф. В. А. Преснова и канд. техн. наук Н. С. Иофиса. М., Атомиздат, 1969.
13. Справочник по пластическим массам. М., «Химия», 1967—1969.
14. Фторопласты. Под ред. Гарбар. М., Госхимиздат, 1954.
15. Hait P.—«Wacuum», 1967, № 10.
16. Плещенко Е. Г. Исследование газопроницаемости и газоотделения материалов в вакууме.—«Электроника». Вып. 8, 1962, с. 90—96.
17. Фаркаш И., Берри Е. Эластомерные уплотнения для больших сверхвысоковакуумных установок. Современная вакуумная техника. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960, с. 121.
18. Иванов А. А. Электровакуумная технология. М., Госэнергоиздат, 1944.
19. Цейтлин А. В. Вакуумные пароструйные насосы. М., «Энергия», 1965.
20. Грошковский Я. Технология высокого вакуума. Пер. с польск. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
21. Спектор О. Ш. Разделительная и поверхностная кислородно-флюсовая резка. М., Машгиз, 1963.
22. Таран В. Д., Калачев Ю. А. Резка нержавеющей стали стандартными резаками.—«Сварочное производство», 1962, № 1, с. 34.

23. Васильев К. В. Газоэлектрическая резка металлом. М., Машгиз, 1963.
24. Вершинин Б. Д. Охладитель для резака УДР-2-58.— «Сварочное производство», 1963, № 1, с. 141.
25. Технология электрической сварки плавлением. Под ред. акад. Б. Е. Патона. М., Машгиз, 1962.
26. Бродский А. Я. Аргодуговая сварка вольфрамовым электродом. М., Машгиз, 1956.
27. Чернаков Ф. А., Богданов Ф. А. Аргодуговая сварка и ее применение. Л., Судпромгиз, 1958.
28. Берсон Л. М. Мягкая камера для сварки титана и его сплавов.— «Сварочное производство», 1962, № 10, с. 36.
29. Башенко В. В. Сварка металлов электронным лучом.— «Сварочное производство», 1961, № 1, с. 34.
30. Козлов Ю. М. Электроннолучевые пушки для сварки металлов в вакууме.— «Сварочное производство», 1961, № 1, с. 38.
31. Костюк В. А., Козлов Ю. М., Шувалов А. В., Герасименко А. В. Промышленные установки для сварки электронным лучом.— «Сварочное производство», 1961, № 1, с. 41.
32. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме. М., «Машиностроение», 1968.
33. Хренов К. К., Гурский П. И., Корниенко Ю. А. Вакуумноплотные швы, выполненные холодной сваркой.— «Автоматическая сварка», 1968, № 5, с. 56.
34. Хренов К. К. Холодная сварка.— «Автоматическая сварка», 1963, № 8, с. 4—11.
35. Балакин В. И., Хренов К. К. Роль вакуума при холодной сварке.— «Автоматическая сварка», 1966, № 2, с. 7—9.
36. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Пайка металлом. М., «Машиностроение», 1967.
37. Любимов М. Л. Спай металла со стеклом. М.—Л., «Энергия», 1968.
38. Батыгин В. Н. Вакуумноплотные алюмооксидные керамические материалы.— «Электроника», Вып. 4, 1959, с. 3—15.
39. Казанцева К. Е., Кириллова Г. К., Полякова Н. Л. Вакуумноплотные керамические материалы для спаев с металлами.— «Электроника». Вып. 4, 1959, с. 52—59.
40. Бравинский В. Г., Иванов В. П., Метлин Г. А. Сравнительная оценка основных способов металлизации.— «Электроника». Вып. 4, 1959, с. 76—85.
41. Denton E. P., Rawson H. The metallizing of high Al_2O_3 ceramics, Transaction of the British Ceramic Society, 1960, № 2.
42. Метелкин И. И., Макаркин А. Я. Новый метод получения металлокерамических узлов.— «Электроника». Вып. 9, 1962, с. 68.
43. Метелкин И. И., Макаркин А. Я., Афанасьев И. В. Сварка металлизированной керамики с металлами термокомпрессионным способом.— «Электроника». Вып. 10, 1961, с. 96—106.
44. Эдис Р., Пенсак Л., Скотт Н. Уплотнение из фторэластомера для высоковакуумных систем. Современная вакуумная техника. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960, с. 126.
45. Шнякин Н. С., Илышев В. С. Роликовая сварка сильфонных узлов из нержавеющей стали. М., «Дом техники», 1962.
46. Ланис В. А., Левина Л. Е. Техника вакуумных испытаний. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.

