



**ЗАОЧНЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ  
ИТР**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО  
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ИМ. АКАДЕМИКА С. Н. ВАВИЛОВА

---

**А. М. ЛЕВИН**

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ И ГЕРМЕТИКИ  
В ВАКУУМНОМ  
ПРИБОРОСТРОЕНИИ**

Редакционно-методический совет

*В. П. Борисов, Н. И. Гореликов, В. В. Голоскоков, В. С. Коган, В. В. Леонов, В. Я. Плисковский (научный редактор), А. К. Ребров, Л. Н. Розанов, Л. Г. Садилов (ответственный за выпуск), Г. Л. Саксаганский (председатель), А. Б. Цейтлин.*

Рецензент канд. техн. наук *Т. В. Симоншвили*

**Левин А. М.** Конструкционные материалы и герметики в вакуумном приборостроении. — М.: Машиностроение, 1986.— 60 с., ил.

В брошюре изложены основные физико-механические свойства конструкционных металлов и сплавов, рекомендованных к применению в вакуумных приборах и установках. Приведены свойства диэлектрических материалов и герметиков, применяемых в вакуумном приборостроении. Рассмотрены области применения конструкционных материалов и герметиков. Сформулированы основные требования, предъявляемые к конструкционным материалам в вакуумном приборостроении. Рассмотрены также теплофизические воздействия на металлы вакуумных приборов.

Табл. 23, ил. 11, список лит. 20 назв.

*Выпущено по заказу Заочного института повышения квалификации ИТР ЦП НТО приборостроительной промышленности им. академика С. И. Вавилова*

## ВВЕДЕНИЕ

Прогресс науки и техники невозможно представить без дальнейшего развития вакуумного приборостроения. Технический уровень вакуумных приборов в значительной степени предопределяет технический уровень развития других отраслей промышленности. Повышаются требования к качеству, долговечности и надежности вакуумных приборов. Важнейшими факторами, влияющими на обеспечение указанных требований, являются качество и правильный выбор применяемых материалов. Электрические параметры, долговечность и надежность вакуумных приборов, как показал многолетний опыт эксплуатации, находятся в прямой зависимости от физико-механических, технологических и других свойств материалов, из которых изготовлены детали и узлы этих приборов.

В вакуумном приборостроении применяется свыше 300 видов различных материалов: цветных металлов, сплавов, порошков, многослойных материалов и др. Велико разнообразие материалов, используемых в вакуумном приборостроении и по сортаменту: проволока из тугоплавких металлов диаметром от микрон до 1,2 мм; прутки диаметром от 1,5 до 400 мм из тугоплавких, черных и цветных металлов; листы из этих металлов толщиной от 4 мкм до 2 мм; трубные заготовки различных диаметров.

Использование в вакуумном приборостроении столь большого количества различных материалов с принципиально различными свойствами, технологией обработки и применения чрезвычайно усложняет производство и требует от специалистов, работающих в этой отрасли промышленности, специальной подготовки и глубоких знаний свойств применяемых материалов.

### 1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МЕТАЛЛАМ И СПЛАВАМ ДЛЯ ВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ

#### 1.1. Особенности применения металлов и сплавов, работающих в вакууме

Современный вакуумный прибор состоит из большого количества деталей и узлов, материалы которых должны удовлетворять определенным требованиям. Главная особенность применения ме-

таллов и сплавов в вакуумном приборе определяется тем, что современный вакуумный прибор отвечает техническим требованиям только при остаточном давлении газов в вакуумной полости не более  $10^{-3}$ ... $10^{-4}$  Па, а некоторые виды приборов при давлении  $10^{-6}$ ... $10^{-7}$  Па. Причем давление должно поддерживаться в приборе на одном уровне в течение длительного времени (10...12 лет). Это является важнейшим условием надежной и долговечной работы вакуумных приборов. Материалы для деталей вакуумных оболочек приборов должны быть вакуум-плотными и коррозионно-стойкими. Ухудшение вакуума в приборах может произойти в результате газоотделения деталей оболочек, а также деталей внутренней полости прибора. Поэтому применяемые для этих целей металлы и сплавы должны содержать минимальное количество газов, способных диффундировать из толщи металла в вакуумную полость приборов. Многолетний опыт показывает, что содержание в металлах основных газов, таких, как кислород, водород и азот, должно быть  $\leq 0,001\%$ . Это достигается применением металлов вакуумного переплава.

Низкое содержание газовых и легколетучих примесей (серы, фосфора, кадмия, цинка, марганца и др.  $\leq 0,001$ ... $0,0001\%$ ) способствует получению плотных полуфабрикатов металлов (прутки, листы, трубы) без внутренних дефектов (трещин, пор, волосовин), что также обеспечивает необходимую вакуумную плотность оболочек приборов. К ряду материалов, применяемых для кернов катодов, подогревателей, геттеров, оболочек, выводов энергии, предъявляются требования по термоэмиссионным свойствам, теплопроводности, электропроводности, коэффициенту термического расширения, геттерирующим и другим свойствам.

Долговечность и надежность вакуумных приборов в эксплуатации во многом зависят от стабильности свойств металлов и сплавов, из которых изготовлены их детали и узлы. Следует помнить, что металлы и сплавы обладают стабильными физико-механическими и другими свойствами только в определенных условиях их применения. Например, сталь марки 12X18H10T после закалки становится коррозионно-стойкой и сохраняет это свойство при работе в воздушной среде практически неограниченное время. Если же детали из этой стали, например, сильфоны, предварительно нагреть до  $500^\circ\text{C}$  (время нагрева 6...8 ч), то они выйдут из строя при эксплуатации в той же воздушной среде через 2...3 года. Нагрев стали до  $500$ ... $550^\circ\text{C}$  в течение 6...8 ч приводит к образованию по границам зерен карбидов хрома, что значительно снижает ее коррозионную стойкость. При хранении на воздухе по границам зерен в такой стали возникает межкристаллитная коррозия, под действием которой сильфоны разрушаются. Детали из молибдена, если их обработать при температуре  $900$ ... $1000^\circ\text{C}$  даже кратковременно, могут сильно охрупчиваться и разрушаться, так как эта температура превышает температуру рекристаллизации молибдена, и пластичность его резко падает.

Все это подтверждает необходимость детального изучения свойств применяемых материалов и влияния на эти свойства различных технологических и эксплуатационных факторов.

## 1.2. Вакуумная плотность и проницаемость

Вакуумная плотность — это способность материалов деталей, ограждающих вакуумную полость приборов, сопротивляться проникновению молекулярного потока газов внутрь прибора из окружающего его пространства. В природе не существует материалов, обладающих абсолютной вакуумной плотностью. Любой материал пропускает сквозь себя некоторые газы. В зависимости от условий (температуры окружающей среды, толщины стенки, перепада давлений по обе стороны стенки и т. д.) один и тот же материал в одном случае будет вакуум-плотным, а в другом — может не обладать этим свойством. Так, кварцевая трубка, из которой удален воздух, при нагреве до 900°C может сохранять заданный вакуум в течение длительного времени, но стоит повысить температуру до 1100°C, как этот же материал становится невакуум-плотным.

Наиболее вероятным путем проникновения газов через оболочки прибора являются внутренние дефекты — микроскопические трещины, поры, раковины и волосовины. Подобные дефекты обнаруживаются наиболее часто на тугоплавких металлах (молибден, вольфрам и сплавы на их основе), а также на полуфабрикатах ковара, низкоуглеродистой стали, мельхиора, монели и т. д. Образование дефектов в металле связано в первую очередь с условиями их выплавки и кристаллизации, с количеством газовых и металлических примесей, растворенных в металле. Чем рациональнее выбраны примеси и их количество, тем лучше условия для кристаллизации металлов, тем меньше возможность образования внутренних дефектов. Отсутствие этих дефектов значительно повышает вакуумную плотность материалов. Минимальное содержание газов и вредных примесей и отсутствие внутренних дефектов можно получить при выплавке металлов и сплавов в вакууме. Такие металлы, как монель, мельхиор, низкоуглеродистое железо, ковар, коррозионно-стойкая сталь, используемые для деталей, ограждающих вакуумную полость, целесообразно применять только вакуумной выплавки.

Образование дефектов в металле может происходить не только при выплавке или переработке слитков на сортамент. Известны случаи, когда дефекты в металлических деталях и узлах возникли под действием определенных условий непосредственно в процессе эксплуатации приборов. Иногда после 1,5...2 лет хранения вакуумных приборов они внезапно теряли вакуум и выходили из строя. Это происходило в результате образования в оболочке прибора новых дефектов — микроканалов. Причин образования

таких дефектов в металле множество. Однако чаще всего они образуются в результате коррозионного растрескивания или коррозионной усталости металла оболочек прибора. Подробно возникновение этих дефектов изложено в работах [4, 5].

Учитывая неизбежность усталостных явлений в металлах, рекомендуется создавать такие конструкции вакуумных приборов, в которых наиболее слабые места (сварные и паяные швы, спай металла со стеклом) выполнялись бы с минимальными растягивающими усилиями в металлах. Это достигается путем тщательного подбора материалов соединяемых деталей по коэффициенту термического расширения или соответствующих конструкций сочленения, позволяющих уменьшить или полностью устранить напряжения в материале наиболее напряженной детали. Для защиты вакуумных приборов от натекания при длительном хранении широко применяют также различного рода покрытия деталей — оболочек приборов. Если предположить, что материал, ограничивающий вакуумный объем прибора, не имеет дефектов в виде пор, раковин, волосовин и других случайных дефектов, то ухудшение вакуума в приборах возможно за счет диффузии газов из окружающего прибор пространства непосредственно через оболочки приборов. Диффузия растворенного в металле газа зависит от характера его химических связей и от того, насколько прочны эти связи.

Водород образует с большинством металлов твердые растворы, или гидриды. Энергия связи атомов водорода с атомами кристаллического каркаса металла мала. Установлено, что атомарный водород, растворенный в металле, легко теряет свой электрон, т. е. ионизируется, превращаясь в протон, эффективный диаметр которого примерно в  $10^4$  раз меньше диаметра атома. Эти обстоятельства объясняют наблюдаемую на опыте интенсивную диффузию водорода через металлы. Диффузия инертных газов через металлы не происходит, так как прочная электронная оболочка атомов этих газов препятствует обмену электронами атомов газов с атомами металлов. Поэтому не происходит их сближения. Например, гелий не может растворяться в металлах и диффундировать через них, несмотря на то, что он имеет наименьший размер атома по сравнению с другими газами. Кислород и азот, образующие с металлами прочные окислы и нитриды, очень медленно диффундируют через них. Газы  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и другие в комплексе практически также не могут диффундировать через металлы.

Таким образом, через металлические оболочки приборов может диффундировать только водород. Проницаемость водорода через металлы хорошо исследована. Установлено, что она различна для разных металлов, определяется их положением в периодической системе элементов и зависит от толщины стенки, перепада давлений по обе стороны стенки и несколько в меньшей степени от состояния поверхности, структуры металла, а также от температуры металла.

Газопроницаемость через металлические оболочки рассчитывается по формуле

$$q' = \frac{q_{\text{пр}}}{Z} p^{1/j} e^{-\frac{E_{\text{пр}}}{jR_0T}},$$

где  $q_{\text{пр}}$  — константа проницаемости для данной системы твердое тело — газ,  $\text{см}^3 \cdot \text{мин} / \text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot (\text{ат})^{1/j}$ ;  $Z$  — толщина стенки, мм;  $p$  и  $p_1$  — давления на границах твердое тело—газ и твердое тело — вакуум (часто  $p_1$  принимают равным 0); ат;  $j$  — число атомов в молекуле растворяющегося газа;  $E_{\text{пр}}$  — энергия активации проницаемости, кал/(г·моль);  $R_0$  — универсальная газовая постоянная  $R_0 = 8,314 \cdot 10^3$ , Дж/(моль·К);  $T$  — абсолютная температура, К.

Для стенки единичной толщины уравнение часто представляют также в виде [10, 11].

$$\lg q' = C_{\text{пр}} + \frac{1}{j} \lg p - \frac{B_{\text{пр}}}{T},$$

где

$$C_{\text{пр}} = \lg q_{\text{пр}}; B_{\text{пр}} \approx \frac{E_{\text{пр}}}{2,303} \cdot jR_0.$$

### 1.3. Упругость паров металлов

При конструировании и изготовлении вакуумных приборов приходится иметь дело не только с газами, но и с парами конструкционных металлов и сплавов. Каждое вещество состоит из молекул. Молекулы в веществе находятся в состоянии теплового движения. Вследствие теплового движения с поверхности вещества все время вылетают молекулы этого вещества. Внутри вакуумного прибора идет процесс испарения с наиболее нагретых деталей. Испарившиеся молекулы оседают на менее нагретых участках вакуумного прибора. Известно, что скорость испарения в значительной степени зависит от температуры. Например, повышение температуры цинка с 20 до 35 °С увеличивает количество испаряющихся молекул в 10 раз. Давление паров металлов и сплавов  $p_m$ , а также скорость их испарения  $\omega$  в зависимости от температуры рассчитываются по формулам

$$p_m = \frac{1710}{\sqrt{M}} \omega \sqrt{T} [\text{Па}];$$

$$\omega = 0,585 \sqrt{M} \frac{p_m}{\sqrt{T}} \quad (\text{кг/с} \cdot \text{м}^2),$$

где  $T$  — абсолютная температура материала, К;  $M$  — молекулярная масса испаряющегося материала [10, 11].

Следует помнить, что рабочая температура конструкционных материалов вакуумных приборов определяется не температурой плавления, а давлением насыщенных паров.

Необходимость поддержания в вакуумных приборах в течение всего срока службы (10...12 лет) низких давлений  $10^{-4}$ ... $10^{-6}$  Па и менее требует применения для их изготовления металлов и сплавов, не содержащих летучих в вакууме примесей с высокой упругостью пара (Zn, Bi, Cd, S, P, Mn, Sb, Sn и др.). Наличие в металлах этих примесей приведет при технологической обработке изделий (откачке), а также при эксплуатации вакуумных приборов к их испарению и образованию налетов на внутривакуумных деталях, что может вывести прибор из строя. Упругость паров диссоциации этих элементов при температуре откачки  $450$ ... $500^{\circ}\text{C}$  значительно выше остаточного давления в вакуумной полости прибора. Для обеспечения нормальной и длительной работы вакуумного прибора необходимо, чтобы давление паров применяемых материалов было не более  $10^{-8}$  Па.

В табл. 1 приведены предельно допустимые температуры по основным химическим элементам, ограничивающие выбор материалов для вакуумных приборов. При указанных температурах с каждого квадратного сантиметра поверхности химического элемента каждую секунду вылетает примерно  $10^{10}$  молекул. В потоке этих молекул концентрация равна  $10^6$  молекул в  $1\text{ см}^3$ , что эквивалентно давлению  $10^{-8}$  Па. Установлено, что при повышении температуры на 5% давление паров и скорость испарения вещества возрастают в 10 раз. Все химические элементы, существующие на Земле, подчиняются этому закону.

