

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОЛЖСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА»  
САМАРСКИЙ ФИЛИАЛ ФГБОУ ВО «ВГАВТ»  
УПРАВЛЕНИЕ СПО – САМАРСКИЙ РЕЧНОЙ ТЕХНИКУМ

**О.В. Кекина**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ  
(курс лекций)**

Учебное пособие  
по дисциплине «Материаловедение»

для специальности 180407 (26.02.06)  
Эксплуатация судового электрооборудования  
и средств автоматики

САМАРА  
2014

621.3

К33

Кекина, О.В. Электротехнические материалы: Курс лекций: учебное пособие по дисциплине «Материаловедение» для специальности 180407 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики»/ О.В.Кекина; ФГБОУ ВО «ВГАВТ» Управление СПО- Самарский речной техникум.- Самара, 2015.- 43 с.: илл.

Учебное пособие «Электротехнические материалы» предназначено для студентов средних специальных учебных заведений специальности 180407 (26.02.06) Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики.

В пособии в доступной форме изложены основные сведения об электротехнических материалах; рассмотрены различные классы широко применяемых электротехнических материалов: проводников, полупроводников, диэлектриков, магнетиков; описаны основные свойства; изложены основы физических явлений, происходящих в них; представлены требования, предъявляемые к этим материалам; область их применения.

Для наглядности каждый раздел пособия снабжен рисунками, иллюстрирующими различные виды материалов, применяемых в электротехнике, и детали, изготовленные из них. Пособие дополнено приложением, в котором в табличной форме представлены характеристики электротехнических материалов. Пособие может быть использовано как для аудиторной, так и для домашней самостоятельной работы студентов при изучении общепрофессиональной учебной дисциплины «Материаловедение».

Автор - преподаватель высшей категории Самарского филиала ФГБОУ ВО «ВГАВТ», Ольга Викторовна Кекина. Пособие рассмотрено на заседании ПЦК «Эксплуатации транспортных энергетических установок, судового электрооборудования и автоматики» и утверждено методическим советом филиала 23.12.2014 г.

Кекина Ольга Викторовна

### **Электротехнические материалы**

Учебное пособие  
по дисциплине «Материаловедение»

Редактор: О.В. Жаровская

Подписано в печать 23.12.2014  
Формат А4. Гарнитура «Таймс».  
Ризография. Усл. печ. л. 2,7  
Тираж 50 экз.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  | Стр. |
|--|------|
| Введение.....  | 4    |
| 1. Классификация электроматериалов.....  | 5    |
| 2. Классификация материалов по электрическим свойствам.....                            | 6    |
| 3. Основные сведения о проводниках.....  | 8    |
| 4. Основные свойства и параметры проводниковых материалов.....                         | 10   |
| 5. Промышленные проводниковые материалы.....   | 11   |
| 6. Материалы с высокой проводимостью.....  | 11   |
| 7. Контактные материалы.....   | 17   |
| 8. Сплавы с повышенным электросопротивлением.....                                      | 18   |
| 9. Проводниковые материалы и сплавы различного применения.<br>Благородные металлы..... | 19   |
| 10. Полупроводниковые материалы.....   | 19   |
| 11. Основные полупроводниковые материалы.....  | 20   |
| 12. Диэлектрические материалы.....   | 21   |
| 13. Свойства диэлектриков.....   | 22   |
| 14. Классификация диэлектрических материалов.....                                      | 24   |
| 14.1 Твердые органические диэлектрики.....   | 24   |
| 14.2 Твердые неорганические диэлектрики.....   | 28   |
| 14.3 Жидкие диэлектрики.....   | 29   |
| 14.4 Газообразные диэлектрики.....   | 31   |
| 15. Магнитные материалы.....   | 33   |
| 15.1 Общие характеристики магнитных материалов.....                                    | 33   |
| 15.2 Классификация магнитных материалов.....   | 35   |
| 15.3 Магнитомягкие материалы.....  | 36   |
| 15.4 Магнитотвердые материалы.....   | 38   |
| Заключение.....  | 39   |
| Список литературы.....   | 40   |
| Приложение.....  | 41   |

## ВВЕДЕНИЕ

В результате освоения общепрофессиональной дисциплины «Материаловедение» студент должен **знать:**

- строение и свойства конструкционных и эксплуатационных материалов, применяемых при ремонте, эксплуатации и техническом обслуживании;
- сущность явлений, происходящих в материалах в условиях эксплуатации изделия;
- современные способы получения материалов и изделий из них с заданным уровнем эксплуатационных свойств;

**и уметь:**

- анализировать структуру и свойства материалов;
- строить диаграммы состояния двойных сплавов;
- давать характеристику сплавам.

Целью данного учебного пособия является изучение основных процессов, происходящих в электротехнических материалах под действием электрического и магнитного полей, знакомство с основными материалами, применяемыми в электроэнергетике и их свойствами.

Электротехническими являются специальные материалы, из которых изготавливают электрические машины, аппараты, приборы и другие элементы электрооборудования и электроустановок. Надежность работы электрических машин, аппаратов и установок зависит от качества и правильного выбора соответствующих электротехнических материалов. При рациональном выборе электротехнических материалов можно создавать оборудование малых габаритов и массы, надежное в эксплуатации. Но для этого необходимо знать свойства электротехнических материалов и их изменения под воздействием электрического напряжения, температуры и других факторов.

Величины, с помощью которых оценивают те или иные свойства материалов, называют характеристиками (параметрами). Чтобы полностью оценить свойства того или иного электротехнического материала, необходимо знать его механические, электрические, тепловые и физико-химические характеристики. У магнитных материалов необходимо еще знать магнитные характеристик, которые позволяют оценить их магнитные свойства.

## 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛОВ

По назначению материалы, используемые в различных областях электроники, условно подразделяют на конструкционные и электротехнические. Конструкционные материалы применяют для изготовления несущих конструкций, а также вспомогательных деталей и элементов радиоприборов, работающих в условиях воздействия механических нагрузок.

Электротехнические материалы, которые находят применение в радиоэлектронике, называют *электрорадиоматериалами*. Применение этих материалов в радиоэлектронике обусловлено, прежде всего, их электрическими и магнитными свойствами.

Электротехническими называют материалы, характеризующиеся определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяемые в технике с учетом этих свойств. Различные материалы подвергаются воздействиям как отдельно электрических и магнитных полей, так и их совокупности. Электротехнические материалы в магнитном поле подразделяются на немагнитные, слабомагнитные и сильномагнитные, а в электрическом поле – на проводниковые, диэлектрические и полупроводниковые.

Указанная классификация очень приближительна, поэтому в пределах названных основных групп материалы систематизируются в подгруппы.

**Физические свойства** материалов определяются цветом, удельным весом, плотностью, температурой плавления, тепловым расширением, тепло- и электропроводностью, а также магнитными свойствами.

