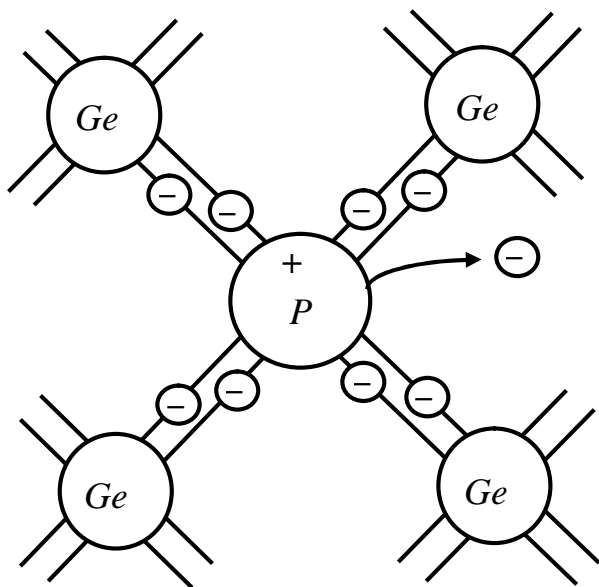


**А.А. Руппель, В.П. Расщупкин  
М.С. Корытов, Ю.К. Корзунин**

---

---

## **ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛЫ**



Федеральное агентство по образованию  
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия  
(СибАДИ)

А.А. Руппель, В.П. Расщупкин  
М.С. Корытов, Ю.К. Корзунин

## ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие

Омск  
Издательство СибАДИ  
2009

УДК 621.315.5  
ББК 31.23  
Р \_\_

*Рецензенты:*

д-р. техн. наук, проф. А.П. Моргунов (ОмГТУ);  
д-р. техн. наук, доц. А.С. Ненишев (СибАДИ)

Работа одобрена редакционно-издательским советом академии в качестве учебного пособия по дисциплине «Материаловедение» для студентов специальностей 220301, 140607.

**Руппель, А.А. и др.**

**Р 47 Электроматериалы:** Учебное пособие / А.А. Руппель, В.П. Расщупкин, М.С. Корытов, Ю.К. Корзунин. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2009. – 134 с.

ISBN 978 – 5 – 93204 – 405 – 6

Приводится классификация электротехнических материалов и описываются их электрические, физико-химические и механические свойства. Рассматривается технология производства электротехнических материалов. Приводятся сведения о диэлектрических, полупроводниковых, магнитных материалах.

Табл. 20. Ил. 35. Библиогр.: 9 назв.

ISBN \_\_\_\_ – \_\_ – \_\_\_\_\_ – \_\_\_\_ – \_

© А.А. Руппель, В.П. Расщупкин,  
М.С. Корытов, Ю.К. Корзунин 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |     |
|--|-----|
| <b>Введение</b> .....  | 4   |
| <b>1. Классификация электротехнических материалов</b> .....  | 8   |
| 1.1. Проводниковые материалы.....  | 8   |
| 1.1.1. Металлы и сплавы высокой проводимости.....  | 10  |
| 1.1.2. Припой.....   | 19  |
| 1.1.3. Сверхпроводники.....  | 22  |
| 1.1.4. Контактные материалы.....   | 23  |
| 1.1.5. Сплавы с повышенным электрическим сопротивлением.....   | 26  |
| 1.2. Полупроводниковые материалы.....  | 34  |
| 1.3. Магнитные материалы.....  | 47  |
| 1.3.1. Классификация веществ по магнитным свойствам.....   | 47  |
| 1.3.2. Природа ферромагнетизма.....  | 49  |
| 1.3.3. Магнитомягкие материалы.....  | 50  |
| 1.3.4. Магнитно-твердые материалы.....   | 60  |
| 1.4. Диэлектрические материалы.....  | 62  |
| 1.4.1. Газообразные диэлектрики.....   | 62  |
| 1.4.2. Жидкие диэлектрики.....   | 71  |
| 1.4.3. Полимерные диэлектрики.....   | 86  |
| <b>2. Проводниковые изделия</b> .....  | 105 |
| <b>3. Методические указания к лабораторным работам</b> .....   | 116 |
| 3.1. Изучение удельного электросопротивления и твердости сплавов<br>различного состава и строения..... | 116 |
| 3.2. Изучение электрических свойств проводников<br>и полупроводников при различных температурах.....   | 124 |
| <b>Контрольные вопросы</b> .....   | 129 |
| <b>Заключение</b> .....  | 132 |
| <b>Библиографический список</b> .....  | 133 |

## ВВЕДЕНИЕ

Материалы, используемые в электронной технике, подразделяют на электротехнические, конструкционные и специального назначения.

Основные части электрических машин, аппаратов и электротехнических устройств выполнены из специальных электротехнических материалов, обладающих свойствами, отличными от свойств обычных конструкционных материалов.

Электротехническими называют материалы, характеризующиеся определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяемые в технике с учетом этих свойств.

Практически различные материалы подвергаются воздействиям как отдельно электрических или магнитных полей, так и их совокупности.

По поведению в магнитном поле электротехнические материалы подразделяют на сильномагнитные (магнетики) и слабомагнитные. Первые нашли особенно широкое применение в технике благодаря их магнитным свойствам.

Большинство электротехнических материалов можно отнести к слабомагнитным или практически немагнитным. Однако и среди магнетиков следует различать проводящие, полупроводящие и практически непроводящие, что определяет частотный диапазон их применения.

Магнитные материалы, применяются для создания среды с малым магнитным сопротивлением (магнитопроводы, сердечники), т. е. для концентрации магнитной энергии в электрических машинах, аппаратах и приборах. По отношению к электрическому току большинство магнитных материалов являются проводниками (чистое железо и сплавы на основе железа), но некоторые из магнитных материалов – ферриты относятся к полупроводникам. По сравнению с металлическими магнитными материалами ферриты обладают большим электрическим сопротивлением. Это обеспечивает им малые потери (на вихревые токи) при работе в переменном магнитном поле.

По поведению в электрическом поле (величине удельного электрического сопротивления) материалы подразделяют на проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические.

Проводник – вещество, обладающее высокой удельной проводимостью. Различают: - проводники 1 рода, в которых носителями заряда являются свободные электроны (металлы); - проводники 2 рода, в которых заряды переносятся ионами (электролиты). Используют про-

водники для изготовления проводов постоянного и переменного тока, резисторов, нагревательных элементов, контактов и т. п.

Диэлектрик – вещество, обладающее низкой удельной электрической проводимостью. Диэлектрики: - практически не проводят электрический ток; - способны поляризоваться в электрическом поле; - подразделяются на пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики, электреты и др. Используются они в основном как изоляторы. Реальный (технический) диэлектрик тем более приближается к идеальному, чем меньше его удельная проводимость и чем слабее у него выражены замедленные механизмы поляризации, связанные с рассеиванием электрической энергии и выделением теплоты.

При применении диэлектриков – одного из наиболее обширных классов электротехнических материалов – довольно четко определилась необходимость использования как пассивных, так и активных свойств этих материалов.

Пассивные свойства диэлектрических материалов используются, когда их применяют в качестве электроизоляционных материалов и диэлектриков конденсаторов обычных типов. Электроизоляционными материалами называют диэлектрики, которые не допускают утечки электрических зарядов, т. е. с их помощью отделяют электрические цепи друг от друга или токоведущие части устройств, приборов и аппаратов от проводящих, но не токоведущих частей (от корпуса, от земли). В этих случаях диэлектрическая проницаемость материала не играет особой роли или она должна быть возможно меньшей, чтобы не вносить в схемы паразитных емкостей. Если материал используется в качестве диэлектрика конденсатора определенной емкости и наименьших размеров, то при прочих равных условиях желательно, чтобы этот материал имел большую диэлектрическую проницаемость.

Активными (управляемыми) диэлектриками являются сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пироэлектрики, электролюминофоры, материалы для излучателей и затворов в лазерной технике, электреты и др.

Полупроводники – вещества, удельная электрическая проводимость которых меньше, чем у металлов и больше, чем у диэлектриков.

Электропроводность полупроводников: - обеспечивается свободными электронами и дырками; - остается постоянной в пределах области температур, специфической для каждого вида полупроводников, и увеличивается с повышением температуры; - зависит от примесей; - увеличивается под действием света и с возрастанием напряженности электрического поля. Применяют их для выпрямления, усиле-

ния электрических сигналов, превращения различных видов энергии в электрическую и т. д.

Электрическая проводимость твердых тел, в первую очередь, определяется электронным строением атомов. Удельная электрическая проводимость измеряется в  $1/(\text{Ом}\cdot\text{м}) = \text{См}/\text{м}$  (Сименс на метр). Один См/м равен электрической проводимости 1 См цилиндрического прямолинейного проводника с площадью поперечного сечения 1 кв.м и длиной 1 м.

Проводники, полупроводники и диэлектрики имеют следующие значения удельной электрической проводимости: - проводники свыше 1000000 См/м; - диэлектрики до 0,00000001 См/м; - полупроводники от 0,00000001 до 1000000 См/м.

Хорошими проводниками электрического тока являются металлы. Из 105 химических элементов лишь двадцать пять являются неметаллами, причем двенадцать элементов могут проявлять полупроводниковые свойства. Но кроме элементарных веществ существуют тысячи химических соединений, сплавов или композиций со свойствами проводников, полупроводников или диэлектриков. Четкую границу между значениями удельного сопротивления различных классов материалов провести достаточно сложно. Например, многие полупроводники при низких температурах ведут себя подобно диэлектрикам. В то же время диэлектрики при сильном нагревании могут проявлять свойства полупроводников. Качественное различие состоит в том, что для металлов проводящее состояние является основным, а для полупроводников и диэлектриков – возбужденным.

Влияние легирующих элементов на электрическую проводимость металлов разнообразно, и это позволяет получать материалы, удовлетворяющие самым различным требованиям электротехнической промышленности.

Влияние деформации и остаточных напряжений на электрическую проводимость чистых металлов незначительно. В связи с этим, не ухудшая электрических свойств, можно использовать пластическую деформацию и возникающий при этом наклеп для повышения прочности проводниковых материалов.

В сплавах влияние деформаций и остаточных напряжений на электрическую проводимость значительно сильнее. Наклеп, вызывая значительное упрочнение, очень сильно (до 25%) снижает электрическую проводимость сплава. Таким образом, упрочнение проводниковых сплавов наклепом можно достичь только ценой потери электрической проводимости.

Развитие радиотехники потребовало создания материалов, в которых специфические высокочастотные свойства сочетаются с необходимыми физико-механическими параметрами. Такие материалы называют высокочастотными.

Приведенное деление электротехнических материалов не исчерпывает всех различий между ними. Внутри каждой из основных групп можно провести еще более подробную классификацию. Так, группу проводниковых материалов обычно делят на материалы с малым удельным сопротивлением и материалы с большим удельным сопротивлением. Электроизоляционные материалы делят на газообразные, жидкие и твердые. Кроме того, различают электроизоляционные материалы органические (смолы, лаки, пластмассы и др.) и неорганические (сланец, керамика и др.). Среди магнитных материалов различают магнитно-мягкие, т. е. легко намагничивающиеся материалы, и магнитно-твердые, которые намагничиваются с трудом, но способны длительное время сохранять сообщенную им магнитную энергию.

Для понимания электрических, магнитных и механических свойств материалов нужны знания их химического и фазового состава, атомной структуры и структурных дефектов.

Разработка новых электротехнических материалов с улучшенными или новыми свойствами способствует развитию электротехники. Так, создание нагревостойких кремнийорганических диэлектриков позволило повысить рабочие температуры электрических машин и тем самым значительно увеличить мощности машин без изменения их габаритов и веса. Создание новых магнитных материалов – ферритов позволило решить ряд важных проблем в области электронной техники (счетно-решающие устройства и др.) и в технике высоких частот.

Совокупность научно-технических знаний о физико-химической природе, методах исследования и изготовления различных материалов составляет основу материаловедения, ведущая роль которого в настоящее время широко признана во многих областях техники и промышленности. Успехи материаловедения позволили перейти от использования уже известных к целенаправленному созданию новых материалов с заранее заданными свойствами.



# 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

## 1.1. Проводниковые материалы

В качестве проводниковых материалов используют чистые металлы, а также сплавы металлов. Наибольшей проводимостью обладают чистые металлы (табл. 1). Исключением является ртуть, у которой удельное сопротивление велико.

В зависимости от удельного электрического сопротивления и применения проводниковые материалы подразделяют на следующие группы: 1) металлы и сплавы высокой проводимости; 2) припои; 3) сверхпроводники; 4) контактные материалы; 5) сплавы с повышенным электрическим сопротивлением.

Удельное электрического сопротивления ряда чистых металлов, применяемых в электрооборудовании, приведено в табл. 1, основных сплавов – в табл. 2.

Т а б л и ц а 1. Удельное электрическое сопротивление чистых металлов при 20 °С

| Металл                  | Алюминий | Висмут | Вольфрам | Железо | Золото | Иридий | Медь   | Молибден | Никель | Платина | Свинец | Серебро | Титан              | Цинк  |
|-------------------------|----------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|---------|--------|---------|--------------------|-------|
| $\rho, 10^{-6}$<br>Ом·м | 0,0271   | 1,2    | 0,055    | 0,098  | 0,024  | 0,0474 | 0,0172 | 0,054    | 0,087  | 0,107   | 0,205  | 0,016   | 0,5562 -<br>0,7837 | 0,059 |

Т а б л и ц а 2. Удельное электрическое сопротивление ряда электротехнических сплавов при 20 °С

| Сплав                   | Нихром     | Хромаль   | Манганин    | Константан | Никелин |
|-------------------------|------------|-----------|-------------|------------|---------|
| $\rho, 10^{-6}$<br>Ом·м | 1,05...1,4 | 1,3...1,5 | 0,43...0,51 | 0,5        | 0,4     |

Чистые металлы составляют группу проводниковых материалов с малым удельным сопротивлением. Из этих материалов (медь, алюминий) изготавливают обмоточные, монтажные и установочные провода и кабели.

Кроме материалов с малым удельным сопротивлением, в электротехнике применяются материалы с большим удельным сопротив-

лением  $\rho = (0,422,0-2,0) \cdot 10^{-6}$  Ом·м. Это преимущественно сплавы на основе меди и никеля; никеля и хрома и других металлов. Изделия из этих сплавов (провода и ленты) применяются в реостатах, добавочных и образцовых сопротивлениях. Изготавливать эти приборы из медной или алюминиевой проволоки, обладающей малым удельным сопротивлением, нерационально, так как получились бы очень большие по размерам реостаты и добавочные сопротивления. Кроме того, медь, алюминий и другие чистые металлы имеют сравнительно большой температурный коэффициент сопротивления, вследствие чего реостаты резко изменяли бы свое сопротивление при колебаниях температуры.

Проводниковые же сплавы, представляющие собой твердые растворы металлов с неупорядоченной структурой, обладают большим удельным сопротивлением и малыми значениями температурного коэффициента сопротивления. Это обеспечивает большую стабильность величины электрического сопротивления изготовленных из них реостатов и других приборов при колебаниях температуры.

По сравнению с чистыми металлами сплавы отличаются повышенной твердостью, большей механической прочностью при растяжении, меньшим относительным удлинением. Кроме того, сплавы в меньшей степени окисляются на воздухе.

Большинство проводниковых сплавов могут длительно работать при температурах до 300-500 °С. В то же время отдельные области электротехники (электротермия) нуждаются в сплавах высокого электрического сопротивления, которые могли бы длительно работать при 800-1200 °С. Такие сплавы называются жаростойкими сплавами. Изготавливаемые из жаростойких сплавов проволока и ленты применяются в электронагревательных приборах, печах сопротивления и термостатах. К жаростойким проводниковым сплавам относятся: нихром, фехраль и др (см. табл. 2).

Нихром – сплав, состоящий из 55-78 % никеля, 15-23 % хрома, 1,5 % марганца, остальное – железо. Нихром используется в электронагревателях печей для всех отраслей промышленности, бытовых приборов и аппаратов теплового действия. Широко используется в высокотемпературных электропечах, печах обжига и сушки, различных электрических аппаратах теплового действия. Применяется в качестве нагревательных и резисторных элементов. Обладает повышенной жаропрочностью, пластичностью и стабильностью формы. Также нихром используется в качестве жаропрочного (жаростойкого) сплава и химически стойкого сплава в агрессивных средах.

Хромаль – сплав состава: *Cr* (23-27%); *Al* (4,5-6,5%); остальное – железо. Сплав идет на изготовление нагревательных элементов электрических печей, электробытовых нагревателей с рабочей температурой до 900 °С.

Константан – сплав, состоящий из *Ni* (39-41%) и *Mn* (1-2%), остальное – медь. Сплав имеет высокое удельное электрическое сопротивление, минимальное значение термического коэффициента электрического сопротивления, высокую термоэлектродвижущую силу в паре с медью, железом, хромелем. Хорошо поддается обработке. Идет на изготовление термопар, реостатов и электронагревательных элементов с рабочей температурой до 400-500 °С, измерительных приборов высокого класса точности.

Манганин – сплав на основе меди с добавкой марганца (11,5-13,5 %) и никеля (2,5-3,5 %), характеризующийся чрезвычайно малым изменением электрического сопротивления в области комнатных температур. Впервые предложен в Германии в 1889 г. Манганин – основной материал для электроизмерительных приборов и образцовых сопротивлений – эталонов, мостовых схем, шунтов, дополнительных сопротивлений приборов высокого класса точности. Максимальная рабочая температура – 100 °С. Существенное преимущество манганина перед константаном заключается в том, что манганин обладает очень малой термоэлектродвижущей силой (ТЭДС) в паре с медью (не более 1 мкВ/1°С), поэтому в приборах высокого класса точности применяют только манганин. В то же время манганин, в отличие от константана, неустойчив против коррозии в атмосфере, содержащей пары кислот, аммиака, а также чувствителен к значительному изменению влажности воздуха.

Никелин – сплав меди с никелем (25-35% *Ni*) с примесями марганца, железа и цинка. Характеризуется большим электрическим сопротивлением. Применяется в реостатах.

### *1.1.1. Металлы и сплавы высокой проводимости*

Проводниковые металлы кроме высокой электрической проводимости (малое электрическое сопротивление) должны иметь достаточную прочность, пластичность, которая определяет технологичность, а также коррозионную стойкость в атмосферных условиях и, в некоторых случаях, высокую износостойкость. Кроме того, металл должен хорошо свариваться и подвергаться пайке для получения соединения

высокой надежности и электрической проводимости. Практическое применение имеют химически чистые металлы: *Cu, Al, Fe*. Эти металлы обладают высокой электрической проводимостью при минимальном содержании примесей и дефектов кристаллической решетки. В связи с этим такие металлы (см. табл. 1) используют в технически чистом виде и, для достижения максимальной электрической проводимости, в отожденном состоянии [1].

#### *Проводниковая медь и ее свойства.*

Медь является одним из главных проводниковых материалов благодаря большой проводимости, механической прочности и стойкости к атмосферной коррозии. По электропроводности медь стоит на втором месте (после серебра).

Проводниковая медь получается из слитков меди путем очистки ее от примесей в электролитической ванне с помощью постоянного тока.

Кроме высокой электропроводности, медь обладает хорошей пластичностью, поэтому из нее изготавливают волочением проволоку диаметром до 0,01 мм, а при прокатке получают ленту толщиной до 0,1 мм и медную фольгу толщиной 0,008 мм.

В нормальной атмосфере проводниковая медь устойчива к коррозии. Медные провода на воздухе медленно окисляются, покрываясь тонким слоем окиси меди (*CuO*). Образовавшаяся пленка окисла препятствует дальнейшему окислению меди. Коррозию меди вызывают сернистый газ (*SO<sub>2</sub>*), сероводород (*H<sub>2</sub>S*), аммиак (*NH<sub>3</sub>*), окислы азота (*NO*), пары азотной кислоты и некоторые другие реагенты.

Медь имеет красновато-оранжевый цвет и обладает температурой плавления 1083 °С.

Наиболее чистая бескислородная медь М006 имеет суммарное содержание примесей 0,01 %, М06 – 0,03 % и М1 – 0,1 %. Серебро (как примесь) засчитывается в содержание меди, так как оно не снижает ее проводимость. Остальные примеси уменьшают проводимость меди. Наиболее вредная примесь в меди – кислород. Помимо ухудшения проводимости кислород при отжиге полуфабрикатов и изделий из чистой меди в водороде вызывает растрескивание и потерю прочности, поэтому содержание кислорода в меди строго ограничено.

Наибольшей электрической проводимостью обладает бескислородная медь М006. Электрическое сопротивление такой меди близко к значению, приведенному в табл. 1. Такую медь получают переплавом электролитически очищенной меди в вакууме или переработкой катодной меди методами порошковой металлургии. Медь указанных

марок используют в виде проката: проволоки разных диаметров, шин, полос и прутков. Прокат из меди М1 поставляется либо в отожженном, либо нагартованном состоянии. Отожженная медь имеет более высокую проводимость, нагартованная большую прочность  $\sigma_B$  (табл. 3). Механические свойства меди зависят от диаметра провода. Малым диаметрам соответствуют большая прочность и меньшая пластичность как в нагартованном, так и в отожженном состояниях. Отожженную медь используют для обмоточных проводов и кабельных изделий, нагартованную медь – для подвесных токонесущих и контактных проводов, коллекторных пластин.

Кроме проводов круглого и прямоугольного сечения из меди изготавливают также провода фасонного сечения, например троллейные провода.

Т а б л и ц а 3 . Механические свойства и удельное электрическое сопротивление меди и алюминия

| Свойства         | Медь       |               | Алюминий   |               |
|------------------|------------|---------------|------------|---------------|
|                  | отожженная | нагартованная | отожженный | нагартованный |
| $\rho$ , мкОм·м  | 0,0175     | 0,0182        | 0,0295     | 0,0295        |
| $\sigma_B$ , МПа | 250-280    | 340-390       | 60         | 130           |
| $\delta$ , %     | 20-30      | 0,5-2,0       | 28         | 5             |

Проволоку и шины из мягкой меди ММ применяют преимущественно для изготовления изолированных обмоточных и монтажных проводов.

Следует заметить, что провода прямоугольного сечения обеспечивают больший коэффициент заполнения обмотки по сравнению с проводами круглого сечения. Это значит, что при одном и том же объеме обмотки в ней можно поместить большее количество витков из прямоугольной меди и тем самым повысить мощность электрической машины или аппарата. Во избежание повреждения изоляции острые ребра у проводов прямоугольного сечения (шины) слегка закругляют.

Проводниковые изделия из твердой меди МТ применяют, как правило, неизолированными (голыми): провода для воздушных линий, шины для электрических аппаратов и коллекторов электрических машин. От этих проводниковых изделий требуется повышенная механическая прочность, твердость и сопротивление истиранию.

Медь – весьма ценный материал, который следует расходовать экономно, и там, где это возможно, медь необходимо заменять менее

дефицитными материалами – проводниковым алюминием или железом.

Из сплавов на основе меди наибольшее применение в электротехнике получили бронзы и латуни. Для изделий, от которых требуется прочность выше 400 МПа, используются латуни и бронзы с кадмием и бериллием, обеспечивающими большие прочность и износостойкость, чем медь, при некоторой потере электрической проводимости.

Бронзы – это сплавы меди с оловом, алюминием и другими металлами, специально вводимыми с целью получения определенных свойств сплава. Раньше всех начали применяться оловянистые бронзы, в которых содержание олова составляет 8-20 %. Оловянистые бронзы являются дорогостоящими сплавами, так как содержат дефицитное олово. Поэтому оловянистые бронзы стараются заменять другими бронзами, содержащими кадмий, алюминий, фосфор и другие вещества (легирующие элементы).

Характерной особенностью бронз является их малая объемная усадка при литье (0,6-0,8 %) по сравнению с чугуном и сталями, у которых усадка достигает 1,5-2,5 %. Поэтому наиболее сложные по форме детали отливают из бронзы. Другие характерные свойства бронз – повышенная твердость, упругость (по сравнению с медью), большое сопротивление истиранию и стойкость к коррозии. Благодаря этим ценным свойствам бронзы широко применяют в машиностроении для изготовления втулок, шестерен, пружин (бронзовая лента) и других деталей.

Т а б л и ц а 4 . Марка и состав некоторых бронз

| Марка бронзы | Содержание легирующих элементов, % |      |        |        |          |          |        |          |
|--------------|------------------------------------|------|--------|--------|----------|----------|--------|----------|
|              | олово                              | цинк | свинец | фосфор | алюминий | марганец | никель | бериллий |
| Бр.О-10      | 10                                 | -    | -      | -      | -        | -        | -      | -        |
| Бр.ОФ7-0,2   | 6-8                                | -    | -      | 0-2    | -        | -        | -      | -        |
| Бр.ОЦС6-6,3  | 5-7                                | 5-7  | 2-4    | -      | -        | -        | -      | -        |
| Бр.ОФ10-1    | 9-11                               | -    | -      | 1,0    | -        | -        | -      | -        |
| Бр.А7        | -                                  | -    | -      | -      | 6-8      | -        | -      | -        |
| Бр.АМ 9-2    | -                                  | -    | -      | -      | 8-10     | 2,0      | -      | -        |
| Бр.Б2        | -                                  | -    | -      | -      | 0,2      | -        | 0,5    | 2,0-2,3  |

Марки бронз обозначаются буквами Бр (бронза), за которыми следуют буквы и цифры, показывающие, какие легирующие элементы и в каком количестве содержатся в данной бронзе (табл. 4).

В электротехнике стараются применять бронзы, проводимость которых близка к проводимости меди. Такими бронзами являются кадмиевая и кадмиево-оловянистая. Остальные бронзы нашли применение в электротехнике, благодаря следующим свойствам: упругости, сопротивлению истиранию и высокой механической прочности. Из бронз изготавливают провода с повышенной механической прочностью, а также щеткодержатели, пружины и контактные детали для электрических аппаратов и приборов.

Кроме бронз, в электротехнике нашли широкое применение сплавы меди с цинком – латуни, в которых содержание цинка может достигать до 43 %. При этом содержании цинка латуни обладают наибольшей механической прочностью. Латуни, содержащие 30-32 % цинка, обладают наибольшей пластичностью, поэтому из них изготавливают изделия горячей или холодной прокаткой и волочением: листы, ленты, проволоку и др. Без нагрева из листовой латуни можно изготавливать глубокой вытяжкой и штамповкой сложные детали: кожухи, колпачки, фасонные шайбы, прокладки и др.

В результате холодной обработки давлением у латуни увеличивается твердость и механическая прочность, но заметно снижается пластичность. Для восстановления пластичности латунь отжигают при температуре 600-700 °С и медленно охлаждают до комнатной температуры. Латуни хорошо обрабатываются резанием. Изделия из латуни устойчивы к атмосферной коррозии, но деформированная (вытяжкой) латунь подвержена коррозии во влажной атмосфере в большей степени, чем медь. Для повышения коррозионной стойкости латуней в них вводят легирующие элементы: алюминий, никель, свинец и др.

Такие латуни называют специальными, например морская латунь (марки ЛО70-1) стойка к коррозии даже в морской воде. Марки латуней начинаются с буквы Л (латунь), за которой следуют буквы, указывающие на другие элементы (кроме меди), которые входят в состав латуней. Стоящие в конце марки цифры означают содержание (в процентах) меди и других компонентов.

Из латуней изготавливают различного рода зажимы и контакты для электрических аппаратов и приборов, а также электроды и крепежные детали.

#### *Проводниковый алюминий и его свойства.*

Алюминий относится к группе легких металлов. Плотность алюминия равна 2,7 г/см<sup>3</sup>, т. е. алюминий в 3,3 раза легче меди.

Доступность, сравнительно большая проводимость, а также стойкость к атмосферной коррозии позволили широко применять алюми-

ний в электротехнике. Недостатками алюминия являются невысокая механическая прочность при растяжении ( $\sigma_p=7,5-8,5$  кгс/мм<sup>2</sup>) и повышенная мягкость.

Алюминий – металл серебристо-белого цвета. Температура плавления алюминия 658 °С, а температурный коэффициент расширения равен  $24 \cdot 10^{-6}$  1/°С, т. е. в 1,5 раза больше, чем у меди. Алюминий стоек к атмосферной коррозии, так как на воздухе он очень быстро покрывается тонкой пленкой окисла ( $Al_2O_3$ ), которая надежно защищает металл от проникновения кислорода, поэтому голые (неизолированные) алюминиевые провода могут длительно работать на открытом воздухе. Оксидная пленка на алюминиевых проводах обладает значительным электрическим сопротивлением, поэтому в местах соединения алюминиевых проводов могут образовываться большие переходные сопротивления. Зачистку мест соединения алюминиевых проводов (шины) обычно производят под слоем вазелина, во избежание окисления алюминия на воздухе.

При увлажнении мест соединений алюминиевых проводов с проводами из других металлов (медных, железных и др.) могут образовываться гальванические пары (гальванические элементы) с заметной электродвижущей силой. При этом алюминиевый провод будет разрушаться местными токами. Чтобы избежать образования гальванических пар во влажной атмосфере, места соединений алюминиевых проводов с проводами из других металлов должны быть тщательно защищены от влаги (лакированием и другими способами). Чем выше химическая чистота алюминия, тем он лучше сопротивляется коррозии. Поэтому для защитных оболочек кабелей (взамен свинца) применяют особо чистые сорта алюминия, содержащие примесей не более 0,03-0,07 % (марки алюминия АВ00 и АВ0). Эти же сорта проводникового алюминия идут для изготовления электродов в электрических конденсаторах. Для изготовления алюминиевой фольги и обмоточных проводов малых диаметров (0,05-0,08 мм) применяют проводниковый алюминий марки А00 с содержанием чистого металла не менее 99,7 %. Для изготовления большинства проводниковых изделий (проволока, провода и др.) применяют алюминий марок А0 и А1 с содержанием чистого металла не менее 99,6% (А0) и 99,5% (А1).

Из проводникового алюминия изготавливают волочением и прокаткой проводниковые изделия – проволоку и шины. Алюминиевую проволоку выпускают трех марок: АМ (мягкая, отожженная), АПТ (полутвердая) и АТ (твердая неотожженная). Проволока выпускается диаметром от 0,06 до 8 мм. Алюминиевые шины марки АТ выпускают



толщиной от 3 до 12 мм и шириной от 10 до 120 мм. Изделия (провода и шины) из алюминия обладают следующими характеристиками: (АМ)  $\sigma_p=7,5-8,5$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $e_p=10-26$  %;  $\rho=0,0279-0,0280$  Ом·мм<sup>2</sup>/м; (АПТ)  $\sigma_p=10$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $e_p=3-4$  %;  $\rho=0,0281-0,0283$  Ом·мм<sup>2</sup>/м; (АТ)  $\sigma_p=12-18$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $e_p=0,5-2,2$  %;  $\rho=0,0283$  Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Температурный коэффициент электрического сопротивления для всех сортов алюминия принимается равным  $a = +0,00423$  1/°С.

Поскольку удельное сопротивление алюминия в 1,68 раза больше удельного сопротивления меди, то при одинаковой длине, сечение алюминиевого провода должно быть в 1,68 раза больше по сравнению с медным проводом при одной и той же величине общего сопротивления. Если же сравнить вес алюминиевого и медного проводов одной и той же длины и одинакового электрического сопротивления, то алюминиевый провод все же будет иметь меньший вес – почти в два раза по сравнению с медным проводом.

Алюминиевые провода соединяют друг с другом горячей и холодной сваркой, а также пайкой с применением специальных припоев и флюсов. Холодная сварка производится в специальных устройствах, в которых торцевые поверхности соединенных проводов соприкасаются друг с другом при удельном давлении 10000-12 000 кгс/см<sup>2</sup>. При этом происходит процесс проникновения (диффузия) кристаллов из одного провода в другой. В результате этого провода надежно соединяются друг с другом.

В электротехнике в основном используют алюминий высокой чистоты АД0ч, в котором общее содержание примесей составляет 0,02 %, и алюминий технической чистоты АД000, АД00, АД0, в котором примесей соответственно 0,2; 0,3; 0,5 %,.

Все примеси, так же как и в меди, снижают проводимость алюминия, которая несколько ниже, чем у меди (см. табл. 1). Алюминий высокой чистоты обладает хорошей пластичностью, поэтому из него изготавливают конденсаторную фольгу толщиной 6-7 мкм. Технически чистый алюминий используют в виде проволоки в производстве кабелей и токонесущих проводов. Алюминий уступает меди в электрической проводимости и прочности, но он значительно легче, больше распространен в природе. При замене медного провода алюминиевым последний должен иметь диаметр в 1,3 раза больше, но масса его и в этом случае будет в 2 раза меньше. Так же, как и медь, алюминий используют или в отожженном, или нагартованном состоянии (см. табл. 3). Для токонесущих проводов воздушных линий электропередачи с большими расстояниями между опорами используют алюминиевые

сплавы (*Al-Mg-Si*) более прочные, чем чистый алюминий. Легирование алюминия магнием и кремнием в небольших количествах (менее 1 % каждого) несколько ухудшает электрическую проводимость, но упрочняет сплав, практически не ухудшая пластичность и коррозионную стойкость:  $\sigma_B=350$  МПа при  $\rho=0,032$  мкОм·м. Алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на поверхности защитной оксидной пленки  $Al_2O_3$ . Эта пленка затрудняет пайку алюминиевых проводов обычными методами. Необходим специальный припой или ультразвуковые паяльники. Места контакта алюминиевого провода с медным следует покрывать лаком для защиты от атмосферной коррозии. Во влажной атмосфере алюминий в контакте с медью быстро разрушается вследствие электрохимической коррозии.

#### *Проводниковые железо и сталь.*

В природе железо находится в различных соединениях с кислородом ( $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  и др.). Выделить химически чистое железо из этих соединений чрезвычайно трудно. По электрическим и магнитным свойствам к химически чистому железу приближается железо, очищенное от примесей электролитическим способом (электролитическое железо). Общее количество примесей в электролитическом железе не превышает 0,03 %.

Железо значительно уступает меди и алюминию по проводимости, но имеет большую прочность, что в некоторых случаях оправдывает его применение как проводникового материала. В таких случаях используют низкоуглеродистые качественные стали с содержанием углерода 0,1-0,15 %, а также стали обыкновенного качества. Эти стали обеспечивают достаточно высокую прочность  $\sigma_B=300-700$  МПа и идут на изготовление шин, трамвайных рельсов, рельсов метро и железных дорог с электрической тягой. Сечение провода определяется не электрической проводимостью, а механической прочностью материала.

Основными примесями в железе являются: кислород ( $O_2$ ), азот ( $N$ ), углерод ( $C$ ), сера ( $S$ ), фосфор ( $P$ ), кремний ( $Si$ ), марганец ( $Mn$ ) и некоторые другие. Кремний и марганец специально вводятся в железо в качестве раскислителей. Они легко соединяются с кислородом и образуют окислы, которые в расплавленном железе (стали) всплывают на поверхность в виде шлака и удаляются. Они улучшают механические свойства сталей, но, оставаясь в небольшом количестве в стали, снижают ее электропроводность. Сера и фосфор – вредные примеси; попадая в железо и сталь из руды и топлива, они вызывают хрупкость

сталей. Газы (азот и кислород) – тоже вредные примеси, так как они ухудшают электрические и магнитные свойства железа и сталей.

Важнейшей примесью, резко снижающей электропроводность железа, является углерод. Сплавы железа с углеродом называются сталями. Кроме углерода в сталях содержатся другие элементы, вводимые специально с целью получения тех или иных свойств (легирующие элементы).

Техническими сортами железа являются малоуглеродистые стали, содержание углерода в которых составляет от 0,01 до 0,1 %. В конструкционных углеродистых сталях углерод содержится в количестве от 0,07 до 0,7 %, а в инструментальных и других специальных (легированных) сталях – от 0,7 до 1,7 %.

Железо и сталь – наиболее дешевые и доступные проводниковые материалы, обладающие высокой механической прочностью при разрыве, но их применение ограничивается следующими недостатками. Железо и сталь имеют низкую коррозионную стойкость, т. е. они легко окисляются на воздухе — ржавеют и обладают повышенным удельным сопротивлением ( $\rho=0,10-0,14 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ) по сравнению с медью и алюминием. Электрическое сопротивление у железа и стали на переменном токе сильно возрастает, поскольку железо и сталь являются магнитными материалами. Поэтому ток в большей степени вытесняется из средней части провода к его поверхности (поверхностный эффект).

Для снижения этого эффекта и величины электрического сопротивления переменному току стараются применять стали с возможно меньшей величиной магнитной проницаемости.

Для изготовления стальной проволоки применяют сталь с содержанием углерода от 0,10 до 0,15 %, обладающую следующими свойствами: плотностью  $7,8 \text{ г}/\text{см}^3$ ; температурой плавления  $1392-1400 \text{ }^\circ\text{C}$ ; пределом прочности при растяжении  $\sigma_p = 55-70 \text{ кгс}/\text{мм}^2$ ; относительным удлинением  $\epsilon_p=4-5 \text{ } \%$ ; удельным сопротивлением  $\rho = 0,135-0,146 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ; температурным коэффициентом сопротивления  $\alpha=+0,0057 \text{ 1}/^\circ\text{C}$ .

Для защиты от атмосферной коррозии стальные провода покрывают тонким слоем цинка (0,016-0,020 мм).

Стальную проволоку и шины применяют также в качестве сердечников в биметаллических проводниках, обеспечивающих значительную экономию проводниковой меди. Биметаллические проводники применяют в электрических аппаратах (рубильники, контакторы и др.)

*Биметаллический провод* (стальной провод, покрытый медью) используют при передаче переменных токов повышенной частоты. Такая конструкция позволяет уменьшить электрические потери, связанные с ферромагнетизмом железа, и расход дефицитной меди. Проводимость определяет металл наружного слоя, так как токи повышенной частот вследствие скин-эффекта распространяются по наружному слою провода. Сердцевина из стали воспринимает силовую нагрузку. Покрытие создают гальваническим способом или плакированием. Наружный медный слой предохраняет железо от атмосферной коррозии. Биметаллический провод используют в линиях связи и электропередачи. Кроме этого, из биметаллического материала изготавливают шины для распределительных устройств, различные токопроводящие части электрических аппаратов.