#### 1.4. Газовыделение

Отрицательное влияние на работу электровакуумных приборов оказывают также содержащиеся в металле и на его поверхности газы. Повышенное газовыделение материалов деталей вакуумных оболочек и внутривакуумных деталей чрезвычайно усложняет процесс откачки приборов и затягивает его до нескольких десятков, а иногда (для крупногабаритных приборов) и сотен часов. Кроме того, детали, изготовленные из металлов с повышенным содержанием газов, при хранении изделий и особенно при их эксплуатации непрерывно выделяют в вакуумную полость растворенные в них газы и ухудшают вакуум, что крайне отрицательно сказывается на работе приборов. Так, при выделении из материала деталей в вакуумную полость прибора объемом  $0,1\text{ л}$  с остаточным давлением  $10^{-4}$  Па только  $1\text{ мкл}$  газа давление в приборе повысится до  $1\text{ Па}$  и прибор выйдет из строя.

Газы в металлах могут находиться в свободном состоянии, заполняя раковины, поры и другие дефекты, а также в виде растворов и химических соединений (гидридов, нитридов, окислов и др.). В свободном состоянии могут находиться водород, реже — азот. Кислород в металлах содержится только в виде различных окислов.

При всех прочих равных условиях легче всего удалить из металлов газы, находящиеся в свободном состоянии. Для удаления

Таблица 1

Элемент	Температура, °С	Элемент	Температура, °С	Элемент	Температура, °С
Сера	—42	Марганец	422	Железо	746
Калий	—13	Галий	476	Церий	837
Фосфор	24	Серебро	486	Лантан	857
Натрий	36	Алюминий	551	Титан	927
Кадмий	37	Олово	579	Ванадий	1019
Мышьяк	67	Никель	582	Платина	1130
Цинк	81	Бериллий	598	Бор	1132
Теллур	112	Скандий	612	Цирконий	1305
Магний	134	Кобальт	613	Гафний	1307
Стронций	184	Медь	622	Рутений	1337
Барий	207	Золото	691	Молибден	1404
Висмут	211	Кремний	697	Углерод	1443
Сурьма	213	Германий	707	Осмий	1532
Кальций	217	Хром	713	Ниобий	1547
Свинец	273	Иттрий	720	Рений	1709
Индий	390	Палладий	722	Тантал	1742
				Вольфрам	1875

газов, находящихся в металле в виде растворов и химических соединений, необходимо создать вначале условия для диссоциации соединений, в которых они находятся, а затем для удаления (диффузии) их из толщи металла. Рафинирующий отжиг деталей и узлов, а также процесс откачки приборов, из-за относительно малой продолжительности этих операций сравнительно низкой температуры откачки и вакуума не могут обеспечить достаточно интенсивного и полного удаления из металлов содержащихся в них газов. Поэтому исходное содержание газов и легколетучих примесей в применяемых металлах должно быть строго регламентировано и не должно превышать для каждого металла определенных значений.

Металлы и сплавы, предназначенные для сварки, не должны содержать окислов. В процессе сварки в вакууме окислы разлагаются с образованием газообразных продуктов, которые в большом количестве остаются в сварном шве, образуя газовые поры и раковины. Наличие окислов недопустимо также в припоях, так как при плавлении такие припой «вскипают», и паяный шов получается пористым и невакуум-плотным. Вредное влияние на вакуум в приборе оказывает содержащийся в металлах и сплавах углерод, который в условиях глубокого вакуума является источником дополнительного газоотделения. Поэтому его содержание в металлах должно быть также строго ограничено [9, 10, 19].

## 1.5. Химический состав. Идентичность свойств материалов

Долговечность и надежность приборов в эксплуатации, как уже говорилось, в значительной мере зависят от стабильности и идентичности физических, электрических, магнитных, механических, технологических и других свойств применяемых металлов и сплавов. Для изготовления идентичных по качеству и электрическим параметрам электровакуумных приборов необходимо иметь металлы и сплавы, свойства которых в пределах одной плавки, а также от плавки к плавке изменялись бы с очень небольшими отклонениями. Идентичность свойств в чистых металлах определяется содержанием примесей, а в сплавах — содержанием легирующих элементов, примесей, термической обработкой и режимами ее проведения.

В условиях многотоннажного серийного производства нельзя, например, выплавить ковар, в котором содержание никеля в десятках тысяч плавов было бы точно 29%. Поэтому в действующих Технических условиях и ГОСТах изменения (в абсолютных значениях) содержания примесей легирующих элементов и свойств регламентированы в пределах соответствующих допусков. Например, содержание никеля и кобальта в коваре от плавки к плавке может колебаться в пределах 0,5% (от 29% нормы). В соответствии с этим температурный коэффициент линейного расширения ковара в определенных интервалах температур от плавки к плавке также колеблется в известных пределах. Естественно, что чем меньше эти допуски, тем ближе по свойствам металл одной плавки к металлу другой плавки. Правильно установить эти допуски дело чрезвычайно трудное и требует знания зависимости влияния определенных факторов на свойства металлов (например, химического состава на механические свойства), а также того, как влияют отклонения в свойствах материала на работу того или иного узла или всего прибора в целом. Например, в коваре легирующие элементы (никель, кобальт) введены с целью обеспечения заданного температурного коэффициента линейного расширения в определенном интервале температур. В сталях никель и хром вводятся для того, чтобы повысить их коррозионную стойкость. Активные присадки (магний, кремний, вольфрам, кальций) в катодных сплавах введены как активаторы, обеспечивающие получение необходимой термоэлектронной эмиссии оксидного катода в вакуумном приборе. Естественно, что допуски на содержание легирующих присадок в каждом из этих сплавов должны быть различными. Так, для кернов оксидных катодов необходим никель с содержанием магния до 0,07%. Увеличение содержания магния приведет к значительным колебаниям электрических параметров и снижению надежности изделий в эксплуатации. Несмотря на трудности выплавки таких сплавов, указанные требования являются технически обоснованными и затраты на их про-

изводство полностью окупаются. Есть ли необходимость устанавливать такие же жесткие допуски на содержание легирующих элементов в коваре или коррозионно-стойкой стали? Научные исследования и опыт показывают, что в этом нет необходимости, так как отклонения в содержании легирующих элементов в этих сплавах в сотые и даже десятые доли процента практически не влияют на их свойства и не являются для них критичными.

### **1.6. Входной контроль качества материалов и методы контроля качества металлических материалов**

Основным техническим документом, регламентирующим качество поставляемых материалов, является ГОСТ или Технические условия. В эти документы невозможно включить абсолютно все характеристики качества материалов, которые в конечном счете влияют на надежность и долговечность вакуумных приборов. В настоящее время, не известно, какую роль в обеспечении надежной и долговечной работы этих приборов, играют например, такие характеристики металлов и сплавов, как их структура, величина зерна, межзеренные прослойки, наличие фаз и фазовых превращений в металлах, характер дислокационной структуры и др. Поэтому для выпуска идентичных по качеству вакуумных приборов необходимо иметь стабильный технологический процесс их изготовления и применять в производстве стабильные по свойствам и качеству материалы.

Учитывая, какую большую роль играет качество материалов в обеспечении долговечности и надежности вакуумных приборов в эксплуатации, одной из важнейших задач считают организацию на современном техническом уровне службы входного контроля качества материалов. Входной контроль качества материалов на предприятиях организуется прежде всего с целью предупреждения поступления в производство материалов, не отвечающих требованиям действующих ГОСТов и ТУ. Кроме того, входной контроль качества материалов должен обеспечить систематизацию и накопление статистических данных по физико-механическим и другим свойствам поступающих материалов для разработки на этой основе предложений по пересмотру действующих ТУ и ГОСТов с целью их совершенствования и приближения соответствия физико-механических и технологических свойств материала к задачам разработки, серийному выпуску надежных, долговечных вакуумных приборов.

Входной контроль качества материалов, как правило, начинается с контроля химического состава. Этот контроль должен предупредить попадание в производство вакуумных приборов материалов, содержащих вредные летучие примеси (цинк, висмут, кадмий, сера, фосфор и др.). Второй задачей контроля химического состава сплавов является определение в них содержания легирующих элементов, от которых зависят физико-механические

и технологические свойства сплавов, например, содержания углерода в углеродистых сталях, хрома и никеля в коррозионно-стойких сталях, магния, кремния в никеле, легирующих добавок в молибдене, повышающих температуру рекристаллизации и т. д. С этой целью применяются два основных вида анализа: химический и спектральный. Подробно о методиках этих анализов изложено в работах [1, 5, 17].

Определение содержания газов в металлах, как было показано ранее, является также очень важной задачей входного контроля. Содержание кислорода, водорода и азота в металлах и сплавах регламентируется действующими ТУ. Основные виды контроля содержания газов в металлах следующие: метод вакуум-плавления, спектрально-изотопный метод, спектральный и радиоактивационный методы. Подробно эти методы изложены в работах [3].

Кроме контроля химического состава и анализа газов, на заводах вакуумного приборостроения необходимо контролировать материалы по ряду специальных показателей, которые являются определяющими с точки зрения качества готовых узлов или приборов в целом. К таким видам контроля относятся.

1. Определение температурного коэффициента линейного расширения ковара в интервале температур 20...500° С, предназначенного для пайки с определенной маркой стекла.

2. Металлографический контроль ковара на наличие  $\alpha$ -фазы при температуре — 70°С.

3. Контроль меди на величину зерна.

4. Контроль на рекристаллизацию металлов и сплавов.

5. Контроль на наличие закиси меди.

Контроль по пп. 2...5 проводится с применением металлографии на специально изготовленных шлифах под микроскопом.

Особенности производства вакуумных приборов требуют организации контроля металлов, деталей и узлов на ряд специальных свойств, несмотря на то, что контроль этих свойств не предусмотрен действующими ТУ на металлы и сплавы.

Оценка вакуумной плотности металлов и сплавов может производиться по результатам прямого и косвенного методов испытаний.

Прямой метод испытаний проводится на гелиевых масс-спектрометрических течеискателях, которые в состоянии оценить вакуумную плотность деталей и узлов и установить наличие крайне малых дефектов.

Косвенный метод определения вакуумной плотности металлов основан на анализе данных по испытаниям на наличие в них внутренних дефектов (волосовин, трещин, пор и неметаллических включений). Основные методы контроля на эти дефекты, позволяющие контролировать заготовки, детали и узлы:

1. Просвечивание металла, а также деталей и узлов рентгеновскими и гамма-лучами.

2. Ультразвуковая дефектоскопия.

3. Магнитная дефектоскопия.
4. Люминесцентная дефектоскопия деталей и узлов.
5. Дефектоскопия внутренних дефектов в проволоках, прутках и других заготовках методом вихревых токов [9, 10].

## 2. МЕДЬ И ЕЕ СПЛАВЫ

### 2.1. Области применения

Медь является основным конструкционным материалом для изготовления деталей многих вакуумных приборов. В общем потреблении металлов в производстве вакуумных приборов полуфабрикаты из меди и ее сплавов составляют 90...95% от массы всех применяемых материалов. Такое широкое применение меди в производстве вакуумных приборов обусловлено исключительно благоприятным сочетанием ее свойств — высокой электропроводности и теплопроводности с высокой пластичностью и удовлетворительными прочностными и другими характеристиками. В производстве вакуумных приборов применяется медь различных марок (М0, М1, М2, М3, Моб, МВ, МВК), которые отличаются друг от друга по количеству содержащихся примесей и в известной степени физико-химическими свойствами.

Производство вакуумных приборов неизбежно связано с нагревом деталей и узлов в среде водорода или других восстановительных средах. Поэтому для их изготовления могут применяться только специальные марки меди: Моб, МВ, МВК. Длительное время в этом производстве применялась исключительно так называемая бескислородная медь марки Моб. Термин «бескислородная медь» является весьма условным, так как и в меди этой марки содержится кислород, но в значительно меньших по сравнению с другими марками количествах. В последние годы в производстве указанных приборов стала широко применяться медь вакуумной плавки марок МВ и МВК.

### 2.2. Физико-механические и технологические свойства меди

Ниже приведены некоторые физико-механические и другие свойства меди (см. также табл. 2):

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	(8,3...8,96) · 10 <sup>3</sup>
Теплопроводность λ, Вт/(м · К)	при 20 °С 3,940 · 10 <sup>2</sup> ; при 100 °С 3,768 · 10 <sup>2</sup> ; при 700 °С 3,517 · 10 <sup>2</sup>
Температурный коэффициент линейного расширения α, 1/градус	при 20°С 16,5 · 10 <sup>-6</sup>
Временное сопротивление разрыву δ <sub>в</sub> , МПа	литая (16...20) · 10; отожженная (20...25) · 10; холоднокатаная (40...49) · 10

Относительное удлинение  $\delta$ , %

литая 25...15;  
холоднотянутая 14...4;  
отожженная 50...30  
отожженная при 20 °C 5,9-10;  
при 180 °C 8,0-10

Предел текучести, МПа

На рис. 1 показано влияние содержащихся в меди примесей на ее электропроводность. Механические свойства меди в большой степени зависят от содержащихся в ней примесей, которые можно разделить на три группы:

примеси Zn, Sb, Sn, As, Fe, Ni и другие, образующие с медью твердые растворы;

примеси Pb, Be и другие, образующие легкоплавкие эвтектики;

примеси S и O<sub>2</sub>, образующие хрупкие химические соединения.

Наиболее вредными примесями являются примеси второй группы, которые, располагаясь по границам зерен, при нагревании оплавляются, что приводит к резкому снижению механических свойств при повышенных температурах (>500 °C). Присутствие примесей третьей группы также нежелательно (Cu<sub>2</sub>O и CuS—хрупкие соединения). Присутствие в меди примесей первой группы практического влияния на ее свойства не оказывает.

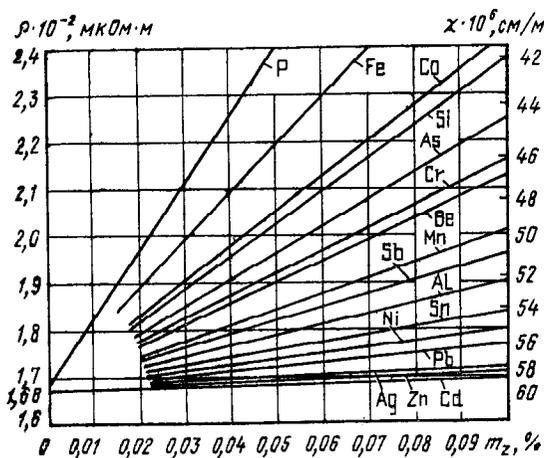


Рис. 1. Зависимость удельного сопротивления и удельной электропроводности меди от содержания в ней примесей

Влияние степени чистоты меди на ее прочностные и пластические свойства видно из графиков (рис. 2, а и б). Из графиков следует, что сорта меди Моб, МВ, МЭ имеют провал пластичности в некотором интервале температур, причем чем чище медь по содержанию примесей (медь электронно-лучевой плавки), тем меньше глубина провала пластичности; при этом минимум пластично-

сти сдвигается в область более низких температур. На положение интервала провала пластичности оказывают существенное влияние температура и длительность отжига. В частности, отжиг в водороде, не влияя на пластические свойства меди при комнатной температуре, резко понижает ее при повышенных температурах, вызывая хрупкий излом. После отжига в вакууме провал пластичности при повышенных температурах тем меньше, чем выше температура отжига и чем больше длительность изотермической выдержки.