Физические свойства металлов характеризуются определенными числовыми значениями, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1

### Физические свойства некоторых металлов

| Металл   | Символ | Цвет                                  | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Температура плавления, °С | Удельное электро-сопротивление при 20 °С, 10 <sup>-6</sup> Ом·м |
|----------|--------|---------------------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| Алюминий | Al     | Серебристо-белый                      | 2700                         | 658,7                     | 0,029   |
| Вольфрам | W      | Блестящий - белый                     | 19300                        | 3380                      | 0,053   |
| Железо   | Fe     | Серебристо-белый                      | 7800                         | 1539                      | 0,100   |
| Кобальт  | Co     | Серебристо-белый                      | 8900                         | 1490                      | 0,062   |
| Магний   | Mg     | Блестящий серебристо-белый            | 1700                         | 650                       | 0,047   |
| Медь     | Cu     | Красный                               | 8900                         | 1083                      | 0,017   |
| Никель   | Ni     | Серебристо-белый с сероватым оттенком | 8900                         | 1452                      | 0,070   |
| Олово    | Sn     | Серебристо-белый                      | 7300                         | 231,9                     | 0,124   |
| Свинец   | Pb     | Синевато-серый                        | 11400                        | 327,4                     | 0,220   |
| Титан    | Ti     | Серебристо-белый                      | 4500                         | 1668                      | 0,470   |
| Хром     | Cr     | Блестящий серовато-белый              | 7100                         | 1550                      | 0,150   |
| Цинк     | Zn     | Синевато-серый                        | 7100                         | 419,5                     | 0,060   |

Отношение массы тела к его объему является постоянной величиной для данного вещества и называется *плотностью*.

Плотность и удельный вес имеют большое значение при выборе металлических материалов для изготовления различных изделий. Так, детали и конструкции в приборостроении, в авиа- и вагоностроении наряду с высокой прочностью должны

обладать малой плотностью. Из металлов, наиболее широко применяемых в технике, наименьшую плотность имеют магний и алюминий.

Все металлы, как тела кристаллического строения переходят при определенной температуре из твердого состояния в жидкое, и наоборот. Температура, при которой металл переходит из твердого состояния в жидкое, называется температурой плавления. Температура плавления является важным физическим свойством металлов. Знание температуры плавления металлов и сплавов необходимо в металлургии, в литейном производстве, при горячей обработке металлов давлением, при сварке, пайке и других процессах, сопровождающихся нагреванием металлических материалов. Способность металлов передавать теплоту от более нагретых частей тела к менее нагретым называется теплопроводностью.

Среди металлических материалов лучшей теплопроводностью обладают серебро, медь, алюминий. Эти же металлы являются и лучшими проводниками электрического тока. Теплопроводность металлов имеет большое практическое значение. Из металлов и сплавов, обладающих высокой теплопроводностью, изготавливают детали машин, которые при работе поглощают или отдают теплоту.

Различные вещества, в том числе и металлы, при нагревании расширяются, при охлаждении - сжимаются. Неодинаковость величины теплового линейного расширения материалов характеризуется коэффициентом линейного расширения  $\alpha$ , который показывает, на какую долю первоначальной длины  $l_0$  при  $0^\circ\text{C}$  удлинилось тело вследствие нагревания его на  $1^\circ\text{C}$ . Единица измерения  $\alpha$  -  $^\circ\text{C}^{-1}$ . Тепловое расширение металлов необходимо учитывать при изготовлении и эксплуатации точных измерительных приборов и инструментов, изготовлении литейных форм, горячей обработке металлов давлением и в других случаях, связанных с нагреванием и охлаждением. Детали точных приборов и измерительных инструментов изготавливаются из материалов с малым коэффициентом линейного расширения, детали автоматически действующих механизмов, которые, удлиняясь, должны замыкать электрическую цепь, делают из материалов с большим коэффициентом линейного расширения.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

По поведению в электрическом поле материалы подразделяют на *проводниковые, полупроводниковые и диэлектрические*. Эта классификация основана на представлениях зонной теории электропроводности твердых тел. Как установлено многочисленными экспериментами, электроны в изолированном атоме могут находиться лишь на определенных орбитах, которым соответствуют строго определенные значения энергии - энергетические уровни. Согласно принципу Паули на одном энергетическом уровне может находиться не более двух электронов. Под воздействием притяжения положительно заряженного атома ядра электроны стремятся занять ближайшие к ядру уровни с минимальным значением энергии.

В результате нижние энергетические уровни оказываются заполненными электронами, а верхние - свободными. Электрон может скачкообразно перейти с нижнего энергетического уровня  $W_1$  на другой свободный уровень  $W_2$  (см. рис. 1). Для этого электрону необходимо сообщить дополнительную энергию. Если свободных уровней в атоме нет, то электрон не может изменить свою энергию, поэтому не участвует в создании электропроводности.

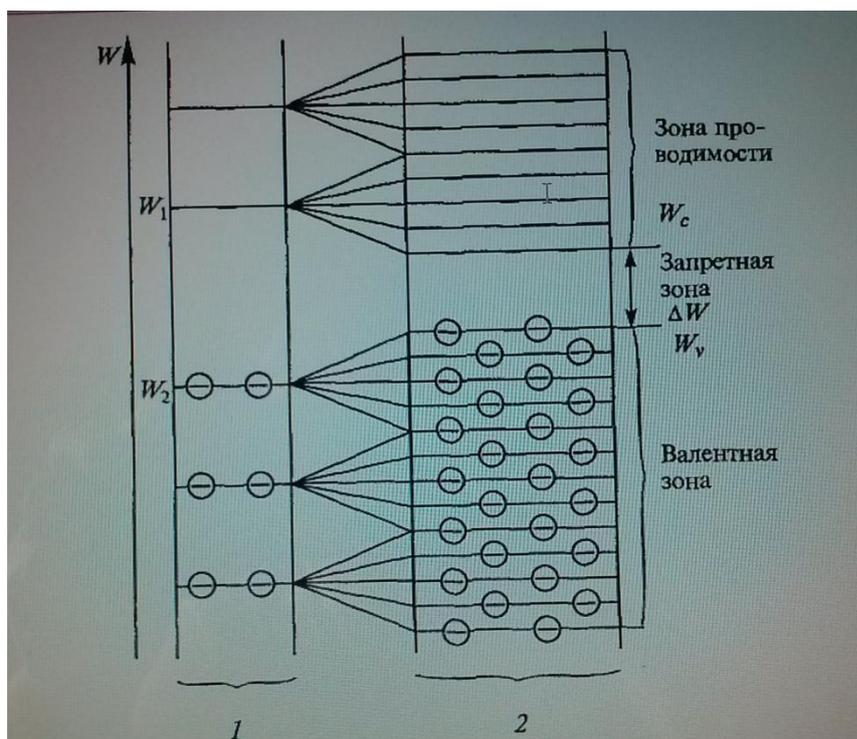


Рис.1. Диаграмма энергетических уровней атома

Зона, заполненная электронами, называется *валентной* ( $E_v$ ). Свободная зона называется *зоной проводимости* ( $E_c$ ). Промежуток между валентной зоной и зоной проводимости называется *запретной зоной* ( $E_g$ ). Значение этой зоны влияет на свойства материалов. Если  $E_g$  приближается к нулю, то такие вещества относят к *проводникам* (металлы).