### 1.1.2. Припой

Сплавы, используемые при пайке металлов высокой проводимости – припой, должны обеспечивать небольшое *переходное сопротивление* (сопротивление контакта). Различают припой двух типов: для низкотемпературной пайки, имеющие температуру плавления до 400 °С, и для высокотемпературной пайки с более высокой температурой плавления. Для получения хорошего соединения припой должен иметь более низкую температуру плавления, чем металл, подвергающийся пайке; в расплавленном состоянии припой должен хорошо смачивать поверхности. Температурные коэффициенты линейного расширения металла и припоя должны быть близки. Для этих целей используют припой на основе *Sn*, *Pb*, *Zn*, *Ag*, имеющих хорошую электрическую проводимость. Сплавы этих металлов образуют эвтектические смеси, электрическое сопротивление которых мало отличается от металлов, образующих сплав.

В приборостроении для *низкотемпературной пайки* применяют оловянно-свинцовые и оловянно-цинковые припой. Сплавы олова и свинца образуют диаграмму состояния эвтектического типа с твердыми растворами ограниченной растворимости. Сплав эвтектического типа (состав 61 % *Sn* и 39 % *Pb*) имеет низкую температуру плавления (183 °С) и хорошую жидкотекучесть, что обеспечивает качественное формирование шва и высокие механические свойства. Такой сплав обозначают ПОС-61. Применяют также сплавы доэвтектическо-

го ПОС-18, ПОС-30, ПОС-40, ПОС-50 и заэвтектического ПОС-90 составов. Цифра в марке указывает на содержание олова.

Свинец – очень мягкий металл светло-серого цвета, обладающий высокой пластичностью и коррозионной стойкостью к многим реагентам (серной и уксусной кислотам, аммиаку и некоторым другим).

Благодаря большой пластичности, гибкости и сравнительно невысокой температуре плавления (327 °С) свинец широко применяется для изготовления защитных оболочек электрических кабелей. Гибкая свинцовая оболочка предохраняет кабель от проникновения в него влаги и других агентов, снижающих качество изоляции.

Свинец используется также для получения мягких оловянно-свинцовых припоев (марки ПОС-30, ПОС-40, ПОС-61 и др.), а также в производстве легкоплавких вставок предохранителей и пластин для кислотных аккумуляторов.

Характерным свойством свинца является поглощение им рентгеновских лучей, поэтому свинец применяют в качестве защитных экранов в рентгеновских установках.

Свинец имеет следующие характеристики: плотность 11,35 г/см<sup>3</sup>; предел прочности при растяжении  $\sigma_p=1,3-2,0$  кгс/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение  $e_p=30-40\%$ ; удельное сопротивление  $\rho=0,207-0,222$  ом·мм<sup>2</sup>/м; температурный коэффициент сопротивления  $\alpha =+0,00387-0,00411$  1/°С.

Свинец выпускается шести сортов, отличающихся между собой содержанием примесей (железа, меди, висмута, магния, мышьяка и др.).

Недостатками свинца являются: слабая стойкость к вибрациям, что обусловлено его крупнокристаллическим строением, и низкая коррозионная стойкость по отношению к гниющим органическим веществам, а также к растворам извести, бетона и некоторым другим. Кабели со свинцовой оболочкой не рекомендуется прокладывать по эстакадам мостов, вблизи дорог и в других местах, где возможны сотрясения и вибрации, вызывающие разрушения свинца.

Чтобы повысить вибрационную стойкость и механическую прочность свинца, в него вводят различные присадки: сурьму, медь, кадмий и др.

Свинец, пары от расплавленного свинца и различные соединения свинца ядовиты. Работа с расплавленным свинцом должна производиться в специальных хорошо вентилируемых камерах. Свинец и его соединения (окись свинца  $PbO$ ; свинцовый сурик  $Pb_3O_4$  и др.) могут проникать внутрь организма через кожный покров при соприкоснове-

ниях со свинцовыми изделиями. Поэтому после работы со свинцом необходимо тщательно мыть руки. Работать со свинцом рекомендуется в предохранительных перчатках.

Свинец является дефицитным металлом и в производстве кабелей он заменяется алюминием или синтетическими материалами (поливинилхлоридом, полиэтиленом).

Припой  $Sn-Pb$  имеют переходное электрическое сопротивление  $\rho=0,14-0,21$  мкОм·м и применяются для пайки очень тонких проводов из меди и медных сплавов, а также в тех случаях, когда недопустим высокий нагрев в зоне пайки. Сплавы олова и цинка также образуют диаграмму эвтектического типа. Наилучшим припоем является сплав ПОЦ-90, отвечающий эвтектическому составу: 90%  $Sn$  и 10%  $Zn$ . Сплав имеет самую низкую температуру плавления (199 °С) из всех сплавов этой системы. Сплавы ПОЦ-70, ПОЦ-60, ПОЦ-40, также как и ПОЦ-90, используют для пайки алюминия и его сплавов. В тех случаях, когда требуется очень низкая температура (<100 °С) нагрева, для пайки используют сплавы висмута со свинцом, оловом, кадмием. В процессе сплавления металлы образуют между собой легкоплавкие тройные и более сложные эвтектики, чем и объясняется низкая температура плавления сплавов. Следует отметить, что такие припои не обеспечивают высокой прочности соединения. Кроме того, сплавы с висмутом хрупки.

Припои для *высокотемпературной пайки* обеспечивают более прочные соединения, чем припои для низкотемпературной пайки, так как вследствие высокой температуры нагрева происходит взаимная диффузия элементов основного металла и припоя. Переходное электрическое сопротивление таких припоев ниже, чем низкотемпературных припоев. В качестве высокотемпературных припоев используют медь, медно-цинковые и медно-фосфористые припои, а также припои, содержащие серебро. Медно-цинковые припои ПМЦ-36, ПМЦ-48, ПМЦ-54 (цифра указывает содержание меди) имеют переходное электрическое сопротивление в пределах 0,03-0,04 мкОм·м, температура плавления их при увеличении содержания меди возрастает от 825 до 880 °С. Применение медно-фосфористых припоев ПМФ7 (цифра указывает процентное содержание фосфора) позволяет вести пайку меди без флюса, что практически удобнее и проще. Припои, содержащие серебро, очень технологичны, так как обладают хорошей растворимостью и смачиваемостью; пригодны для пайки любых металлов и сплавов, обеспечивают соединения с хорошими механическими свойствами и имеют невысокое переходное сопротивление. Кроме сереб-

ра, содержание которого указывает цифра в марке, припой содержит медь или медь с цинком. В припоях ПСр-72, ПСр-61, ПСр-45, ПСр-10 переходное сопротивление возрастает от 0,022 до 0,065 мкОм·м, температура плавления соответственно изменяется от 779 до 920 °С.

### *1.1.3. Сверхпроводники*

Особую группу материалов высокой электрической проводимости представляют сверхпроводники. С понижением температуры электрическое сопротивление всех металлов монотонно падает. Однако есть металлы и сплавы, у которых электрическое сопротивление при критической температуре резко падает до нуля – материал становится сверхпроводником. Сверхпроводимость обнаружена у 30 элементов и около 1000 сплавов. Сверхпроводящие свойства обнаруживают многие сплавы со структурой упорядоченных твердых растворов и промежуточных фаз ( $\sigma$ -фаза, фаза Лавеса и др.). При обычных температурах эти вещества не обладают высокой проводимостью.

Переход металла в сверхпроводимое состояние связывают с фазовым превращением. Новое фазовое состояние характеризуется тем, что свободные электроны перестают взаимодействовать с ионами кристаллической решетки, они вступают во взаимодействие между собой. В результате этого электроны с противоположно направленными нейтронами спариваются. Результирующий спиновый момент становится равным нулю, и сверхпроводник превращается в диамагнетик. Все электронные орбитали располагаются на низких энергетических уровнях, где они перестают испытывать тепловые рассеяния, так как энергия, которую пара может получить от взаимодействия с ионами решетки, слишком мала, чтобы вызвать это рассеяние. Сверхпроводящее состояние разрушается не только в результате нагрева, но также в сильных магнитных полях и при пропускании электрического тока большой силы (критические значения поля и тока). Из всех элементов, способных переходить в сверхпроводящее состояние, ниобий имеет самую высокую критическую температуру перехода ( $-263,83$  °С). Практическое использование нашли сверхпроводящие сплавы с высоким содержанием ниобия, такие как 35БТ, 65БТ, 50БТ, 70ТМ, 60ТБЛ и др. Сплав 35БТ (60-65 % *Ti*; 33,5-36,5 % *Nb*, 1,7-4,4 *Zn*) имеет критическую температуру перехода 9,7 К ( $-263,3$  °С). Критические значения плоскости тока составляют  $2,8 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>, напряженность магнитного поля –  $(6-7,2) \cdot 10^6$  А/м. Сплав 35БТ применяют для обмот-

ки мощных генераторов, магнитов большой мощности (например, поезда на магнитной подушке), туннельных диодов. Способность сверхпроводников, являющихся диамагнетиками, выталкивать магнитное поле, используют в магнитных насосах, позволяющих генерировать магнитные поля колоссальной напряженности, а также в криогенных гироскопах. Якорь гироскопа, изготовленный из сверхпроводника, «плавает» в магнитном поле. Отсутствие опор и подшипников устраняет трение и повышает долговечность гироскопа.

Сортамент промышленных сверхпроводящих сплавов включает проволоку диаметром 0,27 и 0,33 мм из сплавов 65БТ, 50БТ и 35БТ, диаметром от 0,2 до 0,01 мм из сплавов 70ТМ и 60ТБЛ и диаметром от 0,2 до 1,5 мм из сплава 30БТЦ. Все сверхпроводящие провода заключены в медную рубашку с толщиной стенки 0,04; 0,07 и 0,08 мм. Длина провода – 2000 м.

#### *1.1.4. Контактные материалы*

Электрические контакты подразделяют на разрывные, скользящие и неподвижные. Основное требование для всех контактов – малое *переходное электрическое сопротивление*.

*Разрывные контакты.* Эти контакты предназначены для периодического замыкания и размыкания цепи и работают в наиболее трудных условиях. В процессе работы разрывных контактов возникает искра или электрическая дуга, что вызывает коррозию и электроэрозионный износ. В результате происходит окисление контакта. Это повышает переходное электрическое сопротивление, вызывает разогрев и сваривание (или прилипание) контакта. Электроэрозионное изнашивание приводит к появлению на контактных поверхностях кратера на одном контакте и иглы – на другом. Это объясняется тем, что металл контакта плавится, испаряется, распыляется на рабочей поверхности и переносится с одного контакта на другой.

Сопротивление электроэрозионному изнашиванию в металлах растет с повышением температуры плавления, в сплавах оно дополнительно повышается с ростом твердости и прочности. Из сказанного следует, что материал для разрывных контактов должен иметь не только небольшое переходное электрическое сопротивление, но и хорошее сопротивление коррозии и электроэрозионному изнашиванию.

В зависимости от электрической мощности разрывные контакты подразделяют на слабонагруженные и высоконагруженные. Слабона-



груженные контакты изготавливают из благородных металлов: золота, серебра, платины, палладия и их сплавов, которые обладают низким переходным электрическим сопротивлением и повышенной стойкостью против окисления. Высоким сопротивлением электроэрозионному изнашиванию эти металлы и сплавы не обладают, поэтому их можно использовать только в слабонагруженных контактах.

Обычно материалами для таких контактов служат серебро и сплавы на его основе. Серебро является благородным металлом. Основным преимуществом серебра является его высокая электрическая проводимость. Однако при воздействии электрической дуги оно окисляется и подвергается электроэрозионному изнашиванию. Окисление не приводит к значительному росту переходного электрического сопротивления, так как оксид серебра электропроводен и при нагреве восстанавливается.

Окисление серебра на воздухе наблюдается при температурах от 200 °С и выше. Серебро, как и платина, обладает высокой пластичностью, позволяющей получать из него тонкую фольгу и проволоку диаметром до 0,01мм. Плотность серебра равна 10,5 г/см<sup>3</sup>, а температура плавления 960,5° С.

Основные характеристики проволоки из мягкого (отожженного) серебра следующие: предел прочности при разрыве  $\sigma_p=14-16$  кгс/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение  $e_p=45-50$  %; удельное сопротивление  $\rho=0,0150$  Ом·мм<sup>2</sup>/м; температурный коэффициент сопротивления  $\alpha=+0,00428$  1/°С. У проволоки из твердых сортов серебра:  $\sigma_p=30-32$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $e_p=4-5$  %;  $\rho=0,016$  Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $a=+0,00365$  1/°С.

Проводниковое серебро в чистом виде и в сплавах с кадмием или с медью применяется как материал для электрических контактов в электрических аппаратах (реле и др.).

Также из чистой платины, а главным образом из ее сплавов с иридием, родием и осмием, изготавливают контакты для выключающих аппаратов малой мощности (реле и др.).

Платина – металл серебристо-белого цвета, значительно тяжелее меди. Основные характеристики мягкой (отожженной) платины следующие: плотность 21,44 г/см<sup>3</sup>; предел прочности при растяжении  $s_p=15-16$  кгс/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение  $e_p=20$  %; удельное сопротивление  $\rho=0,105$  Ом·мм<sup>2</sup>/м; температурный коэффициент сопротивления  $a=+0,00392$  1/°С. Твердые сорта платины обладают следующими свойствами:  $\sigma_p=22-28$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $e_p=3-5\%$ ;  $\rho=0,108$  мм<sup>2</sup>/м;  $a=+0,00396$  1/°С. Температура плавления платины 1773,5° С.

Благодаря высокой пластичности платины из нее изготавливают фольгу толщиной до 0,005 мм (5 мкм) и проволоку диаметром до 0,002 мм, применяемую в качестве подвесов и струн в точных электроизмерительных приборах (электрометрах).

Платина является металлом весьма устойчивым к воздействию различных химических реагентов. Она не растворяется в отдельных кислотах, а с царской водкой реагирует значительно слабее, чем золото.

Окисление платины на воздухе наблюдается, начиная от 540 °С и выше. Введение в платину небольших количеств иридия *Ir* (3-6 %) или родия *Rh* (5-12 %) резко повышает стойкость платины к окислению при температурах 1000 °С и выше.

Платиновая проволока применяется для изготовления электронагревательных элементов лабораторных печей. Для измерения высоких температур (до 1500 °С) применяют термопары из платиновой и платинородиевой проволок.

Чистое серебро применяют в слабонагруженных контактах при небольшой частоте переключений. Серебро технологично при производстве проката и наиболее дешево из всех благородных металлов. Широко применяют также сплавы серебра с медью. Такие сплавы сохраняют высокую электрическую проводимость и имеют более высокие твердость и сопротивление электрическому изнашиванию, чем чистое серебро. Однако медь ухудшает стойкость сплавов против окисления, поэтому такие сплавы используют только в слабонагруженных контактах. Высоконагруженные контакты изготавливают из вольфрама, молибдена, их сплавов и порошковых композиций. Вольфрам благодаря своей тугоплавкости хорошо сопротивляется электроэрозионному изнашиванию. Несмотря на окисление, вольфрам имеет невысокое и устойчивое переходное сопротивление, так как он достаточно электропроводен, а оксидная пленка вольфрама при работе контакта разрушается. Кроме этого, такие контакты не свариваются при эксплуатации, их применяют при большой частоте переключения.

Такое же назначение имеют сплавы вольфрама с молибденом. Эти сплавы, содержащие 40-50% *Mo*, обладают высоким сопротивлением электроэрозионному изнашиванию, но вследствие образования непрерывного ряда твердых растворов, электрическое сопротивление сплавов и переходное электрическое сопротивление велики. Сплавы обладают пониженным сопротивлением газовой коррозии, так как молибден и вольфрам образуют легко испаряющиеся оксидные плен-

ки. Такие сплавы можно использовать для мощных контактов, но в среде инертных газов или в вакууме. Сплавы вольфрама с 45% *Mo* используют также для нитей накаливания электрических ламп и катодов, как сплавы повышенного электрического сопротивления.

В наиболее мощных контактах используют спеченные композиции вольфрама с серебром или медью, либо используют пористый вольфрам, который в вакууме пропитывают жидкой медью или серебром. Разработан способ обработки серебряно-медных контактов. Сплав СОМ-10, содержащий 10 % *Сu*, подвергают тщательному (50 ч) окислению при температуре 700 °С на воздухе. Благодаря большой растворимости и скорости диффузии кислорода в серебре, он проникает в металл и окисляет благородную медь. В результате такой обработки получается композиционный материал. Наличие оксидов меди повышает сопротивление свариванию и стойкость против электроэрозионного изнашивания. Такие сплавы применяют в тяжелых нагруженных контактах. Кроме того, такие материалы можно использовать в скользящих контактах, так как у них высокое сопротивление свариванию.

*Скользящие контакты.* К материалам для скользящих контактов предъявляют те же требования, что и для разрыва. Но основное требование – высокое сопротивление свариванию. Кроме окисленного серебряно-медного сплава скользящих контактов применяют композиции из порошков меди или серебра с небольшой добавкой графита, препятствующего свариванию (МГЗ, МГ5, СГЗ, СГ5). Цифра в марках указывает на содержание графита в процентах.

*Неподвижные контакты.* Эти контакты должны иметь низкое значение переходного электрического сопротивления. Кроме того, оно должно быть стабильным при небольших контактных усилиях. Поэтому для зажимных контактов выбирают коррозионно-стойкий материал, не образующий оксидных пленок высокого электрического сопротивления на контактной поверхности. Всем этим требованиям удовлетворяют: медь, латунь, цинк.

#### *1.1.5. Сплавы с повышенным электрическим сопротивлением*

В ряде случаев от проводниковых материалов требуется высокое удельное сопротивление, малый температурный коэффициент сопротивления и стойкость к окислению при повышенных температурах. Перечисленными свойствами обладают сплавы на основе меди, нике-

ля и марганца или железа и хрома, а также других металлов. Из чистых металлов сюда следует отнести ртуть, так как она обладает большим удельным сопротивлением ( $\rho=0,95 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ), но ртуть имеет ограниченное применение в электротехнике.

Наибольшее применение имеют проводниковые сплавы с большим удельным сопротивлением ( $\rho=0,42\text{-}2,0 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ). Проволока и ленты из этих сплавов используются для изготовления точных (образцовых) сопротивлений, пусковых и регулирующих реостатов, электронагревательных приборов и электрических печей сопротивления. В каждом из перечисленных случаев применения эти сплавы должны иметь дополнительные свойства, определяемые назначением прибора. Так, сплавы, используемые для изготовления точных сопротивлений, должны еще обладать малой ТЭДС при контакте (в паре) с медью. Кроме того, они должны обеспечивать постоянство электрического сопротивления во времени. Общим же свойством этих сплавов является их большое удельное сопротивление (от 0,42 до 2,0  $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ), поэтому они называются сплавами высокого электрического сопротивления. Эти сплавы представляют собой твердые растворы металлов неупорядоченной структуры. Они удовлетворяют перечисленным выше требованиям.

Сплавы с повышенным электрическим сопротивлением используют для прецизионных элементов сопротивления (обмоток потенциометров, шунтов, катушек сопротивления, резисторов, терморпар, тензометрических датчиков) и нагревательных элементов электрических приборов и печей.

Повышенным сопротивлением обладают металлические сплавы со структурой твердых растворов. Электрическое сопротивление таких сплавов выше сопротивления металлов, его составляющих. Сплавы высокого сопротивления должны обладать малым температурным коэффициентом электрического сопротивления, а также высокой жаростойкостью, что особенно важно для нагревательных элементов.

Т а б л и ц а 5 . Свойства реостатных сплавов

| Сплав                    | Массовая доля элементов, % |           |           | Электрические свойства |                              |                       |
|--------------------------|----------------------------|-----------|-----------|------------------------|------------------------------|-----------------------|
|                          | <i>Ni</i>                  | <i>Mn</i> | <i>Cu</i> | $\rho$ , мкОм·м        | $\alpha_p \cdot 10^5$ , 1/°C | $t_{\text{раб}}$ , °C |
| МНМц 40-1,5 (константан) | 39-41                      | 1-2       | Остальное | 0,48                   | 3                            | 500                   |
| МНМц 3-12 (манганин)     | 2,5-3,5                    | 11,6-13,5 |           | 0,43                   | 2                            | 200                   |

При использовании сплавов в электроизмерительных приборах в паре с медью от них требуется малая ТЭДС. В большинстве случаев сплавы используют в виде лент или проволоки, а поэтому они должны обладать хорошей пластичностью. Все сплавы с повышенным сопротивлением в зависимости от рабочей температуры делят на три группы. Сплавы, рабочая температура которых не выше 500 °С, используют для изготовления прецизионных элементов сопротивления. К ним относятся медные сплавы, легированные никелем и марганцем. Маркировка, химический состав и электрические свойства таких сплавов приведены в табл. 5. При легировании никелем медный сплав МНМц 40-1,5 (константан) имеет высокое значение удельного электрического сопротивления при 20 °С, малое значение  $\alpha_p$ . Однако из-за высокого значения ТЭДС в паре с медью константан применяется в основном только для изготовления термопар. Замена никеля в медном сплаве марганцем, сохраняя сопротивление и  $\alpha_p$ , понижает ТЭДС. Сплав МНМц 3-12 (манганин) имеет широкое применение для прецизионных элементов сопротивления: резисторов, теплодатчиков, шунтов и др. Для получения стабильных значений электрического сопротивления и коэффициента электрического сопротивления проволоку из манганина подвергают рекристаллизационному отжигу в вакууме при 400 °С, а после изготовления элементы сопротивления повторно нагревают (до 250 °С) для устранения остаточных напряжений.

Проводниковыми сплавами, применяемыми для изготовления точных (образцовых) сопротивлений, являются манганины. Они состоят из меди (*Cu*), марганца (*Mn*) и никеля (*Ni*). Наиболее распространенным является манганин состава *Cu* 86 %; *Mn* 12 %; *Ni* 2 %.

Для стабилизации свойств в манганины вводят железо (0,2-0,5 %) и алюминий (0,2-0,5 %). Цвет манганинов светло-оранжевый. Температура плавления 960 °С, плотность 8,4 г/см<sup>3</sup>.

Из манганина изготавливают мягкие и твердые сорта проволоки. Основные характеристики мягкой (отожженной) проволоки: предел прочности при растяжении  $\sigma_p=45-50$  кгс/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение  $e_p=10-20$  %; удельное сопротивление  $\rho=0,40-0,50$  Ом·мм<sup>2</sup>/м. Основные характеристики твердой манганиновой проволоки:  $\sigma_p=50-60$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $e_p=5-9$  %;  $\rho=0,42-0,52$  Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Манганиновая проволока выпускается диаметром от 0,02 до 1,0 мм. У манганиновой проволоки температурный коэффициент сопротивления находится в пределах  $a = +(3-6) \cdot 10^{-5}$  1/°С, у стабилизированных сортов манганина  $a = (0,5-1) \cdot 10^{-5}$  1/°С.

Эти данные показывают, что манганин имеет весьма малую зависимость электрического сопротивления от температуры, что очень важно для обеспечения постоянства величины сопротивления в точных электроизмерительных устройствах. Вторым достоинством манганина является очень малая ТЭДС, развиваемая этим сплавом в контакте с медью.

Для стабилизации электрических свойств манганиновой проволоки ее подвергают тепловой обработке в вакууме, заключающейся в выдержке в течение 1-2 ч при 400 °С и длительном выдерживании при комнатной температуре. В результате этого улучшается однородность сплава и стабилизируются его свойства.

Наибольшая допустимая рабочая температура для манганина 200 °С, но у нестабилизированных сортов манганина, начиная с 60 °С, уже наблюдается необратимое изменение свойств. Поэтому сопротивления из нестабилизированной манганиновой проволоки не рекомендуется нагревать выше 60 °С.

Кроме голой манганиновой проволоки, наша промышленность выпускает манганиновые обмоточные провода с эмалевой изоляцией (марки ПЭММ и ПЭМТ), с шелковой изоляцией (марки ПШДММ и ПШДМТ), а также провода, изолированные эмалью и одним слоем шелка (марки ПЭШОММ и ПЭШОМТ).

Константан также относится к медно-никелевым сплавам, но в отличие от манганина содержит значительно больше никеля. В состав константана входят: медь 60-65 % и никель 40-35 %.

Характерной особенностью константана является очень незначительная величина его температурного коэффициента сопротивления. Практически он принимается равным нулю. Поэтому электрическое сопротивление константана не изменяется с изменением температуры, что является достоинством сплава. Цвет константана серебристо-белый, температура плавления его 1270 °С, плотность 8,9 г/см<sup>3</sup>. Из константана изготавливают мягкие и твердые сорта проволоки диаметром от 0,03 до 5,0 мм.

Основные характеристики мягкой (отожженной) проволоки:  $\sigma_p=40-55$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $\rho=0,45-0,48$  Ом·мм<sup>2</sup>/м. Характеристики твердой проволоки:  $\sigma_p=65-72$  кгс/мм<sup>2</sup>;  $\rho=0,46-0,52$  Ом·мм<sup>2</sup>/м.

Константан в паре с медью создает большую ТЭДС, равную 39 мкВ/град, что не дает возможности применять константан в точных сопротивлениях и электроизмерительных приборах. Голая константановая проволока может использоваться при температурах, не превышающих 500 °С.

Константановая проволока применяется для изготовления реостатов и термопар. В последних константановая проволока чаще всего используется в паре с медной. Спай константановой и медной проволок при нагреве развивает значительную по величине ТЭДС, что дает возможность измерять температуру до 400 °С. При температурах выше 400 °С начинается сильное окисление меди.

Наша промышленность выпускает константановые обмоточные провода с эмалевой изоляцией (марки ПЭК, ПЭВКТ), провода, изолированные эмалью и одним слоем шелка (марки ПЭШОК), а также провода, изолированные эмалью и одним слоем хлопчатобумажной обмотки (марка ПЭБОК).

При нагревании голой константановой проволоки до 900 °С в течение нескольких секунд и последующего охлаждения на воздухе на ее поверхности образуется сплошная пленка из окислов. Она используется в качестве естественной изоляции между витками константановой проволоки, например в реостатах, где напряжение между витками не превосходит нескольких вольт.

Общим недостатком медных сплавов является их склонность к окислению при нагреве, что изменяет переходное электрическое сопротивление. Поэтому часто используют сплавы на основе серебра, палладия, золота, платины. Серебряный сплав с 10 % *Mn* и 8 % *Sn* имеет  $\rho=0,50$  мкОм·м. Значение  $\alpha_p$  близко к нулю после 10-часового старения при 175 °С. Такие сплавы используют при нагреве до 200 °С.

Сплавы, рабочая температура которых менее 1200 °С, используют также для элементов сопротивления и нагревательных элементов.

Т а б л и ц а 6. Свойства сплавов для нагревательных элементов

| Сплав           | Массовая доля элементов, % |           |              |              | Электрические свойства |                                 |                    |
|-----------------|----------------------------|-----------|--------------|--------------|------------------------|---------------------------------|--------------------|
|                 | <i>Cr</i>                  | <i>Al</i> | <i>Fe</i>    | <i>Ni</i>    | $\rho$ ,<br>мкОм·м     | $\alpha_p \cdot 10^5$ ,<br>1/°С | $t_{раб.}$ ,<br>°С |
| X23Ю5 (хромаль) | 21,5-24,5                  | 4,6-5,3   | Остальное    | Не более 0,6 | 1,37                   | 1,4                             | 1200               |
| X20Н80 (нихром) | 20-23                      |           | Не более 1,5 | Остальное    | 1,11                   | 9,0                             | 1100               |

Это сплавы на основе железа и никеля. Легирование хромом обеспечивает им высокое электрическое сопротивление и жаростойкость. Маркировка, химический состав и свойства таких сплавов приведены в табл. 6.

Для электронагревательных приборов нужны жаростойкие проводниковые сплавы высокого сопротивления, т. е. стойкие к окислению при высоких температурах. Кроме того, эти сплавы должны обладать малой величиной температурного коэффициента сопротивления  $\alpha$ . Перечисленным требованиям удовлетворяют сплавы двух типов: двойные сплавы на основе никеля ( $Ni$ ) и хрома ( $Cr$ ), называемые нихромами, и тройные сплавы на основе никеля, хрома и железа, называемые ферронихромами. Кроме того, находят применение тройные сплавы железа, хрома и алюминия, называемые фехралями и хромалями. Эти сплавы отличаются различным содержанием составляющих их компонентов и соответственно разной жаростойкостью и электрическими характеристиками.

Сплавы на основе железа недефицитны. В этом их преимущество по сравнению с нихромами. Однако дополнительное легирование алюминием для повышения жаростойкости ухудшает пластичность, что затрудняет получение проволоки малого сечения. Сплавы на основе железа используют для реостатов и нагревательных элементов в мощных электронагревательных установках и промышленных печах.

Для нагревательных элементов, применяемых в электронагревательных приборах и печах сопротивления, необходимы проволока и ленты, могущие длительно работать при температурах от 800 до 1200 °С. Описанные ранее чистые металлы (медь, алюминий и др.), а также сплавы (манганин и константан) не пригодны для этого, так как они интенсивно окисляются, начиная с температуры 300-500 °С. Образующиеся на них пленки окислов испаряются и не защищают металл от дальнейшего окисления.

Все перечисленные сплавы представляют собой твердые растворы металлов неупорядоченной структуры. При нагревании этих сплавов на их поверхности образуется плотная защитная пленка, состоящая из окиси хрома ( $Cr_2O_3$ ) и закиси никеля. Эта пленка устойчива при высоких температурах (900-1200 °С) и она надежно защищает сплавы от соприкосновения их с кислородом воздуха. Этим обеспечивается длительная работа проволоки и лент, изготовленных из жаростойких сплавов.

В марках сплавов буквы обозначают главные части сплава: хром (Х), никель (Н), алюминий (Ю) и титан (Т). Цифра, стоящая за соответствующей буквой, указывает (в среднем) количество этого металла в сплаве. Например, в нихrome марки Х20Н80 содержится хрома 20 %, а никеля 80 % (по весу). В то же время в обозначениях марок спла-



вов невозможно отразить точное содержание всех компонентов сплава.

Кроме основных компонентов, перечисленных, в состав жаростойких сплавов еще входят: углерод (0,06-0,15 %), кремний (0,5-1,2 %), марганец (0,7-1,5 %), фосфор (0,35 %) и сера (0,03 %). Сера, фосфор и углерод – вредные примеси, так как они повышают хрупкость сплавов. Марганец и кремний являются раскислителями, т. е. они позволяют устранить из сплавов кислород, ухудшающий их свойства. Присутствие в сплавах никеля, алюминия и особенно хрома обеспечивает жаростойкость сплавов (900-1200 °С).

Кроме того, эти компоненты увеличивают удельное сопротивление и снижают величину температурного коэффициента сопротивления, что и требуется для этих сплавов. Содержание в сплавах хрома больше 30 % приводит к повышенной хрупкости и твердости сплавов. Изготовление тонкой проволоки (диаметром 0,01 мм) производится из сплавов, в которых содержание хрома не превышает 20 %: это сплавы марок Х15Н6О и Х20Н80. Проволока диаметром больше 0,2 мм и лента толщиной 0,2 мм и выше изготавливаются из сплава остальных марок.

Железо, вводимое в сплавы типа фехраль, удешевляет их, но после нескольких нагревов у этих сплавов наблюдается резкое возрастание хрупкости. Поэтому спирали из сплавов типа фехраля и хромаля, проработавшие в электронагревательных приборах, не должны подвергаться деформации (при ремонте) в холодном состоянии. Сращивания и скрутки проволок из этих сплавов должны производиться в подогретом (300-400 °С) состоянии. Наибольшая допустимая температура для нагревательных элементов из фехраля равна 800-850 °С, а для нагревательных элементов из хромаля 1000-1200 °С.

Нагревательные элементы из нихрома могут длительно работать при температурах 900-1100 °С, не изменяя заметно своей пластичности и механической прочности. Однако они надежно работают лишь в стационарном режиме. При частых же включениях и выключениях, вызывающих резкое изменение температуры нихромовых спиралей, может происходить растрескивание защитных пленок на их поверхности. Это вызовет проникновение кислорода воздуха к поверхности нихрома и приведет к его окислению и разрушению.

При температурах выше 1200 °С (в вакуумных печах) используют сплавы на основе тугоплавких металлов *W*, *Mo*, *Ta*. Для изготовления нагревателей электрических печей (до 1500 °С) применяют также керамические материалы, например, силикатные стержни, которые

спекают из карбида кремния. Силикат является полупроводниковым материалом и имеет высокое электрическое сопротивление. Распространены также и нагреватели из дисилицида молибдена ( $MoSi_2$ ).

Из тугоплавких металлов наибольшее применение в электротехнике получили вольфрам и молибден.

Вольфрам – металл серого цвета с очень высокой температурой плавления  $3380\text{ }^\circ\text{C}$  и большой твердостью  $HB=350\text{ кг/мм}^2$  – для отожженного вольфрама. Вольфрам получают методом порошковой металлургии, т. е. в результате спекания спрессованных частиц металла.

Для получения механически прочного металла спеченные стержни подвергают многократной ковке и волочению с перемежающимися периодами отжига. В результате такой обработки вольфрам приобретает волокнистое строение, обеспечивающее ему высокую механическую прочность и пластичность. Из вольфрама изготавливают проволоку диаметром до  $0,01\text{ мм}$ . Окисление вольфрама на воздухе начинается при температуре от  $400\text{ }^\circ\text{C}$  и выше.

Основные характеристики вольфрама следующие: плотность  $19,3\text{ г/см}^3$ ; предел прочности при растяжении  $\sigma_p=50-100\text{ кгс/мм}^2$  (отожженный);  $\sigma_p=180-400\text{ кгс/мм}^2$  (твердотянутый); удельное сопротивление  $\rho=0,0503\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ; температурный коэффициент сопротивления  $\alpha=+0,0046\text{ 1/}^\circ\text{C}$  (отожженный);  $\rho=0,0550\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$  (твердотянутый).

Молибден – металл серебристо-белого цвета. Он отличается от вольфрама меньшей температурой плавления ( $2690\text{ }^\circ\text{C}$ ) и несколько пониженной твердостью ( $HB=250\text{ кг/мм}^2$ ). Как и вольфрам, молибден получают в результате спекания (при  $2300\text{ }^\circ\text{C}$ ) заготовок из спрессованных частиц металла. Полученные молибденовые заготовки подвергают ковке и прокатке.

Молибденовые листы и ленты толщиной более  $0,5\text{ мм}$  нельзя изгибать и штамповать при комнатной температуре во избежание их растрескивания. Для этих целей молибден нагревают до  $100-160\text{ }^\circ\text{C}$  в зависимости от его толщины. Окисление молибдена на воздухе начинается при температуре  $600\text{ }^\circ\text{C}$  и выше.

Основные характеристики молибдена: плотность  $10,3\text{ г/см}^3$ ; предел прочности при растяжении  $\sigma_p=140-240\text{ кгс/мм}^2$  (твердотянутый);  $\sigma_p=70-120\text{ кгс/мм}^2$  (отожженный); удельное сопротивление  $\rho=0,048\text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ; температурный коэффициент сопротивления  $\alpha=+0,0048\text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

Из вольфрама и молибдена изготавливают спирали накала, поддерживающие крючки, петли, катоды прямого накала и подогреватели катодов с косвенным накалом в электровакуумных приборах.

## 1.2. Полупроводниковые материалы

### *Основные характеристики и свойства полупроводников.*

Полупроводники при комнатной температуре занимают по удельному сопротивлению, имеющему значения  $10^{-6}$ - $10^9$  Ом·м, промежуточное положение между металлами и диэлектриками. По ширине запрещенной зоны к полупроводникам относят вещества, ширина запрещенной зоны которых лежит в диапазоне 0,1-3,0 эВ.

Приведенные данные следует считать ориентировочными, так как они относятся к нормальным условиям, но могут сильно отличаться в зависимости от температуры. В полупроводниковых материалах удельное электрическое сопротивление может изменяться в широких пределах и, как правило, очень быстро убывает с повышением температуры.

Удельная проводимость полупроводников в сильной степени зависит от вида и количества содержащихся в них примесей и дефектов. Для них характерна чувствительность к свету, электрическому и магнитному полю, радиационному воздействию, давлению и др.

В полупроводниках часто наблюдается смешанный тип химических связей: ковалентно-металлический, ионно-металлический и др. К ним относятся многие химические элементы и химические соединения:

- - простые вещества: германий, кремний; селен, теллур, бор, углерод, фосфор, сера, сурьма, мышьяк и др.;
- - окислы и сульфиды многих металлов:  $NiO$ ,  $Cu_2O$ ,  $CuO$ ,  $CdO$ ,  $PbS$  и др.;
- - тройные соединения:  $CuSbSr$ ,  $CuFeSe_2$ ,  $PbBiSe_3$  и др.;
- - твердые растворы  $GeSi$ ,  $GaAs_{1-x}P_x$  и др.;
- - органические красители и другие материалы: антрацен, фталоцианин, нафталин и другие.

Полупроводники могут быть жидкими или твердыми, кристаллическими или аморфными.

### *Простые полупроводники.*

Рассмотрим широко применяемые химические элементы.

*Германий* – элемент четвертой группы периодической системы, имеет ярко-серебристый цвет, обладает большой твердостью, но чрезвычайно хрупок и раскалывается на мелкие куски при ударах. Один из наиболее хорошо изученных полупроводников. Упрощенная технологическая схема производства германия показана на рис. 1.