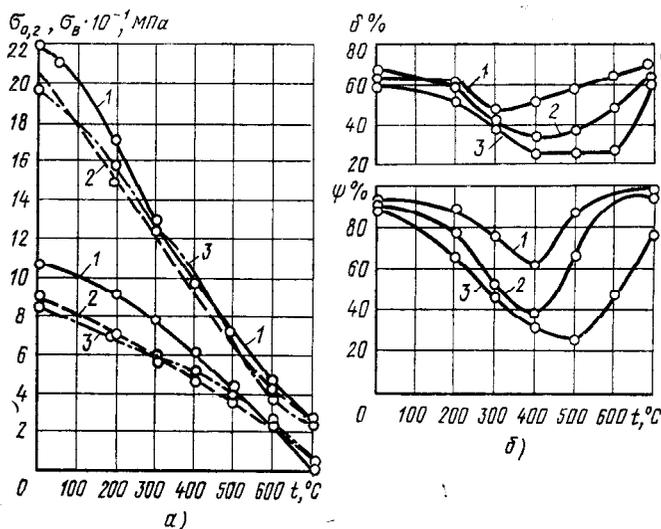


Рис. 2. Механические свойства меди Моб, МВ и МЭ при различных температурах: а — прочностные, б — пластические; 1—медь Моб; 2—медь МВ; 3—медь МЭ

Предел длительной прочности меди, выплавленной методом электронно-лучевой плавки за 5000 ч при 400°С, составляет 21 МПа, тогда как у меди Моб обычной вакуумной плавки он равен 14,8 МПа.

Как уже отмечалось, медь обладает очень высокой пластичностью и поэтому хорошо куется, прокатывается в пруток, ленту, фольгу, протягивается в проволоку, причем в большинстве случаев обработку меди можно вести в холодном состоянии с промежуточными отжигами для снятия внутренних напряжений, возникающих при ее деформации. Межоперационные отжиги меди Моб проводят при 600...650°С, а меди МВ при 400...450°С. Время отжига определяется в зависимости от массы и конфигурации деталей.

### 2.3. Недостатки меди как конструкционного материала

Важнейшие недостатки меди марок МБ, МВ и других следующие: малые механическая прочность и твердость после термической обработки (отжига при 600 °С и выше); большой температурный коэффициент линейного расширения; малая стойкость против электронной бомбардировки в вакууме.

Как уже указывалось, при 20 °С твердость меди после отжига составляет 40...41 НВ, а предел прочности 200...230 МПа. С повышением температуры испытаний прочностные свойства меди резко падают. После испытаний при 600 °С предел прочности меди составляет всего 40...43 МПа. По этой причине тонкостенные детали в процессе технологической обработки или при транспортировке часто деформируются и становятся непригодными для сборки вакуумных приборов.

Из меди нельзя изготавливать также детали, испытывающие механические нагрузки, особенно если эти детали в процессе работы приборов нагреваются до 250...300 °С. При этой температуре медь становится настолько пластичной, что со временем тонкостенные детали деформируются даже под действием собственного веса. Поэтому транспортировка тонкостенных деталей должна производиться в специальной таре, исключающей их повреждение, а детали, испытывающие механические нагрузки и работающие при температуре 250...300 °С и выше, должны изготавливаться не из меди, а из ее сплавов, обладающих лучшими прочностными свойствами. Детали из меди, обладающей большим температурным коэффициентом линейного расширения, при нагревании меняют свои геометрические размеры. Поэтому в приборах, к которым предъявляются жесткие требования по геометрии, медь желательнее заменять или плакировать другим, более тугоплавким металлом, например, молибденом или вольфрамом.

### 2.4. Медные сплавы с повышенными механическими свойствами

Влияние присадок Ni и Si на свойства меди хорошо исследовано. Установлено, что в тройных сплавах Cu—Ni—Si сплавы системы Cu—Ni<sub>2</sub>—Si ведут себя, как простые двойные сплавы. При этом силициды никеля оказываются хорошо растворимыми в твердой меди при высокой температуре и очень плохо растворимыми при низкой. Из диаграммы состояния Cu—Ni<sub>2</sub>—Si следует, что эти сплавы могут подвергаться закалке и старению. Влияние содержания Ni<sub>2</sub>Si на механические свойства сплава после закалки, отжига и старения при различной температуре показано на рис. 3. Опытным путем установлено, что наиболее благоприятным сочетанием механических и электрических свойств обладает сплав с 5% -м содержанием Ni<sub>2</sub>Si. Оптимальная температура старения это-

го сплава 500 °С, в течение 3 ч. Недостатками сплава являются пониженные электро- и теплопроводность, а также предел прочности при повышенных температурах. Пониженные электрические и тепловые свойства сплава резко снижают эффективность применения его в вакуумных приборах. Из табл. 2 следует, что присадки к сплаву меди с 5%-м содержанием Ni<sub>2</sub>Si мишметалла в количестве 0,2...0,25% повышают предел прочности при растяжении при комнатной температуре на 15...17% и при 600 °С на 22...25%, относительное удлинение при 20 и 600 °С почти в 2 раза и электропроводность примерно на 10%.

Сплав МНК является вакуум-плотным материалом, хорошо паяется твердыми припоями на серебряной основе в среде водорода, азота, формиргаза (95% Ni<sub>2</sub>+5% H<sub>2</sub>), а также в вакууме. Для пайки указанного сплава с медью и другими металлами рекомендуется применять припои марок ПСр72 и ПСрИ-63 (с присадками индия).

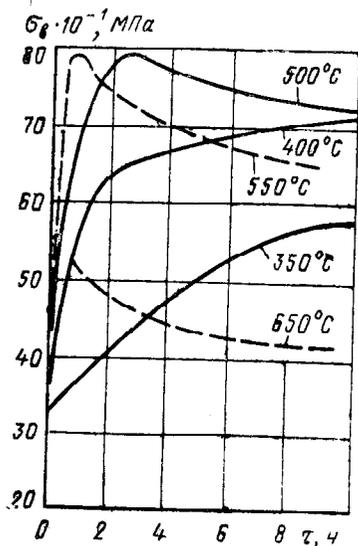


Рис. 3. Зависимость предела прочности сплава меди с 5%-м содержанием Ni<sub>2</sub>Si от температуры и времени отпуска (старения) τ после закалки

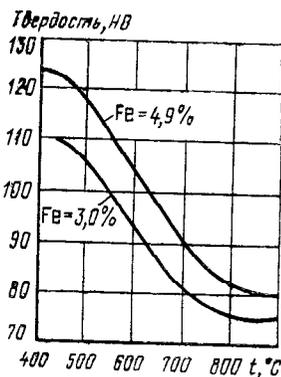


Рис. 4. Влияние температуры отжига на твердость сплавов меди с 3,0 и 4,9%-м содержанием железа

Сплав меди с присадкой 3...4% железа является вакуум-плотным материалом, хорошо поддается пайке твердыми припоями (теми же, что и для меди) и механической обработке. Этот сплав легко может быть раскатан в ленту, фольгу и пруток. Учитывая

повышенную механическую прочность и твердость, сплавы меди с присадками железа с успехом можно использовать для изготовления деталей вакуумных приборов, а также крепежных деталей, от материала которых не требуется высокой тепло- и электропроводности. Этот сплав, так же как и другие дисперсионно-твердеющие сплавы, обладает свойством легко обрабатываться после закалки, а в процессе откатки приборов (при температуре откатки 450...500 °С) — заметно упрочняться (твердость увеличивается до 80 НВ против 40...42 НВ у чистой меди).

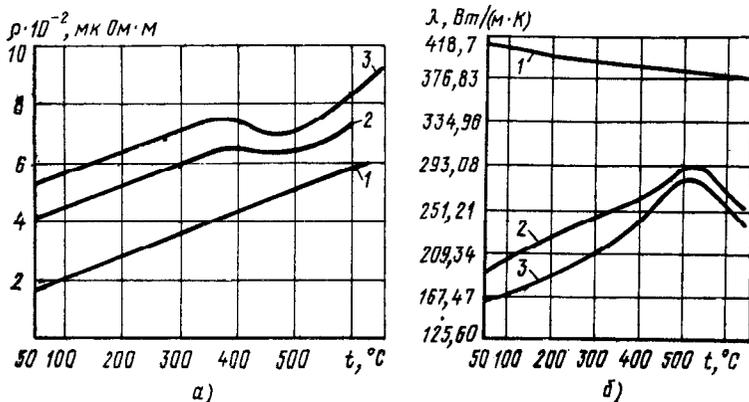


Рис. 5. Влияние присадок железа:

а — на удельное сопротивление меди; б — на теплопроводность меди; 1—Cu; 2—сплав меди с 3%-м содержанием Fe; 3—сплав меди с 4%-м содержанием Fe

Влияние температуры отжига на твердость сплавов медь—железо изображено на рис. 4. Из графиков следует, что температура разупрочнения этих сплавов на 150...200 °С выше температуры разупрочнения чистой меди. Влияние присадок железа на электрические и тепловые свойства меди в интервале температур 50...650 °С показано на рис. 5. С повышением температуры теплопроводность сплавов Cu—Fe увеличивается и достигает максимума при 500 °С. Сравнительные данные физико-механических свойств некоторых сплавов меди и чистой меди приведены в табл. 2.

## 2.5. Сплавы меди с никелем

Для изготовления деталей вакуумных приборов широко применяются мельхиор (МН-19) и константан (МН-45) — сплавы меди с никелем. Химический состав этих сплавов приведен в табл. 3, в которой указано содержание примесей в мельхиоре и константане обычной плавки. Для вакуумной промышленности изготавливаются и поставляются эти сплавы вакуумной плавки. Содержание вредных летучих примесей в таких сплавах не превышает 0,0005...0,001 % каждой. Мельхиор и особенно константан обла-

Таблица 2

Параметр	Медь Моб	Сплав меди с 5%-м содержанием Ni <sub>2</sub> Si			Сплав МНК	Сплав меди с 3%-м содержа- нием Fe
		1	2	3		
Температура плавления, °C	1083	1070	1070	1070	1070	1083... 1160
Температура разупрочнения, °C	275...300	—	—	—	—	450...500
Твердость по Бринеллю, НВ	40 (после отжига)	литого—140...150; деформированного (15%)—160...170; закаленного с 820 °C на воду — 80...85;	литого—140...150; деформированного (15%)—165...176; закаленного с 820 °C на воду— 80...85;	литого—140...150; деформированного (15%)—165...176; закаленного с 820 °C на воду— 80...85;	литого—140...150; деформированного (15%)—165...176; закаленного с 820 °C на воду— 80...85;	80
Предел прочности при растяже- нии ( $\sigma_b$ ), МПа	220	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —190...200 состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —600	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —190...200 состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —600	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —190...200 состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —700	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —190...200 состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —700	200...280
при 600 °C	41...43	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —240...260	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —240...260	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —300...320	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —300...320	100...110
Относительное удлинение, $\delta$ , %	—	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —10	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —10	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —18...20	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —18...20	—
при 20 °C	47,7	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —2...2,5	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —2...2,5	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —3,5...54,5	состаренного при 500 °C ( $\tau=30$ мин) —3,5...54,5	15...25
при 600 °C	—	—	—	—	—	—

1	2	3	4	5
Теплопроводность, Вт/(м·К)	403,19 при $t_{ср} = 46,9^{\circ}\text{C}$	—	—	189,24 при $t_{ср} = 55^{\circ}\text{C}$ (после отжига)
Электропроводность, $1/(\text{Ом}\cdot\text{см})$	$52,8 \cdot 10^{-6}$ при $t_{ср} = 46,9^{\circ}\text{C}$	состаренного при $500^{\circ}\text{C}$ ( $\tau = 30$ мин) — $24,6 \cdot 10^4$	состаренного при $500^{\circ}\text{C}$ ( $\tau = 30$ мин) — $27,01 \cdot 10^6$	$32,2 \cdot 10^6$ (после старения)
Удельное электросопротивле- ние $\rho$ , мОм·м	0,0192 при $t_{ср} = 46,9^{\circ}\text{C}$	состаренного при $500^{\circ}\text{C}$ ( $\tau = 30$ мин) — 0,04065	состаренного при $500^{\circ}\text{C}$ ( $\tau = 30$ мин) — 0,03702	0,0311 (после старения)
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/градус при $20 \dots 200^{\circ}\text{C}$ при $20 \dots 600^{\circ}\text{C}$	— —	17,8 18,35	17,65 18,33	— —

Таблица 3

Наименование материала	Основа	Содержание легирующих элементов, %	Содержание примесей, % не более						
			Cu	Ni+Co	Fe	Si	Mg	Mn	S
Мельхиор	Остальное	18...20	0,005	0,150	0,05	0,3	0,01	0,05	0,002
Константан	Остальное	44...45	0,005	0,10	0,05	1...2	0,01	0,05	0,002

дают по сравнению с медью более высокой температурой плавления, поэтому для их пайки с коваром, армко-железом и другими сплавами черных металлов можно применять в качестве припоя бескислородную медь, которая при пайке хорошо растекается по поверхности черных металлов и обеспечивает получение вакуум-плотных паяных швов. Между тем при пайке деталей из чистой меди (вместо мельхиора и константана) с деталями из черных металлов и сплавов можно применять лишь медно-серебряные припои (ПСр999 и ПСр72) с температурой плавления не выше 960 °С. Эти припои по своим технологическим свойствам при пайке меди с черными металлами не всегда обеспечивают в массовом производстве получение вакуум-плотных соединений. Физико-механические свойства мельхиора и константана приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры	Наименование материала, содержание легирующих элементов		
	Константан (Ni+Co—45%; Cu—остальное)	Мельхиор (Ni+Co—20%; Cu—остальное)	Мельхиор, переплавленный в вакууме (Ni+Cu—20%; Cu—остальное)
1	2	3	4
Температура плавления, °С	1220...1290	1130...1190	1130...1190
Предел прочности $\sigma$ , МПа при 20 °С	400...500	330...340	290...300
Относительное удлинение $\delta$ , %	38...50	40...41	43...44
Твердость по Бринеллю (отожженного), НВ	75...100	70	—

1	2	3	4
Теплопроводность, Вт/(м·К)	22,86	—	—
Удельное электро- сопротивление, мкОм·м	0,48...0,50	2,7758	2,5870
Электропровод- ность, см	—	0,3602	0,3865

Пластические свойства медно-никелевых сплавов в значительной степени зависят от содержания в них примесей. Очень вредной примесью в этих сплавах является сера, которая с никелем образует ряд химических соединений и эвтектику с температурой плавления 644 °С, располагающуюся по границам зерен. Наличие легкоплавкой и хрупкой эвтектики по границам зерен ослабляет связь между ними и приводит к разрушению металла при деформации его в горячем состоянии (красноломкость). Содержание серы в медно-никелевых сплавах, по различным источникам, не должно превышать 0,005%.