Если  $E_g$  больше нескольких эВ, то такие вещества относят к *диэлектрикам*. (1 эВ - это энергия электрона, полученная им при перемещении между двумя точками электрического поля с разностью потенциалов 1В).

Если значение  $E_g$  от 0,1 до 0,3 эВ, то электроны легко переходят из валентной зоны в зону проводимости благодаря внешней энергии. Вещества с управляемой проводимостью относят к *полупроводникам*.

Проводниковые материалы служат для проведения электрического тока. Обычно к проводникам относят вещества с удельным электрическим сопротивлением  $\rho$  менее  $10^{-5}$  Ом·м. Диэлектрические материалы обладают способностью препятствовать прохождению тока. К диэлектрическим материалам относят вещества с удельным электрическим сопротивлением  $\rho$  более  $10^7$  Ом·м. Благодаря высокому удельному электрическому сопротивлению их используют в качестве электроизоляционных материалов.

В зависимости от структуры и внешних условий материалы могут переходить из одного класса в другой. Например, твердые и жидкие металлы - проводники, а пары металлов - диэлектрики; типичные при нормальных условиях полупроводники германий и кремний при воздействии высоких гидростатических давлений становятся проводниками; углерод в модификации алмаза - диэлектриками, а в модификации графита - проводниками.

Полупроводниковые материалы обладают проводимостью, с помощью которой можно управлять напряжением, температурой, освещенностью и т.д.

Удельное электрическое сопротивление полупроводников составляет  $10^{-6} \dots 10^9$  Ом·м.

Основным свойством вещества по отношению к электрическому полю является электропроводность, характеризующая способность материала проводить электрический

ток под воздействием постоянного электрического поля, т. е. поля, напряжение которого не меняется во времени.

Электропроводность характеризуется удельной электрической проводимостью  $\gamma$  и удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ :

$$J = \gamma E = E/\rho,$$

где:

$J$  – плотность тока;

$E$  - напряженность электрического поля В/м;

$\gamma$  - удельная электрическая проводимость;

$\rho = 1 / \gamma$  -удельное электрическое сопротивление, Ом-м.

Значения удельной электрической проводимости  $\gamma$  и удельного электрического сопротивления  $\rho$  у разных материалов существенно различаются. В сверхпроводящем состоянии удельное электрическое сопротивление материалов равно нулю, а у разреженных газов стремится к бесконечности.

### 3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОВОДНИКАХ

#### **Классификация проводниковых материалов**

Проводник – это вещество, внутри которого в случае электростатического равновесия электрическое поле равно нулю, а если поле отлично от нуля, то в проводнике возникает электрический ток.

Проводники, используемые в современной технике, по агрегатному состоянию подразделяются на газообразные, жидкие, твердые.

*К газообразным проводникам* относят пары веществ и газы при таком значении напряженности электрического поля, которое обеспечивает начало процесса ионизации молекул. Ионизированный газ представляет собой проводник, в котором перенос электрических зарядов осуществляется как электронами, так и ионами. Проводимость газов и паров широко используется в различных газоразрядных приборах.

*Плазма* - это сильно ионизированный газ, в единице объема которого число электронов равно числу положительных ионов.

*Твердые* металлы и их сплавы называют проводниками с электронной электропроводностью или *проводниками I рода*. Металлы в твердом состоянии являются кристаллическими веществами, для которых характерен особый вид металлической связи между атомами. Электропроводность металлов, как в твердом, так и в жидком состоянии обусловлена переносом электрических зарядов только электронами. Твердые проводники являются важнейшими проводниковыми материалами, широко применяемыми в радиоэлектронике и электротехнике.

*К жидким проводникам* относят различные растворы и расплавы солей, кислот, щелочей и других веществ, проводящие электрический ток. Их называют *электролитами* или *проводниками II рода*. При прохождении электрического тока через электролит, в который погружены электроды, электрические заряды переносятся вместе с частицами молекул (ионами) электролита. На электродах происходит выделение веществ из раствора. Электролиты широко используются в технике, в частности в технологии изготовления различных элементов радиоэлектронных устройств. Жидкими проводниками являются также расплавы металлов.

По характеру применения в радиоэлектронных приборах металлические материалы разделяют на материалы высокой проводимости (удельное электрическое сопротивление  $\rho < 0,1$  мкОм·м) и материалы с высоким сопротивлением (удельное электрическое сопротивление  $\rho > 0,3$  мкОм·м).

Большинство металлов имеют высокую температуру плавления (см. табл. 2).

Только ртуть и некоторые специальные сплавы (например, сплавы системы индий-галлий) могут быть использованы в качестве жидких проводников при нормальной температуре.

Таблица 2

### Температура плавления и кипения металлов

| Металл   | Температура, °С |         | Металл   | Температура, °С |         |
|----------|-----------------|---------|----------|-----------------|---------|
|          | плавления       | кипения |          | плавления       | кипения |
| Олово    | 232             | 2600    | Серебро  | 960             | 2180    |
| Свинец   | 327             | 1750    | Золото   | 1063            | 2660    |
| Цинк     | 420             | 907     | Медь     | 1083            | 2580    |
| Магний   | 650             | 1100    | Железо   | 1539            | 2900    |
| Алюминий | 660             | 2400    | Титан    | 1680            | 3300    |
| Ртуть    | -38,9           | -       | Платина  | 1773            |         |
| Галлий   | 29,7            |         | Молибден | 2620            |         |
| Натрий   | 97,7            |         | Вольфрам | 3380            |         |

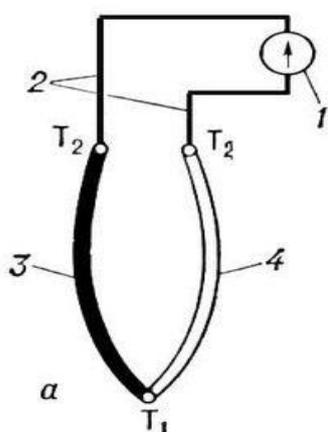


Рис. 2. Схема термопары

Металлы высокой проводимости (серебро, медь, алюминий, железо, золото и др.) используют как основу в контактных материалах и припоях, для изготовления проводов, микропроводов, проводящих покрытий и пленок, различных токопроводящих деталей.