47. Балковец Д. С., Орлов Б. Д., Чулочников П. Л. Точечная и роликовая сварка специальных сталей и сплавов. М., Оборонгиз, 1957.
48. Штернин Л. А., Прокофьев С. Н. Сварка трением алюминия со сталью и медью.— «Сварочное производство», 1961, № 11, с. 30.
49. Баранов И. Б. Холодная сварка пластичных металлов. Изд. 3-е. М.—Л., Машгиз, 1969.
50. Василевский Л. В., Сидорук В. С., Шатайло Д. В. Электрошлаковая сварка фланцев.— «Сварочное производство», 1961, № 5, с. 31.
51. Любимов М. Л., Мишкин А. Г., Федченко Г. Ф. Отпайка медных штенгелей методом холодной сварки.— «Электроника». Вып. 3, 1959, с. 95—100.
52. Лайнер В. И. Справочное руководство по гальваностегии. Химическое и электрохимическое полирование. М., «Металлургия», 1969.
53. Рот А. Вакуумные уплотнения. Пер. с англ. М., «Энергия», 1971.
54. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. Пер. с англ. М., «Мир», 1964.
55. Электроды для дуговой сварки и наплавки. М., Внешторгиздат, 1966.
56. Шумский К. П. Вакуумная аппаратура и приборы химического машиностроения. М., Машгиз, 1963.
57. Кузнецов В. И. Механические вакуумные насосы. М., Госэнергоиздат, 1959.
58. Лакедемонский А. В., Хряпин В. Е. Справочник паяльщика. М., «Машиностроение», 1967.
59. Вишенков С. А. Применение химического никелирования для защиты от коррозии и повышения износостойкости деталей.— ВСНТО, 1958, № 4.
60. Лебединский М. А. Электровакуумные материалы. М.—Л., «Энергия», 1966.
61. ЩигOLEV П. В. Электролитическое и химическое полирование металлов. М., Изд-во АН СССР, 1959.
62. Медовар Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. Киев—Москва, Машгиз, 1958.
63. Коль В. Технология материалов для электровакуумных приборов. Пер. с англ. М., Госэнергоиздат, 1957.
64. Кулагин И. Д., Петруничев В. А., Николаев А. В. Исследование резки дуговой плазменной струей, выделенной из столба дуги.— «Сварочное производство», 1961, № 5, с. 1—4.
65. Бельчук Г. А. Исследование некоторых особенностей технологии аргонодуговой сварки алюминия и его сплавов со сталью.— «Сварочное производство», 1961, № 5, с. 8.
66. Пивоваров Г. Я. Технохимические процессы электровакуумного производства. М., «Энергия», 1964.
67. Александрова А. Т. и др. Технологическое оборудование электровакуумного производства. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
68. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пенчко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М., «Энергия», 1970.
69. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Основы конструирования вакуумных систем. М., «Энергия», 1971.
70. Wheeler W. R., Carlson M. Ultra-high vacuum flanges. Transactions of the 8th Vacuum Symposium, 1962, v. 2.

71. Wheeler W. R. Theory and application of metal gasket seal. Transactions of the 10th National Vacuum Symposium, 1964.

72. Лоташ Ю. В., Медовар Б. И. Электрошлаковый переплав. М., «Металлургия», 1970.

73. Александрова А. Т. и др. Оборудование для обработки тугоплавких металлов в электровакуумном производстве. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963.

74. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. М., «Машиностроение», 1966.

75. Нанесение твердых смазочных покрытий, содержащих дисульфид молибдена, на поверхности трения, М., «Химия», 1967.

76. Плазменная резка.— «Новости науки и техники». М., Информстандартэлектро, 1968.

77. Ковалевский Р. Е., Чекмарев А. А. Конструирование и технология вакуумноплотных паяных соединений. М., «Энергия», 1968.

78. Черепнин Н. В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. М., «Советское радио», 1966.

79. Балицкий А. В., Филатовский Л. А., Шувалов А. С. Крупногабаритные высоковакуумные соединения.— «Приборы и техника эксперимента», 1971, № 1.

80. Балицкий А. В., Филатовский Л. А., Шувалов А. С. Секционные фланцы для крупных высоковакуумных соединений.— «Приборы и техника эксперимента», 1970, № 6.

81. Балицкий А. В., Филатовский Л. А. Прогреваемые высоковакуумные фланцевые соединения.— «Приборы и техника эксперимента», 1970, № 6, с. 219.