Резко снижают механические свойства медно-никелевых сплавов также присадки висмута и свинца. Эти элементы практически нерастворимы в никеле, меди и их сплавах и присутствие их в количествах более 0,002...0,005% также приводит к разрушению медно-никелевых сплавов при горячей обработке давлением. Температура рекристаллизации этих сплавов в зависимости от содержания в них легирующих элементов и вредных примесей находит-

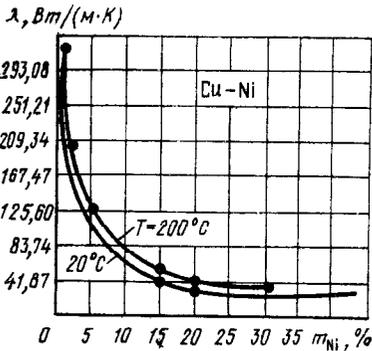


Рис. 6. Зависимость теплопроводности  $\lambda$  сплавов Cu—Ni от содержания никеля  $m_{Ni}$  при различных температурах

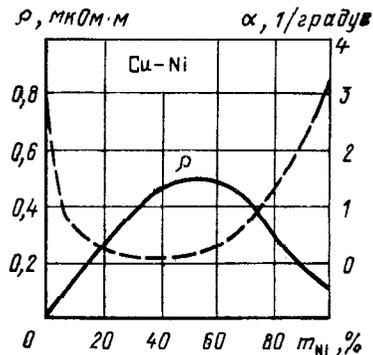


Рис. 7. Зависимость удельного электрического сопротивления и температурного коэффициента линейного расширения сплавов Cu—Ni от содержания никеля  $m_{Ni}$

Таблица 5

Химический состав	Марка сплава				
	Монель НМЖМц28- 2,5—1,5	Монель 326	Монель 403	Монель типовая	Монель К
Ni+Co	Остальное	58—61	55—60	67	66,0
Ni+Fe	2+3	<2,5	<1,0	1,40	0,8
Ni+Mn	1,2+1,8	<2	1,25...2,25	1,0	0,75
Ni+Cu	27...29	≈ 33	Осталь- ное	30	29
Ni+C	<0,2	<0,3	<0,3	0,15	0,15
Ni+Si	<0,05	<0,5	<0,75	0,1	0,5
Ni+Mg	0,1	н. о.	н. о.	—	—
Ni+Pb	0,002	н. о.	н. о.	—	—
Ni+S	<0,01	0,02	<0,024	0,01	0,005
Ni+P	0,005	н. о.	н. о.	—	—
Ni+Bi	<0,002	н. о.	н. о.	—	—
Ni+As	<0,01	н. о.	н. о.	—	—
Ni+Al	—	—	—	—	2,75

Примечание: н.о. — не обнаружено

Таблица 6

Параметры	Марка сплава	
	Монель НМЖМц 28—2,5—1,5	Монель К
1	2	3
Плотность, кг/см <sup>3</sup>	8,84 · 10 <sup>-3</sup>	8847 · 10 <sup>3</sup>
Температура плавления, °С	1300...1350	Ликвидус—1349 Солидус—1316
Температура рекристаллизации, °С	Степень деформации 10%—660 50%—660	— —
Температура отжига, °С	750	870 (в течение 1/2 ч)
Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ ;		
относительное удлинение $\delta$ ;	$\sigma_B$ , МПа   $\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа   $\delta$ , %
отожженного	480...600   50...30	630...770   45...35
холоднотянутого или	650...850   30...10	700...870   35...15
прокатного упрочненного	—   —	910...1180   30...15
Твердость по Бринеллю, НВ:		
отожженного	100...145	140...195
нагартованного	200...280	190...265
упрочненного	—	260...340
Модуль упругости, МПа	182000	182000
Удельное электрическое сопротивление при 20°С, мкОм · м	0,482	0,583
Теплопроводность (0...100°С), Вт/(м · К)	25,958	18,841

1	2	3
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-7}$ , 1/градус	20...100 °С—140 20...300 °С—145	20...100 °С—140 20...760 °С—162
Магнитные свойства при 20 °С	Мало магнитен	Немагнитен
Точка Кюри, °С	+43...+60	отожженный—120 нагартованный—110

ся в пределах: для МН-45 550...650 °С, для МН-19 500...600 °С. Сплавы мельхиор и константан являются немагнитными материалами и обладают высокой коррозионной стойкостью на воздухе с повышенной влажностью.

Кроме того, эти сплавы хорошо поддаются пайке и различного рода сварке. На рис. 6 и 7 приведены зависимости некоторых физических свойств от содержания в сплавах никеля.

Перспективным материалом для ряда деталей вакуумных приборов является монель-металл. В отечественном вакуумном производстве монель-металл пока еще не нашел широкого применения. Между тем за рубежом этот сплав широко применяется в вакуумной промышленности, в частности для изготовления вакуумных приборов, так как он сравнительно дешев и имеет высокие прочностные свойства в интервале температур 200...600 °С (рис. 8).

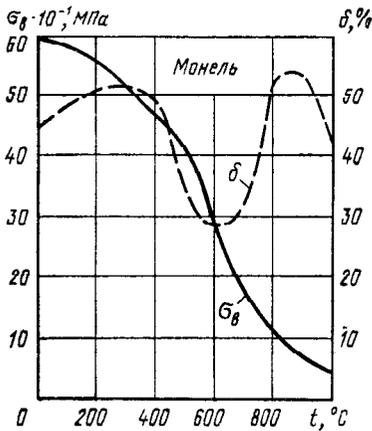


Рис. 8. Зависимость временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  и относительного удлинения  $\delta$  горячекатаного монеля от температуры

Известно несколько марок монеля, химический состав которых приведен в табл. 5. Основные физико-механические свойства монеля типового и монеля К приведены в табл. 6. Обладая высокой коррозионной стойкостью, высокой прочностью и дуктильностью, монель-металл в зарубежных образцах приборов применяется в качестве материала для внешних деталей (кожухов, штеккеров ввода накала, шестерен приводов механизмов), а также для сильфонов. Из монеля изготавливаются рабушки, ограждающие вакуумную полость приборов, а также переходные втулки, сглаживающие напряжения, возникающие при соединении металлов с

резко отличными друг от друга термическими коэффициентами линейного расширения. Широко применяется монель также для изготовления упругих мембран [9, 15, 20].

### 3. НИКЕЛЬ И ЕГО СПЛАВЫ

#### 3.1. Области применения

Трудно найти вакуумный прибор, в котором бы не применялся никель или его сплавы. Из этих материалов изготавливаются крены оксидных катодов почти всех выпускаемых в настоящее время вакуумных приборов, а также аноды и сетки приемно-усилительных ламп и ряд других деталей как внеламповой, так и внутривламповой арматуры приборов самого различного назначения. Широкое применение никеля и его сплавов в производстве этих приборов обусловлено присущим им рядом положительных свойств — благоприятным сочетанием прочности и пластичности в отожженном состоянии, способностью воспринимать все виды механической обработки (ковку, штамповку, прокатку и волочение) даже в холодном состоянии, необходимыми для изготовления деталей различного назначения. В то же время никель обладает и некоторыми недостатками, затрудняющими, а в отдельных случаях просто исключающими его применение в ряде приборов. В частности, никель обладает повышенной испаряемостью, незначительной теплопроводностью, низким пределом текучести, малой формоустойчивостью при длительном воздействии высокой температуры и др.

В настоящее время металлургическая промышленность выпускает полуфабрикаты из никеля и его сплавов по 45 Техническим условиям и ГОСТам самого различного назначения.

#### 3.2. Физико-механические и технологические свойства никеля

Полуфабрикаты из никеля, изготовленные по обычной технологии, содержат большое количество (более 15) различных примесей, отрицательно влияющих на их качество. Установлено, что примеси кобальта, железа, меди и кремния, образующие с никелем твердые растворы, содержащиеся обычно в небольших количествах, практически не влияют на его технологические свойства, но заметно повышают твердость, прочность и электросопротивление. Примеси углерода, серы и кислорода являются вредными, так как эти примеси мало растворимы в никеле и отрицательно влияют на его деформацию в холодном и горячем состояниях. Не менее существенным недостатком, присущим полуфабрикатам из никеля и его сплавов, выплавленных в открытых индукционных печах, является наличие в них большого количества неметаллических включений, раковин, пор и других дефектов, которые могут стать источником газовой выделения или натекания.

Наиболее эффективным средством борьбы с указанными дефектами является переплав никеля и его сплавов в вакууме (в вакуумных индукционных или электронно-лучевых печах). Переплав никеля и его сплавов в печах с остаточным давлением  $10^{-1}$  Па и ниже позволяет полностью избавиться от волосовин и других механических дефектов, а также резко сократить и содержание многих вредных примесей и газов.

С повышением степени чистоты никеля значительно изменяются его свойства: повышаются пластичность, электро- и теплопроводность, но снижаются прочностные свойства (предел прочности, твердость), а также температура начала его разупрочнения.

Ниже приведены физико-механические и другие свойства никеля:

Плотность, $\text{кг/м}^3$	$8,35 \cdot 10^3$
Температура плавления $t$ , °С	1455
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	при 20°С 439,61 при 100°С 468,92 при 600°С 556,84
Теплопроводность, Вт/(м·К)	при 100°С 82,90 при 300°С 63,64 при 500 °С 61,96
Температурный коэффициент линейного расширения при 20 °С $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/градус	14,4
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/градус в интервале температур	
25...100 °С	13,3
25...300 °С	14,4
25...600 °С	15,5
25...900 °С	16,3
Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	Прутки: отожженные 400...450 горячекатаные 450...550
Относительное удлинение $\delta$ , %	Прутки: отожженные 50...30 нагартованные 15...2
Предел текучести, МПа	Прутки отожженные 60...200
Твердость по Бринеллю, НВ	Отожженные 80...90
Удельное электросопротивление при 20 °С $\text{мкОм} \cdot \text{м}$	0,0684
Температурный коэффициент электрического сопротивления, 1/град, в интервале температур при 0...100 °С	0,069
Температура точки магнитного превращения, °С	350...360, очень чистый 370...380
Температура рекристаллизации отжига, °С	700...800

По сравнению с медью никель более эффективно очищается от примесей, особенно от газов, и его прочностные свойства меняются при этом более значительно. В то же время химические свойства меняются весьма незначительно. Кроме того, с повышением степени чистоты никеля резко уменьшается разброс его свойств, в том числе пластических. Следовательно, крайне необходимые вакуум-

ному приборостроению проволока, лента и другие полуфабрикаты из никеля с достаточно стабильными свойствами можно получить только при использовании чистейшего никеля с определенными упрочняющими присадками (Mo, W и др.).

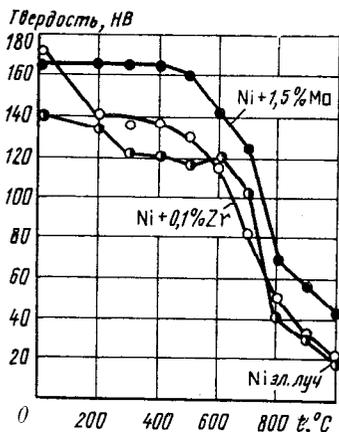


Рис. 9. Температурная зависимость твердости никеля электроно-лучевой плавки (НЭ); никеля, легированного 1,5% Мо (НМо), и никеля, легированного 0,10% циркония

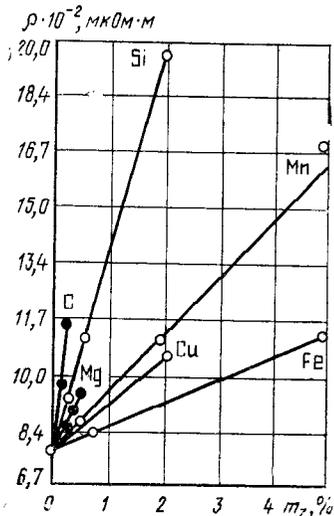


Рис. 10. Влияние различных примесей в никеле на его сопротивление при 20°С

Температурная зависимость твердости никеля чистого и с присадками показана на рис. 9. Из графика следует, что резкое падение твердости начинается с температуры 600°С, тогда как падение прочности с 350°С. Влияние примесей в никеле на его удельное электросопротивление при 20°С приведено на графиках рис. 10; на теплопроводность — на рис. 11.

При комнатной температуре никель весьма устойчив к влиянию окружающей атмосферы. Только при длительном пребывании во влажном воздухе на обычно серебристо-белой поверхности металла появляется бледно-желтый налет. При нагреве на никеле, так же как и на железе, вначале появляются цвета побежалости; при нагреве свыше 500°С возникает пленка

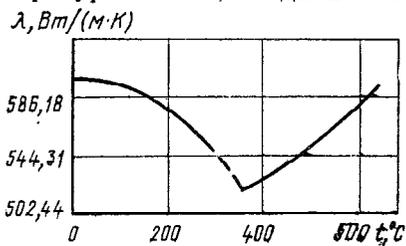


Рис. 11. Зависимость теплопроводности никеля от температуры

окиси никеля. Окисление приводит к охрупчиванию границ зерен и соответственно к снижению прочности и относительного удлинения.

### 3.3. Особенности изготовления основных внутривакуумных деталей и узлов приборов

Для изготовления анодов, траверс, экранов, поясков, сеток и других деталей приемно-усилительных ламп и газоразрядных приборов применяются различные марки никеля и сплавы на его основе. Эти материалы должны удовлетворять ряду специфических требований. Например, для обеспечения требуемой виброустойчивости приемно-усилительных ламп необходимо изготавливать траверсы сеток из проволок сплава НП2 обязательно с плюсовым допуском (+0,01 мм), так как только в этом случае обеспечивается тугая посадка траверсы в отверстие слюдяной детали. Проволока, применяющаяся для изготовления траверс сеток, должна обладать также стабильностью механических свойств, при этом абсолютные значения предела прочности при растяжении и относительное удлинение должны укладываться в достаточно узкие допуски. В частности, опытным путем установлено, что проволоки мягкие, диаметром 0,6; 1; 1,2; 1,5 мм должны иметь предел прочности при растяжении 450...510 и 440...510 МПа; при этом относительное удлинение должно быть  $\geq 30\%$ . Проволока, идущая для изготовления штырьков, пальчиковых ламп, также должна обладать стабильностью механических свойств. Металлургические заводы поставляют для этих целей проволоку диаметром от 1,03 до 0,04 мм с  $\sigma_b = 440...510$  МПа и  $\delta > 30\%$ .

Внутренняя часть двух- и трехзвенных электродов изготавливается из проволоки марки НМц 2,5. Недостатком этой проволоки является присутствие в ней большого количества марганца, который легко испаряется в вакууме. Аноды подавляющего большинства приемно-усилительных ламп изготавливаются из никелевой ленты марки НП2 толщиной от 0,1 до 1 мм. Для уменьшения габаритных размеров приборов без опасности перегрева их анодов необходимо, чтобы внешняя поверхность анодов обладала интегральным коэффициентом излучения, близким к 1. Между тем гладкая поверхность деталей из никелевых лент обладает ничтожно малым коэффициентом излучения ( $\alpha_T = 0,1$ ). С целью увеличения значения  $\alpha_T$  готовые никелевые детали (аноды, экраны) подвергаются либо чернению методом газовой карбонизации (двустороннее чернение), либо цирконируются или титанируются (одностороннее чернение).

Все никелевые, в том числе черненные (методом карбонизации) детали перед постановкой в электровакуумный прибор должны подвергаться рафинирующему отжигу в атмосфере водорода: черненные детали при температуре 600°C, а все другие никелевые детали при 600...900°C [9, 20].