Сплавы высокого сопротивления (медномарганцевые сплавы (манганины), медно-никелевые сплавы (константаны), сплавы железа, никеля и хрома) применяют при изготовлении резисторов и резистивных элементов различных типов назначения, а также разнообразных электронагревательных элементов и т.п.

Материалы, обладающие ничтожно малым удельным электрическим сопротивлением  $\rho$  при очень низких температурах называются сверхпроводниками. Свойством сверхпроводимости обладают ртуть, алюминий, свинец, ниобий, соединения ниобия с оловом, титаном и др.

Характерным свойством всех металлов и сплавов является повышение их электрического сопротивления с ростом температуры. Классическая теория электропроводности (теория электронного газа) объясняет также возникновение *термоэлектродвижущей силы* на контакте двух металлов.

При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает контактная разность потенциалов  $U$ . Ее появление обусловлено различием концентраций свободных электронов в соприкасающихся металлах 3 и 4, что приводит по законам диффузии к переходу части электронов в металл с меньшей их концентрацией (см. рис.2.)

Однако, чтобы покинуть пределы металла, электрон должен иметь определенную энергию, называемую *работой выхода электрона*. Эта величина характерна для каждого проводника и определяет, в частности, эмиссионные свойства металла, т.е. его способность быть источником электронов.

Величина контактной разности потенциалов для различных пар металлов колеблется в пределах от десятых долей вольта до нескольких вольт. Такая пара изолированных друг от друга различных проводников со спаем на конце, называемая *термопарой*, широко используется в технике для температурных измерений.

*Высокая теплопроводность* металлов также легко объясняется посредством передачи тепловой энергии атомов нагретого участка металла атомам холодного участка

за счет переноса этой энергии коллективизированными электронами. Так как механизм электропроводности и теплопроводности в металлах обусловлен одними и теми же факторами - движением электронного газа и его плотностью, становится понятным, почему металлы с высокой электропроводностью являются также хорошими проводниками тепла и почему диэлектрики обладают не только низкой электропроводностью, но и низкой теплопроводностью.

#### 4. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ПАРАМЕТРЫ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

##### **Основные свойства электроматериалов**

К механическим свойствам относят твердость, упругость, вязкость, пластичность, линейное расширение, хрупкость, прочность, усталость.

*Твердость* - это способность материала сопротивляться проникновению в него другого, более твердого. Методы определения твердости: вдавливание, царапание, упругая отдача.

*Упругость* - это свойство материала восстанавливать свою форму и объем после прекращения действия внешних сил, которые вызывают их изменение.

*Вязкость* - это способность материала оказывать сопротивление динамическим (быстрорастущим) нагрузкам.

*Пластичность* - это свойство материала деформироваться без разрушения под действием внешних сил и сохранять новую форму после прекращения действия этих сил.

*Температурный коэффициент линейного расширения* позволяет определить изменения любых геометрических размеров изделий (длины, ширины, толщины) при нагревании.

*Хрупкость* - это способность материалов разрушаться при приложении резкого динамического усилия.

*Прочность* - это способность материала сопротивляться действию внешних сил, не разрушаясь.

*Усталость* - это разрушение материала под действием небольших повторных или знакопеременных нагрузок (вибрации). Пример: пружина.

Свойство металла выдерживать, не разрушаясь, большое число повторных или знакопеременных напряжений называется *выносливостью*.

К физико-химическим свойствам относят цвет, плотность, температура плавления, теплопроводность, тепловое расширение, электропроводность, магнитные свойства, поглощение газов, коррозионную стойкость и другие.

По плотности металлы разделяют на легкие и тяжелые. К *легким* относят те металлы, плотность которых меньше 5 мг/м (литий, натрий, алюминий). К *тяжелым* относят большинство металлов, используемых в технике (железо, медь, никель, олово).

Основными параметрами, определяющими свойства проводниковых материалов, являются:

- 1) удельное электрическое сопротивление  $\rho$ ;
- 2) температурный коэффициент удельного сопротивления  $TK\rho$ ;
- 3) температурный коэффициент линейного расширения  $TKl$ .

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  проводника с сопротивлением  $R$  постоянным поперечным сечением  $S$  и длиной  $l$  вычисляют по формуле:

$$\rho = RS/l$$

Температурный коэффициент удельного сопротивления проводников, измеряемый  $K^{-1}$ , при данной температуре вычисляют по формуле:

$$TK_{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} [K^{-1}]$$

Для проводников, используемых в электровакуумных приборах, важной механической характеристикой материала является температурный коэффициент линейного расширения, позволяющий определить изменение любых геометрических размеров изделий (длины, ширины, толщины) при нагревании.

Величина определяется по формуле:

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT} [K^{-1}]$$

## 5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В зависимости от удельного электрического сопротивления и применения проводниковые материалы подразделяют на следующие группы:

- 1) металлы и сплавы высокой проводимости,
- 2) припой,
- 3) сверхпроводники,
- 4) контактные материалы,
- 5) сплавы с повышенным электросопротивлением.

## 6. МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ

К материалам этого типа предъявляются следующие требования: минимальное значение удельного электрического сопротивления, высокие механические свойства, способность легко обрабатываться, что необходимо для изготовления проводов малых и средних сечений; коррозионная стойкость. К ним относятся: цветные металлы – серебро, медь, алюминий, золото, цинк, олово, магний, свинец; черные металлы – железо.

### **Медь и её сплавы**

**Медь** является одним из лучших токопроводящих материалов. Плотность меди 8,95 г/см<sup>3</sup> при 20°С, температура плавления 1083° С. Медь химически мало активна, но легко растворяется в азотной кислоте, а в разбавленной соляной и серной кислотах растворяется только в присутствии окислителей (кислорода). На воздухе медь быстро покрывается тонким слоем окиси темного цвета, но это окисление не проникает вглубь металла и служит защитой от дальнейшей коррозии. Медь хорошо поддается ковке и прокатке без нагрева.

Свойства меди:

- малое удельное электрическое сопротивление,
- высокая механическая прочность,
- удовлетворительная коррозионная стойкость,
- хорошая паяемость и свариваемость,
- хорошая обрабатываемость.

Для изготовления электрических проводников применяется **электролитическая медь** в слитках, содержащих 99,93% чистой меди.

Медь получают, чаще всего, в результате переработки сульфидных руд. Примеси снижают электропроводность меди. Наиболее вредными из них являются фосфор, железо, сера, мышьяк. Содержание фосфора примерно 0,1% увеличивает сопротивление меди на 55%. Примеси серебра, цинка, кадмия дают увеличение сопротивления на 1...5%. Поэтому

медь, предназначенная для электротехнических целей, обязательно подвергается электролитической очистке.