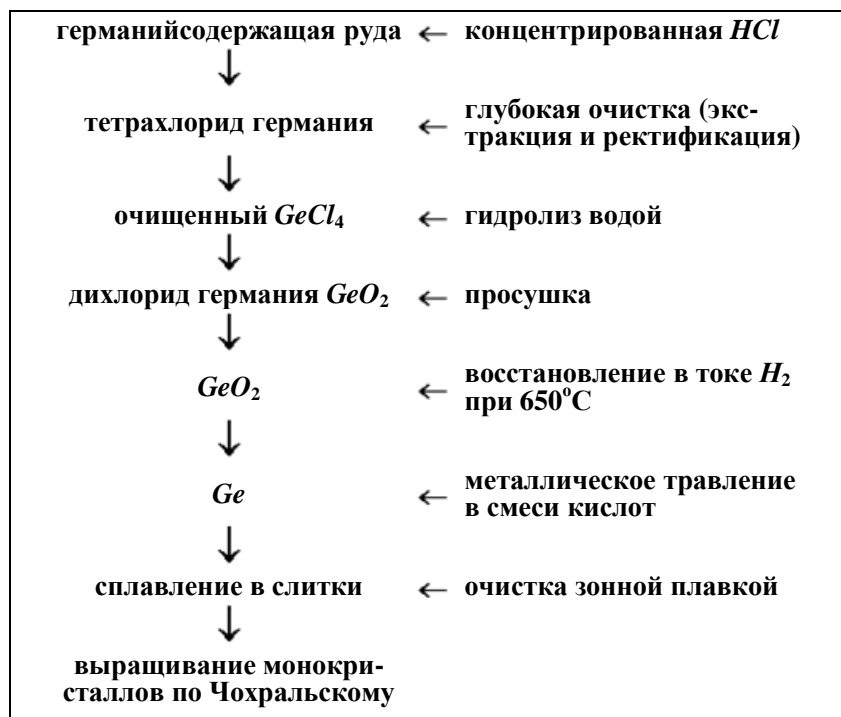


Рис. 1. Схема производства германия

При зонной очистке вдоль горизонтально расположенного образца создается 4-5 узких расплавленных зон, перемещающихся вдоль слитка. Примеси отесняются к концу слитка. Процесс повторяют много раз. Монокристаллы германия можно создавать диаметром до 300-500 мм.

Германий как полупроводниковый материал широко используется не только для диодов и триодов; из него изготавливаются мощные выпрямители на большие токи, различные датчики, применяемые для измерения напряженности магнитного поля, термометры сопротивления для низких температур и др. Германий применяется для изготовления диодов различных типов, транзисторов, датчиков Холла, тензодатчиков, детекторов ядерных излучений и в ИК-оптике. Рабочий диапазон германиевых приборов от  $-60$  до  $+70^\circ C$ .

Кристаллы германия и других полупроводников имеют атомную кристаллическую решетку. Плоская схема структуры кристалла германия изображена на рис. 2. Четыре валентных электрона каждого атома  $Ge$  связаны с такими же электронами соседних атомов химическими парноэлектронными связями (ковалентная связь). В чистом кристалле германия и в кристаллах других полупроводниковых элементов при низких температурах свободных электронов нет, и такие кристаллы в этих условиях являются хорошими диэлектриками.

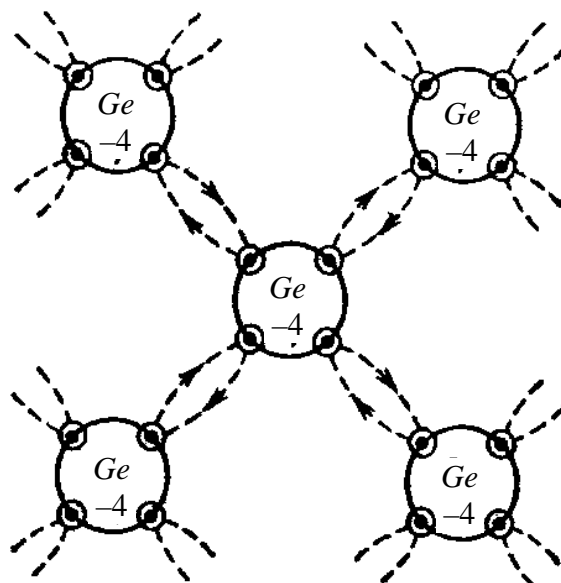


Рис. 2. Структура кристалла германия

*Кремний* широко распространен в природе. Полированный кремний приобретает металлический блеск стали; обладает хрупкостью. Применяется для изготовления многочисленных полупроводниковых приборов. Из кремния изготавливают точечные и плоскостные диоды и триоды, фотоэлементы и др. Кремний полупроводниковой чистоты получается по технологической схеме, приведенной на рис. 3.



Рис. 3. Схема производства кремния

*Селен* – элемент шестой группы периодической системы, принадлежит к группе редких элементов. В твердом состоянии селен может быть кристаллическим или аморфным. Селен используется для изготовления фотоэлементов – приборов, преобразующих световую энер-

гию в электрическую, а также многочисленных селеновых выпрямителей.

Некоторые характеристики германия, кремния, селена приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7. Характеристики полупроводниковых элементов

| Свойства  | Германий          | Кремний           | Селен            |
|---|-------------------|-------------------|------------------|
| Атомный номер                                       | 32                | 14                | 34               |
| Температура плавления, °С                           | 937               | 1412              | 218              |
| Собственное удельное сопротивление при 20 °С, Ом·м  | 0,47              | $2 \cdot 10^3$    | -                |
| Собственная концентрация носителей, м <sup>-3</sup> | $2 \cdot 10^{19}$ | $2 \cdot 10^{16}$ | -                |
| Ширина запрещенной зоны, эВ                         |                   |                   |                  |
| при 0 К   | 0,74              | 1,165             | 2,5              |
| при 300 К   | 0,65              | 1,12              | 2,0              |
| Подвижность электронов, м <sup>2</sup> /(В·с)       | 0,39              | 0,14              | -                |
| Подвижность дырок, м <sup>2</sup> /(В·с)            | 0,19              | 0,05              | $0,2 \cdot 10^2$ |

Каждый полупроводниковый материал обладает электронной и дырочной электропроводностями. Под действием приложенного электрического напряжения свободные электроны движутся от отрицательного к положительному полюсу источника тока, а дырки в направлении, противоположном движению электронов. Электрический ток в полупроводниках обусловлен движением сравнительно небольшого количества электронов. Эта характерная особенность полупроводников объясняется тем, что валентные электроны атомов, из которых состоят полупроводники, связаны со своими атомами и не могут двигаться, т.е. не являются свободными.

С повышением температуры возрастает число разрывов ковалентных связей и увеличивается количество свободных электронов в кристаллах чистых полупроводников. Это означает, что удельная электропроводность чистых полупроводников увеличивается с повышением температуры. Соответственно удельное сопротивление чистых полупроводников уменьшается при нагревании. Этим полупроводники существенно отличаются от металлов, у которых удельное сопротивление увеличивается при нагревании.

Кроме нагревания, разрыв ковалентной связи и возникновение собственной проводимости полупроводников могут быть вызваны освещением (фотопроводимость полупроводников), а также действием сильных электрических полей.

Когда кристаллический чистый полупроводник получает энергию, необходимую для разрыва ковалентных связей, и электрон уходит со своего места, электрическая нейтральность кристалла в этом месте нарушается. В том месте, откуда ушел электрон, возникнет избыточный положительный заряд – образуется *положительная дырка*. Она ведет себя как заряд, равный по абсолютному значению заряду электрона, но положительный по знаку. На освободившееся от электрона место – дырку – может переместиться соседний электрон, а это равносильно тому, что переместилась положительная дырка: она появится в новом месте, откуда ушел электрон.

Во внешнем электрическом поле электроны перемещаются в сторону, противоположную направлению напряженности электрического поля. Положительные дырки перемещаются в направлении напряженности электрического поля, т. е. в ту сторону, куда двигался бы положительный заряд под действием электрического поля. Процесс перемещения электронов и дырок во внешнем поле происходит по всему кристаллу полупроводника. Электропроводность чистого полупроводника, обусловленная упорядоченным перемещением дырок, называется собственной дырочной проводимостью (проводимостью *p*-типа). Температурная зависимость удельного сопротивления при дырочной проводимости аналогична той, которая характерна для электронной проводимости. Общая удельная электропроводность полупроводника складывается из проводимостей *n*- и *p*-типов.

*Примесной проводимостью* полупроводников называется их электропроводность, обусловленная внесением в их кристаллические решетки примесей (примесных центров). Примесными центрами являются: а) атомы или ионы посторонних химических элементов, внедренные в решетку полупроводника; б) избыточные атомы или ионы элементов полупроводников, внедренные в междоузлия решетки; в) различного рода другие дефекты и искажения в кристаллической решетке: пустые узлы, трещины, сдвиги, возникающие при деформациях кристаллов, и т. д.

Примеси вносят изменения в электропроводность полупроводников. При изменении концентрации примесей изменяется число носителей электрического тока – электронов и дырок. Возможность управления числом носителей тока (нагреванием или действием других факторов, например освещением) лежит в основе широкого применения полупроводников в науке и технике. В металлах такая возможность отсутствует.

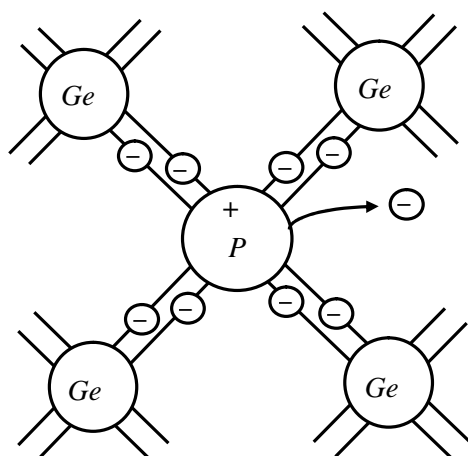


Рис. 4. Решетка германия с примесью фосфора

Примеси могут служить дополнительными поставщиками электронов в кристаллы полупроводников. Пусть, например, в решетке полупроводника один атом германия, имеющий четыре валентных электрона, заменен атомом примеси, который имеет пять валентных электронов (фосфор, мышьяк, сурьма). Четыре электрона примесного атома участвуют в образовании ковалентных связей с электронами соседних атомов германия, а пятый электрон не может участвовать в образовании ковалентной связи. Он является «лишним», слабее связан со своим атомом и легко может его покинуть и стать свободным электроном (рис. 4). Под действием электрического поля такие электроны приходят в упорядоченное движение в кристалле полупроводника, и в нем возникает электронная примесная проводимость. Полупроводники с такой проводимостью называются электронными или полупроводниками *n*-типа. Атомы примесей, поставляющие электроны, называются *донорами*.

При замещении в кристалле полупроводника одного атома с четырьмя валентными электронами атомом примеси, который имеет три валентных электрона (индий, бор, алюминий), наоборот, возникает недостаток одного электрона для образования всех ковалентных связей в решетке. Однако примесный атом может создать все связи, если он заимствует электрон у ближайшего основного атома в решетке. Тогда на месте электрона, ушедшего из основного атома, образуется положительная дырка, которая в свою очередь может быть заполнена электроном из следующего, соседнего атома решетки, и т. д. Последовательное заполнение положительных дырок электронами равносильно движению дырки в полупроводнике и появлению в нем носителей тока. Под действием электрического поля дырка перемещается



в направлении вектора напряженности поля, и в полупроводнике возникает дырочная примесная проводимость. Полупроводники с такой проводимостью называются примесными дырочными или полупроводниками  $p$ -типа. Атомы примесей, которые приводят к примесной дырочной проводимости, называются *акцепторами*.

Если в полупроводник одновременно вводятся и донорные и акцепторные примеси, то характер проводимости (ее  $n$ - или  $p$ -тип) определяется примесью с более высокой концентрацией носителей тока – электронов или дырок. При любом типе электропроводности полупроводника концентрация носителей тока в нем значительно меньше, чем в металлах. Но величина этой концентрации, как и энергия носителей тока в полупроводниках, в отличие от металлов, зависит весьма сильно от температуры. При нагревании число носителей тока резко возрастает.

*Электрические свойства контакта полупроводников  $p$ - и  $n$ -типов.*

Область монокристаллического полупроводника, в котором происходит смена проводимости с электронной на дырочную (или наоборот), называется *электронно-дырочным переходом* ( $p$ - $n$ -переходом). Обычно  $p$ - $n$ -переход образуется в кристалле полупроводника, где введением соответствующих примесей создаются области с различной ( $p$ - и  $n$ -) проводимостью.

При контактировании двух полупроводников с различными типами проводимости будет происходить взаимная диффузия носителей тока через границу соприкосновения (контакт) полупроводников. Электроны из  $n$ -полупроводника будут диффундировать в дырочный  $p$ -полупроводник. В результате из объема  $n$ -полупроводника, граничащего с контактом, уйдут электроны, этот объем будет обеднен электронами, и вблизи границы в нем образуется избыточный положительный заряд. Диффузия дырок из  $p$ -полупроводника по аналогичным причинам приведет к возникновению вблизи границы в  $p$ -полупроводнике избыточного отрицательного заряда. В результате на границе электронно-дырочного перехода образуется *запирающий электрический слой* толщины. Электрическое поле запирающего слоя препятствует дальнейшему переходу электронов и дырок через границу раздела двух полупроводников. Запирающий слой имеет повышенное сопротивление по сравнению с остальными объемами полупроводников.

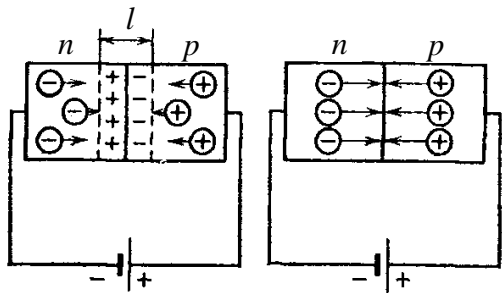


Рис. 5. Пограничный слой  $p$ - $n$ -перехода

Внешнее электрическое поле влияет на сопротивление запирающего электрического поля. Если  $n$ -полупроводник подключен к отрицательному полюсу источника, а плюс источника соединен с  $p$ -полупроводником, то под действием электрического поля электроны в  $n$ -полупроводнике и дырки в  $p$ -полупроводнике будут двигаться навстречу друг другу к границе раздела полупроводников. Электроны, переходя границу, «заполняют» дырки. При таком прямом (пропускном) направлении внешнего электрического поля толщина запирающего слоя и его сопротивление непрерывно уменьшаются (рис. 5). В этом направлении электрический ток проходит через границу двух полупроводников.

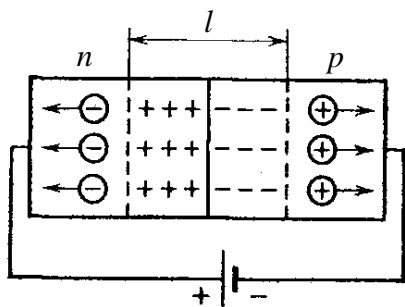


Рис. 6. Утолщение запирающего слоя

Если  $n$ -полупроводник соединен с положительным полюсом источника, а  $p$ -полупроводник – с отрицательным, то электроны в  $n$ -полупроводнике и дырки в  $p$ -полупроводнике под действием электрического поля будут перемещаться от границы раздела в противоположные стороны (рис. 6). Это приводит к утолщению запирающего слоя и увеличению его сопротивления.

Направление внешнего электрического поля, расширяющее запирающий слой называется *запирающим* (обратным). При таком направлении внешнего поля электрический ток через контакт двух  $n$ - и  $p$ -полупроводников практически не проходит.

Электронно-дырочный переход обладает односторонней (униполярной) проводимостью. Поэтому полупроводник с одним  $p$ - $n$ -переходом называется *полупроводниковым диодом*. Полупроводниковые диоды обладают целым рядом преимуществ перед электронными двухэлектродными лампами (экономия энергии для получения носителей тока, миниатюрность, высокая надежность и большой срок службы). Недостатком полупроводниковых диодов является ограниченный интервал температур, в котором они работают (приблизительно от  $-70$  до  $+125$  °C).

Чем выше температура полупроводника, тем более высокие энергетические состояния приобретают электроны и тем большее количество их способно участвовать в создании электрического тока. При

понижении температуры будет уменьшаться число свободных электронов и дырок, а вместе с ними и электропроводность полупроводника. Поэтому полупроводники при охлаждении приближаются к диэлектрикам по величине их электрического сопротивления.

Поскольку полупроводниковые материалы весьма чувствительны к повышению температуры, то этим свойством отдельных полупроводников пользуются для создания термосопротивлений, которые можно применять для изменения температур или стабилизации температуры в различных установках. Такие проводники можно использовать также для изготовления из них термоэлементов или термогенераторов, превращающих тепловую энергию в электрическую. Действительно, если один конец электронного полупроводника нагреть сильнее другого, то это вызовет перемещение электронов из горячего участка полупроводника (где их концентрация и энергия выше) в холодный. Тем самым в холодном участке создается преобладание отрицательных электрических зарядов и он зарядится отрицательно, а горячий участок, наоборот, зарядится положительно. На концах такого полупроводника появится разность потенциалов – ТЭДС. В полупроводниках с дырочной электропроводностью горячий участок зарядится отрицательно, а холодный – положительно.

Эти явления усиливаются, когда два различных полупроводника, соответственно подобранные, находятся в контакте друг с другом. Если создать из таких различных полупроводников замкнутую цепь и пропускать через них электрический ток от внешнего источника, то участок спая полупроводников будет или нагреваться или охлаждаться, в зависимости от природы полупроводников и направления электрического тока. Это явление используется для изготовления полупроводниковых холодильников, термисторов и других технических устройств.

Некоторые полупроводники резко повышают свою проводимость под действием световых излучений. Это вызывается тем, что световые излучения передают электронам определенные количества энергии, достаточные для того, чтобы освободить их из атома. Это свойство полупроводников называется фотопроводимостью. Кроме фотосопротивлений, на основе полупроводников разработаны фотоэлементы с запирающим слоем или вентильные. Они под действием световых излучений приобретают собственный источник электродвижущей силы при освещении полупроводниковой пары параллельно или перпендикулярно плоскости барьера. В освещенном и неосвещенном участке возникает различная концентрация электронов и создается

разность потенциалов. На этом принципе работают различные фотоэлементы и преобразователи солнечной энергии в электрическую – солнечные батареи.

Электрическое сопротивление полупроводниковых материалов не является величиной постоянной, а зависит от величины прикладываемого к нему напряжения. Электрическое сопротивление полупроводников уменьшается с увеличением приложенного к ним напряжения, а ток усиливается.

Электропроводность химически чистого полупроводника оказывается возможной в тех случаях, когда ковалентные связи в кристаллах разрываются. Например, нагревание до сравнительно невысоких температур приводит к разрыву ковалентных связей, появлению свободных электронов и возникновению собственной электронной проводимости (проводимости *n*-типа) чистого полупроводника. Энергия, которая должна быть затрачена для создания в кристаллах чистых полупроводников электропроводности, называется энергией активации собственной проводимости.

#### *Полупроводниковые материалы и изделия.*

Полупроводники составляют обширную область материалов, отличающихся друг от друга большим многообразием электрических и физических свойств, а также большим многообразием химического состава, что и определяет различные назначения при их техническом использовании. Изделия из полупроводниковых материалов называют полупроводниковыми элементами или приборами. По характеру выполняемой ими работы в электрических устройствах они весьма многообразны. К ним в первую очередь относятся полупроводниковые выпрямители (диоды) и усилители (триоды).

По химической природе современные полупроводниковые материалы можно разделить на следующие четыре главные группы.

1. Кристаллические полупроводниковые материалы, построенные из атомов или молекул одного элемента. (германий, кремний, селен, бор). Эти химические элементы принадлежат к IV и VI группам периодической системы, и на внешней электронной оболочке атомов этих элементов находятся четыре валентных электрона.

2. Окисные кристаллические полупроводниковые материалы (закись меди, окись цинка, двуокись титана, окись никеля).

3. Кристаллические полупроводниковые материалы на основе соединений 3-й и 5-й групп периодической системы элементов Менделеева (соединения сурьмы с индием, галлием и алюминием).

4. Кристаллические полупроводниковые материалы на основе соединений серы, селена и теллура с одной стороны и меди, кадмия и свинца с другой.

*Основные параметры полупроводников.*

Из электрофизических параметров важнейшими являются: удельная электрическая проводимость (или величина обратная ей – удельное электрическое сопротивление), концентрация электронов и дырок, температурные коэффициенты удельного сопротивления, ширина запрещенной зоны, энергия активации примесей, работы выхода, коэффициента диффузии носителей заряда и другие. Для некоторых применений важны коэффициент ТЭДС и коэффициент термоэлектрического эффекта, коэффициент Холла и т.п.

К фундаментальным параметрам относятся плотность, постоянная кристаллической решетки, коэффициент теплопроводности, температура плавления и др.

Все полупроводниковые материалы бывают монокристаллическими (изготавливаются в виде больших одиночных кристаллов, из которых вырезают по определенным кристаллическим направлениям пластинки различных размеров для использования их в выпрямителях, усилителях, фотоэлементах) и поликристаллическими (представляют собой смесь множества малых кристалликов, беспорядочно спаянных друг с другом).

Свободными носителями заряда в полупроводниках как правило, являются электроны, возникающие в результате ионизации атомов самого полупроводника (*собственная проводимость*) или атома примеси (*примесная проводимость*). В некоторых полупроводниках носителями заряда могут быть ионы.

При отсутствии электрического поля дырка, как и электрон, будет совершать хаотические колебания, при этом происходят и обратные переходы электронов из зоны проводимости на свободные уровни валентной зоны (рекомбинация).

Электропроводность, возникающая под действием электрического поля за счет движения электронов и в противоположном направлении такого же количества дырок, называется собственной.

Для собственного полупроводника концентрация носителей определяется шириной запрещенной зоны и значением температуры.

*Примесная проводимость.* Поставка электронов в зону проводимости и дырок в валентную зону может быть за счет примесей, которые могут ионизоваться уже при низкой температуре. Энергия их активации значительно меньше энергии, необходимой для ионизации

основных атомов вещества. Примеси, поставляющие электроны в зону проводимости, занимают уровни в запретной зоне вблизи дна зоны проводимости. Они называются донорными. Примеси, захватывающие электроны из зоны проводимости, располагаются на уровнях в запретной зоне вблизи потолка валентной зоны и называются акцепторными.

Примеси с энергией менее 0,1 эВ являются оптимальными. Их относят к «мелким» примесям. Мелкие уровни определяют электропроводность полупроводников в диапазоне температур 200-400 К, «глубокие» примеси ионизируются при повышенных температурах. Глубокие примеси, влияя на процессы рекомбинации, определяют фотоэлектрические свойства полупроводников. С помощью глубоких примесей можно компенсировать мелкие и получить материал с высоким удельным сопротивлением. Например, глубокими акцепторами можно полностью компенсировать влияние мелких донорных примесей.

Подвижность носителей заряда в полупроводниках зависит от температуры, так как тепловое хаотическое колебание частиц мешает упорядоченному движению.

Основные причины, влияющие на температурную зависимость подвижности, это рассеяние на:

- тепловых колебаниях атомов или ионов кристаллической решетки;
- на атомах или ионах примесей;
- на дефектах решетки (пустых узлах, искажениях, связанных с внедрением иновалентных ионов, дислокациями, трещинами и т.д.).

При низких температурах преобладает рассеяние на примесях. При высоких температурах преобладает рассеяние на тепловых колебаниях решетки.

Концентрация носителей заряда также зависит от температуры. Однако, при увеличении концентрации носителей заряда в полупроводниках выше определенного предела она практически перестает зависеть от температуры. Для электронов критическая концентрация имеет порядок  $10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Такие полупроводники называются вырожденными.

Увеличением концентрации примесей с низкой подвижностью в данном примесном полупроводнике можно добиться увеличения его удельного сопротивления.

Так, используя глубокий акцептор хром можно получить арсенид галлия с удельным сопротивлением до  $10^6$  Ом·м. Такие полупроводники относятся к высокоомным компенсированным.

*Основные эффекты в полупроводниках и их применение.*

С точки зрения применения в электротехнике к важнейшим относятся эффекты выпрямления, усиления (транзисторный эффект), Холла, Ганна, фотоэлектрический, термоэлектрический.

*Электронно-дырочный p-n переход.* Выпрямительными свойствами обладает лишь p-n переход и контакт полупроводника с другими металлами. p-n переход представляет собой границу, отделяющую друг от друга области с дырочной и электронной проводимостью в примесном полупроводнике. Переход должен быть непрерывным. В цепи с переменным электрическим полем p-n переход работает как выпрямитель.

*Эффект Холла* заключается в возникновении ЭДС Холла на гранях полупроводникового бруска с током, помещенного в магнитное поле. Величина ЭДС Холла определяется векторным произведением тока  $I$  и магнитной индукции  $B$ . Знак ЭДС Холла легко определить по правилу левой руки. Отогнув в сторону большой палец, найдем направление смещения основных носителей заряда для данного типа полупроводника.

Наиболее часто датчики Холла изготавливают на основе селенида и теллурида ртути ( $HgTe$ ,  $HgSe$ ), антимонида индия ( $InSb$ ) и других полупроводниковых материалов в виде тонких пленок или пластинок. С их помощью возможно измерение магнитной индукции или напряженности магнитного поля, силы тока и мощности, а при подведении к контактам переменных напряжений – и преобразование сигналов. По измерению ЭДС Холла можно определить знак носителей заряда, рассчитать их концентрацию и подвижность.

*Эффект Ганна* – относится к эффектам сильного поля и заключается в появлении высокочастотных колебаний электрического тока при воздействии на полупроводник электрического поля высокой напряженности.

Впервые этот эффект наблюдался на арсениде галлия  $GaAs$  и фосфиде индия  $InP$ . На основе этого эффекта разработаны приборы, генерирующие в диапазоне частот до сотен гигагерц.

*Фотоэлектрический эффект.* При облучении полупроводников светом в них можно возбудить проводимость. Наиболее чувствительные фотосопротивления изготавливаются из сернистого кадмия ( $CdS$ ) и сернистого свинца ( $PbS$ ). Используются и другие полупро-

водниковые материалы. Единственным материалом для интегральных датчиков является кремний.

Полупроводники используются в том числе и в оптоэлектронных устройствах: светодиодах, лазерах, фотодетекторах (датчиках), солнечных батареях, фильтрах.

ТЭДС в полупроводниках, как и в металлах возникает под действием разности температуры. Основой преобразователей тепловой энергии в электрическую являются термоэлементы, составленные из последовательно включенных полупроводников *p* и *n*-типов. Большая ТЭДС полупроводников позволяет использовать их в качестве эффективных преобразователей тепловой энергии в электрическую.

### 1.3. Магнитные материалы

#### 1.3.1. Классификация веществ по магнитным свойствам

*Диамагнетики* – вещества, в которых в «чистом» виде проявляется диамагнитный эффект, являющийся результатом воздействия внешнего магнитного поля на молекулярные токи. Магнитный момент, возникающий при этом эффекте, направлен навстречу внешнему полю.

Примеры диамагнетиков: все вещества с ковалентной химической связью, щелочно-галогидные кристаллы, неорганические стекла, полупроводниковые соединения  $A_3B_5$ ,  $A_2B_6$ , кремний, германий, бор и другие. Ряд металлов: медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и другие, водород, азот, вода и другие.

*Парамагнетики* – вещества с нескомпенсированными магнитными моментами и отсутствием магнитного атомного порядка. Магнитный момент парамагнетика равен нулю. Под действием внешнего поля из-за преимущественной ориентации магнитных моментов в направлении поля появляется намагниченность.

Примеры парамагнетиков: щелочные и щелочно-земельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля, редкоземельных металлов, кислород, окись азота, *Al*, *Na*, *Mg*, *Ta*, *W*, *CaO*, *CoO* и другие.

*Ферромагнетики* – вещества, в которых (ниже температуры Кюри) наблюдается магнитная упорядоченность, соответствующая параллельному расположению спинов в макроскопических областях (доменах) даже в отсутствие внешнего магнитного поля.



Примеры ферромагнетиков: железо, никель, кобальт, их соединения и сплавы, некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия и др. При низких температурах некоторые редкоземельные элементы - гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий. Сплавы  $RCO_5$ , где  $R$  редкоземельный элемент ( $Sm$ ,  $Ce$  или  $Pr$ ).

*Антиферромагнетики* – характеризуются антиферромагнитным атомным порядком, возникающим из-за антипараллельной ориентации одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки. При нагревании магнитная упорядоченность исчезает при температуре, называемой точкой Нееля (антиферромагнитная точка Кюри).

Примеры антиферромагнетиков: хром, марганец, цезий, неодим, самарий и другие. Химические соединения на основе металлов переходной группы типа окислов, галогенидов, сульфидов, карбонатов и др.  $MnSe$ ,  $FeCl_2$ ,  $FeF_2$ ,  $CuCl_2$ ,  $MnO$ ,  $FeO$ ,  $NiO$ .

*Ферримагнетики* – вещества с нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Как и антиферромагнетизм существует при температуре не выше точки Нееля. Выше этой температуры ферримагнетики переходят в парамагнитное состояние.

К ферримагнетикам относятся некоторые упорядоченные металлические и различные оксидные соединения, наибольший интерес среди которых представляют ферриты  $MnO \cdot Fe_2O_3$ ,  $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ ,  $(NiO \cdot ZnO)Fe_2O_3$ ,  $Li_2O \cdot Fe_2O_3$  и другие.

Ферро- и ферримагнетики относятся к сильномагнитным материалам, остальные группы к слабомагнитным веществам.

*Аморфные магнитные материалы.* Магнитный порядок наблюдается и в некоторых химических соединениях в аморфном состоянии, в которых имеет место обменное взаимодействие (обмен энергией) между ближайшими соседними атомами. Металлические магнитомягкие аморфные сплавы состоят из одного или нескольких переходных металлов ( $Fe$ ,  $Co$ ,  $Ni$ ), сплавленных со стеклообразователем – бором, углеродом, кремнием или фосфором.

*Спиновые магнитные стекла.* Это сильномагнитные вещества с ферромагнитным порядком, если магнитные свойства в них возникают в результате косвенных обменных взаимодействий через электроны проводимости и с антиферромагнитным порядком, если возбуждение происходит через промежуточные немагнитные атомы. Такими структурами могут быть также проводящие сплавы с малым содержанием переходных элементов.

Все магнитные материалы делятся на магнитомягкие, магнитотвердые и магнитные материалы специального назначения.

*Магнитомягкие* материалы способны намагничиваться до насыщения в слабых полях, обладают высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на перемагничивание. Применяются в основном в качестве магнитопроводов дросселей, трансформаторов, электромагнитов, электрических машин и т.д.

*Магнитотвердые* материалы отличаются большой удельной энергией, которая тем больше, чем больше остаточная индукция и коэрцитивная сила материала. Используются главным образом для постоянных магнитов.

Намагничивание магнитомягких материалов происходит в основном за счет смещения междоменных границ, а в магнитотвердых – за счет вращения вектора намагниченности (в магнитотвердых материалах на основе редкоземельных элементов преобладают процессы смещения).

Магнитные материалы специального назначения – это материалы с прямоугольной петлей гистерезиса, магнитострикционные, термомагнитные, ферриты СВЧ и другие.

### *1.3.2. Природа ферромагнетизма*

Возникновение магнитных свойств у ферромагнетиков связано с их доменным строением. Домены – это области самопроизвольной намагниченности, возникающие даже в отсутствие внешнего магнитного поля, в которых магнитные моменты атомов ориентированы параллельно.

Атомы или ионы приобретают магнитный момент, как правило, если они имеют нескомпенсированные спины электронов. Например в атомах железа на внутренней 3d-оболочке имеется четыре нескомпенсированных спина. Так как самопроизвольная намагниченность относится к внутриатомным явлениям, то ее природа может быть установлена только на основе квантово-механических понятий. Главную роль в возникновении ферромагнитного состояния играют силы обменного взаимодействия между атомами, имеющие квантовый характер и по происхождению являющиеся электростатическими. Критерием ферромагнетизма является существование незаполненных внутренних электронных оболочек, радиус которых должен быть мал по сравнению с расстоянием между ядрами в решетке.

Каждый реальный магнитный материал разделен по всему объему на множество замкнутых областей – доменов, в каждом из кото-

рых самопроизвольная намагниченность однородна и направлена по одной из осей легкой намагниченности. Такое состояние энергетически выгодно и кристалл в целом немагнитен, так как магнитные моменты доменов ориентированы в пространстве равновероятно. Объем доменов может колебаться в широких пределах ( $10^{-1}$ - $10^{-6}$  см<sup>3</sup>).

Ширина границы между антипараллельными доменами для железа  $13 \cdot 10^{-8}$  м, то есть около 500 элементарных ячеек. Толщина границы зависит главным образом от соотношения энергий: обменной, магнитной анизотропии и магнитоупругой. Размеры самих доменов зависят от неметаллических включений, границ зерен, скоплений дислокаций и других неоднородностей. Обычно домены имеют правильную форму.

В магнитных материалах, предназначенных для устройств записи и хранения информации, создаются изолированные цилиндрические магнитные домены (ЦМД). Емкость отдельного ЦМД-элемента может достигать  $10^5$  бит. В отсутствие внешнего магнитного поля смещения в ЦМД-материалах доменная структура имеет вид либо ЦМД-решетки, либо полосовой структуры.

Если образец был размагничен, то зависимость индукции от напряженности внешнего магнитного поля называется кривой намагничивания. В процессе намагничивания образца основную роль играют два процесса – смещение доменных границ и вращение векторов намагниченности доменов. Процесс намагничивания сопровождается магнитный гистерезис.

### 1.3.3. Магнитомягкие материалы

Наиболее широко применяемыми магнитно-мягкими материалами являются технически чистое железо, листовая электротехническая сталь, сплавы железа и никеля с различным содержанием никеля, получившие название пермаллоев, и альсиферы – сплавы железа, кремния и алюминия. Все эти материалы обладают высокой магнитной проницаемостью, весьма малой коэрцитивной силой, большой магнитной индукцией и малыми потерями на гистерезис.

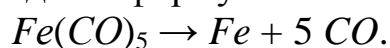
*Технически чистое железо и электротехническая сталь.*

Технически чистое железо называется *армко-железо*. Оно содержит небольшое количество примесей: углерода 0,025 %, кремния 0,02 %, марганца 0,035 %, серы 0,01 %; кислород почти полностью отсутствует. Удаление кислорода, вредно влияющего на магнитные свой-

ства железа, достигается введением кремния и марганца, которые с растворенным в железе кислородом образуют окислы, переводимые в шлак. В результате этого железо восстанавливается, а окислы удаляются со шлаком.

Другим видом технически чистого железа является электролитическое железо. Его получают методом электролитического осаждения из раствора сернокислого или хлористого железа, затем промывают и размалывают в шаровых мельницах. Существенным недостатком такого изготовления железа является наличие в нем водорода. Для удаления водорода железо переплавляют или отжигают в вакууме.

Значительное применение получило технически чистое железо высокой химической чистоты, называемое карбонильным железом. Оно представляет собой порошок, который выделяется из соединения  $Fe(CO)_5$  (карбонил железа) при температурах 200-250 °С и давлении 150 атм. При таком нагреве карбонил железа (жидкость) распадается на железо и окись углерода по формуле



Железо осаждается в виде мелкого порошка. Оно совершенно не содержит таких примесей, как кремний, фосфор и сера; кислород и углерод содержатся в очень небольших количествах (табл. 8). Для удаления из него углерода производят отжиг металла в среде водорода.

Карбонильное железо используется главным образом для изготовления магнитных сердечников, работающих на высоких частотах. Для этого порошок карбонильного железа предварительно смешивается с порошком какого-либо органического диэлектрика (полистирол, бакелит и др.). Из этой смеси получают горячим прессованием сердечники различной формы. Наличие в сердечниках изоляционных прослоек между зернами железа приводит к уменьшению потерь на вихревые токи, которые особенно велики на высоких частотах.

Т а б л и ц а 8. Магнитные характеристики технически чистого железа

| Наименование                            | Примеси, % |          |         | Характеристики |              |            |
|---|------------|----------|---------|----------------|--------------|------------|
|   | углерод    | кислород | $\mu_H$ | $\mu_M$        | $H_C$ , а/см | $B_S$ , тл |
| Армко-железо                            | 0,025      | -        | 250     | 650            | 0,64         | 0,78       |
| Электролитическое железо                | 0,02       | 0,01     | 500     | 15000          | 0,28         | 1,05       |
| Карбонильное железо                     | 0,008      | -        | 3000    | 21000          | 0,064        | 0,6        |
| Железо, обработанное в водородной среде | 0,005      | 0,003    | 6000    | 200000         | 0,024        | -          |

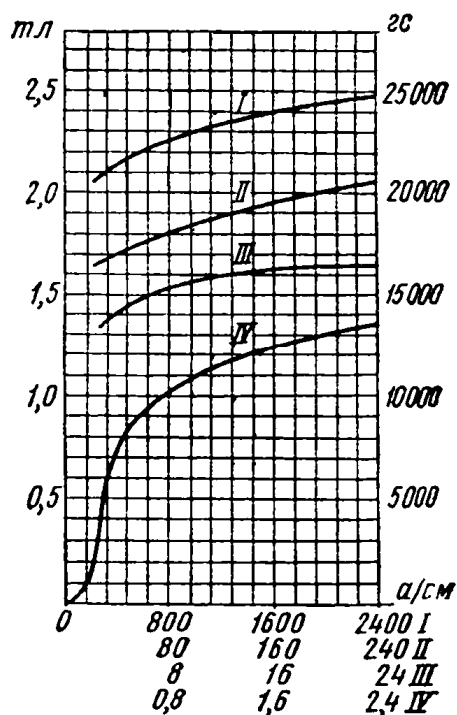


Рис. 7. Кривые намагничивания электролитического железа, переплавленного в вакууме

В табл. 8 приведены основные магнитные характеристики технически чистых сортов железа.

На рис.7 приведена кривая намагничивания для электролитического железа, переплавленного в вакууме.

Наибольшее применение в электротехнике получила листовая электротехническая сталь. Эта сталь является сплавом железа с кремнием, содержание которого в ней 0,8-4,8 %.