## 4. НИЗКОУГЛЕРОДИСТАЯ СТАЛЬ (АРМКО-ЖЕЛЕЗО)

### 4.1. Области применения

В вакуумном производстве низкоуглеродистая сталь применяется в основном в виде сортового проката двух марок (А и Э), из которого изготавливаются полюсные наконечники, вкладыши, крышки, соединительные колпачки и другие детали вакуумных приборов. Широкое применение этого материала в технике обусловлено тем, что при сравнительно небольшой стоимости низкоуглеродистая сталь обладает достаточно благоприятным сочетанием свойств — магнитных, механических и технологических. Кроме того, высокая пластичность материала позволяет изготавливать из него методом штамповки или глубокой вытяжки в холодном состоянии детали самой сложной конфигурации, что особенно ценно для вакуумного производства. Наряду с этим низкоуглеродистая сталь, как и всякий материал, обладает и рядом отрицательных качеств, а именно: прутки квадратного и круглого сечений обычной плавки имеют большое количество неметаллических включений и волосовин, наличие которых в деталях приводит к медленному натеканию приборов по материалу этих деталей. Особенно большое количество дефектов имеют прутки из «кипящей» низкоуглеродистой стали.

Для предупреждения натекания приборов по материалу деталей, изготовленных из этой стали, применяют ряд мер защиты, которые значительно усложняют технологию их изготовления и резко увеличивают стоимость. Наиболее распространенным методом защиты от натекания приборов по материалу деталей из низкоуглеродистой стали является предварительная оплавка их медью в среде водорода с концентрацией влаги не более  $3 \cdot 10$  г/м<sup>3</sup>.

Низкоуглеродистая сталь обычной плавки содержит большое количество газов и вредных примесей, что сильно затрудняет процесс обезгаживания деталей и узлов из этого материала. Неоднократные попытки повысить качество низкоуглеродистой стали за счет некоторых изменений существующей технологии ее выплавки не дали положительных результатов. Детальные исследования показали, что указанные выше дефекты порождаются условиями выплавки и устранить их можно только при переплаве в дуговых или индукционных вакуумных печах. Переплав низкоуглеродистой стали в вакуумных дуговых или индукционных печах приводит к резкому снижению содержания примесей и газов, а также к резкому снижению содержания неметаллических включений и практически полностью устраняет волосовины. В работах [9, 14] на основе результатов большого количества проведенных экспериментов сделан вывод о том, что в вакуумном производстве следует применять прутки из низкоуглеродистой стали

круглого или прямоугольного сечения только вакуумной плавки, повышенная стоимость которых полностью окупается в связи с отсутствием в таких прутках внутренних дефектов.

#### 4.2. Физико-механические и технологические свойства низкоуглеродистой стали (армко-железа)

Ниже приведены физико-механические свойства низкоуглеродистой стали:

Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	7,86
Температура плавления, °С	1,539
Теплопроводность, Вт/(м·К)	
при 20 °С	72,85
при 800 °С	29,726
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/градус при 20 °С	12,5
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/градус в интервале температур	
0...100 °С	12,5
0...300 °С	13,1
0...1 100 °С	14,5
Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	Отожженное 180...280 холоднокатанное 400...620
Относительное удлинение $\delta$ , %	Отожженное 60...40; холоднокатанное 6—1,5
Твердость по Бринеллю, НВ	Отожженное 45...90
Удельное электросопротивление, мкОм·м, при 20 °С	0,095
Температурный коэффициент электрического сопротивления, 1/град, в интервале температур 0...100 °С	$5,5 \cdot 10^{-3}$
Температура точки магнитного превращения, °С	768
Начальная магнитная проницаемость, тл·м/А	1004,8...5024
Коэрцитивная сила, А·м	0,1...0,3
Температура начала рекристаллизации, °С	Порог рекристаллизации 500...30 мин, 450—2 ч
Температура рекристаллизационного отжига, °С	600...900

Переplав низкоуглеродистой стали в вакууме приводит к некоторому снижению показателей прочности (на 8...10%) и повышению относительного удлинения (на 6...16%). Так как большое количество деталей из низкоуглеродистой стали изготавливается методом вытяжки и штамповки в холодном состоянии, повышение ее пластических свойств после переplава в вакууме является весьма благоприятным фактором. Листовое армко-железо рекомендуется отжигать в вакууме при давлении  $1 \cdot 10^{-1}$  Па при тем-

Таблица 7

Марка сплава	Fe	Содержание легирующих добавок, %						
		C	Si	Mn	S	P	Ni	Cu
45Н (ЭИ462)	Остальное	≤ 0,03	0,15...0,3	0,6...1,0	≤ 0,02	≤ 0,02	45...47	≤ 0,02
50Н (ЭИ467)		≤ 0,03	0,15...0,3	0,3...0,6	≤ 0,02	≤ 0,02	49...51	≤ 0,02

Таблица 8

Марка материала	Вид продукции	Диаметр, мм	Начальная прочность, мГн/м (Гс/э)		Максимальная прочность, мГн/м (Гс/э)		Коэффициентная сила А/м (Э)	Индукция насыщения, Т	Удельное сопротивление, мкОм·м	Температура точки Кюри, °С
			2,6 (2000)	3,1 (2500)	23 (180000)	25 (20000)				
45Н	Прутки	8...10	2,6 (2000)	3,1 (2500)	23 (180000)	25 (20000)	24 (0,3)	1,5	0,45	440
30НКД	Прутки	8...100	2,6 (2000)	3,1 (2500)	23 (180000)	25 (20000)	24 (0,3)	1,5	0,45	500

пературе 650...750 °С в течение 10...15 мин. После такого отжига предельный коэффициент вытяжки составляет 0,57, и штампованные детали получают отличного качества. Для получения высоких магнитных свойств содержание углерода в низкоуглеродистой стали должно быть не более 0,01%. Снизить содержание углерода можно, используя различные способы (отжига), но наиболее эффективным является отжиг готовой стали в среде водорода. При этом наряду с удалением углерода удаляются также сера, кислород и азот. Резкое улучшение магнитных свойств низкоуглеродистой стали наблюдается при отжиге выше 1300 °С. При этом углерод быстрее удаляется во влажном водороде, чем в сухом.

### 4.3. Специальные магнитомягкие сплавы

Развитие вакуумного приборостроения потребовало создания новых материалов с более высокими, чем у армко-железа и электротехнических сталей, магнитными свойствами. К таким материалам относятся сплавы пермаллой и пермендюр.

Пермаллой — сплавы железа с никелем, обычно легированные хромом, медью, кобальтом и некоторыми другими элементами. Химический состав пермаллоев приведен в табл. 7. Магнитные и физико-химические свойства некоторых железо-никелевых сплавов (в виде прутков различных диаметров) после конечной термической обработки приведены в табл. 8 и 9. Основными достоинствами пермаллоев являются высокая магнитная проницаемость в слабых полях и малая коэрцитивная сила. Недостатками этих сплавов являются чувствительность магнитных свойств к механическим напряжениям, сравнительно высокая стоимость и очень сложный процесс их термообработки. Для изготовления деталей, создающих в зазоре приборов машин и аппаратов сильное магнитное поле, (полюсов магнитопроводов, сердечников, соединительных элементов и т. п.) необходимы материалы со значительно большей, чем у армко-железа, магнитной индукцией.

Таблица 9

Марка сплава	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Удельная масса, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления, °С
45Н	460	37	8,2	1440
50Н	460	37	8,2	1435

Таблица 10

Марка сплава	Твердость, НВ	Предел прочности $\delta$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Температура плавления, °С
50КФ2	220	350	1	1500

Таблица 11

Марка сплава	Начальная магнитная проницаемость $\mu_0$ , Г/м	Максимальная магнитная проницаемость $\mu_{max}$ , Г/м	Магнитное насыщение $4\pi S$ , Вб/м <sup>2</sup>	Коэрцитивная сила $H_c$ , А/м	Остаточная индукция $B_r$ , Т	Температура точки Кюри, °С	Удельное сопротивление $\rho$ , мКОМ·м
49КФ	800	4500	24 000	159,24	1,4000	980	0,26

Такими материалами являются железо-кобальтовые сплавы с индукцией насыщения до 24300 Т. Их применение позволяет снизить массу и объем по сравнению с армко-железом на 15...20%. Из этой группы сплавов наибольшее применение получили сплавы марки 49КФ (пермендюр), механические и магнитные свойства которого приведены в табл. 10 и 11.

Как и всякому материалу, пермендюру присущ ряд недостатков, а именно: сплав имеет малое электрическое сопротивление и высокое значение магнитострикции, вследствие чего велики потери на гистерезис и вихревые токи. Указанный сплав применяется для изготовления полюсов магнитостатических систем, работающих при слабых переменных полях, но при сильном подмагничивании постоянным током.

В некоторых случаях в качестве магнитомягких материалов применяются хромистые стали марок 12Х13, 20Х13. Высокие значения магнитной проницаемости хромистых сталей соответствуют содержанию в них примерно 15% Сг, т. е. границе составов, начиная с которой в сплавах от точки плавления до комнатной температуры стабильны только  $\alpha$ -твердые растворы. Магнитные свойства магнитомягких материалов можно значительно улучшить путем переплава в вакуумных печах. Так, переплав сплава 50НП в электронно-лучевой печи позволяет значительно снизить содержание марганца (с 0,48...0,50 до 0,11...0,13%), азота (в 8 раз), содержание кислорода в 2—3 раза и неметаллических включений в 4...8 раз, в том числе содержание  $Al_2O_3$  в 4...7 раз. Повышение степени чистоты металла позволяет получать этот сплав с высокими магнитными свойствами. Свойства сплава 50НП приведены в табл. 12.

Т а б л и ц а 12

Сплав	Максимальная магнитная проницаемость, мГ/м
50НП-у	75,36
50НП после переплава в вакуумной индукционной печи	150,72
50НП после переплава в электронно-лучевой печи	265,02

## 5. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ СТАЛИ

### 5.1. Области применения

Коррозионно-стойкие стали были разработаны около 40 лет назад почти одновременно в нескольких странах (США, Англии, Германии, Франции) как результат длительных исследований.

Таблица 13

Марка стали (ГОСТ 5632-72)	Содержание легирующих добавок, %						Примечание
	C	Si	Mn	Cr	Ni		
04X18H10	≤0,04	≤0,80	1,0...2,0	17...19	9...11,0		
08X18H10	≤0,08	≤0,80	1,0...2,0	17...19	9...11,0		
12X18H9	≤0,12	≤0,8	1,0...2,0	17...19	8...10,0		
17X18H9	0,13—0,21	≤0,8	1,0...2,0	17...19	8...10,0		
12X18H10E	≤0,012	≤0,8	1,0...2,0	17...19	9...11,0		
06X18H11	≤0,06	≤0,8	1,0...2,0	17...19	10...12		
08X18H10T	≤0,08	≤0,8	1,0...2,0	17...19	9...11,0	Ti ≥ 5; C до 0,6%	
12X18H10T	≤0,012	≤0,8	1,0...2,0	17...19,0	9...11,0	Ti ≥ 5; C до 0,7%	
12X18H9T	≤0,012	≤0,8	1,0...2,0	17...19,0	8...9,5	To же	
08X18H12T	≤0,08	≤0,8	1,0...2,0	17...19,0	11...13	»	
08X18H12B	≤0,08	≤0,8	1,0...2,0	17...19,0	11...13	Nb ≥ 8; C до 1,2%	
10X17H13M2T	≤0,10	≤0,8	1,0...2,0	16...19,0	12...14	0,3...0,6 Ti; 1,8...2,5 Mo;	
08X17H15M3T	≤0,08	≤0,8	1,0...2,0	16...18	15...17	0,3...0,6 Ti; 2,0...2,5 Mo;	
10X17H13M3T	≤0,10	≤0,8	1...2,0	15...18	12...14	0,3...0,6 Ti; 3,0...4,0 Mo	
03X18H12	≤0,25	≤0,4	≤0,4	17...19	11,5...13		

Таблица 14

Характеристика	Значение	Примечание
Температура плавления, °С	1400...1430	В зависимости от содержания углерода 2—3% снижает температуру плавления до 1385 °С
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup>	7,93 ± 0,02	
Электросопротивление, $\mu\text{Ом} \cdot \text{м}$	0,70	Теплопроводность мала, что следует учитывать при определении скорости нагрева
Теплопроводность, Вт/(м·К) при 100 °С	0,1633	
при 500 °С	0,2135	
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	50,242	
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ , 1/градус в интервале температур		
0...100 °С	16,9	
0...350 °С	17,8	
0...500 °С	18,3	
0...650 °С	18,7	
Магнитная проницаемость, мГ/см	1,003	

Благоприятное сочетание коррозионной стойкости с механическими, технологическими, магнитными и другими свойствами обеспечило этим сталям широкое применение практически во всех отраслях промышленности. В настоящее время у нас и за рубежом выпускается более 70 различных марок коррозионно-стойких сталей. Наибольшее применение в вакуумном приборостроении нашли хромоникелевые аустенитные стали, химический состав которых приведен в табл. 13. Особенно широко применяются три марки сталей этого класса: 03X18H12 (ГОСТ 5632—72), 08X18H12T и 12X18H10T. Из сталей этих марок для вакуумных приборов изготавливаются штоки, оболочки, держатели, колпачки, фланцы и другие детали. По многообразию и количеству деталей, изготавливаемых из этих марок сталей, они находятся на втором месте после меди.

### 5.2. Физико-механические свойства коррозионно-стойких сталей

Физические свойства хромоникелевых сталей приведены в табл. 14. Сочетание повышенного электросопротивления с пониженной температурой плавления благодаря присутствию никеля оказывает благоприятное влияние на свариваемость этих сталей. Чисто аустенитные стали вплоть до минусовых температур немаг-

нитны. Механические свойства и режимы термической обработки хромоникелевых сталей приведены в табл. 15.

### 5.3. Коррозионная стойкость коррозионно-стойких сталей

Введение в хромистую сталь 10...12% никеля повышает ее коррозионную стойкость в условиях действия атмосферы промышленных городов, а также кипящих кислот (азотной, сернистой, лимонной, молочной) и едких щелочей. Стойкость этой стали можно повысить лишь после соответствующей термической обработки: закалки в воде после нагрева до температуры 1000...1150 °С или в другой среде, обеспечивающей быстрое охлаждение. Нарушение режимов термической обработки, а также повышенное содержание углерода ( $>0,06\%$ ) приводят к тому, что эти стали приобретают склонность к межкристаллитной коррозии. Явление межкристаллитной коррозии связано с понижением коррозионной стойкости границ зерен (из-за обеднения их хромом в результате образования карбидов хрома по границам зерен и близлежащим к ним участкам). Процесс межкристаллитной коррозии в аустенитных сталях возникает лишь после нагрева этих сталей (закалки) до 700 °С. Следует напомнить, что в производстве в этом интервале температур проводится откачка изделий, продолжительность которой составляет от нескольких часов до нескольких десятков часов. Выделение карбидов хрома в аустенитных сталях происходит лишь из перенасыщенного аустенита, т. е. у закаленных аустенитных сталей с содержанием углерода более 0,04%. Таким образом, снижение содержания углерода ниже 0,04% будет способствовать устранению этого явления вообще, а введение элементов-стабилизаторов — титана, ниобия, образующих с углеродом карбиды, будет уменьшать межкристаллитную коррозию.