При холодной протяжке получают твердую медь (МТ), которая обладает высоким пределом прочности при растяжении, твердостью и упругостью. МТ применяют в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую механическую прочность, твердость и сопротивляемость истиранию: для контактных проводов, шин распределительных устройств, для изготовления экранов, токопроводящих жил кабелей и проводов диаметром до 0,2 мм.

После отжига до нескольких сотен градусов (медь кристаллизуется при температуре 270 °С) с последующим охлаждением получают мягкую медь (ММ). Мягкая медь имеет проводимость на 3...5% выше, чем у твердой меди.

Мягкая медь широко применяется для изготовления фольги и токопроводящих жил круглого и прямоугольного сечения в кабелях и обмоточных проводах, где важна гибкость и пластичность, а прочность не имеет большого значения (см. рис.3).

Медь сравнительно дорогой и дефицитный материал, поэтому она должна расходоваться экономно. Отходы меди на электротехнических предприятиях собирают и не смешивают с другими металлами, чтобы их можно было переплавить и снова использовать.



Рис.3. Контакты и провода

В ряде случаев, когда от проводникового материала требуется не только высокая проводимость, но и повышенная механическая прочность, коррозионная стойкость и сопротивляемость истиранию, применяют сплавы меди с небольшим содержанием легирующих примесей.

### **Бронзы**

Сплавы меди с примесями олова, алюминия, кремния, бериллия и других элементов, среди которых цинк не является основным легирующим элементом, называют *бронзами*.



Например: кадмиевую бронзу (0,9% кадмия, остальное медь) применяют для контактных проводов (см. рис.4), сварочных электродов при контактных методах сварки.

Фосфористая бронза (6,5% олова, 0,15% фосфора, остальное медь) отличается низкой электропроводностью. Из неё изготавливают различные малоответственные токопроводящие пружины в электроприборах.

Рис.4. Контактные провода из кадмиевой бронзы

## Латуни

*Латуни* представляют собой медные сплавы, в которых основным легирующим элементом является цинк (до 43%). Латуни хорошо штампуются (см. рис. 5) и легко подвергаются глубокой вытяжке (колпачки радиотехнических ламп, экраны корпусов).



Рис. 5. Латунный контакт

В ряде случаев медь как проводниковый материал заменяют другими металлами, чаще всего алюминием.

### Алюминий и его сплавы

Алюминий является вторым после меди материалом по применяемости в электротехнике

Алюминий относится к так называемым легким металлам (плотность литого алюминия около 2600, прокатанного - 2700 кг/м<sup>3</sup>). Алюминий обладает следующими особенностями:

- удельное электрическое сопротивление  $\rho$  алюминия (при содержании примесей не более 0,05%) в 1,63 раза больше, чем у меди, поэтому замена меди алюминием не всегда возможна, особенно в радиоэлектронике;
- алюминий приблизительно в 3,5 раза легче меди;
- из-за высоких значений удельной теплоемкости и теплоты плавления алюминия нагревание алюминиевого провода до расплавления требует больших затрат энергии, чем нагревание и расплавление такого же количества меди;
- даже при одинаковой стоимости алюминия и меди в слитках стоимость алюминиевой проволоки почти вдвое ниже, однако использование алюминия для изолированных проводов в большинстве случаев менее выгодно из-за затрат на изоляцию;
- алюминий на воздухе активно окисляется и покрывается тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением, которая предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов;
- алюминий менее дефицитен, чем медь;
- существенным недостатком алюминия как проводникового материала является низкая механическая прочность, для ее повышения алюминий подвергается механической обработке;
- прокатка, протяжка и отжиг алюминия аналогичны соответствующим операциям для меди;
- примеси значительно снижают проводимость алюминия.

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.

Алюминий высокой степени чистоты (примесей не более 0,001...0,01%) марок А999 и А995 используют для изготовления анодной и катодной фольги электролитических конденсаторов и в микроэлектронике для получения тонких пленок.

Менее чистый алюминий марок А97 и А95 (примесей не более 0,03 %) используют для корпусов электролитических конденсаторов, статорных и роторных пластин воздушных конденсаторов. Из алюминиевой фольги и ленты изготавливают экраны радиочастотных коаксиальных кабелей.

Из алюминия изготавливают провода, шины, трубки, листовой материал, фольгу и прочие изделия. Проволока выпускается диаметром от 0,06 до 8 мм, а шины – толщиной от 3 до 12 мм при ширине от 10 до 120 мм. Алюминиевая фольга толщиной от 0,006 до 0,15 мм используется в качестве обкладок в бумажных и пленочных конденсаторах разных типов.

Алюминий широко применяется в микроэлектронике для формирования токоведущих дорожек, контактных площадок, а также, в окисленном виде – для изоляции элементов и в качестве межуровневой изоляции в многослойных структурах (см. рис.6).



Рис.6. Кабель силовой алюминиевый

Промышленность выпускает алюминиевую проволоку следующих марок: АТП – твердая повышенной прочности, АТ - твердая, АПТ - полутвердая, АМ - мягкая.

Основные свойства алюминиевой проволоки приведены ниже в таблице 3.

Таблица 3

#### Основные свойства алюминиевой проволоки

| Марка алюминия                                 | АТ                 | АМ              |
|--|--------------------|-----------------|
| Плотность D, кг/м <sup>3</sup>                 | 2600... 2700       | 2600... 2700    |
| Удельное электрическое сопротивление ρ, мкОм-м | не более 0,0295    | не более 0,0290 |
| Предел прочности при растяжении а, МПа         | не менее 160...170 | не менее 80     |
| Относительное удлинение при разрыве, %         | 1,5... 2,0         | 10... 18        |

Из-за низкой механической прочности правильная эксплуатация алюминиевых проводов сопряжена с выполнением следующих условий: их нельзя протаскивать по твердому грунту, скручивать медной проволокой, загрязнять поверхность.

Алюминиевые сплавы. Сплав алюминия с цирконием нашел широкое применение за рубежом в качестве жилы в кабельных изделиях (см. рис.7). В Японии, например, для воздушных линий электропередач применяют голый многопроволочный кабель, в котором центральный пучок стальных жил обмотан жилами из жаропрочного алюминиевого сплава марки ТАСR. Преимущества проволок из алюминиевых сплавов наиболее полно проявляются в сборительных шинах на электрических подстанциях, так как здесь увеличение потерь на нагрев и величина провисания не имеют большого значения. В электротехнических изделиях часто используются алюминиевые сплавы, обладающие повышенным удельным электрическим сопротивлением

Сплав альдрей, в котором 0,3...0,5% меди Си; 0,4...0,7% кремния Si; 0,2...0,3% железа Fe, остальное алюминий А1 обладает следующими свойствами:

- повышенной механической прочностью (в 2 раза прочнее алюминия, приближаясь к твердотянутой меди  $\sigma = 350$  МПа);
- сплав сохраняет легкость чистого алюминия и близок к нему по удельному электрическому сопротивлению ( $\rho = 0,0317$  мкОм-м);
- более высоким пределом вибрационной прочности по сравнению с чистым алюминием.