Кремний вводится в железо в виде ферросилиция (сплав силиката железа  $FeSi$  с железом) и находится в нем в растворенном состоянии. Кремний реагирует с наиболее вредной (для магнитных свойств железа) примесью кислородом, восстанавливая железо из окислов  $FeO$  и образуя кремнезем  $SiO_2$ , который пере-

ходит в шлак. Кремний также способствует выделению углерода из соединения  $Fe_3C$  (цементит) с образованием графита. Таким образом, кремний устраняет химические соединения железа ( $FeO$  и  $Fe_3C$ ), которые вызывают увеличение коэрцитивной силы и увеличивают потери на гистерезис. Кроме того, наличие кремния в железе в количестве 4 % и более увеличивает удельное электрическое сопротивление по сравнению с чистым железом, в результате чего уменьшаются потери на вихревые токи. Несмотря на то, что индукция насыщения железа с увеличением кремния в нем значительно повышается и достигает при 6,4 % кремния большой величины, все же кремния вводят не более 4,8 %. Увеличение содержания кремния более 4,8 % приводит к тому, что стали приобретают повышенную хрупкость, т. е. механические свойства их ухудшаются.

Листы изготовляют прокаткой стального слитка в холодном или горячем состоянии. Поэтому различают холоднокатаную и горячекатаную электротехническую сталь. Железо имеет кубическую кристаллическую структуру. По исследованию намагничивания оказалось, что оно может быть неодинаково по различным направлениям этого куба. Наибольшим намагничиванием кристалл обладает в направлении ребра куба, меньше – по диагонали грани, и самым малым – по диагонали куба. Поэтому важно, чтобы все кристаллики железа в лис-

те выстроились в процессе прокатки в ряды по направлению ребер куба.

Это достигается повторными прокатками с сильным обжатием (до 70 %) и последующим отжигом в атмосфере водорода, что способствует очищению стали от кислорода и углерода, а также укрупнению кристаллов и ориентировке их таким образом, чтобы ребра кристаллов совпадали с направлением прокатки. Такие стали называются текстурованными. У них магнитные свойства по направлению прокатки выше, чем у обычной горячекатаной стали. Листы текстурованной стали изготавливаются холодной прокаткой. Магнитная проницаемость их выше, а потери на гистерезис меньше, чем у горячекатаных листов.

Кроме того, у холоднокатаной стали индукция в слабых магнитных полях возрастает сильнее, чем у горячекатаной, т. е. кривая намагничивания в слабых полях располагается значительно выше кривой горячекатаной стали. Следует, однако, отметить, что в результате ориентировки зерен текстурованной стали по направлению прокатки магнитная проницаемость по другим направлениям меньше, чем у горячекатаных. Так, при индукции  $B=1,0$  тл в направлении прокатки магнитная проницаемость  $\mu_M=50000$ , а в направлении перпендикулярно прокатке  $\mu_M=5500$ . В связи с этим при сборке Ш-образных сердечников трансформаторов применяют отдельные полосы стали, вырезанные вдоль прокатки, которые затем шихтуют так, чтобы направление магнитного потока совпадало с направлением прокатки стали или составляло бы с ним угол  $180^\circ$ .

На рис. 8 приведены кривые намагничивания электротехнических сталей Э330А и Э41 для трех диапазонов напряженностей магнитного поля 0-2,4; 0-24 и 0-240 а/см.

Электротехническая листовая сталь обладает хорошими магнитными характеристиками – высокой индукцией, малой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезис. Благодаря этим свойствам оно широко используется в электротехнике для изготовления сердечников статоров и роторов электрических машин, сердечников силовых трансформаторов, трансформаторов тока и магнитопроводов различных электрических аппаратов.

Отечественная электротехническая сталь различается по содержанию в ней кремния, по способу изготовления листов, а также по магнитным и электрическим свойствам.

Выпускается сталь следующих марок шести групп: 1) Э11, Э12, Э13; 2) Э21, Э22; 3) Э31, Э32; 4) Э41, Э42, Э43А, Э44, Э45, Э46, Э47,

Э48; 5) Э310, Э320, Э330А, Э340, Э370, Э380; 6) Э1100, Э1200, Э1300, Э3100, Э3200.

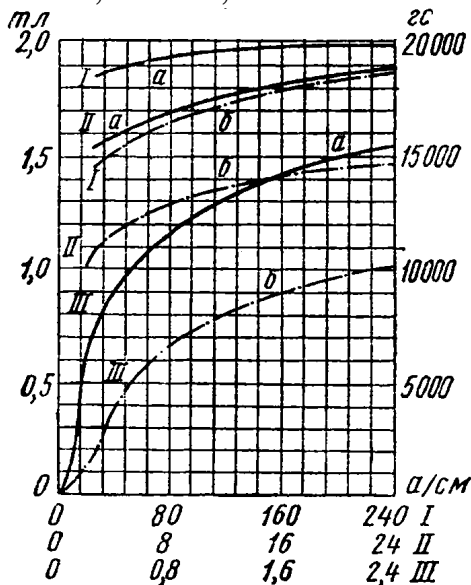


Рис. 8. Кривые намагничивания электротехнических сталей: а) сталь Э330А (текстурированная); б) сталь Э41 (нетекстурированная)

Буква Э означает «электротехническая сталь», первая за буквой цифра (1, 2, 3 и 4) означает степень легирования (содержания кремния в стали в определенных количествах) стали кремнием, причем содержание кремния находится в следующих пределах: - для слаболегированной стали (Э1) от 0,8 до 1,8 %; - для среднелегированной стали (Э2) от 1,8 до 2,8 %; - для повышенолегированной стали (Э3) от 2,8 до 3,8%; - для высоколегированной стали (Э4) от 3,8 до 4,8 %.

Средняя величина удельного электрического сопротивления электротехнической стали  $\rho$  тоже зависит от количества кремния. Оно тем выше, чем больше содержание кремния в стали. Стали марок Э1 имеют сопротивление  $\rho=0,25 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ; марок Э2 –  $\rho=0,40 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ; марки Э3 –  $\rho=0,5 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$  и марок Э4 –  $\rho=0,6 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

Вторые цифры после буквы Э характеризуют удельные потери при перемагничивании. Эти потери тем меньше, чем больше эта цифра, т. е. больше степень легирования. Нули означают, что сталь холоднокатаная текстурированная (0) и холоднокатаная мало-текстурированная (00). Буква А указывает на особо низкие удельные потери при перемагничивании стали.

Электротехническая сталь выпускается в виде листов шириной от 240 до 1000 мм, длиной от 720 до 2000 мм и толщиной 0,1; 0,2; 0,35; 0,5 и 1,0 мм.

#### Магнитно-мягкие сплавы.

Хорошими магнитными свойствами обладает тройной сплав на основе железа, содержащий алюминий 5,4 %, кремния 9,6 %, железа 85 %. Такой сплав называется альсифером (слово «альсифер» образовалось из соединения трех первых слогов наименований, входящих в сплав веществ – алюминия, силиция, феррума). Его магнитные свойства следующие:  $\mu_H = 35 \text{ 000}$ ;  $\mu_M = 115 \text{ 000}$ ;  $H_C = 0,018 \text{ а/см}$ ;  $B_S = 0,335 \text{ тл}$ ;  $\rho = 0,81 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ .

Существенным недостатком таких сплавов является то, что они хрупки, тверды и не могут коваться. Поэтому детали из них изготавливают лишь литьем, обрабатывать детали из альсифера можно лишь шлифованием.

В технических сплавах химический состав несколько отличается от приведенного выше, в результате чего и магнитные свойства альсифера могут быть несколько отличными.

Широкое применение в электротехнике нашли различные сплавы железа и никеля, которые называют пермаллоями. Они обладают высокими магнитно-мягкими свойствами, а именно: большой начальной и максимальной магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой и большой магнитной индукцией. Эти свойства присущи сплавам лишь с содержанием от 40 до 80 %. При содержании никеля 78,5 % сплав имеет наибольшие значения  $\mu_H$  и  $\mu_M$  и очень низкую коэрцитивную силу. Однако достаточно небольших отклонений от этого содержания никеля (в обе стороны), как величина  $\mu_H$  и, особенно,  $\mu_M$  резко уменьшается.

Величина удельного электрического сопротивления сплавов также изменяется в зависимости от содержания никеля. В сплавах с содержанием до 30 % никеля эта величина возрастает, затем на всем диапазоне изменения содержания падает до величины сопротивления никеля. Температура Кюри пермаллоев также сильно зависит от содержания никеля.

Таким образом, можно считать, что железоникелевые сплавы по своим магнитным свойствам весьма чувствительны к составу. Особенно же чувствительны они к тепловой и механической обработке. Свойства сплавов с содержанием никеля 40-80 % зависят от режима тепловой обработки после их отливки. Наиболее эффективна двойная термообработка, заключающаяся в выдержке сплава при температуре 900-950 °С в течение часа, последующем охлаждении со скоростью 100 °С в час, повторном нагреве до 600 °С и охлаждении его на медной плите со скоростью примерно 150 °С в минуту. Эта термообработка получила название пермаллойной обработки. Однако следует отметить, что для таких сплавов с различным содержанием никеля технология термообработки может отличаться от описанной. Исследованиями было показано, что наиболее сильно улучшаются магнитные свойства пермаллоев, если термообработку вести в слабом магнитном поле. Так, в сплаве с 65 % никеля термообработка в магнитном поле  $H=8$  а/см увеличивает  $\mu_M$  с 20000 до 200000. Замечено, что наиболее, эффективное действие магнитного поля проявляется при



охлаждении сплава, начиная с точки Кюри, в данном случае 550-400 °С. Часто эту термообработку производят в водородной среде при быстром охлаждении.

Однако свойства, приобретаемые сплавом при быстром охлаждении, можно ухудшить, если нагреть его снова до высокой температуры и затем температуру в печи медленно снижать до комнатной.

В табл. 9 приведены магнитные характеристики нелегированных пермаллоев.

Т а б л и ц а 9 . Магнитные характеристики нелегированных пермаллоев

| Содержание никеля, % | $\mu_H$    | $\mu_M$       | $H_C$ , а/см | $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м |
|----------------------|------------|---------------|--------------|--------------------------------|
| 78,5                 | 7000-14000 | 100000-200000 | 0,020        | 0,25                           |
| 66,0                 | 2500-3700  | 130000-270000 | 0,024        | 0,33                           |
| 55,0                 | 2000-3200  | 50000-60000   | 0,06         | 0,50                           |

Из железо-никелевых сплавов изготавливают ленты следующих шести видов в зависимости от их толщины: 0,05-0,08; 0,10-0,15; 0,18-0,25; 0,28-0,40; 0,50-1,00 и 1,10-1,40 мм.

В табл. 10 приведены характеристики легированных пермаллоев.

Т а б л и ц а 10 . Магнитные характеристики легированных пермаллоев

| Марка пермаллоев | $\mu_H$ | $\mu_M$ | $H_C$ , а/см | $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м |
|------------------|---------|---------|--------------|--------------------------------|
| 79НМ             | 20000   | 100000  | 0,024        | 0,55                           |
| 80НХС            | 35000   | 120000  | 0,016        | 0,62                           |
| 60НХС            | 30000   | 30000   | 0,012        | 0,85                           |

Каждый пермаллой применяется в соответствии с его свойствами в различных электромагнитных устройствах. Главные области применения пермаллоев следующие: измерительные приборы, сердечники трансформаторов тока, магнитные экраны, реле, магнитные усилители, катушки индуктивности в автоматике и т. п.

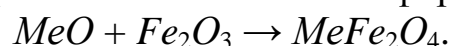
При использовании пермаллоев не следует забывать, что они чувствительны к механическим воздействиям и обработке – штамповке, ударам, внешним механическим напряжениям. Все эти механические воздействия резко повышают коэрцитивную силу и уменьшают магнитную проницаемость, а петля гистерезиса расширяется и искажается. Поэтому необходимо по возможности предохранять пермаллой от таких воздействий или по окончании штамповки и других механических операций подвергать материал дополнительной тепло-

вой обработке; отжигу при высокой температуре и охлаждению с определенной скоростью.

#### *Ферриты.*

За последние годы разработаны и приобрели широкое применение в электротехнике новые магнитные материалы, получившие название ферритов. Эти материалы неметаллические, их изготавливают из смеси окиси железа ( $Fe_2O_3$ ) с окислами других металлов – цинка ( $ZnO$ ), марганца ( $MnO$ ), никеля ( $NiO$ ) и др.

Если обозначить любую окись двухвалентного металла входящую в состав ферритов, в общем виде  $MeO$ , где  $Me$  означает двухвалентный металл, то простейшая химическая формула феррита



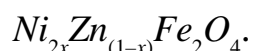
Характерной особенностью ферритов является то, что при наличии хороших магнитных свойств они обладают весьма большим по сравнению с магнитными металлами и сплавами удельным электрическим сопротивлением. Ферриты относятся к группе полупроводников и обладают сопротивлением  $\rho=10^4-10^9 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , тогда как ферромагнитные металлические материалы имеют  $\rho=10^{-5}-10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Сопротивления ферритов больше сопротивления металлических ферромагнетиков в  $10^8-10^{14}$  раз, поэтому у ферритов потери на вихревые токи в переменных магнитных полях очень малы.

Это составляет одно из важнейших преимуществ ферритов.

Ферриты, как и металлические ферромагнетики, делятся на магнитно-мягкие и магнитно-твердые. Магнитно-мягкие ферриты обладают примерно следующими характеристиками: коэрцитивной силой  $H_C$  до 2,4 а/см; индукцией насыщения  $B_S$  от 0,042 до 0,5 тл; остаточной индукцией  $B_r$  от 0,02 до 0,3 тл; начальная магнитная проницаемость  $\mu_H$  от 30 до 3000.

Ферриты называются по входящему в их состав двухвалентному металлу. Так, если в феррит входит окись марганца ( $MnO$ ) то он называется ферритом марганца ( $MnFe_2O_4$ ), если же в феррит входит окись никеля ( $NiO$ ) – ферритом никеля ( $NiFe_2O_4$ ) и т. п. Давно известен естественный феррит, называемый магнетитом. Он представляет собой феррит железа и обозначается химической формулой  $FeFe_2O_4$ . Ферриты, состоящие из окиси лишь одного металла и окиси железа, называются простыми. Для практического использования применяются смеси простых ферритов. В этом случае получают твердые растворы двух или нескольких ферритов, например твердый раствор двух простых ферритов  $NiFe_2O_4$  и  $ZnFe_2O_4$ , т. е. никелевого и цинкового ферри-

тов. В результате этого создается смешанный никель-цинковый феррит. Его химическая формула



В приведенной формуле  $x$  обозначает молярную долю содержания в этом материале окиси никеля, а  $(1-x)$  – долю окиси цинка, причем сумма их должна быть равна единице.

Изготавливаются ферриты по керамической технологии, т. е. в результате обжига порошков при температуре до 1350 °С.

Процесс изготовления ферритов состоит из следующих главных операций. Исходные материалы – окиси двухвалентных металлов и окись железа, взятые в определенных количествах, смешивают и размалывают в шаровых мельницах. После сушки смесь окислов прессуют в брикеты и подвергают первому обжигу.

Спекшийся материал снова размалывают и формуют в изделия с добавлением органического связующего (парафин и др.), а затем обжигают в печах при высокой температуре. Чтобы готовые изделия не спекались друг с другом, их припудривают окисью алюминия.

В печах изделия постепенно нагревают до конечной температуры обжига, а затем охлаждают. Обжиг производится по режиму, устанавливаемому для каждого вида изделия и его состава.

Отечественной промышленностью изготавливаются четыре группы ферритов: никель-цинковые, литий-цинковые, марганец-цинковые магний-марганцевые.

Никель-цинковые ферриты различаются по маркам: Ф-20, Ф-100, Ф-250, Ф-400, Ф-600, Ф-1000 и Ф-2000. В этих обозначениях цифры 20, 100 и т. д. означают величины начальной магнитной проницаемости  $\mu_H$ . Эти ферриты обладают неизменяемостью магнитной проницаемости до определенных частот. Установлено, что чем выше  $\mu_H$ , тем ниже частота, при которой эта величина начинает падать, а потери – возрастать.

Т а б л и ц а 11. Магнитные характеристики некоторых ферритов

| Наименование ферритов | $\mu$     | $H_C$ , а/см | $B_S$ , тл | $B_r$ , тл |
|-----------------------|-----------|--------------|------------|------------|
| Никель-цинковый       | 16-2500   | 0,32-2,4     | 0,04-0,40  | 0,02-0,30  |
| Марганец-цинковый     | 1000-3000 | 0,12-0,28    | 0,35-0,50  | 0,011-0,15 |
| Литий-цинковый        | 20-120    | 2,4-4,8      | 0,10-0,25  | 0,08-0,17  |

Литий-цинковые ферриты обладают меньшими характеристиками и применяются в установках почти тех же частот, что и никель-цинковые, но при слабых магнитных полях. Марганец-цинковые фер-

риты используются для работы в полях, изменяющихся с частотой порядка 1 МГц (мегагерц).

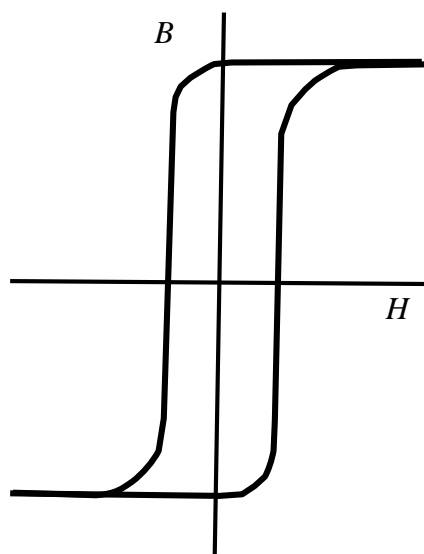


Рис.9. Прямоугольная петля гистерезиса ферритов

В табл. 11 приведены основные магнитные характеристики описанных выше ферритов.

Магний-марганцевые ферриты составляют две группы материалов. Одна из них обладает высоким электрическим сопротивлением и малыми потерями. Вторая группа ферритов характеризуется прямоугольностью петли гистерезиса, что позволяет применять их в счетно-решающих машинах для запоминающих устройств, в магнитных усилителях и т. п.

На рис. 9 приведена петля гистерезиса таких ферритов.

Наиболее широко используют никель-цинковые ферриты. Из них изготавливаются различные кольца, стержни, цилиндрические и трубчатые детали для электронно-лучевых телевизоров, детали для звукозаписывающей аппаратуры и Ш-образные сердечники для трансформаторов.

Из марганец-цинковых ферритов изготавливают кольца, сердечники трансформаторов и другие детали.

#### *Аморфные магнитомягкие материалы (АММ).*

АММ являются магнетиками с неупорядоченным расположением атомов, получаемом наиболее часто в результате быстрой закалки расплава со скоростью охлаждения  $10^4$ - $10^6$  град/с. Аморфные тонкие пленки с цилиндрическими магнитными доменами (ЦМД) можно получать катодным распылением или вакуумным напылением редкоземельных и переходных металлов. Металлические аморфные сплавы содержат 75-85 % одного или нескольких переходных металлов ( $Fe$ ,  $Co$ ,  $Ni$ ) и 15-25 % стеклообразователя, в качестве которого используют бор, углерод, кремний, фосфор. По магнитным свойствам АММ близки к электротехническим сталям и пермаллоям. Наиболее перспективные сплавы – железоникелевые, высококобальтовые и высокожелезистые. Для получения оптимальных свойств применяют термомагнитную обработку, что позволяет повысить  $B_s$  и прямоугольность петли гистерезиса.

АММ имеют повышенную твердость и коррозионную стойкость. Удельное сопротивление АММ в 3-5 раз больше, чем у кристаллических.

Применение АММ: магнитные экраны, сердечники малогабаритных трансформаторов, магнитных усилителей, головки магнитозаписывающих устройств.

#### 1.3.4. Магнитно-твердые материалы

Магнитно-твердые материалы (МТМ), магнитно-жесткие (высококоэрцитивные) материалы, магнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряженностью в тысячи и десятки тысяч а/м. МТМ характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы  $H_C$ , остаточной индукции  $B_r$ , магнитной энергии  $(BH)_{max}$  на участке размагничивания – спинке петли гистерезиса (см. табл. 12). После намагничивания МТМ остаются магнитами постоянными из-за высоких значений  $B_r$  и  $H_C$ . Большая коэрцитивная сила МТМ может быть обусловлена следующими причинами: 1) задержкой смещения границ доменов благодаря наличию посторонних включений или сильной деформации кристаллической решетки; 2) выпадением в слабомагнитной матрице мелких однодоменных ферромагнитных частиц, имеющих или сильную кристаллическую анизотропию, или анизотропию формы.

МТМ классифицируют по разным признакам, например, по физической природе коэрцитивной силы, по технологическим признакам и другим. Из МТМ наибольшее значение в технике приобрели: литые и порошковые (недеформируемые) магнитные материалы типа  $Fe-Al-Ni-Co$ ; деформируемые сплавы типа  $Fe-Co-Mo$ ,  $Fe-Co-V$ ,  $Pt-Co$ ; ферриты (гексаферриты и кобальтовый феррит). В качестве МТМ используются также соединения редкоземельных элементов (особенно легких) с кобальтом; магнитопласты и магнитоэласты из порошков ални, альнико, ферритов со связкой из пластмасс и резины, материалы из порошков  $Fe$ ,  $Fe-Co$ ,  $Mn-Bi$ ,  $SmCo_5$ .

Например, гибкий магнитный винил (другое название магнитная резина) изготавливается путем смешивания порошков феррита с синтезированной резиной или пластиком. Продукт не содержит свинца, состоит из стронция феррита. Магнитный материал легко складывается или сгибается, не теряя при этом своих магнитных свойств. Об-

ладает отличными механическими свойствами, в нем легко сверлить или пробивать отверстия, разрезать его ножницами, вырезать ножом или делать высечку.

Т а б л и ц а 12. Основные характеристики магнитно-твердых материалов

| Марка материала         | Основной состав, %<br>(по массе)                        | $B_r \cdot 10^{-3}$ ,<br>гс | $H_C$ , э             | $(BH)_{max}$ ,<br>Мгс·э |
|-------------------------|---|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|
| У13                     | 1,3 C, ост. Fe  | 8                           | 60                    | 0,22                    |
| Е7В6                    | 0,7C, 0,4Cr, 5,7W, 0,4Si,<br>ост. Fe                    | 10,4                        | 68                    | 0,36                    |
| ЕХ9К15М                 | 1C, 9Cr, 15Co, 1,5Mo, ост.<br>Fe                        | 8,2                         | 160                   | 0,55                    |
| 12КМВ12 (комол)         | 12Co, 6Mo, 12W, ост. Fe                                 | 10,5                        | 250                   | 1,1                     |
| ЮНД4 (ални)             | 25Ni, 12Al, 4Cu, ост. Fe                                | 6,1                         | 500                   | 0,9                     |
| ЮНДК24 (магни-<br>ко)   | 14Ni, 8Al, 24Co, 3Cu, ост.<br>Fe                        | 12,3                        | 600                   | 4                       |
| ЮНДК35Т5ВА<br>(тиконал) | 14Ni, 8Al, 35Co, 3Cu, 5Ti,<br>Nb<1                      | 10                          | 1500                  | 10                      |
| ПлК 76 (платинакс)      | 76Pt, ост. Co   | 7,9                         | 4000                  | 12                      |
| 52КФ (викаллоу)         | 52Co, 13V, ост. Fe                                      | 6                           | 500                   | -                       |
| 2ФК (Co феррит)         | CoO·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                      | 3                           | 1800                  | 2                       |
| 1БИ (Ba феррит)         | BaO·6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (изотропный)        | 2                           | 1700                  | 1                       |
| 3БА (Ba феррит)         | BaO·6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (анизотроп-<br>ный) | 3,7                         | 2000                  | 3,2                     |
| 3СА (Sr феррит)         | SrO·6Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (анизотроп-<br>ный) | 3,6                         | 3200                  | 3                       |
| Co <sub>5</sub> Sm      | Co <sub>5</sub> Sm (анизотропный)                       | 9,4                         | BH <sub>c</sub> =8500 | 21                      |

Высокая коэрцитивная сила литых и порошковых МТМ (к ним относятся материалы типа альнико, магнико и другие) объясняется наличием мелкодисперсных сильномагнитных частиц вытянутой формы в слабомагнитной матрице. Охлаждение в магнитном поле приводит к предпочтительной ориентации у этих частиц их продольных осей. Повышенными магнитными свойствами обладают подобные МТМ, представляющие собой монокристаллы или сплавы, созданные путем направленной кристаллизации (их максимальная магнитная энергия  $(BH)_{max}$  достигает  $10^7$  гс·э). МТМ типа Fe–Al–Ni–Co очень тверды, обрабатываются только абразивным инструментом или электроискровым методом, при высоких температурах их можно изгибать. Изделия из таких МТМ изготавливаются фасонным литьем или металлокерамическим способом.

Деформируемые сплавы (важнейшие из них – комолы и викаллоу) более пластичны и значительно легче поддаются механической

обработке. Дисперсионно-твердеющие сплавы типа  $Fe-Co-Mo$  (комолы) приобретают высококоэрцитивное состояние (магнитную твердость) в результате отпуска после закалки, при котором происходит распад твердого раствора и выделяется фаза, богатая молибденом. Сплавы типа  $Fe-Co-V$  (викаллои) для придания им свойств МТМ, подвергают холодной пластической деформации с большим обжатием и последующему отпуску. Высококоэрцитивное состояние сплавов типа  $Pt-Co$  возникает за счет появления упорядоченной тетрагональной фазы с энергией анизотропии  $5 \cdot 10^7$  эрг/см<sup>3</sup>. Из литых, порошковых и деформируемых МТМ изготавливают постоянные магниты, используемые в измерительных приборах (например, амперметрах и вольтметрах постоянного тока), в микродвигателях и гистерезисных электрических двигателях, в часовых механизмах и др. К МТМ относятся гексаферриты, то есть ферриты с гексагональной кристаллической решеткой (например,  $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ ). Кроме гексаферритов, в качестве МТМ применяется феррит кобальта  $CoO \cdot Fe_2O_3$  со структурой шпинели, в котором после термической обработки в магнитном поле формируется одноосевая анизотропия, что и является причиной его высокой коэрцитивной силы. Магнитно-твердые ферриты применяются для работы в условиях рассеянных магнитных полей и в СВЧ-диапазоне. Изделия из ферритов изготавливают методами порошковой металлургии.

## 1.4. Диэлектрические материалы

### 1.4.1. Газообразные диэлектрики

К газообразным диэлектрикам относятся все газы, в том числе воздух, представляющий собой смесь нескольких газов и паров воды.

В состав воздуха входят: азот (78 %); кислород (20,99 %); углекислый газ (0,03 %); аргон (0,933 %); водород (0,01 %); неон (0,0018 %); гелий, криптон и ксенон составляют в сумме десятитысячные доли процента (по объему).

Многие газы (воздух, азот и др.) используют в качестве диэлектриков в газонаполненных конденсаторах, воздушных выключателях высокого напряжения и в других электрических устройствах. Воздух окружает все электрические установки и как диэлектрик во многом определяет надежность их работы. Провода линий электропередачи высокого напряжения, закреплены на мачтах с помощью фарфоровых

изоляторов, на всем протяжении изолированы друг от друга только слоем воздуха. Иногда в слое воздуха, непосредственно соприкасающемся с поверхностью проводов высокого напряжения, наблюдается характерное светло-фиолетовое свечение – электрическая корона (рис. 10), которое сопровождается характерным шипением. Электрическая корона представляет собой частичное разрушение газообразного диэлектрика.

Электрическая корона возникает при ухудшении электроизоляционных свойств воздуха или при воздействии на воздух повышенной величины напряжения. Явление электрической короны вызывает потери энергии и его не следует допускать в электрических устройствах.

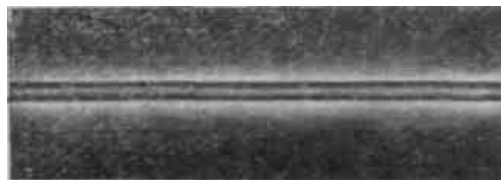


Рис. 10. Электрическая корона

В особенно невыгодных условиях работы оказываются газовые включения внутри твердой изоляции. Напряженности ( $E$ ) электрического поля в последовательно соединенных слоях изоляции распределяются обратно пропорционально их диэлектрическим проницаемостям, т. е.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}.$$

У всех газов диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) немногим больше единицы, а у твердых диэлектриков она находится в пределах от 2 до 8 и больше. Вследствие этого газовые включения (пузырьки воздуха) в твердой изоляции будут находиться под воздействием напряженностей (от 2 до 8 и больше), превосходящих напряженности в твердой изоляции. Это может вызвать ионизацию газовых включений, т. е. образование в них большого количества электрически заряженных частиц (электронов и ионов). Вследствие этого газ может превратиться из диэлектрика в проводник, что ослабит изоляцию всей системы. Ионизация газовых включений часто влечет за собой пробой твердой изоляции, что может вызвать выход из строя электрической машины, аппарата, кабеля и т. д. В нормальных же условиях работы газообразные диэлектрики имеют очень малую проводимость и незначительные диэлектрические потери, поэтому они широко применяются в высоковольтных выключателях, конденсаторах и в других устройствах. Приведенные примеры показывают, что изучение электрических явлений в газах и, в частности, в воздухе, имеет большое практическое значение.



### *Электропроводность газов.*

Во всех газах еще до воздействия на них электрического напряжения всегда имеется некоторое количество электрических заряженных частиц – электронов и ионов, которые находятся в беспорядочном тепловом движении. Это могут быть заряженные частицы твердых и жидких веществ – примесей, находящихся, например, в воздухе. Образование электрически заряженных частиц в газообразных диэлектриках вызывается ионизацией газа внешними источниками (внешними ионизаторами): космическими и солнечными лучами, радиоактивными излучениями Земли и др.

Процесс ионизации газа внешними ионизаторами заключается в том, что они сообщают энергию атомам газа. При этом валентные электроны приобретают дополнительную энергию и отделяются от своих атомов, которые превращаются в положительно заряженные частицы – положительные ионы. Образовавшиеся свободные электроны могут длительно сохранять самостоятельность движения в газе (например, в водороде, азоте) или через некоторое время они присоединяются к электрически нейтральным атомам и молекулам газа, превращая их в отрицательно заряженные ионы. Появление электрически заряженных частиц в газе может быть также вызвано выходом электронов с поверхности металлических электродов при их нагревании или воздействии на них лучистой энергии.

Находясь в беспорядочном тепловом движении, некоторая часть противоположно заряженных частиц (электронов и положительно заряженных ионов) воссоединяется друг с другом и образует электрически нейтральные атомы и молекулы газа. Этот процесс называется восстановлением или рекомбинацией.

Если между металлическими электродами (диски, шары) находится какой-то объем газа, то при приложении к этому объему газа электрического напряжения, на заряженные частицы в газе будут действовать электрические силы – напряженности  $E$  электрического поля. Под действием этих сил электроны и ионы будут перемещаться от одного электрода к другому, создавая электрический ток в газе.

Ток в газе будет тем больше, чем больше заряженных частиц образуется в нем в единицу времени и чем большую скорость приобретают они под действием сил электрического поля. Ясно, что с повышением напряжения, приложенного к данному объему газа, электрические силы, действующие на электроны и ионы, увеличиваются. При этом скорость заряженных частиц, а следовательно, и ток в газе возрастают. Изменение величины тока в зависимости от напряжения,

приложенного к объему газа, выражается графически в виде кривой, называемой вольтамперной характеристикой (рис. 11). Последняя показывает, что в области слабых электрических полей, когда электрические силы, действующие на заряженные частицы, относительно невелики (область *I*), ток в газе возрастает пропорционально величине приложенного напряжения. В этой области изменение тока происходит согласно закону Ома.

С дальнейшим ростом напряжения (область *II*) пропорциональность между током и напряжением нарушается. В этой области ток проводимости не зависит от напряжения. Здесь происходит накопление энергии заряженными частицами газа – электронами и ионами. С дальнейшим повышением напряжения (область *III*) скорость заряженных частиц резко возрастает, вследствие чего происходят частые соударения их с нейтральными частицами газа. При этих упругих соударениях электроны и ионы передают часть накопленной ими энергии нейтральным частицам газа. В результате электроны отделяются от своих атомов. При этом образуются новые свободные электроны и положительно заряженные ионы.

Ввиду того что летящие заряженные частицы соударяются с атомами и молекулами очень часто, образование новых электрически заряженных частиц происходит весьма интенсивно. Этот процесс называется ударной ионизацией газа. В области ударной ионизации (область *III*) ток в газе интенсивно возрастает при малейшем повышении напряжения. Процесс ударной ионизации в газообразных диэлектриках сопровождается резким уменьшением величины удельного объемного сопротивления газа и возрастанием тангенса угла диэлектрических потерь  $tg \delta$ .

Естественно, что газообразные диэлектрики могут использоваться при напряжениях, исключаяющих процесс ударной ионизации. В этом случае газы являются очень хорошими диэлектриками, у которых удельное объемное сопротивление очень велико ( $\rho_v=10^{20}$  Ом·см), а тангенс угла диэлектрических потерь очень мал ( $tg \delta=10^{-6}$ ). Поэтому газы и, в частности, воздух используются в качестве диэлектриков в

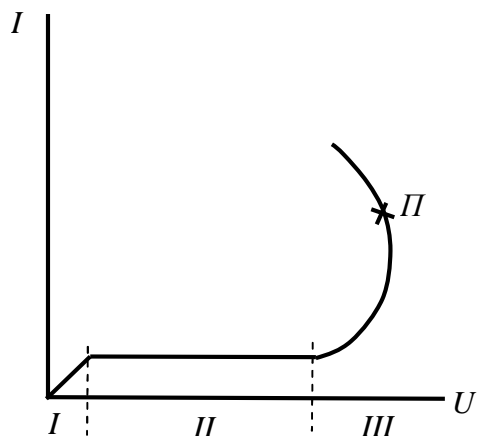


Рис. 11. Вольтамперная характеристика для газообразного диэлектрика

образцовых конденсаторах, газонаполненных кабелях и выключателях высокого напряжения.

### Пробой газов.

Развитие процесса ударной ионизации в газе приводит к пробую данного объема газа (точка  $\Pi$  на рис. 11). В момент пробоя газа ток в нем резко возрастает, а напряжение стремится к нулю. Пробой газа происходит в виде искрового разряда, т.е. светящихся искр, соединяющих поверхности металлических электродов, помещенных в газовой среде (рис. 12).

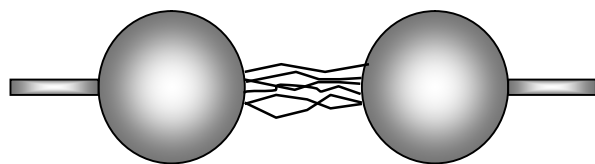


Рис. 12. Искровой разряд в воздухе между металлическими шарами

Явление пробоя газообразных диэлектриков в однородном электрическом поле выражается формулой Пашена:

$$U_{\text{ПР}} = A \cdot p \cdot h,$$

где  $U_{\text{ПР}}$  – пробивное напряжение слоя газа;  $A$  – коэффициент;  $p$  – давление газа;  $h$  – расстояние между электродами в газе.

Однородным электрическим полем называется такое поле, во всех точках которого силы электрического поля (напряженности  $E$ ) равны между собой, а плотность силовых линий всюду одинакова.

Согласно этой формуле величина пробивного напряжения  $U_{\text{ПР}}$  любого газа пропорциональна произведению давления газа на расстояние между электродами (рис. 13).

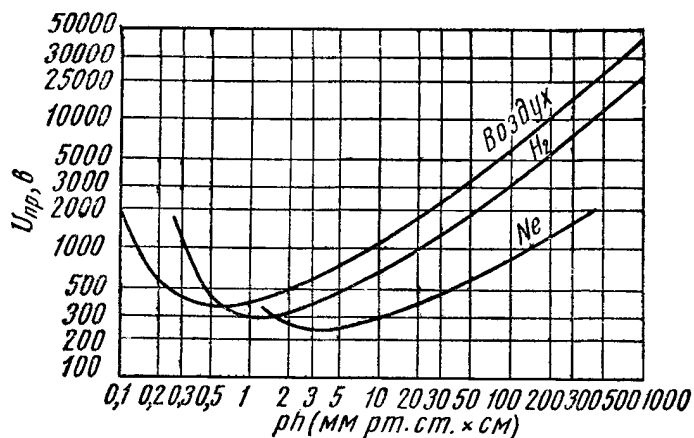


Рис. 13. Зависимость пробивного напряжения воздуха (амплитудные значения) от произведения давления  $P$  (мм рт. ст) воздуха на расстояние  $h$  (см) между электродами

Таким образом, величина пробивного напряжения газа увеличивается с ростом давления газа и с увеличением расстояния между электродами (правая часть U-образной кривой на рис. 13). С уменьшением же давления и расстояния между электродами пробивное напряжение газа уменьшается, но, пройдя минимум, начинает снова возрастать в области разреженного газа

или в области малых расстояний между электродами (левая часть U-образной кривой). Это происходит, так как в области разреженного газа (вакууме) резко уменьшается количество атомов и молекул газа,

являющихся объектами ионизации, а значит, и процесс ударной ионизации происходит при более высоких напряжениях.

В области очень малых расстояний между электродами ( $h=0,1$  мм и менее) пробой газа также происходит при повышенных значениях пробивного напряжения. Это объясняется сокращением длины пути, на котором заряженные частицы не могут накапливать энергию, необходимую для процесса ударной ионизации. Чтобы такой процесс происходил естественно, необходимы более высокие напряжения. Значит, слой газа меньшей толщины обладает более высокой электрической прочностью  $E_{ПР}$ , чем слой газа большей толщины. Таким образом, с увеличением толщины слоя газа его электрическая прочность  $E_{ПР}$  уменьшается (рис. 14). Из приведенного графика видно, что при расстоянии между электродами около 1 см электрическая прочность воздуха  $E_{ПР}=30$  кВ/см. С увеличением расстояния между электродами  $E_{ПР}$  воздуха медленно убывает. То же наблюдается и у других газов.