В подавляющем большинстве случаев детали приборов имеют напряжения внутренние, возникающие в результате термической обработки (закалки, сварки, быстрого охлаждения), или внешние, возникающие под действием прилагаемых нагрузок. Чаще всего детали имеют как те, так и другие виды напряжений. При наличии коррозионной среды в металле происходит самостоятельный процесс — коррозия под напряжением, или коррозионное растрескивание, тогда как при отсутствии напряжений в этой среде коррозии не происходит. Коррозионное растрескивание в сталях, не склонных к межкристаллитной коррозии, имеет внутрикристаллический характер, а в сталях, склонных к этому виду коррозии, межкристаллитный характер. Наилучшую стойкость против коррозии под механическим напряжением имеют образцы стали после отпуска при 800 °С в течение 100 ч. Коррозионное растрескивание коррозионно-стойких сталей под механическим напряжением наблюдается только в растворах, содержащих хлориды, сульфиды, а также в азотно-кислых, фосфорно-кислых и других солях.

Таблица 15.

Марка стали (ГОСТ 5632—72)	Сортамент	Термическая обработка		Механические свойства				
		Температура закали, °С	Среда охлаждения*	σ <sub>а</sub>		δ	ψ	
				10 МПа	10 МПа			
04X18N10	Лист	1050...1080	Вода	50	—	45	—	
	Пруток	1050...1100	Воздух, вода, масло	45	16	40	20	
08X18N10	Лист	1050...1080	Вода	52	—	45	—	
	Пруток	1050...1100	Воздух, вода, масло	48	20	40	55	
12X18N9	Лист	1050...1080	Воздух, вода, масло	55	—	40	—	
	Пруток	1050...1100	Воздух, вода, масло	58	20	40	55	
17X18N9	Лист	1050...1100	Вода, воздух	60	—	35	—	
	Пруток	—	—	58	22	40	55	
08X18N10T	Лист	1050...1080	Вода, воздух	52	—	40	—	
	Пруток	1050...1100	Воздух, масло, вода	50	20	40	55	
12X18N9T	Лист	1050...1080	Вода, воздух	54	—	40	—	
	Пруток	1050...1100	Воздух, масло, вода	55	20	40	55	
06X18N11	Лист	1050...1080	Вода, воздух	52	—	35	—	
	Лист	1050...1080	То же	52	—	35	—	
06X18N12T	Лист	1050...1080	»	55	—	35	—	
	Лист	1050...1080	Воздух, масло, вода	55	20	40	55	
20X13N4Г9	Лист	1080...1120	Вода, воздух	65	—	40	—	
	Пруток	1100±30	Вода, воздух	70	—	40	—	
12X17Г9АН4	Лист	1050...1080	Вода, воздух	54	—	40	—	
	Пруток	1000...1080	То же	65	25	35	45	
10X14Г14НЗТ	Лист	1050...1080	Вода, воздух	70	—	40	—	
	Пруток	1050...1080	То же	70	30	35	50	
15X17АН14	Лист	1050...1080	То же	70	—	35	—	
	Пруток	1050...1080	То же	70	30	35	50	
08X17Н5Г9БА	Лист	1000...1080	»	70	—	35	—	
	Лист	1050...1080	Вода, воздух	80	40	35	—	
08X17Н13М2Т	Лист	1050...1080	То же	54	24—36	35	—	
	Лист	1050...1100	»	54	24—36	35	—	
08X17Н16М3Т	Сорт	1050...1080	»	54	24—36	35	—	
	Лист	1050...1080	»	54	24—36	35	—	

\* Среда охлаждения может быть выбрана любая из приведенных, но для нестабилизированных сталей лучше быстрое охлаждение.

Одновременное действие переменных механических напряжений и коррозионной среды может привести к образованию трещин. Это явление принято называть коррозионной усталостью [9, 18].

## 6. ПРЕЦИЗИОННЫЕ СПЛАВЫ

### 6.1. Сплавы для пайки с диэлектриками

Соединения металла со стеклом и керамикой нашли широкое применение в производстве вакуумной аппаратуры. Для пайки с электровакуумными стеклами различных марок могут применяться только металлы и сплавы, которые:

1) имеют в интервале температур от  $-120^{\circ}\text{C}$  до температуры перехода стекла из пластичного состояния в хрупкое (для мягких стекол эта температура ограничивается  $350^{\circ}\text{C}$ , для тугоплавких стекол С-49-2 и С-48-3 — соответственно  $450$  и  $720^{\circ}\text{C}$ ) температурный коэффициент линейного расширения, равный или близкий температурному коэффициенту линейного расширения стекла. Разница в температурных коэффициентах линейного расширения стекла и металла не должна быть больше  $(1...3) \cdot 10^{-6}$  1/градус. Если эта разность будет больше, то спаи будут плохо согласованы и будут иметь большие внутренние напряжения, под действием которых они в конечном счете разрушатся и прибор выйдет из строя;

2) в пределах температуры пайки, воздействию которых металл подвергается на операции пайки со стеклом или в процессе эксплуатации приборов, не должно происходить никаких внутренних превращений, сопровождающихся изменением температурного коэффициента линейного расширения;

3) при температурах пайки образуют на поверхности прочно сцепленную с основным металлом окисную или другого состава пленку, хорошо растворимую в стекле;

4) имеют температуру плавления на  $100...200^{\circ}\text{C}$  выше температуры пайки металла со стеклом;

5) удовлетворительно свариваются или спаиваются с другими металлами, используемыми в электронновакуумном производстве;

6) обладают пластичностью, обеспечивающей получение из металлов ленты, проволоки и деталей сложной конфигурации методами глубокой вытяжки, штамповки или выдавливания.

По химическому составу сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения являются многокомпонентными сплавами на железоникелевой и железохромистой основах. Для получения требуемого сочетания свойств основы этих сплавов (F—Ni, Fe—Cr) дополнительно легированы кобальтом, медью, титаном, алюминием, ванадием, молибденом, вольфрамом и др. (одним или несколькими из указанных элементов одновременно). В табл. 16 приведены данные об электрических, магнитных и

Сплав (ГОСТ 10994—74)	Удельное электро- сопро- тивле- ние, мкОм·м	Коэрпитив- ная сила, А/м	Темпера- тура пла- вления, °С	Удель- ный вес, 10 <sup>3</sup> кг/м <sup>3</sup>	Тепло- емкость, Дж/К	Теплопро- водность при 20 °С, Вт/(м·К)
36Н	0,82	12,739	—	—	—	—
46Н	0,54	15,924	—	—	—	—
48НХ	0,40	15,924	1450	8,10	—	20,097
47НЗХ	1,58	9,554	1450	8,20	—	16,747
47НД	0,45	22,293	1450	8,20	—	25,121
47НХР	0,90	30,255	—	—	—	—
18ХМТФ	0,62	127,389	—	7,7	—	20,934
18ХТФ	0,60	127,389	—	7,7	—	21,771
29НК	0,50	75,637	1450	8,3	—	19,250
30НКД	0,52	71,656	1450	8,2	—	20,515
33НК	0,42	76,433	1450	8,2	—	17,585
12Х13	0,52	—	1500	7,25	0,461	23,027
12Х17	0,75	—	1500	7,68	0,461	28,470
12Х18Н9Т	0,56	—	1425	7,90	0,502	14,654

механических свойствах важнейших прецизионных сплавов, наиболее часто применяемых для соединения со стеклом и керамикой.

За последние годы разработаны и внедрены в производство вакуумных приборов сплавы на основе меди с присадками молибдена МД-40, МД-50, МД-15. Сплавы МД хорошо обрабатываются резанием. Из них получают заготовки в виде ленты и прутков. В табл. 17 приведены основные физико-механические свойства сплавов МД. Более подробно о сплавах, применяемых для пайки со стеклом и керамикой, изложено в работах [7, 13, 16].

## 6.2. Сплавы для гибких элементов

Перестройка вакуумных приборов по диапазону частот осуществляется при помощи гибких элементов (сильфонов, пружин, мембран), смонтированных в специальные механизмы, являющиеся элементами конструкции самого прибора. В одних приборах гибкие элементы служат для ручной подстройки, в других — для механической. Гибкие элементы в механизмах для механической перестройки должны выдерживать сотни тысяч перестроек при скорости 1...10 цикл/с и линейном прогибе 50% и более. Материалы

Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ , 1/градус, при 20°C				Твердость, НВ	Временное сопроти- вление разрыву, 10 МПа	Предел текучести, 10 МПа	Относительное удлинение, %	Модуль нормальной упругости, ГПа
200 °С	300 °С	400 °С	500 °С					
	Не более 1,5			131	45,5	26,1	45,5	15,100
	Не более 1,5			—	51,0	—	44,0	14,200
	Не более 1,0			—	53,0	—	44,0	—
8,2...9,5	8,0...9,0	8,3...9,5	9,5...10,6	—	50,0	—	38,0	—
—	—	—	—	—	52,0	—	40,0	14,100
—	—	—	—	—	50,0	—	37,0	14,000
—	—	—	11,0...11,4	—	50,0	33,0	28,0	22,600
—	—	—	—	—	50,0	33,0	28,0	22,250
—	4,6...5,5	4,5...5,2	5,9...6,4	—	53,0	36,0	37,0	14,800
—	3,3...4,3	3,8...4,6	5,9...6,7	—	52,0	36,0	39,0	14,000
—	7,4...8,4	10,4...11,4	7,8...8,0	—	52,0	31,0	43,0	14,200
—	—	—	—	140...180	45,0	24,0	25,0	2,100
—	—	—	—	140...180	40,0	25,0	20,0	—
—	—	—	—	140...170	55,0	20,0	40,0	20,300

для гибких элементов (сильфоны, мембраны, пружины) должны иметь не только высокие механические и упругие свойства, но и обладать повышенной коррозионной стойкостью, немагнитностью, а также хорошей пластичностью, свариваемостью, малой склонностью к росту зерна и окислению в процессе термической обработки. В вакуумном производстве в качестве гибких элементов наиболее широко применяются сильфоны, а для возврата сильфона в исходное состояние — пружины. Причем часто сильфоны являются составной частью оболочки прибора.

В настоящее время широко применяются сильфоны из стали марки 12Х18Н9Т, бериллиевой бронзы марок БрБ2 и БрБ2,5, монеля, никеля, сплавов марок 36НХТЮ, 42НХТЮ. Из пружинных сплавов наибольшее распространение получили сплавы марок 36НХТЮМ5, 36НХТЮМ8, 42НХТЮ, 44НХТЮ и др. (ГОСТ 10994—74). Сильфоны из стали 12Х18Н9Т отличаются высокими технологическими свойствами и при правильном использовании значительной долговечностью. В отдельных случаях из стали 12Х18Н9Т изготавливают также пружины, которые могут применяться до температур 280...290 °С. При конструировании упругих элементов из стали 12Х18Н9Т рекомендуется принимать модуль нормальной упругости равным  $186 (19 \cdot 10^4 \text{ МПа})$ . В качестве гиб-

Таблица 17

Сплав	Состав, %			Технология изготовления	Средний температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур 20...1000 °С $\alpha \cdot 10^{-7}/\text{градус}$	Электропроводность		Средний предел прочности при статическом изгибе $\sigma \cdot 10^{-1}$ , МПа	Твердость, НВ	Вакуумная плотность	Соединяемая со сплавом керамика
	Cu	Mo	Ni			$1 \times 10^{-2}$ См	Относительно чистой меди, %				
МД42С	42	58	—	Спекание в водородной смеси порошков при 1350 °С	100	30	50	45	100	После обработки давлением со степенью деформации 0%	Фортестерит Ф17
МД25С	25	75	—	То же при 1500 °С	70	20	25	55	120	То же	Ф17
МД20П	20...25	80...75	—	То же при 1400 °С с последующей пропиткой в Cu	70...72	20	20	65	120	После пропитки	М7
МД15НП	14...16	82...84	2	То же при 1350 °С с последующей пропиткой в Cu	74	7,7	14	90	220	—	М7

ких элементов иногда применяются также сильфоны из монель-металла. Большое применение нашли сильфоны, пружины, мембраны из бериллиевых бронз. Упругие элементы из бериллиевой бронзы могут надежно работать лишь до температуры 500 °С. Нагрев их выше этой температуры приводит к резкому снижению механических свойств и, как следствие, к преждевременному разрушению.

Повышение температуры обезгаживания при откачке ряда вакуумных приборов до 550...650 °С и требование гарантированной долговечности сильфонов до 300...500 тыс. циклов привело к необходимости использовать ряд специальных сплавов. К таким сплавам относятся 42НХТЮ, 36НХТЮ, 36НХТЮМ5, 36НХТЮМ8 и др. Два последних сплава успешно применяются для пружин с высокой температурой облагораживания. В табл. 18 приведены сравнительные данные по механическим свойствам этих сплавов после закалки и отпуска. Более подробно по этому разделу см. [12, 20].

### 6.3. Металлы и сплавы, применяемые для пар трения

В промышленности широко применяются следующие группы антифрикционных материалов: на оловянной основе (олово—свинец—цинк); на свинцовой основе (свинец—сурьма—олово, свинец—кальций—натрий, свинец—медь); на кадмиевой основе (кадмий—никель, кадмий—серебро, кадмий—цинк); на цинковой основе (цинк—алюминий—медь, цинк—сурьма—олово); на алюминиевой основе; на медной основе (бронзы и латуни); на железной основе (чугуны и стали); металлокерамические материалы (графитированные бронзы, железографитные сплавы, сплавы с добавками дисульфида молибдена), изготовленные прессованием и спеканием смесей порошков. Первые пять групп сплавов обладают хорошими антифрикционными свойствами, коррозионно-стойки, но имеют низкую (в пределах 300...700 °С) температуру плавления, малые прочность и твердость при повышенных температурах. Например, у наиболее тугоплавких сплавов — дюралюмина и алькурина предел прочности при температуре 300 °С не превышает 80 МПа, поэтому для применения при температуре 300...350 °С выбраны сплавы 6, 7 и 8-й групп.

Из антифрикционных сплавов на основе меди наиболее широко применяются оловянистые бронзы (Br010, Br011H408, Br010Ц2, BrA9Mц2, BrA10M4H4, кремнистые бронзы BrK3Mц1, свинцовистые бронзы (BrC30) и др. Так как откачка приборов происходит при температуре 400...650 °С в глубоком вакууме, то применение оловянистых, свинцовых бронз, а также бронз с добавками цинка и марганца исключается. Эти металлы сублимируются в глубоком вакууме. Исключение составляют алюминиевые безмарганцовистые бронзы у которых упругость пара (алюминия) при температуре 900 °К  $4,61 \cdot 10^{-7}$  Па, что соизмеримо с остаточным давле-

Слав (ГОСТ 1099А—74)	Термическая обработка	Предел прочности $\sigma_b$ , Мн/м <sup>2</sup>	Предел текучести $\sigma_s$ , Мн/м <sup>2</sup>	Предел упругости $\sigma_{0,002}$ , Мн/м <sup>2</sup>	Относительное удлинение $\delta$ , %	Твердость, НВ
36НХТЮ (ЭИ702)	Закалка с 920...1100°С в воде	588...735	245...392	—	30...38	150...180
	Закалка с 950°С в воде, отпуск при 700°С 2 ч, охлаждение на воздухе	1176...1372	833...1078	764...882	12...18	370...400
36НХТЮМ5 (ЭП51)	Закалка с 980...1100°С в воде	833...882	490...588	—	30...35	200...215
	Закалка с 980°С в воде, отпуск при 750°С 4 ч, охлаждение на воздухе	1372...1421	980...1078	833...931	8...10	400...420
36НХТЮМ8 (ЭП52)	Закалка с 980...1100°С в воде	882...931	588...637	—	20...25	215...230
	Закалка с 1000°С в воде, отпуск при 750°С 4 ч, охлаждение на воздухе	1421...1430	1078...1107	931...980	6...7	440...450

\* Предел упругости  $\sigma_{0,002}$  после отпуска при 700°С 4 ч.