Рис.7. Алюминиевая продукция

Он применяется для изготовления проводов малонагруженных линий электропередачи.

Сплав магналий (сплав алюминия с магнием) отличается низкой плотностью. Применяется для изготовления стрелок различных электрорадиотехнических приборов.

Сплав силумин относится к группе литейных сплавов с повышенным содержанием кремния, меди и марганца. Он обладает хорошей жидкотекучестью, малой усадкой, большой плотностью и повышенной прочностью по сравнению с алюминием и широко применяется для корпусов воздушных конденсаторов.

Для токонесущих проводов воздушных линий электропередачи с большими расстояниями между опорами используют более прочные, чем чистый алюминий, алюминиевые сплавы системы Al - Mg - Si.

**Железо** – значительно уступает меди и алюминию по проводимости, но имеет большую прочность, что в некоторых случаях оправдывает его применение как проводникового материала.

Используют низкоуглеродистые качественные стали ( $C < 0,15\%$ ), а также стали обыкновенного качества. Эти стали идут на изготовление шин, трамвайных рельсов, рельсов метро и железнодорожных дорог с электрической тягой. Сечение провода определяется не электрической проводимостью, а механической прочностью материала.

**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 частоты вследствие скин-эффекта (англ. skin – кожа) распространяются по наружному слою провода. Сердцевина из стали воспринимает силовую нагрузку. Наружный медный слой предохраняет железо от атмосферной коррозии. Биметаллический провод используют в линиях связи и электропередачи. Изготавливают шины для распределительных устройств, различные токопроводящие части электрических аппаратов.

### **ПРИПОИ**

Сплавы, используемые при пайке металлов высокой проводимости, - припои должны обеспечивать небольшое переходное электросопротивление (сопротивление контакта).

Различают припои 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 припои на основе олова, свинца, цинка, серебра, имеющих хорошую электрическую проводимость. Сплавы этих металлов образуют эвтектические смеси, электросопротивление которых мало отличается от металлов, образующих сплав.

В приборостроении для низкотемпературной пайки применяют оловянно-свинцовые и оловянно-цинковые (ГОСТ 21931-76) припои.

В качестве высокотемпературных припоев используют медь, медноцинковые и медно-фосфористые припои, а также припои, содержащие серебро.

**Сверхпроводимость** — свойство некоторых материалов обладать *строго нулевым* электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения (критическая температура). Сверхпроводники представляют особую группу материалов высокой электрической проводимости. С понижением температуры электрическое сопротивление ( $\rho$ ) всех металлов монотонно падает. Есть металлы и сплавы, у которых электрическое сопротивление при критической температуре резко падает до нуля – *материал становится сверхпроводником*.

Известны несколько сотен соединений, чистых элементов, сплавов и керамик, переходящих в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводимость — квантовое явление.

В 1911 году обнаружили, что при 3 Кельвинах (около  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) электрическое сопротивление ртути практически равно нулю. Исчезновение электрического сопротивления и появление бесконечной удельной проводимости у материала, было названо сверхпроводимостью. Материалы, обладающие способностью переходить в сверхпроводимое состояние при их охлаждении до достаточно низкой температуры, называются сверхпроводниками. Керамика, состоящая из атомов кислорода, меди, бария и лантана и в обычных условиях вообще не проводящая электрический ток, обрела сверхпроводимость при температуре 30 градусов Кельвина. Абсолютный рекорд – 138 градусов Кельвина – принадлежит сегодня соединению, состоящему из атомов кислорода, ртути, таллия, бария, кальция и меди.

Из всех элементов, способных переходить в сверхпроводящее состояние, ниобий (Nb) имеет самую высокую критическую температуру перехода (**9,17°K** или **-263,83°С**).

Практическое использование нашли сверхпроводящие сплавы с высоким содержанием ниобия: **65БТ, 35БТ (ГОСТ 10994-74)**. Цифры показывают содержание **Nb**, остальное **Ti, Zr**.

Наиболее интересные возможные промышленные применения сверхпроводимости связаны с генерированием, передачей и использованием электроэнергии. Часто сверхпроводниковые провода покрывают стабилизирующей оболочкой из меди или другого металла, хорошо проводящего электрический ток и тепло, что дает возможность избежать повреждения основного материала сверхпроводника при случайном повышении температуры.

Сверхпроводники используют при создании: электрических машин и трансформаторов малых массы и размеров с высоким коэффициентом полезного действия; кабельных линий для передачи энергии большой мощности на большие расстояния; накопителей энергии и устройств памяти. На основе плёночных сверхпроводников создан ряд запоминающих устройств и элементов автоматики и вычислительной техники.

Сверхпроводники применяют для обмоток мощных генераторов, магнитов большой мощности (например, поезда на магнитной подушке), туннельных диодов (для ЭВМ).

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.

### **Криопроводники**

Некоторые металлы могут достигать при низких (криогенных) температурах весьма малого значения удельного электрического сопротивления  $\rho$ , которое в сотни и тысячи раз меньше, чем удельное электрическое сопротивление при нормальной температуре. Материалы, обладающие такими свойствами, называют криопроводниками. В качестве криопроводников используют медь, алюминий, серебро, золото.

Например, бериллий при температуре сжижения азота (77,4 К) обладает в 3,5 раза более высокой удельной проводимостью, чем у меди, в 5 раз – более чем у алюминия, и в 18 раз – более чем у натрия.

Если в сверхпроводниковых устройствах в качестве охлаждающего вещества применяют жидкий гелий, то работа криопроводников обеспечивается благодаря более дешевым хладагентам - жидкому водороду или даже жидкому азоту. Это упрощает и удешевляет производство и эксплуатацию устройства.

## **7. КОНТАКТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Электрические контакты подразделяют на разрывные, скользящие и неподвижные. Основное требование для всех контактов — малое переходное электросопротивление.

Разрывные контакты предназначены для периодического замыкания и размыкания цепи и работают в наиболее трудных условиях.

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

Слабонагруженные контакты изготавливают из благородных металлов: золота, серебра, платины, палладия и их сплавов, которые обладают низким переходным электросопротивлением и повышенной стойкостью против окисления. Высоким сопротивлением электроэрозионному изнашиванию эти металлы и сплавы не обладают, поэтому их можно использовать 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 электросопротивление, так как он достаточно электропроводен, а оксидная пленка вольфрама при работе контакта разрушается. Кроме того, такие контакты не свариваются при эксплуатации, поэтому их применяют при частых переключениях. В наиболее мощных контактах используют спеченные композиции вольфрама с серебром или медью, либо спекают пористый вольфрам, который затем в вакууме пропитывают жидкой медью или серебром.