В табл. 13 приведены значения электрической прочности (в однородном поле) и другие характеристики газообразных диэлектриков. При этом все тепловые характеристики воздуха условно приняты за единицу. Из данных, приведенных в таблице, следует, что наибольшей электрической прочностью обладают газы: элегаз  $SF_6$  и фреон  $CCl_2F_2$  наибольшей теплопроводностью и теплоемкостью обладает водород ( $H_2$ ). Поэтому водород широко используют в качестве охлаждающей среды (вместо воздуха) в электрических машинах большой мощности (генераторы).

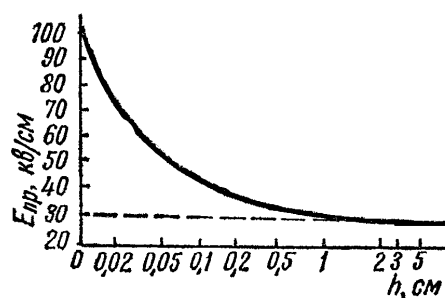


Рис. 14. Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами при давлении 760 мм рт. ст и  $20^\circ\text{C}$  (однородное электрическое поле)

С качественной стороны пробой газообразного диэлектрика протекает по-разному, в зависимости от степени однородности электрического поля в газе. Так, пробой в воздухе при наличии в нем однородного электрического поля происходит сразу в виде искры (см. рис. 12). Этот искровой разряд может переходить в электрическую дугу при достаточной мощности источника тока.

Пробой же газа в неоднородном электрическом поле проходит через ряд промежуточных стадий. Вначале наступает электрическое разрушение слоя газа у электрода с меньшим радиусом, так как у его поверхности наблюдаются наибольшие напряженности электрическо-

го поля. При напряжении значительно меньше пробивного у поверхности электрода с малым радиусом (острие, провод малого диаметра и др.) в газе возникает коронирующий разряд (электрическая корона, см. рис. 10).

Т а б л и ц а 13. Основные характеристики газообразных диэлектриков

| Наименование газа | Плотность, г/см <sup>3</sup> | Диэлектрическая проницаемость | Электрическая прочность, кВ/мм | Коэффициент теплопроводности | Теплоемкость | Коэффициент теплопередачи от твердого тела к газу |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------|---|
| Воздух            | 1,0                          | 1,00057                       | 3,0                            | 1,0                          | 1,0          | 1,0   |
| Азот              | 0,97                         | 1,00058                       | 3,0                            | 1,08                         | 1,05         | 1,03  |
| Водород           | 0,69                         | 1,00026                       | 1,8                            | 6,69                         | 14,35        | 1,51  |
| Углекислый газ    | 1,529                        | 1,00098                       | 2,7                            | 0,64                         | 0,85         | 1,13  |
| Элегаз            | 5,03                         | 1,00191                       | 7,2                            | 1,25                         | 0,60         | -   |
| Фреон             | 4,262                        | -                             | 7,8                            | -                            | -            | -   |

Она представляет собой светло-фиолетовое свечение в слое воздуха около электрода с меньшим радиусом. Электрическая корона сопровождается слышимым шипением и образованием в воздухе озона ( $O_3$ ) и окислов азота ( $NO$ ). Эти газы являются активными окислителями металлов и многих электроизоляционных материалов органического происхождения (резины, пластмассы и др.).

С дальнейшим повышением напряжения коронирующий разряд переходит в кистевой. При этом в слое газа около электрода с меньшим радиусом образуется ряд светящихся веточек-кистей, указывающих на дальнейшее электрическое разрушение газообразного диэлектрика. По достижении величины пробивного напряжения одна из светящихся кистей развивается в искру. Последняя в момент пробоя перекрывает весь слой газа от одного электрода до другого, т. е. происходит искровой разряд.

На практике приходится встречаться главным образом с неоднородными электрическими полями. Такие неоднородные поля наблюдаются между соседними проводами высокого напряжения, а также между проводом и заземленной мачтой – на линиях электропередачи и в других случаях.

Типичными электродами, между которыми создаются резко неоднородные электрические поля, являются: острие – плоскость; острие – острие и некоторые другие. Действительно, около острия густо-

та силовых линий очень велика, следовательно, здесь действуют напряженности большой величины, могущие вызвать ударную ионизацию газа. По мере удаления от острия к плоскости густота силовых линий уменьшается, следовательно, напряженности электрического поля тоже уменьшаются. При этом их ионизирующее действие на частицы газа снижается.

Закономерности в отношении пробоя газа между этими электродами наблюдаются во многих элементах установок высокого напряжения (линии электропередачи, воздушные выключатели и др.).

Большое влияние на пробой газа в неоднородном поле оказывает полярность электродов. Для слоя газа одной и той же толщины при положительном острие (игле) и отрицательно заряженной плоскости пробивное напряжение значительно меньше, чем при отрицательном острие. Это объясняется накоплением положительно заряженных ионов около острия и проращением их в направлении отрицательно заряженной плоскости (рис. 15, *а*). Вследствие этого острие как бы прорастает в толщу газа, сокращая путь искровому разряду. При этом пробой газа происходит при сравнительно низких напряжениях.

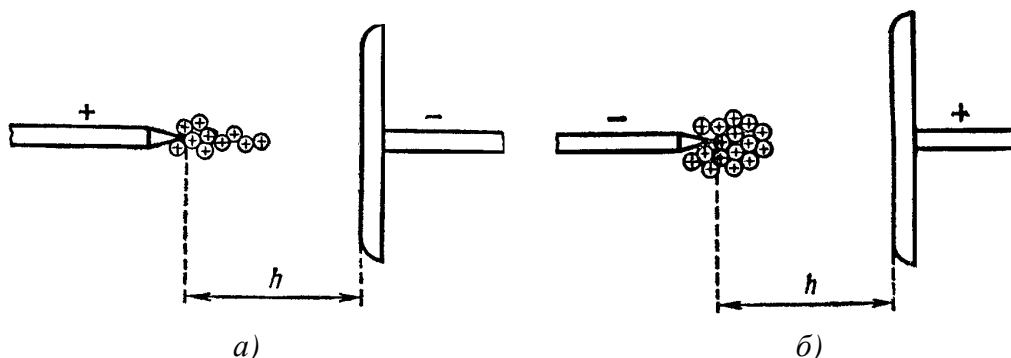


Рис. 15. Формирование объемного заряда в воздухе: *а* – при положительном острие; *б* – при отрицательном острие

При отрицательно заряженном острие наблюдается концентрация около него положительно заряженных ионов (рис. 15, *б*). Последние, вследствие малой их подвижности, не успевают нейтрализовать свой заряд у поверхности острия и образуют около него положительно заряженное облачко. Оно затрудняет возникновение искрового разряда, начинающегося с отрицательно заряженного острия. В результате этого пробой газа происходит при повышенных величинах пробивного напряжения. Пробивные напряжения воздуха между двумя остриями несколько больше пробивных напряжений воздуха между острием и плоскостью (при положительном острие). Это объясняется не-

сколько меньшей неоднородностью электрического поля между двумя острями.

Следует заметить, что пробой газа в однородном электрическом поле, как правило, происходит при большей величине напряжения по сравнению с пробоем того же слоя газа в неоднородном электрическом поле.

При пробое газов в неоднородных электрических полях заметное влияние на пробой оказывает их влажность. Так, при увеличении влажности воздуха его пробивное напряжение в неравномерном электрическом поле может повышаться на 8-10 %. Запыление же воздуха приводит к понижению его электрической прочности.

При пробое газообразных диэлектриков в однородном электрическом поле пробивные напряжения на постоянном и переменном токе (до частот 10000 Гц) практически не отличаются по величине.

#### *Пробой газов на границе с твердыми диэлектриками.*

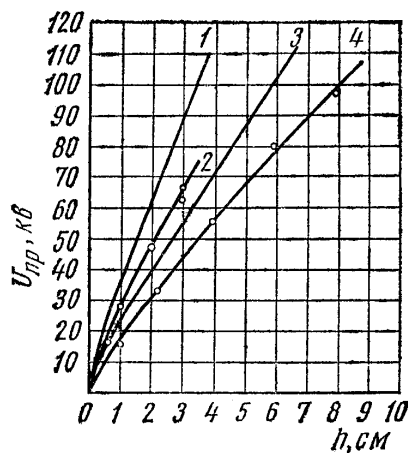


Рис. 16. Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами в присутствии твердого диэлектрика: 1 – без твердого диэлектрика; 2 – парафин; 3 – фарфор; 4 – фибра

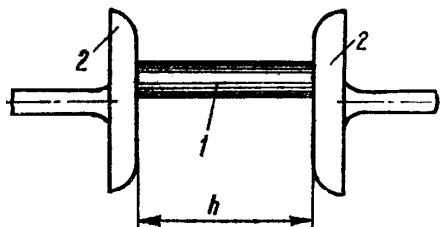


Рис. 17. Расположение твердого диэлектрика в слое воздуха между металлическими дисковыми электродами: 1 – образец твердого диэлектрика в виде сплошного цилиндра, 2 – металлические электроды

Выше рассматривались явления пробоя газа при отсутствии в нем твердых диэлектриков. На практике же часто встречаются случаи пробоя газа на границе с твердым диэлектриком. Примером этого является поверхностное перекрытие (искрой) фарфорового изолятора.

Оно представляет собой пробой слоя воздуха у поверхности твердого диэлектрика. Во всех случаях пробоя воздуха на границе с твердым диэлектриком величина пробивного напряжения меньше по сравнению с пробивным напряжением для такого же расстояния в газе при отсутствии твердого диэлектрика. Кривые на рис. 16 показывают зависимость пробивного напряжения воздуха без твердого диэлектрика и в присутствии твердых диэлектриков. Твердые диэлектрики представляли собой сплошные цилиндры, которые своими торцовыми поверхностями плотно соприкасались с поверхностью дисковых электродов, расположенных в воздухе (рис. 17).

Понижение пробивного напряжения газа при наличии в нем твердого диэлек-

трика вызывается искажением однородного электрического поля зарядами на поверхности твердого диэлектрика, которое обусловлено различием диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика и окружающего его воздуха.

Следует еще заметить, что электрическая прочность любого из газов меньше электрической прочности жидких и твердых диэлектриков. Поэтому расстояния между голыми металлическими частями, находящимися под высоким напряжением в воздухе, всегда выбираются несколько большими по сравнению с расстояниями между ними в жидкой или твердой изоляции.

#### *1.4.2. Жидкие диэлектрики*

##### *Классификация и назначение жидких диэлектриков.*

В качестве жидких электроизоляционных материалов в электротехнических устройствах применяют электроизоляционные минеральные масла и синтетические жидкие диэлектрики: совол и кремнийорганические жидкости. Наибольшее применение имеют минеральные нефтяные масла. По характеру использования в качестве жидких диэлектриков нефтяные масла могут быть разделены на три группы: - масла для силовых трансформаторов и высоковольтных выключателей; - кабельные масла, используемые для пропитки бумажной изоляции высоковольтных кабелей; - конденсаторные масла, применяемые для пропитки бумажной изоляции конденсаторов. Для этой же цели в бумажно-масляных конденсаторах используют искусственную жидкость – совол.

Характерной особенностью всех жидкостей является то, что их молекулы обладают большей подвижностью по сравнению с молекулами твердого тела. Чем выше температура жидкостей, тем подвижность их молекул больше. Это свойство жидкостей определяется их вязкостью. Большая подвижность молекул жидкостей обеспечивает им возможность заполнять различные пустоты в твердой изоляции. Минеральные масла хорошо пропитывают такие пористые электроизоляционные материалы, как картоны, бумаги, дерево и др. Будучи хорошими диэлектриками, минеральные масла, проникнув в поры такой изоляции, улучшают их электрические характеристики. Так, например, у пропитанной минеральным маслом бумаги резко возрастает по сравнению с непропитанной электрическая прочность  $E_{ДР}$ . Минеральные масла при температурах около 70-80 °С обладают небольшой



вязкостью, поэтому частицы масла приобретают большую подвижность. Это позволяет использовать нефтяные масла в трансформаторах для охлаждения обмоток.

Масло в трансформаторах нагревается у обмоток и, притекая к холодным частям бака трансформатора, отдает им полученное тепло. Масло, имеющее большую вязкость, не обеспечит необходимого охлаждения трансформатора. На рис. 18 приведена кривая вязкости нефтяного трансформаторного масла в зависимости от температуры.

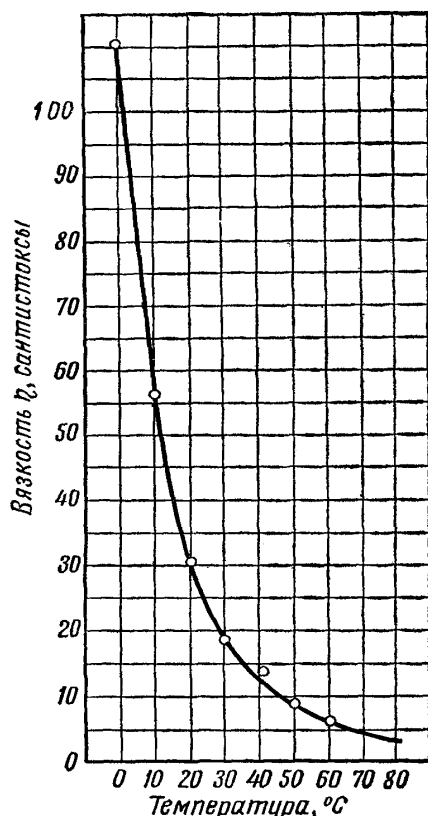


Рис. 18. Вязкость трансформаторного масла в зависимости от температуры

В высоковольтных трансформаторах нефтяное масло является не только теплопроводящей средой, но и главным электроизоляционным материалом. Оно заполняет пространство между обмотками трансформатора и тем самым усиливает изоляцию трансформатора.

Выполняя эту роль, масло должно обладать в первую очередь большой электрической прочностью и малой величиной тангенса угла диэлектрических потерь.

В высоковольтных выключателях применяется то же самое масло, что и в трансформаторах. Здесь масло выполняет не только функцию жидкого диэлектрика, изолирующего части выключателя от стенок бака, но и среды, гасящей электрическую дугу, возникающую между контактами выключателя при отключении им высоковольтных сетей.

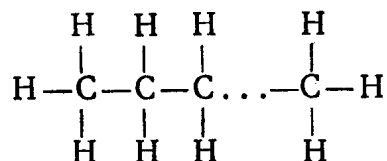
Процесс гашения электрической дуги состоит в следующем: при высокой температуре электрической дуги масло разлагается с выделением газов (водорода, ацетилена, этилена и др.). Газы вытесняют масло из части объема около контактов выключателя и образуют здесь газовое пространство. Давление в этом газовом пространстве повышается, в результате чего горение дуги прекращается.

В электрических кабелях минеральное масло применяется в чистом виде без каких-либо растворенных в нем веществ или в виде пропиточного состава для пропитки бумажной изоляции. В последнем случае в минеральное масло вводят канифоль, которая растворяется в

масле. В результате этого вязкость масла повышается, и оно не протекает в бумажной изоляции внутри кабеля.

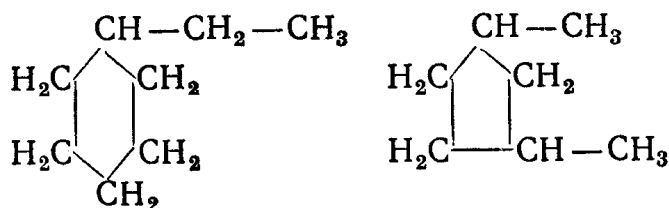
*Минеральные электроизоляционные масла.*

Минеральные масла получают методом дробной перегонки нефти. Химический состав их определяется составом нефти. Все нефтяные масла являются смесью различных углеводородов парафинового (метанового), нафтенового и ароматического рядов. Углеводороды парафинового ряда представляют собой соединения углерода и водорода в виде молекул цепочечной структуры:



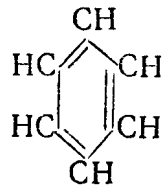
Как видно из этой формулы, цепочки могут быть различной длины в зависимости от количества соединенных между собой атомов углерода. Углеводороды метанового ряда обладают хорошей химической стабильностью, т. е. стойкостью против окисления.

Нафтеновые углеводороды представляют собой соединения углерода с водородом в виде замкнутых колец с боковыми цепями.



Поэтому они часто называются циклическими углеводородами. Содержание их в масле достигает 70-85 %.

Ароматические углеводороды тоже являются циклическими соединениями углерода с водородом, имеющими (аналогично нафтенам) небольшие боковые цепочки. Установлено, что удаление этих углеводородов из электроизоляционного масла приводит к его быстрому окислению, однако чрезмерное количество ароматических углеводородов в составе масел понижает температуру вспышки паров масла и вызывает выпадение осадков. В результате этого ухудшаются электрические характеристики масла. Количество ароматических углеводородов в масле регулируется в зависимости от химического состава нефти. Представителем ароматических соединений является бензол, химическая формула которого такова:



Как видно из этой формулы, ароматические соединения в отличие от нафтеннов имеют так называемую двойную связь между атомами углерода, что обеспечивает их стойкость против окисления.

В состав электроизоляционных нефтяных масел входят еще другие компоненты – органические кислоты, смолистые вещества, сернистые соединения.

Изготовление масел из нефти – сложный технологический процесс, состоящий из ряда физико-химических операций. Содержащиеся в нефти отдельные ее части кипят при разных температурах и поэтому могут быть из нее удалены отдельно – путем нагрева в вакууме до разных температур. При температурах ниже 300 °С из нефти выделяются легкие продукты: бензин, лигроин, керосин. Из оставшейся части, называемой мазутом, при температуре выше 300 °С выделяется соляровое масло. Путем последовательной обработки масла кислотой и щелочью из него удаляют химически нестойкие соединения и получают электроизоляционное масло. Полученное масло промывают теплой дистиллированной водой, вводимой в масло в виде тонких струек. После отстоя и удаления посторонних продуктов промытое водой масло сушат и очищают отбеливающей глиной от химически нестойких веществ. Для этого в масло вводят отбеливающие глины или земли. Затем это масло фильтруют, пропуская его через слой фильтровального картона, установленные в аппарате – фильтр-прессе.

Трансформаторное масло выпускается двух марок: масло трансформаторное и масло трансформаторное с антиокислительной присадкой. В состав масла второй марки вводится вещество – антиокислительная присадка для стабилизации физико-химических свойств масла.

Все трансформаторные масла обычно делят на следующие группы:

- 1) не бывшее в эксплуатации свежее масло, полученное с завода-изготовителя;
- 2) чистое сухое масло. В эту группу входят: а) еще не бывшее в эксплуатации; б) масло, уже бывшее в эксплуатации, но восстановленное химически;
- 3) масло, находящееся в эксплуатации;

4) масло, изъятое из обращения и подлежащее восстановлению (регенерации).

Свежее трансформаторное масло перед заливкой его в аппараты и трансформаторы подвергается испытанию. Главные его характеристики приведены в табл. 14.

Т а б л и ц а 14. Технические условия на свежее трансформаторное масло

| Марки              | Вязкость кинематическая, сст, при температуре (не более) |       | Кислотное число, (не более) | Температура вспышки паров, °С (не менее) | Температура застывания, °С (не выше) | Тангенс угла диэлектрических потерь (не более) |           |
|--------------------|--|-------|-----------------------------|--|--------------------------------------|--|-----------|
|                    | 20 °С  | 50 °С |                             |  |                                      | при 20 °С                                      | при 70 °С |
| Масло без присадки | 30   | 9,6   | 0,05                        | 135                                      | -45                                  | 0,003  | 0,025     |
| Масло с присадкой  | 30   | 9,6   | 0,03                        | 135                                      | -45                                  | 0,003  | 0,025     |

Как видно из таблицы, электрическая прочность свежего масла не нормируется. Эта характеристика нормируется «Правилами технической эксплуатации» лишь для сухого масла и масла, находящегося в эксплуатации.

Величины электрической прочности нормируются по величинам рабочих напряжений маслонеполненных аппаратов согласно табл. 15. Кроме того, для эксплуатационного масла температура вспышки должна быть не ниже 135 °С, а кислотное число не выше 0,4.

Т а б л и ц а 15. Пробивное напряжение свежего и эксплуатационного масла

| Название масла                  | Рабочее напряжение аппарата, кВ |       |        |        |
|---------------------------------|---------------------------------|-------|--------|--------|
|                                 | до 15                           | до 35 | до 220 | до 500 |
| Эксплуатационное, кВ            | 20                              | 25    | 35     | 45     |
| Свежее или регенерированное, кВ | 25                              | 30    | 40     | 50     |

Большое количество электроизоляционных нефтяных масел используют также в производстве силовых кабелей с бумажной изоляцией.

В зависимости от конструкции кабелей масла делятся по вязкости, величине и температуре застывания на следующие три группы: 1) масла малой вязкости МН-2; 2) масла средней вязкости С-110 и С-220; 3) масла вязкие П-28.

Маловязкое масло МН-2 применяется в маслонаполненных кабелях низкого и среднего давления (до 3 атм). Малая вязкость масла (около 9 сст при 50 °С) для таких кабелей необходима, чтобы обеспечить подпитку кабеля маслом через сравнительно небольшие каналы в нем при всех эксплуатационных температурах.

Средневязкие масла С-110 и С-220 предназначены для пропитки и заполнения маслонаполненных высоковольтных кабелей при давлении около 14 атм. Эти масла не содержат в своем составе ни ароматических углеводородов, ни асфальтосмолистых веществ. Они представляют собой технически чистую смесь нафтеновых и парафиновых углеводородов, поэтому обладают весьма устойчивыми электрическими характеристиками, особенно величиной  $tg\delta$ . Установлено, что чем больше вязкость таких масел, тем меньше величина  $tg\delta$ .

Наиболее вязкое масло применяется для кабелей с бумажной изоляцией до 35 кВ, у которых пропитывающим жидким веществом является масло П-28 с растворенной в нем канифолью. Вязкость этой маслоканифольной пропиточной массы должна иметь резко падающую кривую зависимости ее от температуры. В процессе производства кабеля при его пропитке при температурах 115-130 °С необходима малая вязкость массы. В процессе эксплуатации при 65-80 °С нужна, наоборот, высокая вязкость, затрудняющая передвижение пропиточной массы в кабеле, если он расположен вертикально или наклонно.

Наряду с высокой электрической прочностью для всех кабельных масел весьма важно, чтобы величина  $tg\delta$  была малой и с повышением температуры не возрастала бы резко.

Масла в кабелях соприкасаются с металлами – медью, свинцом, являющимися катализаторами их окисления, поэтому необходимо, чтобы они обладали высокой химической устойчивостью против окисления в эксплуатационных условиях. Кроме того, в высоковольтных маслонаполненных кабелях недопустимы газовые пузырьки, ослабляющие электрическую прочность изоляции кабеля. При высоких напряжениях электрического поля в кабелях нафтеновые и парафиновые углеводороды могут разлагаться и выделять водород, т. е. образовывать газовые пузырьки. В кабелях с вязкой пропиткой (П-28) такие газовые выделения поглощаются канифолью. В маслонаполненных кабелях с высоким давлением процесс ионизации, в результате которого выделяется водород, отсутствует или значительно ослаблен давлением. Поэтому газовыделение – важный показатель лишь для маслонаполненных кабелей низкого давления. В табл. 16 приведены основные характеристики двух кабельных масел.

Т а б л и ц а 16. Физические и электрические характеристики электроизоляционных масел

| Показатели                     | МН-2                  | С-110                 |
|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Вязкость, сст:                 |                       |                       |
| - при 20 °С.                   | 37,3                  | 680-800               |
| - при 50 °С.                   | 9,0                   | 80-120                |
| - при 100 °С                   | -                     | 15,0-17,5             |
| Температура вспышки, °С        | 135                   | 200                   |
| Температура застывания, °С     | -45                   | -15                   |
| Электрическая прочность, кВ/мм | 18-20                 | 18-20                 |
| $tg\delta$ при 50 Гц, 100 °С   | 0,003                 | 0,003                 |
| $\rho_V$ при 20 °С, Ом·см      | $10^{14}$ - $10^{15}$ | $10^{14}$ - $10^{15}$ |

Применяемое в бумажно-масляных конденсаторах нефтяное масло служит электроизоляционным материалом, обеспечивающим высокие величины напряженности электрического поля. Поэтому для конденсаторного масла весьма важны электрические характеристики, а именно: малая величина  $tg\delta$ , высокая электрическая прочность, большое удельное объемное сопротивление. Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков для конденсатора желательна большей величины, однако в нефтяных маслах этого достигнуть нельзя, так как эти масла – неполярные диэлектрики.

Конденсаторное масло получают в результате более тщательной очистки, чем трансформаторное масло. Очистка состоит из ряда последовательных химических обработок масла с помощью кислот, щелочей, промывки горячей водой и очистки отбеливающими глинами.

*Влияние примесей и физико-химических факторов на свойства электроизоляционных масел.*

Свойства масел изменяются в зависимости от примесей, которые могут попасть в них в условиях эксплуатации, а также от температуры и других факторов.

Следует указать, что электрическая прочность масла  $E_{DP}$  снижается от содержания в нем воды и различных твердых примесей. Вода, попавшая в масло, может в нем раствориться в большом количестве (молекулярная вода). При понижении температуры эта растворенная вода выпадает, создавая мельчайшие капельки (эмульсионная вода), распространенные по всему объему масла.

Молекулярная вода оказывает на величину электрической прочности небольшое влияние. Эмульсионная же вода сильно снижает пробивную прочность.

Если такую зависимость определить у одного и того же увлажненного масла при разных температурах, то величины электрической

прочности при более высокой температуре расположатся выше (рис. 19). Это объясняется тем, что при высокой температуре часть воды из эмульсионной перешла в молекулярную.

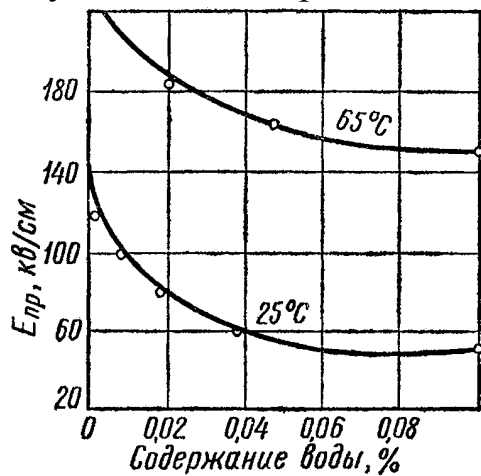


Рис. 19. Зависимость  $E_{пр}$  трансформаторного масла от содержания в нем воды (при разной температуре)

значительно меньше, чем в первом случае. Это объясняется неоднородностью электрического поля, образуемого электродами с острыми краями.

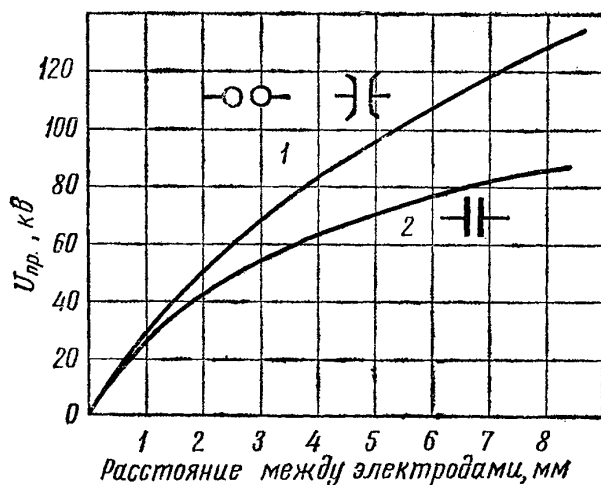


Рис. 20. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от расстояния между электродами различной формы

Длительность воздействия напряжения также влияет на электрическую прочность. При импульсных напряжениях электрическая прочность масла выше, чем при переменном или постоянном напряжении. При увеличении внешнего давления прочность масла также увеличивается.

Повышение температуры сухого масла снижает его электрическую прочность. Большое влияние на электрическую прочность масла и его пробивное напряжение оказывает форма электродов и расстояние между ними. На рис. 20 показана зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от расстояния между электродами в виде шаров и закругленных пластин (кривая 1) и пластин с острыми краями (кривая 2). На рисунке видно, что в последнем случае значения  $U_{пр}$  с увеличением расстояния между электродами

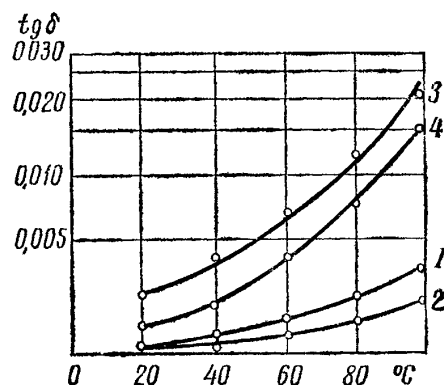


Рис. 21. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь двух различных масел от температуры: 1 – масло первой марки, 2 – масло второй марки (свежее), 3 – масло первой марки, 4 – масло второй марки (бывшее в эксплуатации)

Величина тангенса угла диэлектрических потерь у масел обусловлена их электропроводностью. С повышением температуры электропроводность увеличивается и аналогично этому нарастает  $tg\delta$ . Это хорошо видно на рис. 21, где приведены кривые зависимости  $tg\delta$  от температуры для двух различных масел. Кривые показывают, что увеличение  $tg\delta$  масел в случае их окисления происходит в результате повышения проводимости масел (графики 3 и 4 на рис. 21).

Все электроизоляционные масла должны обладать высокой стабильностью своих характеристик, которые могут изменяться, когда масло стареет. Старение масла в основном выражается в окислении его кислородом воздуха.

Высокая температура в эксплуатационных условиях это окисление ускоряет. Старение масла ускоряется также металлическими катализаторами: медью, латуной, железом и другими металлами. Присутствие воды в масле ускоряет процесс его старения. При старении в масле образуются твердые смолообразные примеси, не растворимые и растворимые в горячем масле. Такие примеси выпадают в виде осадков на обмотках и других частях трансформатора, что затрудняет теплоотвод от нагретых частей. Будучи же растворенными в масле, примеси значительно ухудшают его электрические свойства. В процессе старения масла в нем образуются кислоты, которые могут вызвать разрушение изоляции обмоток.

Чтобы замедлить старение масел, в них вводят вещества, задерживающие окисление – ингибиторы. Однако присадка ингибиторов не может полностью предохранить масло от окисления и старения. Поэтому электроизоляционные масла следует хранить и перевозить в сухой чистой таре, перекачивать их по чистым металлическим трубопроводам (но не по резиновым шлангам, которые, растворяясь, загрязняют масло). В условиях эксплуатации масло необходимо защищать от проникновения в него воздуха и влаги. Крышки маслонаполненных аппаратов должны плотно закрываться и иметь консерваторы, т. е. дополнительные бачки. Иногда в трансформаторах пространство над уровнем масла заполняют химически неактивным газом, например азотом, который химически не действует на масло и защищает масло от окисления.

#### *Очистка и сушка электроизоляционных масел.*

Несмотря на меры предохранения масла от окисления оно все же окисляется и со временем в нем появляются твердые и жидкие продукты окисления и вода. Поэтому находящееся в эксплуатации масло необходимо время от времени очищать от примесей и воды и даже



регенерировать, т. е. восстановить его свойства. Существует несколько способов очистки масла от примесей и воды. Воду из масла можно удалить путем испарения, нагревая масло до температуры кипения воды. Однако следует учесть, что всякое нагревание масла при наличии доступа воздуха портит его. Поэтому сушку масла производят в специальных установках под вакуумом. Этим, во-первых, устраняется в значительной степени воздух и, следовательно, кислород и, во-вторых, понижается температура кипения воды, т. е. облегчается ее испарение.

На рис. 22 показана схема сушки масла при его распылении в вакууме. Масло насосом 2 через фильтр 1, теплообменник 3 и электроподогреватель 4 подается в распыленном состоянии в вакуумный котел 5, откуда откачиваются пары воды и газа (вакуумным насосом 8). Далее масло подается насосом 6 через теплообменник 3 и фильтр-пресс 7, а затем поступает непосредственно в трансформатор или в тару. В этом случае масло освобождается от воды и от примесей.

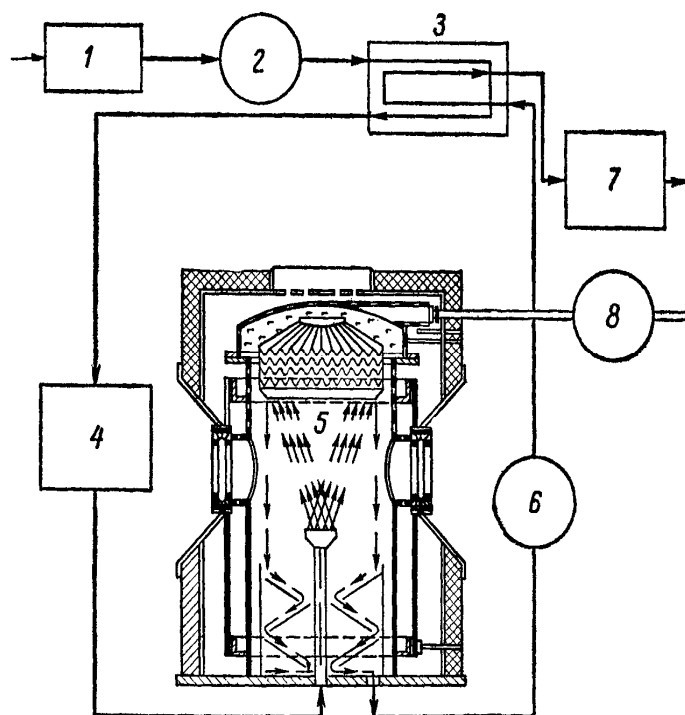


Рис. 22. Схема сушки масла распылением под вакуумом: 1 – предварительный фильтр, 2 – насос, 3 – теплообменник, 4 – электроподогреватель, 5 – вакуумный котел, 6 – насос, 7 – фильтр-пресс, 8 – вакуумный насос

От твердых примесей масло можно очистить при помощи центрифуги, где твердые частицы, имеющие больший удельный вес, чем масло, отбрасываются к стенкам центрифуги и удаляются. Масло

здесь подвергается разделению на тонкие пленки, поэтому имеется опасность его окислить, так как для лучшей очистки и понижения вязкости масло через центрифугу пропускают в нагретом состоянии (до 40-60 °С).

В современных центрифугах удаление примесей из масла производят под вакуумом.

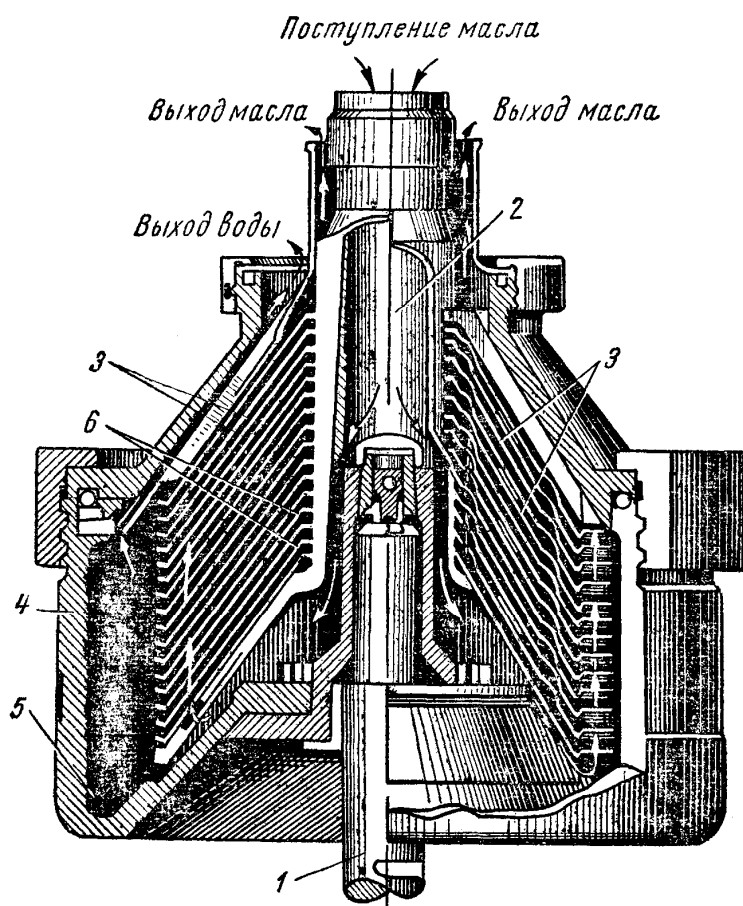


Рис. 23. Центрифуга для очистки масла: 1 – вал центрифуги, 2 – центральный канал, 3 – диски (тарелки), 4 – корпус центрифуги, 5 – грязевик, 6 – отверстие в тарелках

На вал 1 центрифуги в барабане (рис. 23) насажены металлические конические тарелки 3. Они расположены на расстоянии долей миллиметра одна от другой.

Процесс очистки масла центрифугой от загрязняющих его твердых частичек (процесс осветления) называется *кларификацией*. Удаление же центрифугой воды носит название *пурификации* масла. Для этих двух процессов тарелки барабана собираются несколько различно. На рис. 23 показан разрез центрифуги, где слева показана сборка тарелок для *кларификации*, а справа – для *пурификации*. Грязное мас-

ло в обоих случаях поступает сверху в центральный канал 2 и из него входит в корпус 4 снизу, а затем поднимается вверх, разливаясь по тарелкам 3.

В случае *кларификации* масло поступает на тарелки с периферии и, двигаясь к центру, оно попадает в отверстия б тарелок, затем поднимается по этим отверстиям к выходу. Твердые же частицы, скользя по нижней поверхности вышележащей тарелки, отбрасываются к стенкам корпуса 4 а затем попадают в камеру загрязнения (грязевик 5), где остаются до конца операции. После остановки центрифуги осевшие примеси удаляются.