нием в приборе. Из табл. 19 видно, что алюминиевые безмарганцовистые бронзы обладают хорошей коррозионной стойкостью, достаточными твердостью и прочностью при температурах до 400 °С. Основным недостатком этих бронз является большой термический коэффициент линейного расширения  $(16...18) \cdot 10^{-6}$  1/градус, что при нагреве приводит к значительному увеличению зазора трущейся пары. Другим недостатком бронз является то, что при нагреве и окислении они дают рыхлые мягкие окисленные слои, которые легко удаляются при трении, что приводит к повышенному износу трущихся пар. Обычно бронзы работают в паре со сталью.

Таблица 19

Свойства	Марка сплава	
	БрА9Ж4	БрА10Ж4Н4
Коэффициент трения:		
со смазкой	0,004	0,011
без смазки	0,18	0,23
Коррозионная стойкость (г/мм <sup>2</sup> )·сутки, потеря в массе под действием:		
морской воды	0,25	0,18
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1,4	Полутвердая 0,8
пара влажного при 100 °С	0,45	—
Линейная усадка, %	2,49	1,8
Температура		
литья слитков, °С	1120...1140	1120...1200
горячей обработки	750...850	850...900
отжига	700...750	700...750
ковки	—	850...950
облагораживания	—	400
Температура заливки (°С)		
фасонных отливок при толщине стенок, мм:		
12	1220	1240
12...25	1160	1170
25	1120	1120

Большое влияние на повышение износостойкости сплавов оказывают карбиды. С увеличением количества карбидов значительно повышается износостойкость сплавов. Твердость, а значит и износостойкость структурных составляющих повышаются с повышением содержания легирующих элементов. В особенности это относится к карбидной фазе, твердость которой значительно увеличивается при растворении в ней хрома, вольфрама, молибдена, ванадия и других карбидообразующих элементов. За счет большого содержания карбидов и их более высокой твердости износостойкие легированные стали превосходят по износостойкости углеродистые стали, что видно из табл. 20. Основным недостатком

Марка стали	Термообработка	Приведенный износ при скорости скольжения, м/с				Относительная износостойкость при скорости скольжения, м/с			
		$v = 0,25$ (схватывание первого рода)		$v = 1,56$ (окислительный износ)		$v = 0,25$ (схватывание первого рода)		$v = 1,56$ (окислительный износ)	
		$v = 5,08$ (схватывание второго рода)	$v = 156$	$v = 46,07$	$v = 1,0$	$v = 1,42$	$v = 2,17$	$v = 5,08$ (схватывание второго рода)	
45	Нормализация	6,65	4,79	156	1,0	1,0	1,0	1,0	
30ХГСА	Закалка, высокий отпуск	5,52	3,38	46,07	1,2	1,42	3,38	3,38	
37ХНЗА	—	4,46	2,21	230	1,49	2,17	0,68	0,68	
30ХГСА	Закалка, низкий отпуск	3,1	2,0	49	2,15	2,4	3,18	3,18	
18ХНВА	Улучшение	2,65	2,09	31,3	2,52	2,3	4,99	4,99	
40Х	—	2,05	0,93	31,2	3,25	5,18	5,0	5,0	
18Х1ВА	Цементация	1,21	0,24	20,83	5,5	20,1	7,48	7,48	
12Х1ВА	—	1,05	0,32	21,27	6,35	15,0	7,32	7,32	
ШХ15	—	0,91	0,39	26,03	7,32	12,5	5,85	5,85	
20Х	—	1,37	0,815	23,41	4,86	5,88	6,66	6,66	
18ХГТ	Цементация	0,77	0,487	17,6	8,65	9,8	8,85	8,85	
Р18	—	0,36	0,07	3,3	18,4	68,5	47,3	47,3	
ХВГ	—	0,85	0,155	18,81	7,9	35	8,3	8,3	
Х12М	—	1,0	0,21	13,61	6,65	22,4	11,5	11,5	
У10А	—	1,43	0,54	21,58	4,67	8,9	7,25	7,25	
5ХНМ	—	3,25	0,83	144	2,05	5,77	1,08	1,08	

сталей, приведенных в табл. 20, является их малая коррозионная стойкость.

Подшипниковые стали марок ШХ4, ШХ15, ШХ15С, ШХ20СГ (ГОСТ 801—78) отличаются высокой износостойкостью в условиях трения качения, так как они обладают высокими твердостью и сопротивляемостью контактной усталости. Но эти стали также обладают малой коррозионной стойкостью. В настоящее время для подшипников качения для работы в агрессивных средах применяют сталь 9Х18. На основе стали 9Х18 для колец и тел качения для работы при температурах 300...540 °С созданы термостойкие стали с добавками молибдена, кобальта, никеля, бериллия, титана, вольфрама и ванадия. Для сепараторов термостойких и жаропрочных подшипников применяются коррозионно-стойкие бронзы (до 300 °С) и монели (до 500 °С).

В настоящее время разработано большое количество композиций пористых металлокерамических материалов, применяющихся для изготовления подшипников. Эти материалы обладают высокими антифрикционными свойствами, большой износостойкостью и малым коэффициентом трения. К таким материалам можно отнести композиции черных и цветных металлов с графитом, дисульфидом молибдена и другими смазками. К числу достаточно исследованных пористых металлокерамических подшипниковых материалов относятся железографитовые (1...3% С, 99...97% Fe) и бронзографитовые (88...86% Cu, 9...10% Sn, 2...3% С) сплавы. Прочность, твердость и пористость металлокерамических материалов зависят от условий прессования и режима спекания. Но эти материалы обладают и недостатками. Например, железографитовые материалы не коррозионно-стойки, бронзографитовые обладают малой прочностью при высоких температурах. Эти материалы работают успешно только при условии применения смазок. Материалы получают горячим прессованием, в результате чего достигаются их высокие плотность и твердость. При горячем прессовании детали из этих композиций имеют большой срок службы и прочность, чем при спекании. Самосмазывающиеся материалы могут работать от криогенных температур до 700 °С, на воздухе и в вакууме ( $10^{-10}$  Па). Композиция Ag—NbSi<sub>2</sub> имеет хорошие электрические свойства и рекомендуется для изготовления скользящих контактов, предназначенных для работы на воздухе и в глубоком вакууме.

## 7. ТУГОПЛАВКИЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

### 7.1. Общие сведения

К тугоплавким условно относят металлы и сплавы с температурой плавления выше 1700 °С. Это, прежде всего, вольфрам, молибден, титан, тантал, ниобий, цирконий, рений и сплавы на их основе. Тугоплавкие металлы отличаются низкими скоростью ис-

парения, химической стойкостью, высоким удельным электросопротивлением. Температурный коэффициент линейного расширения небольшой и поэтому возможна пайка тугоплавких материалов со стеклом и керамикой. Тугоплавкие металлы являются антикоррозионными; широко применяются в вакуумном приборостроении в виде проволоки, лент, листа, прутков и труб. Имеются два вида технологии получения тугоплавких металлов: порошковый метод и метод вакуумной плавки. Метод порошковой металлургии имеет ряд преимуществ по сравнению с вакуумной плавкой при получении вольфрама и сплавов на его основе. Некоторые тугоплавкие материалы в принципе нельзя получить методом вакуумной плавки. Существенными недостатками этого метода являются относительно малые массы и размеры получаемых заготовок, повышенное (по сравнению с вакуумной плавкой) содержание газовых и других вредных примесей, трудность поддержания стабильных физико-механических свойств материалов от партии к партии.

## 7.2. Применение тугоплавких металлов в вакуумных приборах. Физико-механические свойства

**Вольфрам.** Из всех тугоплавких металлов вольфрам имеет самую высокую температуру плавления —  $3440^{\circ}\text{C}$  и самое низкое давление насыщенных паров. В качестве нагревательных элементов вольфрам может работать до  $2500^{\circ}\text{C}$ . Наиболее часто вольфрам используется для катодов подогревателей, спиралей, а также для поддержек, крючков и других деталей, где ценятся только его высокая прочность и упругость. Из-за низкой температуры рекристаллизации ( $1000..1100^{\circ}\text{C}$ ) и повышенной хрупкости чистый вольфрам применяется ограниченно. Наибольшее применение, особенно для спиралей, подогревателей и катодов, находят сплавы на основе вольфрама. Вольфрам марки ВЧ (чистый без присадок) применяется для изготовления электрических контактов, катодов газоразрядных приборов и других высокотемпературных деталей, работающих при температуре не выше  $900^{\circ}\text{C}$ . Вольфрам марки ВРН (с повышенным содержанием примесей) применяется для вводов в стекло, траверс и т. п., работающих до температуры  $1100^{\circ}\text{C}$ . Вольфрам марки ВА (с кремнешелочной и алюминиевой присадками) применяется для изготовления спиралей, биспиралей, катодов, подогревателей мощных вакуумных приборов и других деталей, работающих при температурах до  $2900^{\circ}\text{C}$ . Вольфрам марок ВТ7, ВТ10, ВТ15, ВТ50 (с присадкой двуокиси тория) применяется для изготовления прямонакальных катодов, крючков и пружин генераторных ламп.

**Молибден.** По сравнению с вольфрамом молибден имеет более низкую температуру плавления, более высокую степень окисления и испарения. Однако молибден значительно пластичнее, особенно после отжига. Температура рекристаллизации молибдда ( $900..$

1000 °С) может быть повышена введением в него ряда присадок: окислов циркония, титана, лантана, иттрия, неодима. Молибден марки МЧ (чистый, без присадок) используется для изготовления сеток, кернов подогревателей, катодов, обойм, переходных втулок и др. Молибден марки МРН (без присадок, но с повышенным содержанием примесей) используется для деталей, изготовляемых из проволоки диаметром более 0,6 мм. Прутки из молибдена МРН диаметром 1...1,5 мм широко применяются для вводов. Хорошо соединяется со специальными стеклами и керамикой. Молибден марки МК (с кремнещелочной присадкой) используется для изготовления вводов в кварцевое стекло, крючков мощных ламп, кернов оксидных катодов и других деталей, подвергающихся во время работы нагреву до температуры выше 1200 °С.

**Тантал и ниобий.** Температура плавления тантала 2996 °С, ниобия — 2415 °С. Тантал, близкий по свойствам к ниобию, имеет почти в два раза большую удельную плотность. Эти металлы обладают низкой скоростью испарения и высоким электросопротивлением, превышающим в три раза электросопротивление вольфрама. Тантал и ниобий часто используются в нагревательных элементах, для изготовления держателей катодов, для деталей, получаемых из листа и тонких фольг. Из тантала получают фольгу толщиной до 4 мкм. По механической прочности тантал и ниобий уступают вольфраму и молибдену. Температура рекристаллизации тантала 1300 °С, ниобия — 1050 °С. Тантал и ниобий активно взаимодействуют с водородом, что используется для изготовления из них нераспыляемых газопоглотителей. Особенно активно тантал и ниобий поглощают газы в интервале температур 600...700 °С. Учитывая большую дефицитность тантала, часто применяют его сплавы с ниобием (ТН-20, ТН-50, ТН-80), содержащие 20...80% ниобия.

**Титан и цирконий.** Температура плавления титана 1725 °С, а циркония 1845 °С.

Эти металлы отличаются высокой механической прочностью при малой плотности. Так титан почти в два раза легче стали. Оба металла имеют малую скорость испарения, низкую теплопроводность, малый температурный коэффициент линейного расширения, близкий к коэффициенту некоторых марок стекла и керамики. При температуре 700 °С и выше у титана и циркония происходит рекристаллизация, что приводит к снижению прочности и твердости. Титан и цирконий обладают исключительной способностью поглощать кислород, водород, азот и удерживать их в широком интервале температур. Поэтому эти металлы нашли применение в качестве газопоглотителей, в электроразрядных насосах, в ряде конструктивных деталей, где также используется их низкая теплопроводность. Более подробно о свойствах тугоплавких металлов см [2, 9, 20].

## 8. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

**Керамика, стекло и слюда. Основные физико-механические и технологические свойства.** В табл. 21 приведены физико-механические и технологические свойства основных марок керамики, применяемых в вакуумном приборостроении.

В табл. 22 приведены физико-механические свойства электровакуумного стекла и искусственной слюды.

**Герметики, их свойства и область применения.** В качестве уплотнительных материалов при производстве вакуумных приборов часто используют герметизирующие материалы, или герметики. Уплотнение неподвижных соединений в настоящее время производится главным образом с помощью герметиков на основе каучуков. Основными видами деформаций, которые испытывают герметики в различных условиях эксплуатации, являются, как правило, сдвиг и растяжение (сжатие). Это определяет два основных требования к герметикам — эластичность и адгезию к различным конструкционным материалам: металлам, пластмассам, стеклу, керамике и др. Основой эластичных герметиков являются синтетические высокомолекулярные каучуки и различные олигомеры. Основные требования к герметикам:

1) обеспечение надежной герметичности конструкции во всем рабочем диапазоне температур и в различных средах (воздух, вода, масла, бензин и др.);

2) адгезия к герметизирующей поверхности;

3) технологичность обработки, доступность и нетоксичность компонентов;

4) удовлетворительные физико-механические показатели (условная прочность при разрыве — не менее 1,0...1,5 МПа, относительное удлинение при растяжении — не менее 150%).

Достоинствами герметиков являются: надежность в эксплуатации, неизменяемость свойств при хранении, механическая прочность конструкции (защита от ударов, вибраций), дополнительная электрическая изоляция, небольшие габаритные размеры и масса изделий, простота конструкций, простота технологических процессов производства.

Недостатками являются: сложность ремонта конструкции; ухудшение отвода тепла, увеличение паразитных емкостей и диэлектрических потерь; появление механических напряжений; подверженность герметиков процессам старения.

**Классификация герметиков.** Невысыхающие герметики: не вулканизуются и находятся в одном пастообразном состоянии как в момент их нанесения, так и в процессе эксплуатации (обладают пластозластичными свойствами). Марки герметиков: У-20А, УМС-50, 51-Г-4, 51-Г-6, У-22, 51-Г-3, 52-Г-4М, 51-Г-7, Бутэпрол, УН-01.