Скользящие контакты. К материалам для скользящих контактов предъявляют те же требования, что и для разрывных, но основное требование к ним - высокое сопротивление свариванию. Кроме окисленного серебряно-медного сплава для скользящих контактов применяют композиции из порошков меди или серебра с небольшой добавкой графита.

Неподвижные контакты. Эти контакты должны иметь низкое значение переходного электросопротивления, которое, кроме того, должно быть стабильным при небольших контактных усилиях. Поэтому для зажимных контактов выбирают коррозионно-стойкий материал, не образующий оксидных пленок с высоким электросопротивлением на контактной поверхности. Всем этим требованиям удовлетворяют медь, латунь, цинк.

## 8. СПЛАВЫ С ПОВЫШЕННЫМ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЕМ

Эти сплавы используют для прецизионных элементов сопротивления (обмоток потенциометров, шунтов, катушек сопротивления, резисторов, терморпар, тензометрических датчиков) и нагревательных элементов электрических приборов и печей.

В большинстве случаев сплавы используют в виде лент или проволоки, а поэтому они должны обладать хорошей пластичностью. Все сплавы с повышенным электросопротивлением в зависимости от рабочей температуры делят на три группы.

1. Сплавы, рабочая температура которых не выше 500°C, используют для изготовления прецизионных элементов сопротивления. К ним относятся медные сплавы, легированные никелем и марганцем.

При легировании никелем медный сплав МНМц 40-1,5 (константан) применяют в основном только для изготовления терморпар. Константан представляет собой твердый раствор никеля и меди, получивший свое название за высокое постоянство коэффициента удельного электрического сопротивления  $\rho$  (константа). Ориентировочный состав константана: медь Си - 58,5%, никель Ni - 40%, марганец Мп - 1,5%.

При замене никеля в медном сплаве марганцем (манганин) широко применяют для прецизионных элементов сопротивления: резисторов, термодатчиков, шунтов и т.п. Манганин - сравнительно пластичный сплав, получивший свое название из-за содержания в нем марганца. Его примерный состав: медь Си - 85%, марганец Мп - 12%, никель Ni - 3%.

Общим недостатком медных сплавов является их склонность к окислению при нагреве, что изменяет переходное электросопротивление. Поэтому часто используют сплавы на основе серебра, палладия, золота, платины.

2. Сплавы, рабочая температура которых менее 1200°C, используют также для элементов сопротивления и нагревательных элементов. Это сплавы на основе железа и никеля (хромаль, нихром). Легирование хромом обеспечивает им высокое электросопротивление и жаростойкость. Сплавы на основе железа используют для реостатов и нагревательных элементов в мощных электронагревательных установках и промышленных печах. Нихромы представляют собой твердые растворы никель - хром (Ni - Cr) или тройные сплавы никель - хром - железо (Ni - Cr - Fe).

Железо вводится в сплав для обеспечения лучшей обрабатываемости и снижения стоимости, но в отличие от никеля и хрома железо легко окисляется, что приводит к снижению жаростойкости сплава; содержание хрома придает высокую тугоплавкость оксидам. Для увеличения срока службы трубчатых нагревательных элементов нихромовую проволоку помещают в трубки из стойкого к окислению металла и заполняют их диэлектрическим порошком с высокой теплопроводностью (магnezий Mg). Такие нагревательные элементы применяют, например, в электрических кипятильниках, которые могут работать длительное время. Нихромовая проволока применяется для изготовления проволочных резисторов, потенциометров, паяльников, электропечей и пленочных резисторов интегральных микросхем. Как и константаны, нихромы содержат большое количество дорогого дефицитного никеля.

Хромоалюминиевые сплавы *фехрал* и *хромаль* намного дешевле нихромов, так как хром и алюминий сравнительно дешевле и менее дефицитны. Однако они менее технологичны, более твердые и хрупкие. Из них получают проволоку большого диаметра и ленты с большим поперечным сечением, поэтому их используют в электронагревательных устройствах большой мощности и промышленных электрических печах.

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

стержни, которые спекают из карбида кремния. Силит является полупроводниковым материалом и имеет высокое электросопротивление. Распространены также нагреватели из дисилицида молибдена ( $\text{MoSi}_2$ ).

## 9. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СПЛАВЫ РАЗЛИЧНОГО ПРИМЕНЕНИЯ. БЛАГОРОДНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Группу благородных металлов (серебро Ag, золото Au, платина Pt, палладий Pd) составляют металлы, обладающие наибольшей химической стойкостью к условиям окружающей среды.

**Серебро** - белый блестящий металл, его используют в производстве конденсаторов в чистом виде и сплавах, в виде покрытий в ответственных **ВЧ** и **СВЧ** устройствах. Оно входит в состав тугоплавких ответственных припоев.

**Платина** - светло-серый металл, используется как материал для сеток в мощных генераторных лампах, для особо тонких нитей (диаметр примерно 1 мкм).

**Палладий** - белый пластичный металл, по многим свойствам близкий к платине, в ряде случаев служит его заменителем. Палладий и его сплавы с серебром и медью применяют в качестве контактных материалов. Его применяют для очистки водорода, благодаря высокой проницаемости для этого газа.

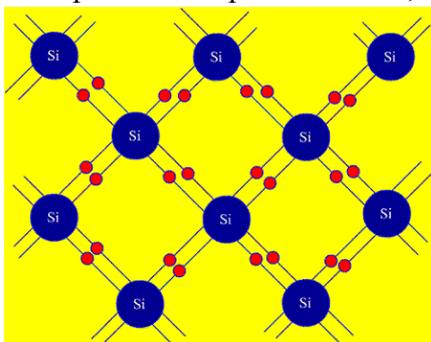
**Золото** - металл желтоватого цвета. Золото в чистом виде и в виде сплавов с платиной, серебром, никелем, цирконием применяют для вакуумного напыления тонких пленок полупроводниковых и гибридно-пленочных интегральных микросхем, золочения контактных поверхностей электронных ламп СВЧ, корпусов микросхем.

## 10. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводник – вещество, основным свойством которого является сильная зависимость его электропроводности от внешних факторов.

К полупроводниковым относятся материалы, обладающие удельным электрическим сопротивлением в пределах  $10^{-5} - 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . К таким материалам относятся 12 элементов (*бор, алмаз, кремний, германий, олово, фосфор, мышьяк, сурьма, сера, селен, теллур, иод*), представляющие простые полупроводники, а также многие химические соединения (*карбид кремния –  $\text{SiC}$ , антимониды –  $\text{ZnSb}$  (цинк-сурьма), арсениды –  $\text{GaS}$ , сульфиды –  $\text{ZnS}$ ,  $\text{CdS}$ , оксиды –  $\text{ZnO}$ ,  $\text{FeO}$* ). Категория химических элементов, занимающих промежуточное положение между металлами и изоляторами, называется полупроводниками.