82. Вакуумные системы и их элементы (атлас). М., «Машиностроение», 1968.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----|
| Предисловие к третьему изданию | 3 |
| <i>Глава первая. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВАКУУМНОЙ АППАРАТУРЕ</i> | 4 |
| 1-1. Введение | 4 |
| 1-2. Остаточное давление | 6 |
| 1-3. Низкий, средний, высокий и сверхвысокий вакуум | 6 |
| 1-4. Определение вакуума в зависимости от способов его получения | 8 |
| 1-5. Вакуумная плотность высоковакуумной системы | 8 |
| 1-6. Газовыделение с поверхностей. Понятие о вакуумной гигиене | 10 |
| 1-7. Работа узлов при низких температурах | 11 |
| 1-8. Особенности работы движущихся механизмов в вакууме | 11 |
| <i>Глава вторая. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ</i> | 12 |
| 2-1. Общие требования | 12 |
| 2-2. Металлическое литье | 15 |
| 2-3. Прокатные металлы | 16 |
| 2-4. Черные металлы | 20 |
| 2-5. Цветные металлы | 31 |
| 2-6. Прецизионные сплавы и тугоплавкие металлы | 39 |
| <i>Глава третья. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ</i> | 44 |
| 3-1. Стекло | 44 |
| 3-2. Керамика | 47 |
| 3-3. Пластмассы | 50 |
| 3-4. Резины | 57 |
| 3-5. Пасты, замазки, застывающие уплотнители | 59 |
| 3-6. Клеи | 60 |
| 3-7. Вакуумные масла | 61 |
| <i>Глава четвертая. ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТЬ И ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ВАКУУМЕ</i> | 62 |
| 4-1. Общие сведения | 62 |
| 4-2. Газопроницаемость металлов | 64 |
| 4-3. Газопроницаемость неметаллических материалов | 67 |
| 4-4. Газовыделение металлов | 67 |
| 4-5. Газовыделение неметаллических материалов | 75 |
| <i>Глава пятая. ЗАГОТОВКИ И ДЕТАЛИ</i> | 77 |
| 5-1. Общие замечания | 77 |
| 5-2. Методы резки заготовок | 78 |
| 5-3. Обработка кромок | 87 |
| 5-4. Ковка заготовок | 87 |
| 5-5. Давильные работы | 88 |
| 5-6. Механические нагрузки и прочность оболочек | 92 |
| 5-7. Обечайки и фланцы | 94 |
| 5-8. Днища и крышки | 98 |
| 5-9. Горловины и патрубки | 102 |
| 5-10. Трубопроводы | 103 |
| 5-11. Детали для сплавания со стеклом | 105 |
| 5-12. Охлаждающие змеевики | 106 |

| | |
|---|-----|
| <i>Глава шестая.</i> ВАКУУМНО-ПЛОТНАЯ СВАРКА | 107 |
| 6-1. Общие замечания | 107 |
| 6-2. Выбор метода | 109 |
| 6-3. Условия получения вакуумно-плотных швов | 112 |
| 6-4. Газовая сварка | 117 |
| 6-5. Ручная электродуговая сварка | 117 |
| 6-6. Сварка под слоем флюса | 120 |
| 6-7. Аргоно-дуговая сварка | 127 |
| 6-8. Сварка неплавящимся электродом | 129 |
| 6-9. Механизация аргоно-дуговой сварки | 137 |
| 6-10. Особенности сварки аппаратов сверхвысокого вакуума | 140 |
| 6-11. Сварка в газонаполненной камере | 143 |
| 6-12. Сварка в вакуумной камере | 144 |
| 6-13. Сварка тонкостенных трубок и сильфонов | 148 |
| 6-14. Сварка методом пластической деформации | 154 |
| 6-15. Сварка трением | 157 |
| 6-16. Сварка меди | 158 |
| 6-17. Сварка фторопласта-4 | 160 |
| <i>Глава седьмая.</i> ВАКУУМНО-ПЛОТНАЯ ПАЙКА МЕТАЛЛОВ | 160 |
| 7-1. Общие условия получения вакуумно-плотных паяных соединений | 160 |
| 7-2. Спаяемость металлов | 164 |
| 7-3. Формы вакуумных паяных соединений | 165 |
| 7-4. Оборудование паяльного участка | 168 |
| 7-5. Пайка мягкими припоями | 170 |
| 7-6. Пайка твердыми припоями | 174 |
| 7-7. Нагрев | 177 |
| 7-8. Зазоры | 178 |
| 7-9. Техника пайки твердыми припоями | 179 |
| 7-10. Пайка алюминия | 180 |
| 7-11. Сложные паяные соединения | 183 |
| 7-12. Пайка в восстановительных и нейтральных средах | 185 |
| 7-13. Пайка титана | 197 |
| <i>Глава восьмая.</i> ПАЙКА МЕТАЛЛОВ СО СТЕКЛОМ И КЕРАМИКОЙ | 199 |
| 8-1. Возможность получения вакуумно-плотного спая | 199 |
| 8-2. Подготовка металла для пайки со стеклом | 202 |
| 8-3. Окошечные спай | 204 |
| 8-4. Трубочатые спай | 205 |
| 8-5. Техника пайка | 209 |
| 8-6. Пайка керамики с помощью ультразвука | 211 |
| 8-7. Пайка твердыми припоями. Метод металлизации | 213 |
| 8-8. Соединение термокомпрессионным методом | 217 |
| <i>Глава девятая.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ФЛЮСОВ И ПРИПОЯ 34-А | 218 |
| 9-1. Флюсы | 218 |
| 9-2. Припой 34-А для твердой пайки алюминия | 222 |
| <i>Глава десятая.</i> СБОРКА. ВАКУУМНАЯ ГИГИЕНА. ПОКРЫТИЯ | 223 |
| 10-1. Общие правила | 223 |
| 10-2. Помещение сборочного цеха | 225 |