В случае *пурификации* влажное масло поступает сразу в отверстие тарелок, которые расположены ближе к периферии, и разливается по тарелкам 3, направляясь к их центру, вода же отбрасывается в камеру 5 и сразу удаляется из центрифуги. Для осуществления этого режима центрифугу предварительно заполняют теплой водой.

От воды и твердых частичек примесей масло очищают также пропусканием его через картонные фильтры с помощью насоса, который создает давление 3-8 атм. Такая установка называется фильтр-прессом (рис. 24). Листы фильтровального картона 3 закладывают между выступами 2 металлических рам 1, которые на противоположных углах по диагонали имеют отверстия 4 и 5.

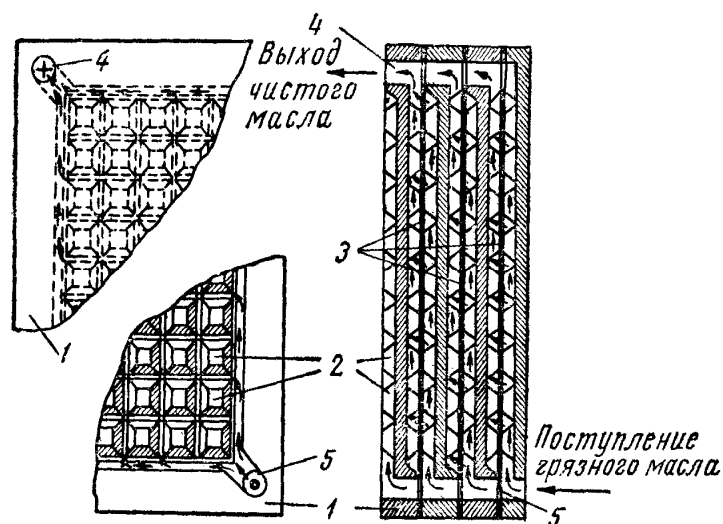


Рис. 24. Схема устройства фильтр-пресса: 1 – металлические рамы, 2 – выступы рам, 3 – фильтровальный картон, 4 и 5 – выходное и входное отверстия в рамах фильтр-пресса

Для повышения скорости прохождения масла через картонные фильтры его нагревают до 40-50 °С и прогоняют под давлением 3-8 атм. С загрязнением картонных листов давление начинает увеличи-

ваться до 6-8 атм, тогда фильтр-пресс останавливают и заменяют листы картона. Обычно картон меняют через 4 ч работы, а в случае очень сильно загрязненного масла – через каждый час.

Загрязненные листы картона промывают и высушивают при 80 °С в течение суток, после чего их снова пускают в работу. Фильтр-пресс обеспечивает хорошую очистку масла от примесей и от влаги и по обслуживанию он значительно проще центрифуги.

#### *Регенерация электроизоляционных масел.*

С увеличением степени старения масла увеличивается его кислотное число. Если кислотное число в масле достигает величины 0,4-0,50, то масло регенерируют. Это осуществляется в основном при помощи адсорбентов – веществ, обладающих способностью адсорбировать, т. е. поглощать продукты старения масла и влагу. Кроме природных адсорбентов, в качестве которых используют мелкораздробленные отбеливающие глины, применяют «силикагель» – особый вид кремниевой кислоты и активную окись алюминия, которые дороже природных адсорбентов. Адсорбент тем эффективнее, чем мельче его частички, но особенно тонкого помола добиваться не следует, так как тогда частички будут плохо оседать в масле. Обычно размер частичек определяется ситами с количеством отверстий 1000-2500 на 1 см<sup>2</sup>. Перед употреблением адсорбент должен быть просушен при температуре 150-200 °С. Количество адсорбента обычно составляет 10-15 % веса масла.

Очистку масла адсорбентами производят двумя способами: контактным и перколяцией. Контактный способ состоит в том, что в нагретое масло вводится адсорбент и смесь тщательно перемешивается, отстаивается и фильтруется. При перколяции очистка масла происходит непрерывно. Нагретое до 80-100 °С масло поступает в металлический цилиндр снизу, через сетчатое дно, на которое закладывают определенный слой адсорбента. При такой подаче масла фильтр не забивается мелкими частицами адсорбента и воздух быстрее вытесняется из цилиндра. В процессе очистки целесообразно отбирать из нижней части фильтра 10-20 % адсорбента и заменять его новым.

В случае сильно постаревшего масла регенерацию природными отбеливающими глинами совмещают с химическими способами очистки. Таким является щелочноземельный метод, который состоит в следующем. Масло обрабатывают 3-5-процентным раствором едкого натра, перемешивают и дают отстояться. Затем спускают образовавшуюся эмульсию и непрореагировавшую щелочь. После этого масло

промывают дистиллированной водой, обрабатывают отбеливающей глиной и пропускают через фильтр-пресс или центрифугу.

Более полное химическое восстановление масла осуществляется по кислотнo-щелочноземельному методу. В этом случае в регенерируемое масло вводят 0,5-1,5 % крепкой серной кислоты, которая связывает все нестойкие соединения и переводит их в кислый гудрон. Отстоявшееся после этого масло обрабатывают щелочью для нейтрализации органических кислот и остатков серной кислоты. Затем масло промывают дистиллированной водой и обрабатывают адсорбентами, после чего фильтруют через фильтр-пресс или пропускают через центрифугу.

В заключение следует отметить один крупный недостаток всех нефтяных электроизоляционных масел, заключающийся в их горючести и в выделении из них под действием электрической дуги газообразных продуктов распада (водород, этилен, метан и др.). Эти газы могут образовать взрывоопасные смеси с воздухом. Поэтому в ряде случаев нефтяные масла заменяют негорючей синтетической жидкостью – соволом или применяют трансформаторы с сухой негорючей изоляцией.

#### *Синтетические жидкие диэлектрики.*

Из синтетических жидких диэлектриков наибольшее применение получили совол и «Калория-2».

Совол – жидкий синтетический диэлектрик. Исходным материалом для его изготовления служит кристаллическое вещество – дифенил, представляющий собой двухъядерный углеводород ароматического ряда. Химическая формула дифенила:  $H_5C_6-C_6H_5$ .

В расплавленном состоянии дифенил хлорируется, т. е. через него пропускают хлор в присутствии катализатора (олово, железо и др.). При этом происходит реакция замещения атомов водорода атомами хлора в молекулах дифенила. Если будет замещено более четырех атомов водорода атомами хлора, то продукт получается маслообразным. В соволе атомами хлора замещено пять атомов водорода  $Cl_3H_5C_6-C_6H_5Cl_2$ .

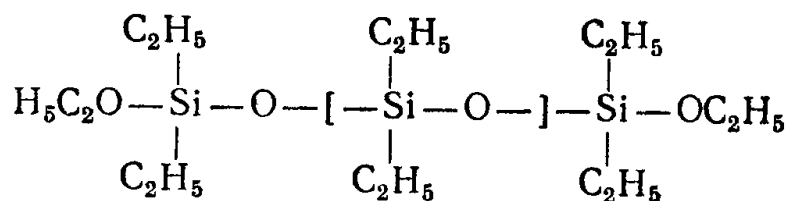
Так как молекулы совола построены не симметрично, то они полярны и совол является полярным диэлектриком. Его диэлектрическая проницаемость совпадает с величиной диэлектрической проницаемости изоляционных бумаг, что увеличивает емкость конденсаторов и повышает электрическую прочность бумажной изоляции. Поэтому совол применяется в бумажных конденсаторах в качестве про-

питающего вещества. Электрическая прочность совола близка к электрической прочности нефтяных изоляционных масел.

Совол является негорючим веществом, что составляет его главное преимущество перед нефтяным маслом. Однако он имеет существенные недостатки, ограничивающие его применение. У совола температура застывания  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, совол обладает большой вязкостью, которая при  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  колеблется в пределах 185-200 сст, тогда как у нефтяного масла она равна 14 сст. Это исключает пропитку бумаги при комнатной температуре и требует подогрева совола до температуры  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Большим недостатком совола является его токсичность (ядовитость) вследствие наличия в нем хлора. Поэтому совол необходимо хранить в хорошо закрывающейся таре. При работе с соволом надо быть осторожным, так как он вызывает раздражение слизистых оболочек.

«Калория-2» принадлежит к группе кремнийорганических жидкостей, молекулы которых представляют собой линейные цепочки типа



Эта жидкость выгодно отличается от совола по ряду характеристик. Ее температура застывания ниже  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура вспышки  $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{tg}\delta$  при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  равен 0,0003, а при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  равен 0,0008, удельное объемное сопротивление почти не изменяется в интервале температур от  $20$  до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и составляет  $(2,5-1)\cdot 10^{13}$  Ом·см. Однако электрическая прочность жидкости «Калория-2» несколько ниже прочности нефтяного масла.

Кремнийорганическая жидкость «Калория-2» применяется в бумажных конденсаторах в качестве питающего жидкого диэлектрика, обладающего высокой стабильностью характеристик в широком интервале температур от  $-60$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

За последнее время разработано и используется для пропитки силовых кабелей до 10 кВ синтетическое масло «Октол». Оно представляет собой жидкий продукт совместной полимеризации бутиленов и изобутиленов и является прозрачной жидкостью, почти не имеющей кислоты, и не содержит сульфатов хлорида и свободной серы. Октол

обладает большой вязкостью и применяется в качестве вязкой пропитки бумажной изоляции силовых кабелей.

Т а б л и ц а 17. Основные характеристики электроизоляционных жидкостей

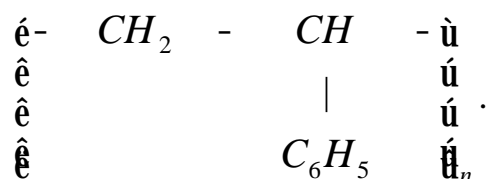
| Характеристики                                   | Минеральные масла                  |                                    | Совол                              | «Калория-2»                        | Октол                              |
|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|  | трансформаторное                   | конденсаторное                     |                                    |                                    |                                    |
| Плотность, г/см <sup>3</sup>                     | 0,84-0,89                          | 0,85-0,92                          | 1,50-1,56                          | 0,98-0,99                          | 0,85                               |
| Кислотное число, мг КОН/г масла                  | 0,03-0,05                          | 0,015-1,020                        | 0,01-0,02                          | 0,06-0,07                          | 0,03                               |
| Температура застывания, °С (не выше)             | -45                                | -45                                | -8                                 | -60                                | -15                                |
| Температура вспышки паров, °С (не ниже)          | 135                                | 135                                | 200-230                            | 145                                | 165                                |
| Вязкость при 20 °С, сСт                          | 28-30                              | 30-32                              | 200                                | -                                  | -                                  |
| Вязкость при 50 °С, сСт                          | 9,0-9,6                            | 8,5-9,0                            | 9                                  | -                                  | 410-460                            |
| Удельное объемное сопротивление при 20 °С, Ом·см | 10 <sup>14</sup> -10 <sup>15</sup> | 10 <sup>14</sup> -10 <sup>16</sup> | 10 <sup>14</sup> -10 <sup>15</sup> | 10 <sup>13</sup> -10 <sup>15</sup> | 10 <sup>13</sup> -10 <sup>14</sup> |
| Диэлектрическая проницаемость при 20 °С          | 2,1-2,4                            | 2,1-2,3                            | 5,0-5,2                            | 2,6-2,8                            | 2,2-2,4                            |
| Тангенс угла диэлектрических потерь при 20 °С    | 0,0006-0,001                       | 0,0003-0,0006                      | 0,002-0,004                        | 0,0003-0,0005                      | 0,005                              |
| Электрическая прочность при 20 °С                | 15-20                              | 20-25                              | 14-18                              | 18-20                              | 12-15                              |

В табл. 17 приведены основные характеристики широко применяемых электроизоляционных жидкостей.

### 1.4.3. Полимерные диэлектрики

К полимеризационным диэлектрикам, широко применяемым в электротехнике, относятся полистирол, полиэтилен, поливинилхлорид и др.

Полистирол – твердый прозрачный материал. Имеет структурную формулу



Он обладает высокими электроизоляционными свойствами и стоек к воде, кислотам и щелочам. Полистирол получают в результате реакции полимеризации жидкого вещества – стирола. Различают

блочный полистирол, выпускаемый в виде листов, пластин и гранул, а также эмульсионный полистирол, получаемый сразу в виде порошка. Для получения порошкообразного (эмульсионного) полистирола реакцию стирола производят в водном растворе щелочных веществ при температуре 85-90 °С.

Из блочного полистирола изоляционные изделия получают методом механической обработки, требующим большой затраты труда. Из гранулированного полистирола изделия изготавливают методом литья под давлением. Для этого гранулы полистирола загружают в расплавитель – сосуд из нержавеющей стали с электрическим обогревом (до 120 °С). Полистирол, переведенный в жидкое состояние, поступает под давлением в разъемные металлические формы. Так получают литые изделия из полистирола.

Из эмульсионного порошкообразного полистирола изделия изготавливают методом горячего прессования в стальных пресс-формах. Методы горячего прессования и литья под давлением дают меньшее количество отходов и они менее трудоемки.

Изделия из эмульсионного полистирола обладают несколько пониженными электрическими характеристиками, так как эмульсионный полистирол содержит остатки щелочных веществ, применяемых при его изготовлении.

Полистирол – термопластичный диэлектрик, размягчающийся при 120 °С. При 300 °С полистирол деполимеризуется, т. е. снова переходит в исходное вещество – стирол.

Полистирол растворяется в неполярных растворителях: бензоле, толуоле, ксилоле, четыреххлористом углероде и в некоторых других растворителях.

Из полистирола изготавливают каркасы катушек, изоляционные панели, основания и изоляторы для электроизмерительных приборов. На основе полистирола изготавливают также электроизоляционные лаки.

Полистирол состоит из молекул линейной структуры, но они расположены в материале хаотически. Вытягивание размягченного полистирола через щель фильеры позволяет ориентировать молекулы в направлении вытягивания материала.

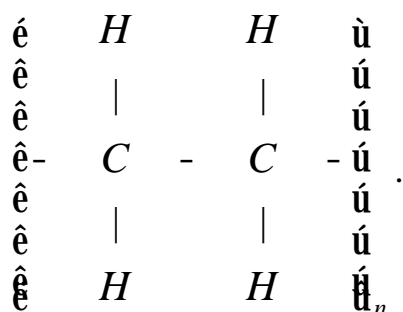
Способом вытягивания размягченного полистирола через узкую щель – фильеру получают гибкие полистирольные пленки (стиропленки) толщиной от 20 до 100 мкм (микрон) и шириной от 10 до 300 мм.



Полиэтилен – твердый непрозрачный материал светло-серого цвета, несколько жирный на ощупь, Электроизоляционные свойства и стойкость к воде у полиэтилена находятся на таком же высоком уровне, как и у полистирола. В отличие от полистирола полиэтилен обладает гибкостью, что позволяет применять его в качестве основной изоляции высокочастотных кабелей, а также в качестве защитных шлангов.

Различают полиэтилен высокого (ВД) и низкого (НД) давления. Полиэтилен получают из газа этилена ( $H_2C=CH_2$ ) посредством его полимеризации под давлением в присутствии катализатора – кислорода (0,05 %).

Процесс получения полиэтилена высокого давления (ВД) протекает при давлениях 1500-2500 атм и при температурах 180-200 °С. Полиэтилен низкого давления (НД) получают при давлениях 1-5 атм и при температуре 60 °С, но с применением специальных катализаторов, например четыреххлористого титана. При этом образуется молекула линейной структуры:



Полиэтилен – термопластичный материал. Он поступает в промышленность в виде гранул. Из полиэтилена изделия получают методом литья под давлением, горячим прессованием и методом экструзии (горячее непрерывное выдавливание).

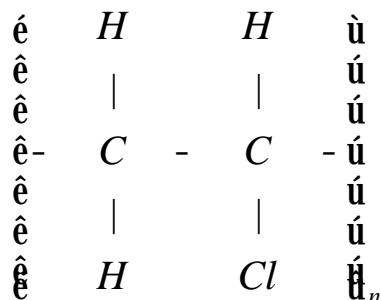
Метод экструзии применяют при нанесении полиэтиленовой изоляции на провод, а также при изготовлении изоляционных шлангов и трубок, Изделия из полиэтилена могут быть сварены между собой. Из полиэтилена ВД получают изоляционные гибкие пленки толщиной от 30 до 200 мкм и шириной от 1 до 1,5 м.

Из более твердых сортов полиэтилена НД (с большим молекулярным весом) изготавливают негибкие электроизоляционные изделия: каркасы катушек, панели и др. При комнатной температуре полиэтилены не растворяются ни в одном из растворителей. Только при нагреве до 60 °С полиэтилены растворяются в ксилоле, четыреххлористом углероде, в хлорированных углеводородах и минеральных маслах.

Все полиэтиленовые изделия нестойки к солнечному свету, т. е. растрескиваются при длительном воздействии солнечных лучей. С целью обеспечения стойкости к световому старению (светостойкость) в полиэтилены вводят сажу – окрашивают в черный цвет.

Поливинилхлорид (полихлорвинил, ПВХ) представляет собой порошок белого цвета, из которого получают горячим прессованием или горячим выдавливанием прочные изделия (листы, трубы и др.), стойкие к минеральным маслам, многим растворителям, щелочам и кислотам.

Порошкообразный поливинилхлорид получают в результате реакции полимеризации газообразного вещества – винилхлорида  $H_2C=CHCl$  в присутствии перекисного катализатора (перекись водорода и др.). Реакция проводится с сжиженным винилхлоридом в водном растворе щелочных веществ (водноэмульсионный метод) при температуре 50-60 °С. ПВХ имеет структурную формулу



В отличие от полистирола и полиэтилена поливинилхлорид (полихлорвинил) является материалом негорючим.

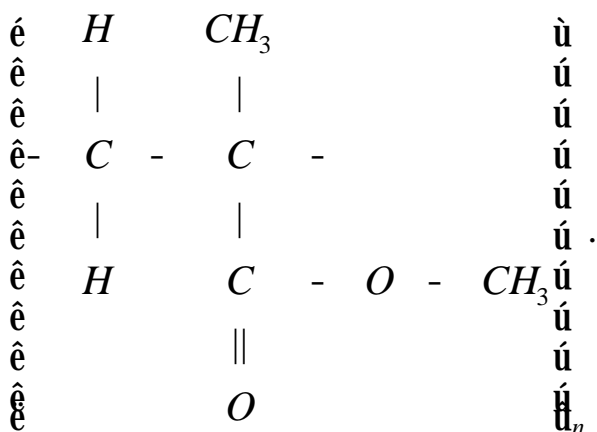
Горячим выдавливанием разогретой массы порошкообразного поливинилхлорида через отверстия (в стальном мундштуке) 1 получают твердый материал – винипласт в виде листов, пластин, труб и стержней. Все винипластовые изделия имеют светло-коричневый цвет. Они отличаются химической стойкостью к минеральным маслам, щелочам, многим кислотам и растворителям. Винипластовые изделия обладают высокой механической прочностью, особенно при ударных нагрузках, и обладают хорошими электроизоляционными свойствами.

Винипласт – термопластичный материал. Он легко формируется в металлических формах при температуре 160 °С. Изделия из винипласта поддаются всем видам механической обработки (обточка, фрезерование и др.), а также легко свариваются. Из поливинилхлорида изготавливают баки для аккумуляторов и различные электроизоляционные детали (панели и проч.), стойкие к ударным нагрузкам.

Недостатками винипласта являются его малая морозостойкость (–15 °С) и недостаточно высокая теплостойкость (65 °С). Разложение винипласта наступает при температуре 170-180 °С. Полихлорвиниловый пластикат – гибкий рулонный материал, получаемый из порошка поливинилхлорида, смешанного с пластификаторами – густыми маслообразными жидкостями. Пластификаторов вводится от 30 до 65 %. Кроме пластификаторов в полихлорвиниловый пластикат вводят: красители, наполнители и термостабилизаторы. Все эти вещества перемешивают с порошкообразной полихлорвиниловой смолой и полученную смесь пропускают несколько раз между нагретыми стальными вальцами. В результате такой переработки получают гибкий, эластичный материал – полихлорвиниловый пластикат в виде лент толщиной от 0,8 до 1,5 мм и шириной 40 мм и более, а также в виде крошки.

Полихлорвиниловый пластикат широко применяется в качестве основной изоляции монтажных и установочных проводов, а также для изготовления защитных оболочек – шлангов для кабелей.

Органическое стекло (полиметилметакрилат) представляет собой высокополимерный, термопластичный материал. Это прозрачная синтетическая смола, легко окрашиваемая во многие цвета. Структурная формула



Полиметилметакрилат устойчив к разбавленным кислотам и щелочам, а также к бензину и минеральным маслам. Он растворяется в ароматических углеводородах (бензоле, толуоле, ксилоле), в хлорированных углеводородах.

Органическое стекло поддается всем видам механической обработки: распиливается, сверлится, фрезеруется и обтачивается. Для предохранения органического стекла от царапин при его механической обработке материал предварительно оклеивают бумагой. Детали из органического стекла легко склеиваются дихлорэтановым клеем.

Этот клей получается растворением стружки органического стекла в дихлорэтаноле (5г стружки на 100 г дихлорэтанола). Склеиваемые поверхности должны быть хорошо подогнаны и промыты бензином. Места склейки подвергаются сдавливанию в течение 2-4 ч.

Органическое стекло и изделия из него можно сваривать в специальных устройствах при температуре 140-150 °С с применением давления на свариваемые поверхности 5-10 кгс/см<sup>2</sup>.

Под действием электрической дуги органическое стекло выделяет большое количество газов (СО, Н<sub>2</sub>, СО<sub>2</sub> и др.), которые способны гасить электрическую дугу. Поэтому из органического стекла изготовляют защитные высоковольтные разрядники. Они представляют собой цилиндры с толстой стенкой (20-30 мм), внутри которых помещаются на некотором расстоянии друг от друга металлические стержни. Один из этих стержней присоединяется к проводу линии электропередачи, а другой – к земле. При ударе молнии в линию электропередачи между стержнями, находящимися внутри цилиндра из органического стекла, возникает электрическая дуга. Она вызывает разложение органического стекла на газы, которые накапливаются в узком внутреннем пространстве цилиндрического корпуса разрядника и создают повышенное давление газов. Вследствие этого горение электрической дуги прекращается. Из органического стекла изготовляют также шкалы приборов.

Капрон (поликапролактан) представляет собой твердый материал белого или светло-желтого цвета. Это синтетическая смола, получаемая в результате полимеризации капролактама – порошкообразного вещества с температурой плавления 70 °С. Полученную смолу – капрон – выдавливают через отверстие в дне автоклава в виде узких лент. Последние попадают в ванну с проточной водой, где отмываются от низкомолекулярных веществ, ухудшающих свойства капрона. Отмытые и остуженные в воде капроновые ленты поступают на рубильную машину, где их рубят на кусочки (крошка) длиной 10 и толщиной 2-3 мм. Полученную крошку подвергают дополнительной промывке теплой водой, а затем сушат. Высушенную капроновую крошку доставляют и хранят в резиновых мешках, так как она способна поглощать влагу из воздуха.

#### *Поликонденсационные органические диэлектрики.*

Из этой группы высокополимерных материалов в электротехнике получили наибольшее применение; резольные, новолачные, полиэфирные и эпоксидные смолы.

Резольные смолы являются термореактивными веществами, которые в своей конечной стадии не размягчаются при нагревании.

Переход в неплавкое и нерастворимое состояние у резольных смол совершается в три стадии. Только что полученная смола находится в первоначальной стадии *A* (резол). Она размягчается при нагреве и растворяется в растворителях. При дальнейшем нагревании резольная смола переходит в стадию *B*, в которой она еще может размягчаться (при 95-100 °С), но уже не растворяется в растворителях. При последующем нагревании смола переходит в конечную стадию *C*. В этой стадии резольная смола состоит из больших трехмерных молекул и уже не способна плавиться и растворяться. Это свойство резольных смол используется в производстве термореактивных пластмасс.

Из резольных смол наибольшее применение в электротехнике имеет бакелитовая смола (бакелит). Она образуется в результате реакции поликонденсации, протекающей между кристаллическим фенолом ( $C_6H_5OH$ ) и формалином (40-процентный раствор газа – формальдегида  $CH_2O$  в воде) в присутствии щелочного катализатора – гидрата окиси бария  $Ba(OH)_2$  или гидрата окиси аммония  $RH_4OH$  – в виде 25-процентного раствора в воде. Формальдегид берется в избытке. Для получения бакелитовой смолы определенное количество компонентов (фенол, формалин и катализатор) загружают в варочный котел, где они перемешиваются вращающейся мешалкой. Затем варочный котел нагревают до 95 °С.

При этой температуре начинается реакция поликонденсации, в результате которой в нижней части варочного котла образуется густая сиропобразная масса светло-коричневого цвета. Это бакелитовая смола в первоначальной стадии *A*. В верхней же части котла над слоем смолы располагается слой воды (надсмольная вода), являющаяся побочным продуктом реакции. После окончания варки воду откачивают; получившуюся смолу сушат под вакуумом температуре 60-70 °С, а затем разливают в металлические противни.

Охлажденная (до комнатной температуры) бакелитовая смола представляет собой твердое хрупкое вещество коричневого цвета. Она имеет характерный запах фенола (карболовой кислоты). Бакелитовая смола, измельченная до порошкообразного состояния, применяется в качестве связующего вещества в пластмассах. Бакелитовую смолу используют еще для получения бакелитовых лаков. Чтобы получить спиртовой бакелитовый лак, этиловый спирт вводят в варочный котел для растворения высушенной смолы в стадии *A*. Обычно по-

лучают лак с содержанием 50-65 % бакелитовой смолы. С целью экономии этилового спирта широко применяют жидкие водно-эмульсионные бакелитовые смолы, содержащие 15-20 % воды. Спиртовыми лаками и жидкими смолами пропитывают волокнистые основы (бумага, ткани), применяемые для производства слоистых электроизоляционных материалов – гетинакса, текстолита и стеклотекстолита.

Если вместо кристаллического фенола взять крезол (жидкое вещество) и провести поликонденсацию между крезолом и формальдегидом, то получится крезолоформальдегидная смола. Эта смола тоже относится к резольным смолам. Она обладает более высокими электроизоляционными свойствами по сравнению с фенолоформальдегидной смолой.

В своей конечной стадии *C* резольные смолы обладают стойкостью к минеральным маслам и к воде, но они нестойки к электрическим искрам. Под действием искровых разрядов поверхность резольных смол легко обогащается углеродом, в результате чего создаются науглероженные токопроводящие дорожки. Вследствие этого пластмассовые изделия, выполненные на основе резольных смол, не рекомендуется применять там, где возможно образование электрически искр.

Новолачные смолы (новолаки), как и резольные, получают в результате реакции поликонденсации между фенолом и формальдегидом, но при недостатке формальдегида. При этом применяют кислотный катализатор – соляную кислоту.

Полученная новолачная смола представляет собой густую массу светло-коричневого цвета, которую в нагретом состоянии разливают в противни. В остуженном состоянии новолачная смола представляет собой твердое хрупкое вещество, растворяющееся в этиловом спирте и ацетоне. Электроизоляционные свойства новолачных смол ниже, чем у резольных смол из-за наличия в них кислотного катализатора. Новолачные смолы с улучшенными электроизоляционными свойствами изготавливаются на основе фенола, анилина и формальдегида.

Новолачные смолы являются термопластичными веществами. Они сохраняют плавкость и растворимость при длительном хранении и даже при нагревании до 200 °С. Новолачные смолы могут быть переведены в неплавкое и нерастворимое состояние при взаимодействии их (в нагретом состоянии) с уротропином  $(CH_2)_6N_4$ . Этим пользуются при получении быстро прессующихся пластмасс на основе новолачных смол.

В порошкообразную новолачную смолу вводят 12-15 % уротропина (порошок белого цвета). Эти два порошкообразных вещества тща-

тельно смешивают друг с другом, а также с красителями и наполнителями (древесная мука и др.). Из полученной смеси прессуют в стальных, нагретых до 150-180 °С пресс-формах пластмассовые детали для электрических аппаратов низкого напряжения (основания и крышки выключателей, патронов), а также конструкционные детали (кнопки, рукоятки и др.).

Более широкому применению пластмасс на основе новолачных смол препятствуют их пониженные электроизоляционные свойства, особенно во влажной атмосфере.

Глифталевые смолы относятся к группе полиэфирных смол, получаемых поликонденсацией многоатомных спиртов (гликоль, глицерин др.) и органических кислот (фталевая, малеиновая и др.). Глифталевые смолы (глифталы) получают в результате реакции поликонденсации глицерина и фталевого ангидрида при избытке последнего.

Для обеспечения достаточной гибкости глифталевые смолы модифицируют, т. е. в процессе поликонденсации в них вводят жирные кислоты и растительные масла, например касторовое масло. Отличительной особенностью глифталевых смол является их клеящая способность при хороших электрических характеристиках и стойкости к поверхностным разрядам.

Глифталевые смолы в электротехнике используются как основы для клеящих, пропиточных и покровных лаков, пленки которых (после запекания при 150-160 °С) оказываются стойкими к нагретому минеральному маслу.

Эпоксидные смолы, применяемые в электротехнике, представляют собой сиропообразные жидкости желтой или коричневой окраски. Жидкие эпоксидные смолы являются низкомолекулярными веществами, но при большом молекулярном весе (свыше 1000) эпоксидные смолы представляют собой твердые вещества.

Эпоксидные смолы получают в результате реакции поликонденсации хлорированного глицерина с резорцином или дианом. Процесс образования смолы происходит в щелочной среде. Для этого в реактор (закрытый сосуд) вводят 25-50-процентный раствор едкого натра  $NaOH$ . Молекулы эпоксидных смол содержат так называемые эпоксидные группы, что послужило основанием назвать эти смолы эпоксидными.

Жидкие эпоксидные смолы нашли широкое применение в электротехнике как основы электроизоляционных заливочных компаундов, а также клеящих и покровных лаков. Достоинством эпоксидных компаундов (заливочные составы для герметизации обмоток и других частей

электрических аппаратов) является очень малая объемная усадка (0,5-1,0 %) при их отвердевании. Кроме того, затвердевшие эпоксидные смолы обладают большой механической прочностью и стойкостью к воде и растворителям.

*Нагревостойкие высокополимерные диэлектрики.*

Одной из важнейших задач электроматериаловедения является разработка органических диэлектриков с повышенной нагревостойкостью. Применение таких материалов в изоляции электрических машин и аппаратов позволяет повысить их температуру нагрева и делает возможным увеличение мощности машин и аппаратов без изменения их веса и габаритов.

Рассмотренные ранее высокополимерные органические диэлектрики могут длительно использоваться при температурах до 90-105 °С и только некоторые из них, например глифтали, до 130 °С. Таким образом, подавляющее большинство органических диэлектриков может длительно работать при температурах 90-105 °С (классы нагревостойкости *У* и *А*). При превышении указанных температур органические диэлектрики в результате теплового старения быстро разрушаются.

Высокой нагревостойкостью обладают электроизоляционные материалы неорганического происхождения, например электрокерамические материалы (фарфор, стеатит), но из них невозможно изготовить гибкие виды изоляции. Как показали исследования, основной причиной низкой нагревостойкости высокополимерных органических диэлектриков является сравнительно малая энергия связи между атомами углерода, составляющими основы молекул органических диэлектриков. Так, например, энергия химической связи между атомами: углерод–углерод (С–С) равна 58,6 ккал/моль.

При нагревании диэлектриков в процессе их использования до температуры, при которой тепловая энергия будет выше энергии химической связи, они будут претерпевать тепловое старение, т. е. разрушаться. Возникла необходимость изыскать новые виды диэлектриков, которые бы состояли из молекул с большей энергией связи.

В результате многочисленных исследований были разработаны новые кремнийорганические высокополимерные диэлектрики. В основе молекул этих диэлектриков находится силоксановая группировка атомов *Si–O–Si* (кремний – кислород – кремний), энергия связи которой равна 89,6 ккал/моль. Вследствие этого кремнийорганические диэлектрики обладают более высокой нагревостойкостью по сравнению с органическими диэлектриками, рассмотренными ранее.



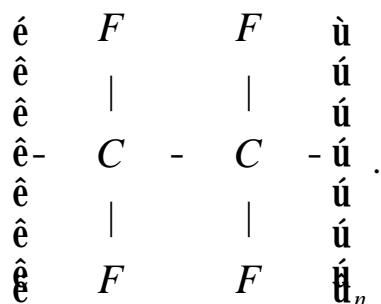
Название «кремнийорганические диэлектрики» обусловлено тем, что в состав молекул, кроме атомов кремния и кислорода, входят остатки различных органических соединений:  $CH_3$ ,  $C_2H_5$ ,  $C_6H_5$  и др. Эти органические остатки называются органическими радикалами и обозначаются буквой  $R$ . В зависимости от присоединенного органического радикала  $R$  и от числа их, приходящихся на один атом кремния, могут быть получены жидкие, каучукоподобные и твердые диэлектрики. Это либо бесцветные вещества, либо имеющие окраску от бледно-желтой до коричневой. Отличительной особенностью кремнийорганических диэлектриков является их высокая нагревостойкость и морозостойкость. Кремнийорганические электроизоляционные материалы (пластмассы, резины, лаки и др.) могут длительно работать в интервале температур от  $-60$  до  $+180$  °С, а некоторые из них от  $-70$  до  $+200$  °С и выше. Кроме того, кремнийорганические диэлектрики отличаются высокой стойкостью к воде, минеральным маслам, а также к электрическим искровым разрядам. Эти диэлектрики не растворяются в минеральных маслах (трансформаторном и др.) и не науглероживаются под действием электрических искр, т. е. на их поверхности не создается токопроводящих путей.

Электрические характеристики кремнийорганических диэлектриков находятся на высоком уровне и мало изменяются при нагреве и при воздействии на них воды. Кремнийорганические материалы являются слабополярными диэлектриками.

Наша промышленность вырабатывает большое количество кремнийорганических лаков, эмалей, пластмасс и резин. По нагревостойкости кремнийорганические диэлектрики относятся к классу  $H$ , т. е. могут длительно работать при температурах до  $180$  °С включительно (некоторые из них до  $200-220$  °С).

Фторопласт-4. Значительным достижением в области разработки нагревостойких диэлектриков явилось получение твердого высокополимерного мерного материала – фторопласта-4.

Это негорючий, жирный на ощупь материал белого цвета. Он получается в результате полимеризации сжиженного газа тетрафторэтилена  $F_2C=CF_2$ . Структурная формула фторопласта-4



Образующийся вначале полимер представляет собой рыхлый порошок белого цвета, из которого прессованием (в стальных пресс-формах) получают заготовки в виде брусков, пластин и других изделий. Чтобы образовался плотный, монолитный материал, отпрессованные заготовки подвергают спеканию в печах. При быстром охлаждении нагретых до 370 °С заготовок и изделий материал имеет аморфное строение, а при медленном охлаждении материал приобретает кристаллическое строение. Аморфная часть у этих изделий составляет 15-20 %. Быстро охлажденные (закаленные) изделия из фторопласта-4 обладают повышенной механической прочностью и большей пластичностью. У изделий, имеющих кристаллическую структуру, наблюдается большая стабильность электроизоляционных свойств. Кроме того, кристаллическая структура фторопласта-4 обеспечивает ему повышенную твердость и меньшую пластичность.

Основной особенностью фторопласта-4 является его исключительно высокая нагревостойкость (250 °С) и морозостойкость (-269 °С). При нагреве фторопласта-4 до 327 °С (точка перехода) его кристаллическая структура переходит в аморфную и материал приобретает прозрачность. При нагреве до температур выше 327 °С материал не размягчается вплоть до температуры 400 °С, когда начинается термическое разложение материала с отщеплением свободного фтора, являющегося токсичным веществом.

#### *Пленочные электроизоляционные материалы.*

Пленочные электроизоляционные материалы представляют собой гибкие пленки и ленты, получаемые из синтетических высокополимерных диэлектриков: полистирола, полиэтилена, фторопласта-4 и др.

Полистирольные пленки получают методом выдавливания размягченного (при 140-160 °С) полистирола через узкую щель – фильеру в металлической плашке. По выходе из щели выдавливаемая полистирольная пленка захватывается специальными приспособлениями, которые увлекают нагретую пленку и растягивают ее в продольном и поперечном направлениях. В результате этого толщина пленки уменьшается. Охлажденная в воздухе полистирольная пленка (стиро-

пленка) наматывается на вращающийся приемный барабан. Полистирольные пленки изготовляют толщиной от 0,02 до 0,2 мм и шириной от 20 до 500 мм.

Их выпускают неокрашенными и окрашенными в фиолетовый, розовый и другие цвета.

Недостатком полистирольных пленок является сравнительно невысокая температура их размягчения и низкая механическая прочность при надрыве.

Полистирольные пленки и ленты применяют для изоляции жил высокочастотных кабелей, а также в производстве полистирольных конденсаторов низкого и высокого напряжения.

Полиэтиленовые пленки получают способом выдавливания размягченного полиэтилена через кольцевое отверстие в мундштуке машины. Через это отверстие непрерывно вытягивается полиэтиленовый цилиндр с тонкими стенками, который раздувается изнутри поступающим сжатым воздухом. На некотором расстоянии от мундштука полиэтиленовый цилиндр сплющивается металлическими валками, а затем разрезается. В результате этого получается полиэтиленовая пленка толщиной от 0,03 до 0,3 мм и шириной от 1 до 1,4 м. Для изготовления пленок применяют преимущественно полиэтилен ВД. Полиэтиленовые пленки и ленты полупрозрачны.

Полиэтиленовые пленки применяют для изоляции жил высокочастотных кабелей, а также в качестве электроизоляционных прокладок.

Пленки из фторопласта-4 получают посредством обточки (на токарном станке) вращающейся фторопластовой болванки цилиндрической формы. Стружка снимается специальным широким резцом при его автоматической подаче. Обычный способ получения пленки выдавливанием размягченного материала через щель не может быть применен, так как фторопласт-4 не размягчается вплоть до температуры 400 °С, когда начинается его термическое разложение.