**Вулканизирующиеся герметики** — герметики на основе жидких тиоколов. Они имеют удовлетворительные физико-механические,

Таблица 2Г

Характеристика	Тип керамики								
	Корундовая		Лейко-сапфир	Бромелитовая	Нитрид бора пиролитический		Поглощающая керамика		9
	ВК-94-1	ВК-100-2			II	I	КТ-30	Окись берилля + двуокись титана	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Объемная масса, 10 кг/м <sup>3</sup> , не менее	3,65	3,88	3,98	2,84	—	2,0	3,75	2,9	
Водопоглощение, % не более	0,02	0,02	0,02	0,03	—	—	0,05	0,05	
Предел прочности при статическом изгибе, 10 МПа, при температуре, °С, не менее	3600	3600	3500	2000	—	1100	1500	1500	
700	3600	3600	3500	2000	—	1100	1500	1500	
800	3200	3600	3500	2000	—	1100	1500	1500	
900	1200	3600	3500	2000	—	1100	1500	1500	
1000	800	3600	3500	1500	—	1100	1500	1500	
Механическая прочность, 10 МПа при температуре 20 °С на сжатие	110	98	—	—	—	—	—	—	
на разрыв	13	10	—	—	—	—	—	—	
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-7}$ , 1/градус			—	—	—	—	—	—	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
в интервале температур, °С:								
20...200	60±5	60±5	60...64	—	—	—	75...85	80...85
20...500	70±5	70±5	—	—	—	—	—	—
20...900	79±5	79±5	78...82	81±7	2,2...3,2	35...45	—	—
20...1000	80±5	80±5	—	—	—	—	—	—
Диэлектрическая проводимость на $f=10^{10}$ Гц при температуре, °С								
20	9,4	9,7	9,4...11,6	7	—	—	—	—
400	9,6	10,2	9,8...12,2	7,7	3,4...4,8	—	—	—
на $f=3,75 \cdot 10^{10}$ Гц при 20°С	9,2	9,6	—	—	—	—	—	—
на $f=7,5 \cdot 10^{10}$ Гц при 20°С	9,1	9,5	—	—	—	—	—	—
на $f=1,5 \cdot 10^{10}$ Гц Тангенс угла диэлектрических потерь на $f=10^{10}$ Гц при температуре: 20°С	9,0	9,4	—	—	—	—	—	—
400°С	9	<1	0,4	12	—	0,5—1,0	0,3	0,3
на $f=3,75 \cdot 10^{10}$ Гц при 20°С	15	2,0	1,0	20	—	—	—	—
на $f=7,5 \cdot 10^{10}$ Гц при 20°С	25	5,0	—	—	—	—	—	—
на $f=1,5 \cdot 10^{11}$ Гц при 20°С	50	14,0	—	—	—	—	—	—
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре, °С								
20	3 · 10 <sup>13</sup>	3 · 10 <sup>13</sup>	5 · 10 <sup>16</sup>	6 · 10 <sup>12</sup>	10 <sup>8</sup> · 10 <sup>13</sup>	—	5 · 10 <sup>2</sup>	5 · 10 <sup>4</sup>
500	3 · 10 <sup>6</sup>	3 · 10 <sup>9</sup>	1 · 10 <sup>12</sup>	7 · 10 <sup>8</sup>	—	—	—	—

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1000 1600 Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом при 20 °С 100 °С Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К) при температуре, °С 20	6·10 <sup>3</sup> — 10 <sup>15</sup> 10 <sup>5</sup> 13,398	7·10 <sup>8</sup> — 10 <sup>15</sup> 10 <sup>7</sup> 20,934	1·10 <sup>8</sup> — — — 37,681	— — — — 125,604	7·10 <sup>5</sup> 8·10 <sup>1</sup> — — 46,055... 54,428	7·10 <sup>9</sup> 7·10 <sup>7</sup> — — 0,837... 1,674	— — — — 5,862	— — — — 58,615
400 800 Электрическая прочность, мВ/м, при 20 °С Минимальное напряжение пробоя по поверхности мВ/м при 20 °С Удельная теплоемкость Дж/(кг·К) в интервале температур 20...1000 °С	8,374 5,862 50 1,5...2,0 795,49... 1214,17	10,467 7,118 50 1,5...2,0 795,49... 1297,91	25,121 12,560 50 — — —	83,736 62,802 50 — — —	— — 46,055... 54,28 45	— — 0,837... 1,674 150	— — — — —	— — — — —
Допустимая температура технологической обработки, °С Газовыделение (м <sup>3</sup> ·Па) при нагреве в вакууме в интервале температур 20...900 °С Объемная газопроницаемость по гелию, водороду, азоту, воздуху	1500 1598,4	1750 2664	— —	— —	— —	— —	— —	— —

1	2	3	4	5	6	7	8	9
(при толщине образца $\geq$ $\geq 0,5$ мм), м <sup>2</sup> /(с·Па) при температуре, °С 20 100 Стойкость керамики к реакторному излучению, интегральный поток теп- ловых нейтронов $10^{14} \dots 10^{18}$ нейтр/см <sup>2</sup> , при температуре, °С —150 20 300	$< 10^{-22}$ $< 10^{-17}$	==	==	==	==	==	==	==
Свойства практически не ухудшаются								

Таблица 22

Физико-механические свойства	Стекло электровакуумное			Слюда искусственная фторфлогопит
	C38-2	C48-3	C52-1	
1	2	3	4	5
Плотность, $10^3 \text{ кг/м}^3$	2,18	2,84	2,29	2,87...2,90
Предел прочности при изгибе, 10 МПа	11,4	9,2	7,3	
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha$ , $1/\text{градус}$ в интервале температур 20...300 °С	$(36 \pm 1) \cdot 10^{-7}$	$(48 \pm 2) \times 10^{-7}$	$(52 \pm 1,5) \times 10^{-7}$	$(80...120) \cdot 10^{-7}$ (вдоль слойности); $190 \cdot 10^{-7}$ (перпендикулярно слойности)
Температура размягчения, °С	$620 \pm 15$	$810 \pm 15$	$585 \pm 10$	950° С — температурная устойчивость
Термостойкость, °С, не менее	230	150	180	—
Диэлектрическая проницаемость при $f = 10^{10}$ Гц и $T = 20$ °Т	4,28	6,8	5,2	~ 6 при об. частотах
Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ при $f = 10^{10}$ Гц $T = 20$ °С	$32 \cdot 10^{-4}$	$110 \cdot 10^{-4}$	$140 \cdot 10^{-4}$	$(0,9...2,5) \cdot 10^{-4}$ на $f = 10^6$ Гц
Удельное объемное сопротивление Ом·м при температуре 100 °С	$> 1 \cdot 10^{13}$	$> 5 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{13} \dots 10^{14}$
Электрическая прочность при постоянном напряжении при 20 °С Мв/м. на $f = 3 \cdot 10^9$ Гц, Мв/м	235 —	200...250 30...35	200 25...30	5...7 кВ при толщине 50 мкм в резко неоднородном поле
Области применения	В спаях с W и сплавом 30НКД	В спаях с Мо	В спаях со сплавом 29НК	В окнах вывода энергии

адгезионные и диэлектрические характеристики, обладают высокой эластичностью в интервале температур от  $-60$  до  $130$  °С, отличной стойкостью к действию тепла, света, озона, радиации, масел и топлив, разбавленных кислот и щелочей. Марки: У-30М, У-30мэс-5, У-30мэс-10, УТ-32, УТ-34, 51-УТ-37, 51-УТ-36А, ВИТЭФ-1, ВИТЭФ-2, АМ-0,5. Обладают хорошими диэлектрическими и теплофизическими свойствами. Недостатки — малое сопротивление раздиру и износу, высокая остаточная деформация при сжатии.

**Герметики на основе силиконового каучука** (кремнийорганические) обладают повышенной морозо- и термостойкостью (от  $-100$  до  $+300$  °С), высокой стойкостью к действию кислорода, озона, света, других атмосферных факторов, высокими диэлектрическими показателями и хорошей эластичностью, стабильностью

Свойства	Виксинт У-1-18	Виксинт У-2-28	Виксинт У-4-21	ВГО-1	Эластосил П-1
Цвет	Белый	Розовый	—	Белый	Белый
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2200	2200	1850	1900	1900
Интервал рабочих температур, °С	—60... +300	—60... +300	—60... +300	—60...+250	—
Твердость при ТМ-2, кг/мм	50...60	40...50	40...50	20	—
Условная прочность при растяжении, МПа, не менее	2	1,8	—	1,5	1,6
Относительное удлинение при растяжении, %, не менее	160	200	—	150	140
Жизнеспособность, мин	30...35	3...84	0,5...54	10...30	—
Удельное объемное сопротивление при 20 °С 10 <sup>-11</sup> Ом·м, не более	1	5	5	3	10
Электрическая проч- ность при 20 °С Мв/м	5,0	5,7...8,7	15...32	—	15,0
Тангенс угла диэлек- трических потерь при 1 МГц, не более	0,02	0,2	0,005	0,003	0,04
Диэлектрическая про- ницаемость при 1 МГц	6,5	3,9...4,5	3,5...4,7	3,8	4,0

свойств при повышенной влажности, гидрофобностью, химической, физиологической и биологической инертностью, вибропоглощающими свойствами, грибостойкостью, стойкостью к коррозии. Недостатки — низкая механическая прочность. Марки: У-1-18, У-2-28, У-4-21, К-18, КЛ-4, КЛ-СВ, КЛТ-30, КЛТ-50, КЛВАЕ-105, КДВАЕ-155, КЛВСЕ-305, КЛФ-20, КЛФС-30, В20-1.

**Герметики на основе жидких углеводородных каучуков.** Вулканизация таких каучуков происходит за счет взаимодействия с различными химическими реагентами. Преимущества жидких олигомеров перед высокомолекулярными каучуками — возможность вулканизации при комнатной температуре и на месте потребления; текучесть, позволяющая перерабатывать их на малогабаритном оборудовании (краскотерках, лопастных мешалках и пр.).

В СССР и за рубежом выпускается большой ассортимент олигомеров подобного типа с молекулярной массой 1700...6300 и вязкостью при 20...25 °С 17...120 Па·с. Основные свойства герметиков приведены в табл. 23. В вакуумном приборостроении герметики нашли применение для защиты разъемов от воздействия паров воды и т. д. в условиях вибрации и колебания температур. Кроме того, герметики применяются для защиты от воздействия агрес-

Силпен	КЛ-4	КЛТ-30	КЛТ-50	КЛФ-20	КЛФС-30	КЛВАЕ-155
Белый	Бесцветный, прозрачный	Белый	Белый	Серый	Серый	Красный
600	1000	1150	1300	—	1300	—
—60... +200	—60...+200	—60... +300	—60... +300	—75...+200	—	—60...+250
—	—	60...70	55...70	—	—	50...65
—	1	0,8	1,2	0,3	—	1,0
—	100	120	120	100	—	130
—	10...40	15...40	15...40	15...40	—	20...35
10	10	1	—	10	—	1
	12,3	14,5	15,0	—	20,7	—
0,02	0,005	0,01	0,02	0,005	1,1	0,01
2,9	3,2	3,4	3,5	3,2	3,1	3,2

сивных средств, а также для герметизации и изоляции. В современном машиностроении герметики широко применяются для уплотнения болтовых, заклепочных, резьбовых фланцевых и других соединений. Более подробно см. [6, 8, 20].

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Перечислите основные требования, предъявляемые к материалам, применяемым для вакуумных приборов.
2. Как рассчитать газопроницаемость через металлические оболочки?
3. Перечислите специальные виды контроля металлов, которые необходимо проводить на заводах вакуумного приборостроения.
4. Назовите области применения меди, никеля, армко-железа, коррозионно-стойких сталей в вакуумном приборостроении.
5. Что такое коррозия под напряжением в коррозионно-стойких сталях?

6. Каким требованиям должны удовлетворять металлы и сплавы, применяемые для пайки с электровакуумными стеклами?

7. Назовите основные металлы и сплавы, применяемые для гибких элементов.

8. Перечислите детали вакуумных приборов, изготавливаемые из тугоплавких металлов.

9. Назовите основные требования к герметикам.

10. Как классифицируются герметики?

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В. Н. Количественный анализ. М.: Химия, 1972. 340 с.
2. Андреева Р. Т., Ипатова С. И., Розина Н. С. Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов. Справочное пособие. М.: Энергия, 1973. 320 с.
3. Вассерман А. М., Кунин Л. А., Суровой Ю. Н. Определение газов в металлах. М.: Наука, 1976. 296 с.
4. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Оборонгиз, 1963. 356 с.
5. Иванова З. И., Савостин А. П. Технический анализ. М.: Металлургия, 1981. 180 с.
6. Клей и герметики/ Под ред. Д. А. Кардашева. М.: Химия, 1978. 436 с.
7. Коль В. Технология для электровакуумных приборов. М.: Госэнергоиздат, 1957. 378 с.
8. Лабуптин А. Л., Федорова Н. С. Герметики на основе каучуков. Л.: Знание, 1962. 82 с.
9. Металлы и сплавы для электровакуумных приборов/В. М. Амосов, А. С. Гладков, Ч. В. Капецкий, А. М. Левин. М.: Энергия, 1969. 236 с.
10. Основы вакуумной техники/Б. И. Королев, В. И. Кузнецов, А. И. Пипко, В. Я. Плисковский. М.: Энергия, 1981. 340 с.
11. Пипко А. И., Плисковский В. Я., Пеньченко Е. А. Конструирование и расчет вакуумных систем. М.: Энергия, 1979. 212 с.
12. Рахштадт А. Г. Пружинные сплавы. М.: Металлургия, 1965. 186 с.
13. Рубашов М. А., Бердов Г. И., Гаврилов В. Н. Термостойкие диэлектрики и их спай с металлом в новой технике. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
14. Симонишвили Т. В. Некоторые свойства армо-железа вакуумной плавки. — Электронная техника, сер. XIV, материалы, вып. 1, 1967, с. 42—56.
15. Смирягин А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Металлургиздат, 1956. 278 с.
16. Соловьева Н. А., Юдкевич М. И. Прецизионные сплавы с особыми свойствами теплового расширения и упругости. Справочник. М.: Металлургиздат, 1963. 140 с.
17. Терек Т., Мика И., Гегуш Э. Эмиссионный спектральный анализ. Т. 2. М.: Мир, 1982. 524 с.
18. Химушин Ф. Ф. Нержавеющие стали. М.: Металлургиздат, 1963. 300 с.
19. Черепнин Н. В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. М.: Сов. радио, 1966. 220 с.
20. Эспе В. Технология электровакуумных материалов. М.: Госэнергоиздат, 1962. 412 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Общие требования к металлам и сплавам для вакуумных приборов	3
1.1. Особенности применения металлов и сплавов, работающих в вакууме	3
1.2. Вакуумная плотность и проницаемость	5
1.3. Упругость паров металлов	7
1.4. Газовыделение	8
1.5. Химический состав. Идентичность свойств материалов	10
1.6. Входной контроль качества материалов и методы контроля качества металлических материалов	11
2. Медь и ее сплавы	13
2.1. Области применения	13
2.2. Физико-механические и технологические свойства меди	13
2.3. Недостатки меди как конструкционного материала	16
2.4. Медные сплавы с повышенными механическими свойствами	16
2.5. Сплавы меди с никелем	18
3. Никель и его сплавы	24
3.1. Области применения	24
3.2. Физико-механические и технологические свойства никеля	25
3.3. Особенности изготовления основных внутривакуумных деталей и узлов приборов	28
4. Низкоуглеродистая сталь (армко-железо)	29
4.1. Области применения	29
4.2. Физико-механические и технологические свойства низкоуглеродистой стали (армко-железа)	30
4.3. Специальные магнитомягкие сплавы	32
5. Коррозионно-стойкие стали	34
5.1. Области применения	34
5.2. Физико-механические свойства коррозионно-стойких сталей	36
5.3. Коррозионная стойкость коррозионно-стойких сталей	37
6. Прецизионные сплавы	39
6.1. Сплавы для пайки с диэлектриками	39
6.2. Сплавы для гибких элементов	40
6.3. Металлы и сплавы, применяемые для пар трения	43
7. Тугоплавкие металлы и сплавы	47
7.1. Общие сведения	47
7.2. Применение тугоплавких металлов в вакуумных приборах. Физико-механические свойства	48
8. Неметаллические материалы	50
Вопросы для самопроверки	57
Список литературы	58