| | |
|---|-----|
| 10-3. Механическая обработка | 226 |
| 10-4. Обработка уплотняемых поверхностей | 229 |
| 10-5. Очистка поверхностей | 229 |
| 10-6. Химическая и электрохимическая обработка | 230 |
| 10-7. Травление | 231 |
| 10-8. Электрохимическое и химическое полирование | 232 |
| 10-9. Покрытия | 234 |
| 10-10. Сульфидирование | 235 |
| 10-11. Твердые смазочные покрытия | 236 |
| 10-12. Покрытия напылением | 238 |
| 10-13. Покрытия внешних поверхностей системы | 239 |
| <i>Глава одиннадцатая. УПЛОТНЕНИЯ С УПРУГИМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ</i> | 240 |
| 11-1. Общие сведения | 240 |
| 11-2. Виды уплотнений | 245 |
| 11-3. Механизм уплотнения упругой прокладкой | 245 |
| 11-4. Стыковые уплотнения с резиновыми уплотнителями | 248 |
| 11-5. Крупногабаритные уплотнения с резиновыми уплотнителями | 252 |
| 11-6. Стыковые уплотнения с полимерными уплотнителями | 255 |
| 11-7. Уплотнение телескопических соединений и грибковых вводов | 258 |
| 11-8. Сальниковые уплотнения вводов движения | 260 |
| <i>Глава двенадцатая. ПРОГРЕВАЕМЫЕ СТЫКОВЫЕ УПЛОТНЕНИЯ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ УПЛОТНИТЕЛЯМИ</i> | 261 |
| 12-1. Механизм уплотнения металлической прокладкой | 261 |
| 12-2. Уплотнения с плоскими металлическими уплотнителями | 265 |
| 12-3. Уплотнения с коническими уплотняемыми поверхностями | 274 |
| <i>Глава тринадцатая. КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ПРОГРЕВАЕМЫЕ УПЛОТНЕНИЯ</i> | 276 |
| 13-1. Общие сведения | 276 |
| 13-2. Уплотнения для соединений $D_y = 250 \div 1500$ мм с проволочными уплотнителями | 277 |
| 13-3. Уплотнения для соединений D_y свыше 1500 мм | 281 |
| 13-4. Секционные фланцы для прогреваемых соединений | 286 |
| 13-5. Основные правила монтажа и обслуживания соединений с металлическими уплотнителями | 293 |
| <i>Глава четырнадцатая. ИСПЫТАНИЯ НА ВАКУУМНУЮ ПЛОТНОСТЬ</i> | 295 |
| 14-1. Методы испытания | 295 |
| 14-2. Испытание опрессовкой | 296 |
| 14-3. Испытания галогенным теченскателем | 297 |
| 14-4. Испытания масс-спектрометрическим теченскателем | 299 |
| 14-5. Испытания методом щупа | 305 |
| Список литературы | 306 |

41323

Цена 1 руб. 05 коп.

14
27424