Если неориентированную пленку подвергнуть многократной прокатке между нагретыми стальными валками, то получится ориентированная, уплотненная пленка. Она выпускается толщиной от 0,02 до 0,1 мм и шириной от 10 до 200 мм.

Пленки применяют в производстве термостабильных конденсаторов, а также для изоляции обмоточных и монтажных проводов, используемых при температурах до 250 °С и на высоких частотах.

Лавсановые пленки представляют собой прозрачные пленки, получаемые из синтетического высокополимерного материала – лавсана

микроструктурной структуры. Пленки получают методом выдавливания через щель размягченного лавсана (метод экструзии) с последующим растяжением пленки.

Повышенные значения механической и электрической прочности и относительного удлинения при разрыве относятся к ориентированным лавсановым пленкам. Часто лавсановая пленка наклеивается на электротехнический картон и в таком сочетании применяется в качестве пазовой изоляции в электрических машинах. Лавсановые пленки стойки к растворителям, применяемым в лаках, а также к плесневым грибкам и влаге, поэтому применяются в электрических машинах и аппаратах тропического исполнения. Пленки могут длительно работать при температурах, не превышающих 120 °С (класс нагревостойкости *E*).

При довольно большой электрической прочности лавсановые пленки нестойки к электрической короне. Поэтому область применения их ограничивается электрооборудованием низкого напряжения. При длительном нахождении в трансформаторном масле при 105-120 °С пленки приобретают хрупкость.

Пленки из лавсана применяют для пазовой и межвитковой изоляции электрических машин низкого напряжения, а также для звукозаписи. В последнем случае на пленку (с одной стороны) наносят тонкий слой магнитного порошка.

Триацетатцеллюлозные (триацетатные) пленки изготавливают из аморфного прозрачного вещества, получаемого в результате воздействия уксусного ангидрида на растительную клетчатку (целлюлоза).

Триацетатные пленки выпускают непластифицированными, слабопластифицированными и пластифицированными. Непластифицированные пленки обладают жесткостью и упругостью, у слабопластифицированных жесткость заметно снижена, а пластифицированные обладают значительной гибкостью и растяжимостью.

Триацетатные пленки окрашены в синий цвет и имеют толщину от 0,025 до 0,07 мм. Их применяют в качестве пазовой изоляции в машинах низкого напряжения. Они могут быть длительно использованы при температурах до 120 °С включительно.

Следует отметить недостаточную стойкость триацетатных пленок в электрической короне, что позволяет применять их только в электрических машинах низкого напряжения.

Отрицательным свойством триацетатных пленок является также невысокая прочность при надрыве. Триацетатные пленки, как правило, применяют в композиции с электрокартоном, на который они на-

клеиваются с помощью масляно-глифталевых или других лаков, придающих гибкость клееному материалу.

Электрокартон, оклеенный с одной или двух сторон триацетатной пленкой, называется пленкоэлектрокартоном. Из пленкоэлектрокартона изготавливается пазовая изоляция электрических машин на напряжения до 500 В.

#### *Электроизоляционные лаки.*

Лаки представляют собой коллоидные растворы различных пленкообразующих веществ в специально подобранных органических растворителях. Пленкообразующими называются такие вещества, которые в результате испарения растворителей и процессов отвердевания (полимеризации) способны образовать твердую пленку.

К пленкообразующим веществам относятся смолы (природные и синтетические), растительные высыхающие масла, эфиры целлюлозы и др. В качестве растворителей пленкообразующих веществ применяют легко испаряющиеся (летучие) жидкости: бензол, толуол, спирты, ацетон, скипидар и др.

Чтобы создать электроизоляционный лак, удовлетворяющий ряду требований, подбирают несколько пленкообразующих веществ, которые составляют основу лака. Для полного растворения лаковой основы и равномерного высыхания лака иногда приходится применять несколько растворителей. Для разбавления загустевших лаков в них вводят разбавители, которые отличаются от растворителей меньшей испаряемостью. В качестве разбавителей применяют бензин, керосин, скипидар и некоторые другие жидкости.

В состав лака могут еще входить пластификаторы и сиккативы. Пластификаторы – вещества, придающие лаковой пленке эластичность; к ним относятся касторовое масло, жирные кислоты льняного масла и другие маслообразные жидкости.

Сиккативы представляют собой жидкие или твердые вещества, вводимые в некоторые лаки (масляные и др.), чтобы ускорить их высыхание.

При сушке слоя лака, нанесенного на какую-либо поверхность, содержащиеся в нем органические растворители улетучиваются (испаряются), а пленкообразующие вещества в результате процессов полимеризации образуют твердую лаковую пленку. Эта пленка может быть гибкой (эластичной) или негибкой и хрупкой в зависимости от свойств пленкообразующих веществ, составляющих лаковую основу.

По своему назначению электроизоляционные лаки делятся на пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные лаки применяют для пропитки обмоток в электрических машинах и аппаратах с целью цементации (соединения) витков обмотки друг с другом, а также с целью устранения пористости в изоляции обмотки.

Пропиточный лак, проникая в поры изоляции обмоток, вытесняет оттуда воздух и после своего отвердевания делает обмотку влагостойкой. При этом повышается электрическая прочность изоляции обмотки и ее коэффициент теплопроводности. Одной из главных характеристик пропиточных лаков является их пропитывающая способность.

Покровные лаки применяют для создания на поверхности уже пропитанных обмоток влагостойких или маслостойких лаковых покрытий. К покровным также относятся лаки, применяемые для изоляции листов электротехникой стали в магнитопроводах.

Клеящие лаки применяют для склеивания различных электроизоляционных материалов: листочков слюды (в производстве слоистой слюдяной изоляции), керамики, пластмасс и др. Основное, требование, предъявляемое к клеящим лакам, состоит в том, чтобы эти лаки обладали хорошим прилипанием (адгезией) и образовывали бы прочный шов.

Следует заметить, что один и тот же лак может применяться в качестве пропиточного и покровного или в качестве покровного и клеящего.

По способу сушки лаки делятся на две группы: лаки воздушной (холодной) сушки и лаки печной (горячей) сушки.

У лаков воздушной сушки отвердевание пленки происходит при комнатной температуре.

У лаков печной сушки отвердевание пленки возможно лишь при температурах значительно выше комнатной (от 100 °С и выше).

Лаки горячей сушки, как правило, обладают более высокими механическими и электрическими характеристиками.

По лаковой основе лаки делятся на смоляные, масляные, масляно-битумные и эфироцеллюлозные.

Смоляные лаки представляют собой растворы природных или синтетических смол в органических растворителях. К смоляным лакам относятся глифталевые, бакелитовые, кремнийорганические и др. В зависимости от основы смоляные лаки могут быть термопластичными (полихлорвиниловые и др.) и терморезистивными (глифталевые, бакелитовые и др.).

Масляные лаки представляют собой растворы растительных (высыхающих) масел в органических растворителях. К высыхающим маслам относятся тунговое и льняное масла. Тунговое масло добывается из орешков тунгового дерева, оно быстро высыхает, образуя эластичную влагостойкую пленку. Льняное масло получается из семян льна. Уваренное до определенной плотности льняное масло служит основой масляных лаков. В масляные лаки обычно вводят сиккативы – вещества, ускоряющие высыхание лаков.

Пленки масляных лаков являются терморезистивными веществами, т. е. не размягчаются при нагревании. С целью повышения твердости пленок в масляные лаки вводят иногда природные или синтетические смолы.

Область применения масляных лаков в электротехнике весьма ограничена по сравнению со смоляными лаками.

Масляно-битумные лаки представляют собой растворы масляно-битумных смесей в органических растворителях (скипидар, толуол, ксилол и др.). Для этого применяют битумы нефтяные и природные (асфальты). Из растительных масел применяется главным образом льняное масло. Пленки этих лаков имеют черный цвет. Они обладают хорошими электроизоляционными свойствами, отличаются эластичностью и водостойкостью. Пленки масляно-битумных лаков термопластичны и легко растворяются в минеральных маслах и в ряде растворителей, что является их недостатком.

Масляно-битумные лаки широко применяются в качестве пропиточных лаков для обмоток электрических машин.

Эфиروцеллюлозные лаки представляют собой растворы эфиров целлюлозы (нитроцеллюлоза, ацетил целлюлоза и др.) в смеси растворителей (амилацетат, ацетон, спирты и др.). Пленки этих лаков прозрачны, имеют характерный блеск и обладают стойкостью к минеральным маслам, бензину и озону.

Применение эфиروцеллюлозных лаков облегчается тем, что они являются лаками воздушной сушки, но область применения их в электротехнике относительно невелика.

Характеристики лаков. Основными характеристиками лаков (в жидком состоянии) являются: вязкость лака, время высыхания и пропитывающая способность лака. У отвердевших лаковых пленок определяют термоэластичность, водопоглощение и электрические характеристики.

Вязкость лаков определяется с помощью приборов – вискозиметров. Для определения вязкости лаков чаще всего используют вискозиметр ВЗ-4, он вмещает 100 мл испытуемой жидкости.

Время высыхания лака определяется следующим образом. Пропитывают испытуемым лаком полоски бумаги толщиной 0,05 мм и площадью 100x200 мм<sup>2</sup>. В случае испытания лака воздушной сушки пропитанные бумажные полоски сушат при температуре 20°С в хорошо вентилируемом помещении. Затем на поверхность лакированной бумаги накладывается кусочек фильтровальной бумаги, который прижимается к поверхности лакированной бумаги грузом 200г, действующим на металлическую пятую площадью в 1 см<sup>2</sup>. Это испытание продолжается в течение 30 сек. Лак считается высохшим, если после снятия груза фильтровальная бумага не прилипает к поверхности лакированной бумаги и не оставляет на ней волокон. При этом отмечается время высыхания лака при 20 °С.

#### *Термопластичные компаунды.*

Компаунды – это электроизоляционные составы, изготавливаемые из нескольких исходных веществ. В момент применения компаунды представляют собой жидкости, которые постепенно отвердевают.

В отличие от лаков и эмалей компаунды не содержат летучих растворителей. Это обеспечивает монолитность компаунда после его отвердевания. Согласно своему назначению компаунды разделяются на пропиточные, заливочные и обмазочные. Пропиточные компаунды применяют для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов с целью цементации витков обмотки и защиты их от влаги. Заливочные компаунды применяются для заливки полостей (свободных пространств) в кабельных муфтах и воронках, а также в корпусах электрических аппаратов – трансформаторов тока, дросселей и т. п. Обмазочные компаунды применяются для обмазки лобовых частей обмоток электрических машин с целью защиты их от влаги, масла и др.

Компаунды могут быть терморезистивными материалами, не способными размягчаться после своего отвердевания, или термопластичными, могущими размягчаться при последующем нагреве. К термопластичным относятся компаунды на основе битумов, воскообразных диэлектриков (парафин, церезин и др.) и термопластичных полимеров (полистирол и др.). К терморезистивным относятся компаунды на основе эпоксидных, полиэфирных и других синтетических смол.

Широкое применение в электротехнике получили термопластичные компаунды на основе битумов, так как последние являются де-



шевыми материалами, стойкими к воде, и обладают хорошими электроизоляционными свойствами.

Одной из главных характеристик компаундов является их объемная усадка – сокращение объема компаунда после его отвердевания

Для пропитки обмоток электрических машин широко применяется битумный пропиточный компаунд № 225, который получают в результате сплавления битума, канифоли и обезвоженного льняного масла. В твердом состоянии компаунд № 225 представляет собой массу черного цвета с блестящей поверхностью.

Для пропитки обмоток компаунд нагревается до 160-170 °С. При этой температуре он переходит в жидкое состояние и тогда частицы его становятся способными проникать внутрь пропитываемой обмотки. Пропитка обмоток жидкими битумными компаундами производится в специальных пропиточных котлах, закрываемых герметически. Обмотки, помещенные в герметически закрытые котлы, вначале подвергаются длительной сушке под вакуумом и без вакуума при температуре 105-180 °С. Затем в пропиточный котел впускается разогретый жидкий компаунд, после этого давление в котле повышают до 6-8 атм. Под воздействием давления жидкий компаунд проникает в поры изоляции обмоток и одновременно опрессовывает их. Для различных обмоток разрабатываются разные режимы пропитки.

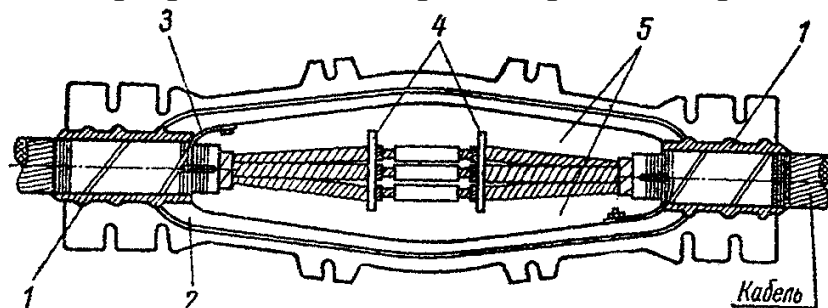


Рис. 25. Соединительная кабельная муфта для кабелей на напряжение до 1000 В (крышка снята)

Битумы являются термопластичными материалами, поэтому битумные компаунды применяют только для пропитки неподвижных обмоток. Из вращающихся обмоток (при перегреве их) битумный компаунд будет вытекать, особенно под действием центробежных сил. Битумными компаундами также нельзя пропитывать обмотки, работающие в трансформаторном масле или подвергающиеся воздействию бензина, так как все битумы растворяются в минеральных маслах и в углеводородах (бензин, бензол и др.).

Из заливочных битумных компаундов наиболее широкое применение получили компаунды МБ-70, МБ-90, МБМ-1 и МБМ-2. Первые два компаунда изготавливают на основе нефтяных битумов БН-Ш, БН-IV и БН-V, взятых в разных соотношениях. Компаунды МБМ-1 и МБМ-2 изготавливают на основе тех же битумов, но для повышения их морозостойкости в них вводится еще трансформаторное масло (пластификатор).

Перечисленные компаунды применяют для заливки полостей в кабельных соединительных муфтах (рис. 25) и концевых воронках напряжением до 10 кВ. Компаунд МБ-70, обладающий морозостойкостью до  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , применяют для заливки кабельных муфт, проложенных в земле, и кабельных воронок, установленных в неотапливаемых помещениях (с температурой до  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Компаунд МБ-90, обладающий несколько меньшей морозостойкостью, чем компаунд МБ-70, применяют для заливки кабельных муфт и воронок установленных в отапливаемых помещениях.

## 2. ПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗДЕЛИЯ

*Обмоточные провода с эмалевой изоляцией.*

Медные и алюминиевые обмоточные провода применяют для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов.

Обмоточные провода выпускают с эмалевой, волокнистой, пленочной, а также с эмалево-волокнистой изоляцией.

Эмалевая изоляция имеет наименьшую толщину (0,007-0,065 мм) по сравнению с волокнистой и пленочной изоляцией обмоточных проводов. Это позволяет в том же объеме обмотки заложить большее число проводов и тем самым увеличить мощность электрической машины или аппарата. Поэтому эмалированные провода являются наиболее перспективными среди обмоточных проводов. Эмалевая изоляция на проводе представляет собой гибкое лаковое покрытие, полученное в результате затвердевания слоя лака, нанесенного на провод. Нанесение лака на провод производят на эмалировочных станках.

Нагревостойкость эмалевой изоляции на алюминиевых проводах в среднем на 6-8  $^{\circ}\text{C}$  выше по сравнению с соответствующими эмалями на медных проводах. Это объясняется меньшим каталитическим воздействием алюминия на органическое эмальлаковое покрытие. В связи с необходимостью экономии проводниковой меди сортамент алюминиевых обмоточных проводов будет увеличиваться.

Наибольший практический интерес представляют обмоточные провода с высокопрочными эмалевыми покрытиями на основе поливинилацеталевой и полиэфирной смол (провода марок ПЭВ и ПЭТВ), а также провода с высокопрочным эмалевым покрытием на основе полиуретановой смолы (провод марки ПЭВТЛ). Последние отличаются высоким электрическим сопротивлением и повышенной нагревостойкостью (до 120 °С) их эмалевой изоляции. Нагревостойкость – способность электроизоляционного материала длительно выдерживать заданную предельную температуру заметно не изменяя своих основных свойств. Вследствие плавления пленки полиуретанового эмаль-лака провода марки ПЭВТЛ быстро залуживаются без предварительной зачистки слоя эмали и без применения флюсующих веществ (канифоль и др.). Более высокой нагревостойкостью (до 130 °С) и хорошими электроизоляционными свойствами обладают провода марки ПЭТВ.

Обмотки, выполненные проводами с эмалевой изоляцией, нуждаются в пропитке электроизоляционными лаками, как и обмотки из проводов с волокнистой изоляцией. Дело в том, что в тонком слое эмалевого изоляционного покрытия всегда имеется небольшое количество сквозных отверстий (точечные повреждения), вызванное несовершенством технологии эмалирования проволоки и наличием заусенцев на проволоке. На длине провода в 1 м может быть от 5 до 15 точечных повреждений. Точечных повреждений меньше на проводах большего диаметра.

Важнейшими характеристиками эмалированных проводов являются: эластичность, нагревостойкость и электрическая прочность эмалевых покрытий. Из других характеристик следует отметить электрическое сопротивление эмалевой изоляции, ее термопластичность и механическую прочность при истирании. Здесь мы рассмотрим три первые характеристики.

Эластичность эмалевого покрытия у проводов диаметром до 0,38 мм определяется плавным растяжением провода до удлинения на 10 % или до разрыва его. При этом эмалевая пленка не должна растрескиваться. У проводов большего диаметра (от 0,38 мм и выше) эластичность эмалевого покрытия определяется при навивании провода на стальной стержень, диаметр которого двух- или трехкратен диаметру голого провода (без эмали). Например, провод марки ПЭВ-1 диаметром 0,96 мм навивают на стальной стержень диаметром  $3 \times 0,96 = 2,88$  мм. При этом к навиваемому проводу прикладывается растягивающее усилие определенной величины.

Нагревостойкость эмалевой изоляции определяется в результате теплового старения образцов-отрезков эмалированного провода.

Для этого отрезки провода помещают в обогреваемую камеру (термостат), где выдерживают в течение 24 ч при температуре 105, 125, 155 или 200 °С в зависимости от состава эмалевого покрытия. После выдержки в термостате (тепловое старение) отрезок эмалированного провода, охлажденный до комнатной температуры, подвергается растяжению до удлинения на 10 % или до разрыва. Провода диаметром более 0,38 мм после теплового старения навивают на круглый стальной стержень определенного диаметра. При этих испытаниях не должно наблюдаться растрескивания эмали на проводе. В противном случае считается, что провод не удовлетворяет требованию по нагревостойкости.

Электрическая прочность эмалевой изоляции определяется на двух скрученных (свитых) друг с другом отрезках проводов длиной 200 мм. Число скруток на длине 200 мм устанавливается в зависимости от диаметра провода. С увеличением диаметра провода число скруток соответственно уменьшается. Скручивание двух отрезков эмалированных проводов производится в специальном станке.

*Обмоточные провода с волокнистой и пленочной изоляцией.*

Обмоточные провода с волокнистой и пленочной изоляцией имеют большую толщину изоляции (0,05-0,17 мм) по сравнению с эмалированными проводами.

В качестве волокнистой изоляции применяется пряжа: хлопчатобумажная, шелковая, из капроновых, асбестовых, лавсановых и стеклянных волокон.

Наибольшая нагревостойкость обмоточных проводов достигается применением стеклянной и асбестовой пряжи, подклеиваемой к поверхности провода с помощью глифталевых и кремнийорганических лаков, отличающихся повышенной стойкостью к нагреву.

Для изготовления обмоток трансформаторов с масляной изоляцией находят большое применение провода с изоляцией из бумажных лент, которые хорошо пропитываются минеральным маслом. Этим обеспечивается высокая электрическая прочность изоляции обмоток трансформаторов. Для повышения механической прочности изоляции из бумажных лент сверху ее накладывают обмотку из хлопчатобумажной (провода марок ППБО-1, ППБО-2 и др.) или капроновой (провода марок ППКО-1, ППКО-2 и др.) пряжи.

*Обмоточные провода с эмалево-волокнистой изоляцией.*

Кроме перечисленных, выпускают также обмоточные провода с эмалево-волокнистой изоляцией. У этих проводов поверх слоя эмали наносится обмотка из хлопчатобумажной, шелковой, капроновой или стеклянной пряжи. Такого рода обмоточные провода применяют для более тяжелых условий работы в тяговых, шахтных электродвигателях и в других электрических машинах и аппаратах, где для эмалевой изоляции требуется защитное покрытие из волокнистых материалов. Наибольшей механической прочностью обладает обмотка из лавсановых волокон. Повышенной нагревостойкостью отличается обмотка из стеклянной пряжи.

Основные требования, предъявляемые к обмоточным проводам с волокнистой изоляцией, состоят в следующем. У проводов с волокнистой изоляцией не должно наблюдаться просветов между нитями обмотки, наложенной на провод. Не должно быть разрывов нитей при навивании провода на стальной стержень диаметром, равным пятикратному диаметру (но не менее 3 мм) провода с волокнистой изоляцией в два слоя (провода марок ПБД, ПШД и др.), или при навивании провода с однослойной изоляцией (провода марок ПБО и др.) на стержень диаметром, равным десятикратному диаметру провода (но не менее 6 мм).

Электроизоляционные свойства обмоточных проводов с волокнистой изоляцией относительно невысоки, так как все виды волокнистой изоляции гигроскопичны, т. е. поглощают влагу из воздуха. Гигроскопичность стеклянных и капроновых волокон несколько меньше гигроскопичности хлопчатобумажных и шелковых волокон.

Обмотки, выполненные из проводов с волокнистой изоляцией, нуждаются в тщательной сушке и пропитке изоляционными лаками или в компаундировании (пропитка изоляционными составами без растворителей).

Электрическая прочность проводов с волокнистой изоляцией определяется электрической прочностью воздуха, заключенного между волокнами, а также электрической прочностью эмалевой изоляции (у проводов с эмалево-волокнистой изоляцией ПЭЛБО, ПЭЛКО и др.).

Электрическая прочность волокнистой изоляции определяется при испытаниях отрезков (образцов) проводов, навитых на металлический стержень. При этом напряжение прикладывается к стержню и металлической жиле испытуемого провода. Пробивное напряжение слоя волокнистой изоляции проводов ПБД, ПШД, ПШДК находится в пределах 450-600 В, а проводов ПЭЛБО, ПЭЛШО и ПЭЛШКО – 700-1000 В. Приблизительное такое же пробивное напряжение наблюда-

ется у проводов со стеклянной изоляцией, пропитанной нагревостойкими лаками (провода ПСД, ПСДК). У проводов с асбестовой изоляцией пробивное напряжение равно 450-500 в.

Кроме медных и алюминиевых проводов с эмалевой, волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией, выпускают также обмоточные провода из сплавов высокого сопротивления (манганин, константан и нихром с такими же видами изоляции).

#### *Монтажные провода.*

Монтажные провода применяют для соединения различных приборов и частей в электрических аппаратах и машинах. Токопроводящие жилы монтажных проводов изготавливают из проводниковых металлов – меди или алюминия. Изоляцию монтажных проводов выполняют из электроизоляционной резины или полихлорвинилового пластика, а также из хлопчатобумажной, шелковой или капроновой пряжи и из синтетических пленок. Для лучшего распознавания монтажных проводов их изоляционные оболочки обычно окрашивают в различные цвета.

Монтажные провода с резиновой и полихлорвиниловой изоляцией могут применяться в электрических аппаратах и устройствах с напряжением до 380 В переменного тока и до 500 В постоянного тока.

Большинство проводов с волокнистой изоляцией (хлопчатобумажной, шелковой и др.) может применяться при напряжениях до 60-100 В переменного тока, а некоторые из них – только до 20 В переменного тока (МГШ, МГШД и др.).

Наибольшей гибкостью обладают многопроволочные провода, жила которых состоит из большого числа тонких проволок. Монтажные провода выпускают с лужеными медными жилами. Это облегчает подпайку проводов к различным частям электрических аппаратов и устройств.

#### *Установочные провода.*

Установочные провода и шнуры применяют в силовых и осветительных установках. Они служат для распределения электрической энергии, а также для присоединения к сети электродвигателей, светильников и других потребителей тока. Токопроводящие жилы установочных проводов и шнуров изготавливают из медной или алюминиевой проволоки. Жилы изолируют электроизоляционной резиной или полихлорвиниловым пластиком. Поверх изоляции накладывают защитный покров в виде оплетки (рис. 26) из хлопчатобумажной или шелковой пряжи. У некоторых проводов защитный покров (оплетку) пропитывают противогнилостным составом. В отдельных конструк-

циях проводов наружную оплетку изготовляют из стальных оцинкованных проволок для защиты от легких механических воздействий.

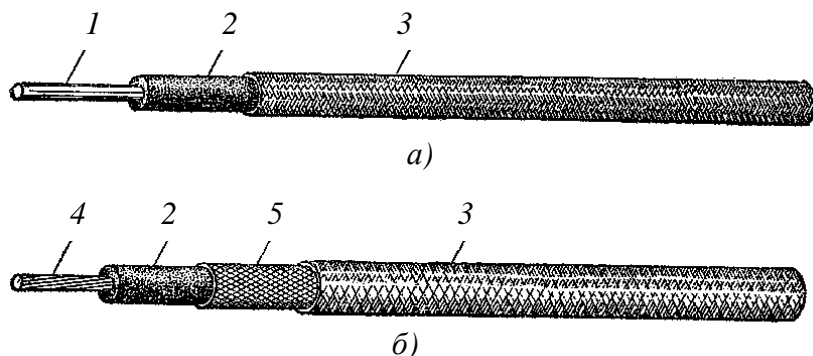


Рис. 26. Установочные провода с резиновой изоляцией: *a* – марки ПР. *б* – марки ПРГ; 1 – однопроволочная жила, 2 – изоляция из вулканизированной резины, 3 – оплетка из хлопчатобумажной пряжи, 4 – многопроволочная жила, 5 – покрытие (обмотка) из прорезиненной ленты

Провода и шнуры с полихлорвиниловой изоляцией выпускают без защитных оболочек (рис. 27). Шнуры выпускают двухжильными (рис. 28), т. е. они состоят из двух изолированных и свитых друг с другом жил. Установочные провода выпускают одно-, двух-, трех-, четырех- и многожильными. Для обеспечения большей гибкости жилы шнуров и некоторых типов проводов изготовляют многопроволочными. Шнуры изготовляют на напряжение до 220 В, а провода – на напряжение 220, 380, 500, 2000 и 3000 В переменного тока.



Рис. 27. Провода установочные с изоляцией из полихлорвинилового пластиката: *a* – марки ПВ, *б* – марки ППВ (ленточный двухжильный провод); 1 – однопроволочная жила, 2 – изоляция из полихлорвинилового пластиката

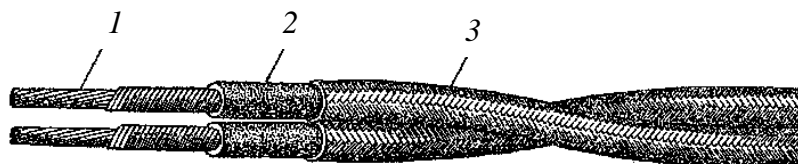


Рис. 28. Шнур марки ШР с резиновой изоляцией: 1 – многопроволочная жила, 2 – изоляция из вулканизированной резины, 3 – оплетка из хлопчатобумажной крученой пряжи

Высокая водостойкость, маслостойкость и негорючесть полихлорвинила обеспечили широкое применение проводов с полихлорвиниловой изоляцией.

*Кабели с резиновой изоляцией.*

Силовые кабели с резиновой изоляцией применяются для передачи и распределения электрической энергии в установках с напряжением до 500, 3000 и 6000 В переменного тока. Кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией могут прокладываться на трассах с неограниченной разностью уровней прокладки. Кабели с резиновой изоляцией выпускаются одно-, двух- и трехжильными с сечением жил от 1 до 500 мм<sup>2</sup>. Жилы состоят из проволок, изготовленных из отожженной меди (ММ), и имеют круглую форму (рис. 29). Каждая жила изолирована электроизоляционной резиной и прорезиненной тканью (фазовая изоляция).

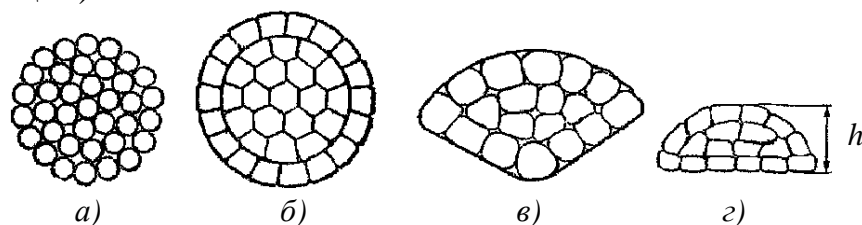


Рис. 29. Сечения многопроволочных жил кабелей: *а* – круглая неуплотненная жила, *б* – круглая уплотненная жила, *в* – секторная уплотненная жила, *з* – сегментная уплотненная жила

В многожильных кабелях изолированные жилы скручены (свиты) друг с другом и заключены в общую защитную оболочку, которая изготавливается из свинца (рис. 30), полихлорвинилового пластика или из специальной светостойкой резины. Промежутки между скрученными изолированными жилами внутри кабеля заполняют кабельной пряжей (междуфазное заполнение), пропитанной противогнилостным составом. С целью повышения электрической прочности кабелей на напряжения 3000 и 6000 В на их скрученные изолированные жилы накладывают общую поясную изоляцию из резины. Сверх нее накладывается защитная оболочка из свинца, полихлорвинилового пластика или из специальной резины. Радиальная толщина свинцовой оболочки колеблется в пределах от 1,05 до 2,0 мм, а толщина полихлорвиниловой и резиновой оболочки находится в пределах от 2 до 4 мм. Чем больше диаметр кабеля под оболочкой, тем больше толщина защитной оболочки.



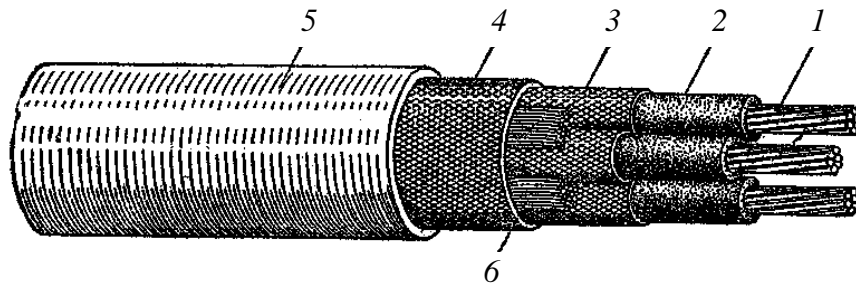


Рис. 30. Силовой кабель с резиновой изоляцией в свинцовой оболочке, небронированный (марка СРГ): 1 – медная многопроволочная жила, 2 – изоляция из вулканизированной резины, 3 – покрытие (обмотка) из прорезиненной ленты, 4 – поясная изоляция, 5 – свинцовая оболочка, 6 – междуфазное заполнение

Большинство кабелей с резиновой изоляцией снабжаются еще броневым покровом из стальных лент или плоских стальных проволок. Броневой покров накладывают на защитную оболочку из свинца, полихлорвинилового пластиката или специальной резины.

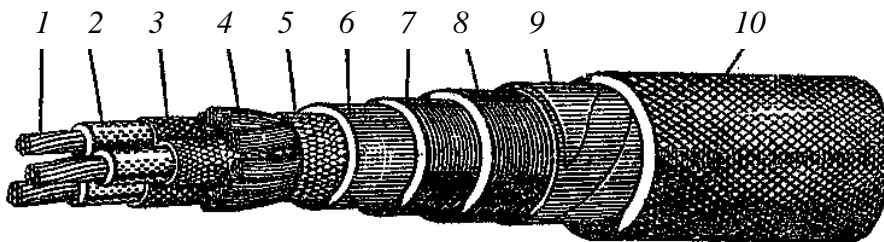


Рис. 31. Силовой кабель с резиновой изоляцией в свинцовой оболочке, бронированный стальными лентами с наружным защитным покровом (марка СРБ): 1 – медная многопроволочная жила, 2 – изоляция из вулканизированной резины, 3 – покрытие (обмотка) из прорезиненной ленты, 4 – междуфазное заполнение, 5 – поясная изоляция, 6 – свинцовая оболочка, 7 – антикоррозийное покрытие, 8 – нижняя подушка, 9 – броневой покров из стальных лент, 10 – наружный защитный покров (верхняя подушка)

Между защитной оболочкой и броневым покровом (рис. 31) прокладывают слой из пропитанной кабельной бумаги или пряжи. Этот промежуточный слой (нижняя подушка) предохраняет защитную оболочку от возможных повреждений ее броневым покровом. Для защиты стальных броневых покровов от коррозии (ржавление) поверх них накладывается слой грубой пряжи (верхняя подушка), пропитанной водостойким битуминозным составом в который введен антисептик (нафтенат меди). Последний обеспечивает устойчивость джудо-

вой пряжи против разрушающего действия микроорганизмов при прокладке кабелей в земле.

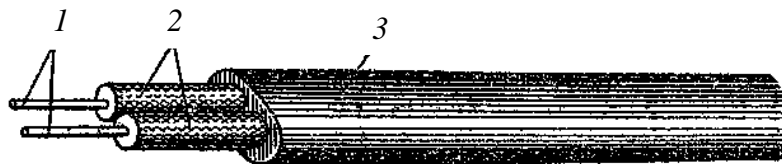


Рис. 32. Силовой кабель с резиновой изоляцией жил в оболочке из полихлорвинилового пластиката: 1 – однопроволочные жилы, 2 – изоляция жил из вулканизированной резины, 3 – оболочка из полихлорвинилового пластиката

В настоящее время широкое применение получили кабели с алюминиевыми жилами с резиновой изоляцией. Конструкции этих кабелей аналогичны конструкциям кабелей с медными жилами.

Кабели с пластмассовой изоляцией (полиэтилен) изготавливают на напряжения до 35000 В (35 кВ). У всех кабелей на напряжение от 6000 В и выше на каждую изолированную жилу накладывают экран из полупроводниковой резины, бумаги или медной фольги (рис. 32).

*Кабели с бумажной изоляцией.*

Силовые кабели с бумажной пропитанной изоляцией выпускают на напряжения 1, 3, 6, 10, 20, 35 кВ и выше. Здесь рассматриваются широко применяемые кабели на напряжения до 35 кВ.

Токопроводящие жилы кабелей изготавливают из мягкой медной проволоки (марка ММ), а также из алюминиевой мягкой или твердой проволоки (марки АМ и АТ). Как и в кабелях с резиновой изоляцией, токопроводящие жилы сечением до 16 мм<sup>2</sup> включительно изготавливают однопроволочными. Начиная с сечения 25 мм<sup>2</sup> и выше, жилы кабелей изготавливают многопроволочными. Это необходимо для обеспечения определенной гибкости кабелей.

Сечения токопроводящих жил могут иметь круглую, сегментную или секторную форму. Это обеспечивает меньший объем кабеля. С этой же целью круглые жилы делают тоже уплотненными (см. рис. 29, б). Каждая из жил в кабеле имеет изоляцию, состоящую из нескольких слоев кабельной бумаги толщиной 0,125 или 0,175 мм, пропитанной вязким электроизоляционным составом, состоящим из минерального масла и растворенной в нем канифоли. Для крутонаклонных и вертикальных прокладок применяют кабели с бумажной изоляцией жил, но с обедненной пропиткой их вязкими составами. При обедненной пропитке бумажной изоляции кабеля изоляционный пропиточный состав находится только в порах и капиллярах бумаги, а

излишки его удаляются. Это исключает стекание изоляционного пропиточного состава при вертикальной или крутонаклонной прокладке кабеля.

Толщина бумажной изоляции жил в многожильных кабелях лежит в пределах от 0,25 до 0,95 мм – для кабелей на напряжение 1 кВ и от 1,35 до 3,0 мм – для кабелей на напряжение от 3 до 10 кВ с поясной изоляцией. Толщина изоляции жил в одножильных кабелях и в кабелях с отдельно свинцованными жилами находится в пределах от 1,2 до 2,7 мм для кабелей на напряжение от 1 до 6 кВ и от 3,5 до 6,0 мм для кабелей на 10 и 20 кВ. У кабелей на напряжение 35 кВ толщина слоя изоляции жилы равна 9-11 мм. Наложение изоляции на жилу производится посредством многократной обмотки жилы бумажными лентами шириной от 6 до 35 мм. В многожильных кабелях верхняя бумажная лента каждой жилы имеет отличительную окраску, что необходимо для распознавания фаз при разделке кабелей.

Изолированная жила одножильного кабеля или скрученные жилы многожильных кабелей заключают в герметическую оболочку из свинца или алюминия. Промежутки между скрученными жилами заполняют жгутами из пропитанной бумаги (междуфазное заполнение). В кабелях на напряжение до 10 кВ включительно на скрученные друг с другом изолированные жилы накладывают еще поясную изоляцию, поверх которой располагают герметическую оболочку из свинца или алюминия. Для защиты герметических оболочек от возможных механических повреждений на последние накладывают броневой покров из стальных лент или стальных проволок. Броневой покров накладывают не непосредственно на свинцовую или алюминиевую оболочку, а на подушку, состоящую из последовательно наложенных (на герметическую оболочку) слоев бумаги и кабельной пряжи, пропитанных битумными и другими составами. В кабелях, предназначенных для прокладок в помещениях с химически агрессивными средами (кабели марок СБВ, СКВ, СПВ, СБВГ и др.), подушку под броню изготавливают из последовательно наложенных слоев пропитанной бумаги и лент полихлорвинилового пластика.

Для защиты броневого покрова от коррозии на него накладывают защитный покров из грубой кабельной пряжи, пропитанной противогнилостным битуминозным составом. На броневой покров кабелей, предназначенных для прокладки в пожароопасных помещениях и шахтах, защитный покров из пропитанной пряжи не накладывают (кабели марок СБГ, СПГ и др.). Кабели, предназначенные для про-

кладки в местах; где механические повреждения исключаются, не снабжаются броневыми покровами (кабели марок СГТ, АСГТ и др.).

Кабели на напряжения 20 и 35 кВ изготавливают с отдельно освинцованными жилами (рис. 33), т. е. на каждую из трех изолированных жил круглого сечения накладывают свинцовую оболочку. Освинцованные жилы скручивают друг с другом, а промежутки между ними заполняют пропитанной кабельной пряжей. На три освинцованные скрученные жилы накладывают несколько слоев пропитанной хлопчатобумажной ленты (нижняя подушка). Затем кабель покрывают броневым покровом из стальных лент, защищенных от коррозии пропитанной кабельной пряжей (верхняя подушка).

Свинцовые оболочки, наложенные на каждую из трех жил кабеля, являются электрическими экранами. Они обеспечивают более равномерное распределение силовых линий электрического поля в изоляции каждой жилы в радиальном направлении и усиливают теплоотвод. Благодаря этому повышается электрическая прочность, а следовательно, и надежность работы кабелей. Сечения жил у одножильных кабелей находятся в пределах от 2,5 до 800 мм<sup>2</sup>, а у многожильных – от 2,5 до 240 мм<sup>2</sup>.

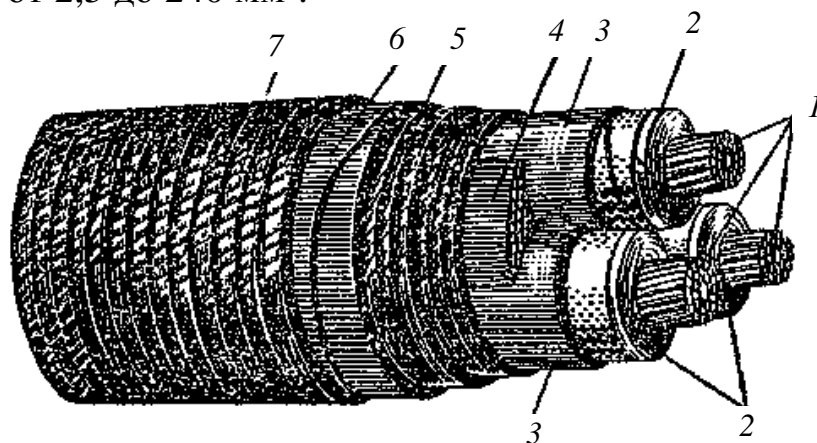


Рис. 33. Силовой кабель с бумажной изоляцией с отдельно освинцованными жилами (марка ОСБ): 1 – круглая медная многопроволочная жила, 2 – бумажная пропитанная изоляция, 3 – свинцовая оболочка жилы, 4 – междуфазное заполнение, 5 – защитный покров (нижняя подушка), 6 – броневой покров из стальных лент, 7 – верхний защитный покров из грубой пропитанной пряжи

Кроме кабелей в свинцовой оболочке, выпускаются кабели в алюминиевой защитной оболочке (кабели марок АБВ; ААБВ; АБГВ; АЛБГВ и др.). Так как алюминий обладает более высокими механическими характеристиками по сравнению со свинцом, то алюминиевые

оболочки делают меньшей толщины. Кабели с алюминиевыми оболочками имеют меньший диаметр и вес по сравнению с кабелями в свинцовой оболочке. Для обеспечения коррозионной устойчивости алюминиевых оболочек применяют проводниковые сорта алюминия с содержанием этого металла не менее 99,7 % (марки АОО и АВО).

Конструкции силовых кабелей для постоянного тока на напряжение до 3 кВ не отличаются от конструкции кабелей на соответствующее напряжение переменного тока. Кабели на напряжение выше 35 кВ (110, 220 и 400 кВ) изготавливают тоже с бумажной изоляцией жил, но пропитанной маловязким, легкоподвижным маслом, которое находится внутри кабеля под повышенным давлением. Такие кабели называются маслонаполненными. Особенностью этих кабелей является то, что масло внутри них может легко перемещаться по центральной поллой жиле под давлением, создаваемым подпитывающей аппаратурой, присоединенной к оболочке кабеля. Наличие маловязкого масла, находящегося под давлением, позволяет создать бумажно-масляную изоляцию жил с повышенной электрической прочностью.

Кроме маслонаполненных кабелей, находят применение газонаполненные кабели на напряжение до 220 кВ. Внутри оболочек этих кабелей находится какой-либо инертный газ (азот, фреон и др.) под давлением. Жилы газонаполненных кабелей имеют бумажную изоляцию, пропитанную уменьшенным количеством масла (обедненная изоляция). Внутреннее пространство такого кабеля заполнено газом под давлением, создаваемым специальными установками, присоединенными к оболочке кабеля. В качестве оболочек газонаполненных кабелей высокого давления (10-15 атм.) применяют стальные трубы. Газ, находящийся внутри кабеля под давлением, обеспечивает высокую электрическую прочность изоляции жил кабеля.

Из-за сложности конструкций маслонаполненные и газонаполненные кабели имеют пока ограниченное применение.

### **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

#### **3.1. Изучение удельного электросопротивления и твердости сплавов различного состава и строения**

Цель работы – изучить основные типы диаграмм «состав–свойство», экспериментально установить зависимость коэффициента

удельного электросопротивления и микротвердости сплавов от концентрации и вида взаимодействия компонентов.

*Основные теоретические положения.*

Создание сплавов с заданным комплексом свойств требует знания природы формируемых свойств и зависимости их от структуры и состава сплава. Зависимости эти были экспериментально установлены Н. С. Курнаковым и известны теперь под общим названием «правило Курнакова». Согласно правилу Курнакова уровень свойства зависит от типа взаимодействия компонентов, составляющих сплав, и их концентрации.

Исследуем зависимость таких свойств, как удельное электросопротивление (электропроводность) и твердость, от состава и строения различных сплавов.

Общее выражение для электропроводности имеет вид

$$\sigma = n \cdot e \cdot u, \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация носителей тока,  $1/\text{см}^3$ ;  $e$  – заряд носителя тока, Кл;  $u$  – подвижность носителя,  $\text{см}^2/\text{с}$ .

Выражение (1) справедливо для различных носителей заряда (дырок, заряженных комплексов, электронов и т.д.).

В металлах и сплавах основными носителями заряда являются электроны проводимости, концентрация которых  $n = 10^{22} - 10^{23}/\text{см}^3$ , заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, а подвижность изменяется в пределах  $u = 10 - 1000 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Поскольку подвижность носителей изменяется в гораздо более широких пределах, нежели другие величины и выражении (1), электропроводность металлов и сплавов на их основе в первую очередь определяется этой характеристикой. Подвижность электронов в металлах определяется формулой

$$v = e\tau/m, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость частицы;  $\tau$  – среднее время свободного пробега электронов проводимости;  $m$  – масса электрона, равная  $9 \cdot 10^{-28}$  г. Время свободного пробега электрона в сильной степени зависит от нарушений правильности кристаллического строения, размер которых соизмерим по порядку с величиной длины волны электрона (объяснение природы электропроводности металлов и сплавов может быть дано только с учетом волновых свойств электронов).

Согласно формуле де Бройля

$$\lambda = h/mv, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $h$  – постоянная Планка;  $m$  – масса частицы.

Средняя длина волны свободных электронов в металлах составляет  $5 \cdot 10^{-8}$  см, т. е. соизмерима с межатомным расстоянием кристаллических решеток металлов, а следовательно, и с размерами нарушений правильности кристаллического строения.

Различные нарушения правильности кристаллического строения в основном могут быть двух типов:

1) тепловые колебания ионов в узлах кристаллической решетки (динамические искажения кристаллической решетки);

2) искажения решетки, связанные с присутствием растворенных атомов и дефектов кристаллического строения (статические искажения кристаллической решетки).

Динамические искажения кристаллической решетки зависят от температуры, так как с ее ростом увеличиваются амплитуды колебаний ионов относительно положения равновесия. В диапазоне температур, исключая процессы диффузии, статические искажения практически не зависят от температуры, а при более высоких температурах зависимость эта проявляется вплоть до температур плавления.

Оба типа нарушений правильности кристаллического строения способствуют рассеянию электронных волн, определяя время свободного пробега электрона, а вместе с ним электропроводность и обратную ей величину – удельное электросопротивление:

$$\rho = \rho_1 + \rho_2, \quad (4)$$

где  $\rho$  – удельное электросопротивление;  $\rho_1$  – удельное электросопротивление, обусловленное динамическими искажениями кристаллической решетки;  $\rho_2$  – удельное электросопротивление, обусловленное статическими искажениями кристаллической решетки.

При постоянной температуре изменение  $\rho$  в зависимости от состава сплава будет связано в первую очередь с изменением  $\rho_2$ .

Для твердых растворов зависимость удельного электросопротивления от состава выражается соотношением

$$\rho = a_x \cdot x(1-x), \quad (5)$$

где  $x$  – мольная доля растворенного элемента;  $a_x$  – коэффициент, зависящий от разницы в размерах и валентностях атомов растворенного элемента и элемента-растворителя.

Из соотношения (5) видно, что зависимость  $\rho(x)$  представляет собой квадратичную параболу. При неограниченной растворимости компонентов максимум  $\rho$  соответствует концентрации  $\sim 50\%$ , так как в этом случае статические искажения максимальны. У химических соединений  $\rho$  всегда значительно выше, чем у компонентов, обра-

зующих соединения. Объясняется это усилением химической связи и уменьшением числа электронов проводимости. При образовании смесей статические искажения не накладываются на кристаллические решетки компонентой, и электросопротивление сплава равно сумме электросопротивления компонентов с учетом их мольной доли (правило аддитивности). Отклонение от этого правила может быть вызвано присутствием в гетерофазной структуре фаз, размеры частиц которых соизмеримы с длиной волны электрона.

Динамические и статические искажения кристаллической структуры существенно влияют на многие физико-химические свойства материалов, в том числе и на механические. Прочностные свойства (твердость, пределы прочности и текучести и др.) определяются прочностью межатомной связи, одной из характеристик которой являются динамические искажения (чем больше прочность межатомной связи, тем меньше динамические искажения). В то же время экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при температурах  $T \leq 0,5T_{пл}$  прочностные свойства твердых растворов пропорционально зависят от степени статических искажений кристаллической решетки и от изменения электронной концентрации. Объясняется это повышением сопротивления движению дислокаций за счет их упругого и электрического взаимодействия с растворенными атомами.

Упругое взаимодействие дислокации с растворенным атомом учитывает два фактора:

- 1) взаимодействие дислокации с собственно статическими искажениями кристаллической структуры (размерное взаимодействие);
- 2) взаимодействие дислокации с областью структуры, отличной по упругим свойствам от матрицы, так как растворенный атом представляет собой малую область со свойственными ей упругими характеристиками (взаимодействие по модулю).

С учетом этих факторов сопротивление перемещению дислокации в твердом растворе можно выразить следующим образом:

$$\tau \sim G\delta^{3/2}x^{1/2}, \quad (6)$$

где  $\tau$  – сопротивление кристаллической решетки перемещению дислокации;  $G$  – модуль сдвига металла-растворителя;  $\delta$  – величина, характеризующая взаимодействия по модулю и размерности;  $x$  – концентрация растворенного элемента.

Электрическое взаимодействие дислокации с атомами растворенного элемента также зависит от двух факторов:



1) перераспределения плотности электронов проводимости, связанного с собственно статическими искажениями кристаллической структуры;

2) изменения электронной концентрации.

Сопротивление перемещению дислокации с учетом ее электрического взаимодействия с растворенными атомами можно выразить соотношением

$$\tau \sim k_1 \cdot \Delta a + k_2 \cdot C_{ЭЛ} + k_3 \cdot \Delta a \cdot C_{ЭЛ} x, \quad (7)$$

где  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – численные коэффициенты уравнения;  $\Delta a$  – изменение периода решетки элемента-растворителя на 1 ат. % растворенного элемента.

Согласно (6) и (7) зависимость прочностных свойств твердых растворов от концентрации представляет собой параболу порядка  $n$ . Зависимость эта имеет максимум вблизи 50 ат. % растворенного элемента, что соответствует максимальной степени статических искажений. Однако по мере приближения к температуре плавления твердого раствора максимум смещается в область повышения концентраций более тугоплавкого элемента, так как прочность сплава с повышением температуры начинает контролироваться не сдвиговыми процессами, а диффузионными.

При образовании смесей статические искажения не накладываются на кристаллические решетки компонентов, и прочность сплава равна сумме значений прочностей компонентов с учетом их мольной доли (правило аддитивности). Отклонение от правила аддитивности имеет место в случае мелкозернистой смеси, в которой сильно развита протяженность межзеренных границ, являющихся эффективными дислокационными барьерами. Кроме того, отклонение имеет место в смесях, компоненты которых существенно отличаются по прочности, так как пластическая деформация сначала осуществляется преимущественно за счет более пластичного компонента.

У химических соединений значения прочности всегда намного выше, чем у компонентов, образующих соединение. Объясняется это более высокой прочностью межатомных сил связи у соединений по сравнению с чистыми компонентами.

*Практическая часть работы.*

Практическая часть работы состоит из двух заданий. Задание 1 выполняется студентами специальностей 220301 и 140607, а задание 2 – студентами всех остальных (механических) специальностей.

Задание 1. Измерение электросопротивления сплавов

1. Изучить компенсационный метод измерения электросопротивления сплавов (рис. 34).

2. Измерить удельное электросопротивление сплавов систем  $Pb - Sb$  и  $Cu - Ni$  и построить графики зависимости удельного электросопротивления изучаемых сплавов от их состава.

3. Установить связь между составом, структурой и удельным электросопротивлением сплавов в системах  $Pb - Sb$  и  $Cu-Ni$ .

4. Изучить электрические свойства металлов и сплавов, употребляемых в приборостроении: меди, никеля, никелина, константана.

Порядок проведения эксперимента:

1. Закрепить исследуемый образец в зажимном устройстве установки.

2. Определить рабочую длину образца  $l$ , измеряя штангенциркулем расстояние между зажимающими контактами.

3. Включить ключом  $K$  питание от аккумулятора и установить с помощью реостата  $R_p$  и амперметра  $A$  в цепи рабочий ток  $I_p$ , равный 3 А.

4. Измерить с помощью милливольтметра  $mV$  падение напряжения на изучаемом образце (падение напряжения можно измерить, также методом компенсации с помощью потенциометра).

Расчет удельного электросопротивления образца  $\rho$  производится по формуле

$$\rho = (R_x \cdot S) / l = (u_x \cdot S) / (I_p \cdot l) \quad \text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м},$$

где  $R_x$  – сопротивление образца, Ом;  $S$  – площадь поперечного сечения образца,  $\text{мм}^2$ ;  $l$  – длина образца, м;  $u_x$  – измеренное падение напряжения, В;  $I_p$  – рабочий ток, А.

Порядок выполнения работы:

1. Бригаде студентов выдается набор образцов в виде прутков или проволоки, изготовленных из двойных сплавов систем  $Pb-Sb$  и  $Cu-Ni$  составов, приведенных соответственно в табл. 1 и 2.

2. С помощью микрометра определяется диаметр образцов и рассчитывается площадь поперечного сечения  $S$  (в миллиметрах квадратных). Рабочая длина образцов  $l$  (в метрах) устанавливается путем измерения расстояния между зажимающими образец контактами.

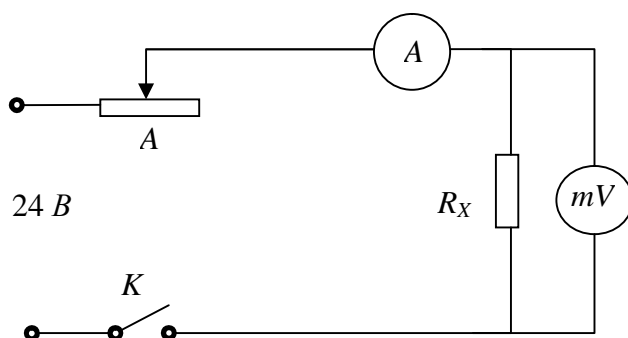


Рис. 34. Схема для измерения электросопротивления образцов металлов

Таблица 18. Сплавы системы *Pb-Sb*

| Номер сплава     |           | 1   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6   |
|------------------|-----------|-----|----|----|----|----|-----|
| Состав сплава, % | <i>Sb</i> | –   | 6  | 13 | 40 | 80 | 100 |
|                  | <i>Pb</i> | 100 | 94 | 37 | 60 | 20 | -   |

Таблица 19. Сплавы системы *Cu-Ni*

| Наименование сплава | Состав сплава, % |           |           |
|---------------------|------------------|-----------|-----------|
|                     | <i>Ni</i>        | <i>Cu</i> | <i>Mn</i> |
| Медь т. ч.          | -                | 99,7      | -         |
| Никелин             | 33               | 67        | -         |
| Константан          | 40               | 58,5      | 1,5       |
| Копель              | 44               | 56        | -         |
| Сплав 80/20         | 80               | 20        | -         |
| Никель т. ч.        | 99,5             | -         | -         |

3. Измерение электросопротивления образцов производится на установке в последовательности, указанной выше.

4. Результаты опыта заносятся в протокол установленной формы.

*Оформлении отчета.*

Отчет должен содержать:

- 1) изложение цели работы;
- 2) протокол результатов опыта по установленной форме;
- 3) диаграммы состояния сплавов систем *Pb-Sb* и *Cu-Ni*;
- 4) графики изменения удельного электросопротивления для изучаемых систем сплавов (вычерченные под соответствующими диаграммами состояния сплавов);
- 5) принципиальную схему установки для измерения удельного электросопротивления металлов и сплавов;
- 6) краткие выводы.

Задание 2. Измерение микротвердости на приборе ПМТ-3

1. Изучить методику испытания твердости отдельных структурных составляющих сплавов системы *Mo-Nb* и *Ni-Cr*.

2. Измерить микротвердость сплавов систем *Mo-Nb* (в интервале концентраций от 0 до 100 % *Nb*) и *Ni-Cr* (в интервале концентраций от 0 до 100 % *Cr*); построить графики зависимости микротвердости изучаемых сплавов от их состава.

3. Установить связь между составом, структурой и микротвердостью сплавов в системах *Mo-Nb* и *Ni-Cr*.

Для выполнения работы необходимы прибор ПМТ-3 с набором грузов и прессом для запрессовки образцов, а также набор микрошлифов с выявленной микроструктурой.

Микротвердость – это твердость материала, испытанная в микроскопическом объеме.

При испытании по схеме вдавливания в качестве наконечника (индентора) чаще всего используется алмазная пирамидка с квадратным основанием, которая вдавливается в испытуемый образец с нагрузкой от 2 до 200 г. При испытании по схеме царапания в качестве наконечника, как правило, применяется алмазный конус с углом заострения  $90^\circ$ . Величину нагрузки выбирают в зависимости от размера структурных составляющих и их твердости. Применяются также инденторы иной формы, при этом нагрузка может быть увеличена до 1000 г.

При измерении микротвердости необходимо учитывать неизбежный разброс получаемых значений из-за влияния соседних структурных составляющих, имеющих иную твердость, а также из-за различной толщины изучаемых элементов структуры, ошибок измерения и т. п. В связи с этим надо провести несколько испытаний (5-10), причем по возможности в одинаковых условиях. Пользоваться можно лишь средним значением измерений. Повторные измерения следует проводить каждый раз на новом месте структурной составляющей.

*Порядок выполнения работы:*

1. На каждом образце из имеющейся коллекции провести не менее двух испытаний на микротвердость для каждой структурной составляющей.

2. Определить микротвердость по табличным данным и рассчитать по формуле.

3. Зарисовать схематически микроструктуру с отпечатками микротвердости.

*Оформление отчета.*

Отчет должен содержать:

- 1) изложение цели работы;
- 2) протокол результатов опыта по установленной форме;
- 3) диаграммы состояния сплавов систем  $Mo-Ni$  и  $Ni-Cr$ ;
- 4) графики изменения микротвердости для изучаемых систем сплавов (вычерченные под соответствующими диаграммами состояния сплавов);
- 5) принципиальную схему установки для измерения микротвердости;

б) краткие выводы.

*Контрольные вопросы к лабораторной работе.*

1. Какие нарушения правильности кристаллического строения определяют уровень электросопротивления и прочности в сплавах?
2. Объясните характер диаграммы «состав – свойство» при образовании компонентами неограниченных твердых растворов.
3. Объясните характер диаграммы «состав – свойство» при образовании компонентами смесей.
4. Объясните характер диаграммы «состав – свойство» при образовании компонентами химических соединений.
5. Какие факторы определяют упругое взаимодействие дислокации с растворенными атомами в твердом растворе?
6. Какому сплаву соответствует экспериментальное значение уровня свойства при образовании компонентами твердых растворов?
7. В каком направлении смещается точка экстремума свойства при повышении температуры в случае взаимодействия компонентов с образованием неограниченных твердых растворов?
8. Как зависит удельное электросопротивление твердых растворов от концентрации?
9. Как зависит сопротивление перемещению дислокации в твердых растворах от концентрации?

### **3.2. Изучение электрических свойств проводников и полупроводников при различных температурах**

Цель работы – определить экспериментально температурную зависимость проводимости проводников и полупроводников от температуры и обосновать теоретически эту зависимость.

*Основные теоретические положения.*

Наилучшими проводниками электричества в природе являются металлы. Объясняется это наличием в них свободных электронов. Электрическое сопротивление проводника как в классической, так и в квантовой теории объясняется взаимодействием направленно движущихся электронов проводимости с кристаллической решеткой. При действии электрического поля энергия движущихся электронов определяется величиной приложенного напряжения: чем больше взаимодействие с кристаллической решеткой, тем меньше длина свободного пробега электрона. При взаимодействии с решеткой электроны передают часть своей энергии ионам решетки, что проявляется в нагревании проводников при пропускании электрического тока. Вероятность взаимодействия увеличивается при повышении температуры провод-

ника вследствие его внешнего нагрева, так как в этом случае увеличивается амплитуда колебаний ионов в узлах кристаллической решетки.

Согласно электронной теории общее выражение для электропроводности  $\sigma$  ( $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ ) имеет вид

$$\sigma = n \cdot e \cdot u, \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация носителей тока,  $1/\text{см}^3$ ;  $e$  – заряд носителя тока, Кл;  $u$  – подвижность носителя,  $\text{см}^2/\text{с}$ .

В металлах и сплавах основными носителями заряда являются электроны проводимости, концентрация которых  $n = 10^{22} - 10^{23}/\text{см}^3$ , заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, а подвижность изменяется в пределах  $u = 10 - 1000 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Поскольку подвижность носителей изменяется в гораздо более широких пределах, нежели другие величины и выражения (1), электропроводность металлов и сплавов на их основе в первую очередь определяется этой характеристикой. Подвижность электронов в металлах определяется формулой

$$v = e\tau/m, \quad (2)$$

где  $v$  – скорость частицы;  $\tau$  – среднее время свободного пробега электронов проводимости;  $m$  – масса электрона, равная  $9 \cdot 10^{-28}$  г. Время свободного пробега электрона в сильной степени зависит от нарушений правильности кристаллического строения, размер которых соизмерим по порядку с величиной длины волны электрона.

Нарушения в строении кристаллической решетки в основном могут быть двух типов:

1) тепловые колебания ионов в узлах решетки (динамические искажения);

2) дефекты геометрического происхождения: точечные, линейные, поверхностные (статические искажения).

Динамические искажения кристаллической решетки зависят от температуры, так как с ее ростом увеличиваются амплитуды колебаний ионов относительно положения равновесия.

Оба типа искажений рассеивают электронные волны, определяя время свободного пробега электрона, а следовательно, электропроводность и электросопротивление  $\rho$ :

$$\rho = \rho_1 + \rho_2, \quad (3)$$

где  $\rho$  – удельное электросопротивление;  $\rho_1$  – удельное электросопротивление, обусловленное динамическими искажениями кристаллической решетки;  $\rho_2$  – удельное электросопротивление, обусловленное статическими искажениями кристаллической решетки.

При повышении температуры изменения  $\rho$  в первую очередь будет связано с изменением  $\rho_2$ .

Однако, несмотря на рассмотренные выше явления, металлы имеют самые низкие значения электросопротивления по сравнению с другими веществами в природе. Объясняется это энергетическим состоянием электронов в металлах. Распределение электронов в твердых телах по энергиям подчиняется законам квантовой механики, одним из которых является принцип Паули. Согласно этому принципу как в отдельных атомах, так и в кристалле в целом в одинаковом энергетическом состоянии могут находиться только два электрона с противоположно направленными спиновыми моментами. Отсюда следует, что энергетические уровни, соответствующие изолированному атому, в твердом теле (большая совокупность атомов и электронов) расщепляются в зону, в которой число возможных энергетических уровней по порядку соответствует числу электронов. Разрешенные зоны чередуются с запрещенными электрическими зонами, в которых электроны не могут существовать устойчиво.

Для переноса электрического тока электроны с энергией, соответствующей валентной орбите, должны «перейти» в энергетическую зону проводимости, т. е. получить дополнительный импульс энергии. Величина этого импульса и определяет деление всех веществ в природе на проводники, полупроводники и диэлектрики.

В атомах металлов на внешних электронных уровнях обычно находятся один или два электрона с высокой энергией, которые легко могут покинуть атом и перейти в относительно свободное состояние, в котором они могут осуществлять направленный перенос электрической энергии (электрический ток). Энергетическое состояние электронов последнего энергетического уровня (валентное) в атоме металла и энергия «свободного» состояния очень близки. Поэтому эти энергетические зоны «перекрываются» в зонной структуре металла.

Полупроводники отличаются от металлов в двух отношениях. Прежде всего само название «полупроводники» говорит о том, что проводимость этих веществ при обычных температурах занимает промежуточное положение между проводимостью металлов и изоляторов. Кроме того, у полупроводников с повышением температуры, так же как и у изоляторов, проводимость возрастает.

В полупроводниках преобладают парные ковалентные связи (большинство полупроводников – ковалентные кристаллы). Возрастание проводимости обусловлено «выбиванием» электронов из парных ковалентных связей при росте температуры и переходом их в

свободное состояние. Отсутствие одного электрона на связи создает вокруг нее область с избытком положительного заряда («дырку»).

Движение электронной вакансии соответствует движению положительного заряда в противоположном направлении:

$$I_{\text{СУМ}} = I_{\text{ЭЛ}} + I_{\text{ДЫР}}. \quad (4)$$

Узкая энергетическая щель между валентной зоной и зоной проводимости свидетельствует о непрочности ковалентных связей, которые легко разрушаются с повышением температуры, в результате чего проводимость полупроводника растет.

Полупроводниками являются многие химические элементы, например *Ge*, *Si*, *Se*, *Te*, *B*, а также соединения *CuO*, *Cu<sub>2</sub>O*, *NiO*, *Ag<sub>2</sub>S*, *Mg<sub>2</sub>Sn* и др. Диапазон изменения электросопротивления у полупроводников очень широк:  $\rho=10^{-3}-10^9$  Ом·см. Проводимость полупроводников может возрасти также при световом и радиоактивном облучении.

Температурная зависимость удельной электропроводности полупроводников выражается, формулой

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\Delta E / 2kT}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – удельная электропроводность;  $\sigma_0$  – постоянный коэффициент, имеющий для многих полупроводников численное значение  $10^5$ ;  $\Delta E$  – ширина запрещенной зоны;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Свойство полупроводников с изменением температуры значительно увеличивать проводимость используется в специальных приборах для измерения температуры – термисторах.

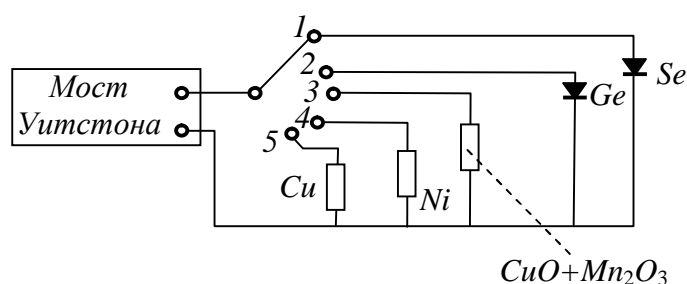


Рис. 35. Принципиальная схема установки для измерения электросопротивления полупроводников и металлов при различных температурах

#### Порядок проведения работы:

1. Ознакомиться с установкой для определения электросопротивления металлов и полупроводников при различных температурах (рис. 35).



2. Измерить (сначала при комнатной температуре, а затем при температурах 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 °С) электросопротивление полупроводников и металлов в такой последовательности: *Se*, *Ge*, термистор (смесь окислов *CuO + Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*), *Ni*, *Cu*.

3. Построить графики зависимости электросопротивления от температуры для полупроводников и металлов.

Порядок измерения электросопротивления:

1. Установить переключатель моста Уитстона в положение, соответствующее величине сравнительного сопротивления, определяемого множителем  $x$  (в случае измерения электросопротивления смеси окислов *CuO + Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* множитель  $x$  должен быть равен 100, а для *Se*, *Ge*, *Ni* и *Cu* – 1).

2. Вращая ручку реохорда моста Уитстона, установить стрелку гальванометра в нулевое положение.

3. По положению ручки реохорда определить показатель шкалы  $R_x$ .

4. Рассчитать электросопротивление  $R$  исследуемого материала по формуле

$$R = R_x \cdot x, \text{ Ом}, \quad (6)$$

где  $R_x$  – показатель шкалы реохорда;  $x$  – множитель, соответствующий установленному сравнительному сопротивлению.

По окончании опытов при комнатной температуре панель с изучаемыми материалами помещают в термостат для нагрева. Измерение электросопротивления при повышенной температуре производится точно то же, как и при комнатной.

Т а б л и ц а 20. Результаты опыта

| № п/п | Температура, °С | Название материала         |       |          |                  |       |          |   |       |          |           |       |          |           |       |          |
|-------|-----------------|----------------------------|-------|----------|------------------|-------|----------|---|-------|----------|-----------|-------|----------|-----------|-------|----------|
|       |                 | <i>Se</i><br>(выпрямитель) |       |          | <i>Ge</i> (диод) |       |          | <i>CuO + Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i><br>(термистор) |       |          | <i>Ni</i> |       |          | <i>Cu</i> |       |          |
|       |                 | $x$                        | $R_x$ | $R$ , Ом | $x$              | $R_x$ | $R$ , Ом | $x$   | $R_x$ | $R$ , Ом | $x$       | $R_x$ | $R$ , Ом | $x$       | $R_x$ | $R$ , Ом |
|       |                 |                            |       |          |                  |       |          |   |       |          |           |       |          |           |       |          |

*Оформление отчета.*

Отчет должен содержать:

- 1) изложение цели работы;
- 2) протокол результатов опыта (табл. 20);
- 3) графики зависимости электросопротивления изучаемых материалов от температуры;

4) принципиальную схему экспериментальной установки;

5) краткие выводы.

*Контрольные вопросы к лабораторной работе.*

1. Чем обусловлена высокая проводимость металлов?

2. Каково выражение для электропроводности с точки зрения электронной теории?

3. Какие нарушения кристаллического строения влияют на проводимость металлов и почему?

4. Назовите особенности зонных структур металлов, полупроводников и диэлектриков.

5. Как влияет повышение температуры на проводимость металлов и полупроводников?

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

### К главе 1

1) Расскажите о строении металлов.

2) Какие физические характеристики имеют металлические материалы?

3) Что представляют собой диаграммы состояния сплавов металлов?

4) Напишите формулу, определяющую величину коэффициента линейного теплового расширения металла.

5) Напишите формулу для подсчета коэффициента теплопроводности.

6) Какие механические свойства металлов вы знаете? Начертите диаграмму растяжения металлов.

7) Как рассчитать удельное электрическое сопротивление металлических материалов?

8) Что представляет собой температурный коэффициент удельного электрического сопротивления проводникового материала и какое свойство материала он определяет?

9) Как классифицируются проводниковые материалы?

10) Как обеспечить жаростойкость проводниковых материалов?

### К главе 2

1) Перечислите основные свойства и характеристики проводниковой меди и сплавов на ее основе.

2) Перечислите основные свойства и характеристики проводникового алюминия.

- 3) Перечислите основные свойства и характеристики проводникового железа.
- 4) Перечислите основные свойства и характеристики платины и серебра.
- 5) Что представляют собой проводниковые сплавы высокого сопротивления и где они применяются?
- 6) Каков состав манганина и константана? Каковы основные характеристики этих проводниковых сплавов?
- 7) Какие требования предъявляются к изоляции обмоточных проводов?
- 8) С какой изоляцией выпускаются монтажные и установочные провода?
- 9) Какова конструкция кабелей с резиновой изоляцией?
- 10) Какова конструкция кабелей с бумажной изоляцией?

#### К главе 3

- 1) Что представляет собой процесс дипольной и спонтанной поляризации диэлектриков?
- 2) Какие заряженные частицы образуют ток проводимости в диэлектриках?
- 3) Что представляет собой явление пробоя диэлектриков?
- 4) Перечислите основные механические характеристики электроизоляционных материалов и единицы их измерения.
- 5) В чем разница между теплостойкостью и нагревостойкостью твердого диэлектрика?
- 6) Перечислите основные физико-химические характеристики электроизоляционных материалов.
- 7) Какие требования предъявляются к электроизоляционным жидкостям, применяемым в трансформаторах?
- 8) Перечислите электрические и физико-химические характеристики, определяющие основные свойства жидких диэлектриков.
- 9) Какие требования предъявляются к электроизоляционным жидкостям, применяемым для пропитки бумажных конденсаторов?
- 10) Какой состав минеральных электроизоляционных масел?

#### К главе 4

- 1) Перечислите характерные свойства магнитномягких материалов.
- 2) Приведите состав и характерные свойства пермаллоев.

- 3) Перечислите характерные свойства магнитотвердых материалов.
- 4) Какие ферриты применяют в качестве магнитотвердых материалов?
- 5) Приведите состав и характерные свойства сплавов, применяемых в качестве магнитотвердых материалов.
- 6) Какие магнитные стали называются текстурованными?
- 7) Какими особенностями обладают ферриты?
- 8) Перечислите основные магнитные характеристики, согласно которым оцениваются магнитные свойства материалов.
- 9) Что представляют собой пермаллои и аковы их основные магнитные характеристики?
- 10) Что представляют собой электротехническая листовая сталь и каковы ее магнитные характеристики?

#### К главе 5

- 1) Перечислите характерные свойства полупроводниковых материалов.
- 2) Какие вещества называют донными и какие акцепторными и для чего они применяются в полупроводниках?
- 3) Расскажите об образовании р-п перехода в полупроводниках.
- 4) Напишите формулу определяющую удельную проводимость полупроводника.
- 5) Начертите вольтамперную характеристику для р-п перехода. Как она будет изменяться с повышением температуры.
- 6) Перечислите основные группы полупроводниковых материалов.
- 7) Опишите структуру и основные свойства германия и кремния.
- 8) Что представляет собой плоский германиевый или кремниевый диод?
- 9) Опишите основные свойства и характеристики карбида кремния.
- 10) Какие полупроводниковые материалы обладают нелинейным сопротивлением и в каких электрических устройствах используется это свойство?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для успешного развития электронной техники необходимым условием является разработка прогрессивных, экономичных, экологически чистых, безотходных технологических процессов, обеспечивающих электронную промышленность высококачественными материалами. Проводники, полупроводники, диэлектрики и магнитные материалы являются группой материалов электронной техники, на основе которых изготавливаются активные и пассивные компоненты электронной аппаратуры. Технологические процессы получения этих материалов в виде монокристаллов, стекла, керамики имеют много общего.

Уровень и темпы развития технологии электрических материалов неразрывно связаны с подготовкой высококвалифицированных специалистов. Роль технолога в современной промышленности значительно возросла, поскольку синтез новых материалов или совершенствование уже освоенных позволяет разрабатывать приборы с уникальными характеристиками, совершенствовать функциональные возможности электронной аппаратуры. Усложнение производства, а также значительное расширение номенклатуры выпускаемых материалов требуют от будущих инженеров электронной техники углубленного изучения теоретических основ технологии. Это обеспечивает успех в создании управляемой технологии, в прогнозировании состава и свойств получаемых материалов.

### *Библиографический список*

1. Колесов, С.Н. *Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учеб. для вузов.* / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – М.: Высшая школа, 2004. – 519 с.
2. Бородулин, В.Н. *Проводниковые, полупроводниковые материалы: Конспект лекций по курсу «Электротехническое материаловедение».* – М.: Издательство МЭИ, 1994. – 63 с.
3. Богородский, Н.П. *Электротехнические материалы.* / Н.П. Богородский, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
4. Пасынков, В.В. *Материалы электронной техники.* / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
5. Штофа, Я. *Электротехнические материалы в вопросах и ответах.* М.: Энергоатомиздат, 1984. – 199 с.
6. *Конструкционные и электротехнические материалы.* / В. Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.А. Филиков и др.; Под ред. В.А. Филикова. М.: Высшая школа, 1990. – 296 с.
7. Матвеев, А.Н. *Электричество и магнетизм.* – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
8. *Справочник по электротехническим материалам. Т3.* Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Изд 3-е. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.
9. Мишин, Д.Д. *Магнитные материалы.* – 2-е изд. М.: Высшая школа, 1991. – 383 с.

*Учебное издание*

Алексей Александрович Руппель, Валерий Павлович Расщупкин,  
Михаил Сергеевич Корятов, Юрий Константинович Корзунин

## ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛЫ

Учебное пособие

\*\*\*

Редактор Т.И. Калинина

\*\*\*

Подписано к печати \_\_.\_\_.2009  
Формат 60 × 90 1/16. Бумага писчая  
Оперативный способ печати  
Гарнитура Times New Roman  
Усл. п. л. 8,5, уч.-изд. л. 8,5  
Тираж 100 экз. Заказ №  
Цена договорная

Издательство СибАДИ  
644099, г. Омск, ул. П. Некрасова, 10

---

Отпечатано в ПЦ издательства СибАДИ  
644099, г. Омск, ул. П. Некрасова, 10