В кристаллических решетках этих веществ, все валентные электроны, на первый взгляд, связаны химическими связями, и свободных электронов для обеспечения электрической проводимости, казалось бы, оставаться не должно (см. рис. 8). Однако на



деле ситуация выглядит несколько иначе, поскольку часть электронов оказывается выбитой со своих внешних орбит в результате теплового движения по причине недостаточной энергии их связи с атомами. В результате при температуре выше абсолютного нуля они все-таки обладают определенной электропроводностью под воздействием внешнего напряжения. Коэффициент проводимости у них достаточно низкий, но какой-то ток, пусть и незначительный, они все-таки проводят.

Рис. 8. Распределение электронов в решетке кремния

Как выяснилось в результате исследований, электрическая проводимость в полупроводниках, обусловлена не только движением свободных электронов (так называемой *n-проводимостью* за счет направленного движения отрицательно заряженных частиц).

Имеется второй механизм электропроводности. При высвобождении электрона из кристаллической решетки полупроводника за счет теплового движения на его месте образуется так называемая *дырка* — положительно заряженная ячейка кристаллической структуры, которая может в любой момент оказаться занятой отрицательно заряженным электроном, перескочившим в нее с внешней орбиты соседнего атома. В итоге в полупроводниках и наблюдается второй тип проводимости (так называемая *дырочная* или *p-проводимость*), обусловленная движением отрицательно заряженных электронов, но, с точки зрения макроскопических свойств вещества, является направленным током положительно заряженных дырок к отрицательному полюсу.

Явление дырочной проводимости проще всего проиллюстрировать на примере дорожной пробки. По мере продвижения вперед машины, застрявшей в ней, на ее месте образуется свободное пространство, которое тут же занимает следующая машина, место которой сразу же занимает третья машина и т. д.

Именно руководствуясь подобной аналогией, физики и говорят о дырочной проводимости, условно принимая за данность, что электрический ток проводится не благодаря движению многочисленных, но редко трогающихся с места отрицательно заряженных электронов, а благодаря движению в противоположном направлении положительно заряженных пустот на внешних орбитах атомов полупроводников, которые они условились называть «дырками». Таким образом, дуализм электронно-дырочной проводимости носит чисто условный характер.

Полупроводники нашли широкое практическое применение в современной радиоэлектронике и компьютерных технологиях именно благодаря тому, что их проводящие свойства легко и точно контролируются посредством изменения внешних условий.

Проводниковые материалы очень чувствительны к повышению температуры и это свойство используется для создания термосопротивлений, которые можно применять изменения температур или стабилизации температуры в различных установках. Такие полупроводники используются для термоэлементов или термогенераторов, превращающих тепловую энергию в электрическую.

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*. Если такие проводники подключить к внешнему источнику напряжения, то в темноте они будут иметь меньшую проводимость, а на свету или при специальном освещении — значительно большую. Это свойство используется в фотосопротивлениях (фоторезисторах), чувствительных не только к видимому участку спектра, но и к инфракрасным излучениям.

## 11. ОСНОВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Свойства, характерные только для полупроводниковых материалов:

- отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления;
- при введении в полупроводник даже малого количества примесей его удельное сопротивление резко меняется;
- полупроводники чувствительны к внешним воздействиям (свету, ядерному излучению, давлению, электромагнитным полям).

Полупроводниковыми свойствами обладает целый ряд материалов – природных и синтетических, органических и неорганических, простых и сложных по химическому составу.

К простым полупроводникам относятся: германий, кремний, селен, теллур, бор, фосфор, углерод, сера, сурьма, мышьяк, олово, йод.

Германий. Германий – один из наиболее тщательно изученных полупроводников. Существование и основные свойства германия предсказал Д.И.Менделеев еще в 1870 году. Чистый германий обладает металлическим блеском, характеризуется высокой твердостью и хрупкостью. Он кристаллизуется в структуре алмаза, плавится при температуре 936°C. На его электрические свойства сильное влияние оказывает термообработка.

Германий применяется для изготовления диодов различных типов, транзисторов, датчиков ЭДС Холла, тензодатчиков. Оптические свойства германия позволяют его использовать для изготовления фотодиодов и фототранзисторов, модуляторов света, оптических фильтров, счетчиков ядерных частиц. Рабочий диапазон температур германиевых приборов от -60 до +70°C. Германий является высокочастотным материалом и используется в ВЧ и СВЧ транзисторах.

Кремний. Кремний является одним из самых распространенных элементов в земной коре (26%) и основным материалом современного производства полупроводниковых приборов и микросхем. Кристаллический кремний имеет решетку типа алмаза. Основными материалами для получения чистого кремния являются галогениды  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{SiHCl}_3$ ,  $\text{SiI}_4$  и силан  $\text{SiH}_4$ .

Кремний используют для изготовления мощных диодов, транзисторов, тиристорных, интегральных схем, солнечных батарей, тензопреобразователей и т.д.

На основе полупроводниковых материалов изготавливаются различные приборы, работа которых основана на использовании их основного свойства – зависимости электропроводности:

- от температуры – термисторы,
- от электрического поля – варисторы,
- от электромагнитного излучения – фоторезисторы,
- от механических нагрузок – тензорезисторы.

Возможность создания в одном полупроводниковом материале двух областей с разной электропроводностью позволяет получать р-п переход, обладающий выпрямляющим. Система переходов позволяет изготавливать транзисторы и на их основе усилители и генераторы, а также интегральные схемы различного назначения. Возникающее рекомбинационное свечение р-п переходов при низких напряжениях применяется в полупроводниковых лазерах и индикаторах излучения, в том числе и радиоактивного.

Благодаря использованию полупроводниковых материалов приборы на их основе имеют:

- большой срок службы,
- малые габариты и вес,
- простую и надежную конструкцию,
- высокую механическую прочность,
- малую потребляемую мощность,
- малую инерционность.

## 12. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Диэлектрические материалы являются основными видами электротехнических материалов, с которыми придется встретиться на практике будущим электромеханикам. Эти материалы служат в качестве изоляции токоведущих частей энергетического

оборудования. Они включают в себя такие разнообразные типы электрической изоляции как: воздух в линиях электропередач и электроаппаратах; нефтяные и искусственные масла в трансформаторах, кабелях и конденсаторах; твердые диэлектрики в изоляторах воздушных линий (ВЛ), конденсаторах, установочных изделиях и корпусах аппаратов и т.п. При этом физические условия, в которых должна находиться и функционировать изоляция, накладывают определенные требования на физико-химические параметры материала, ограничивая возможные вид и тип используемых электротехнических материалов. При рассмотрении даже простейших изделий, предназначенных для работы в электрическом поле, необходимо четко представлять, какие процессы происходят в материале, как влияет тот или иной материал на работу других частей устройства, в том числе за счет перераспределения электрического поля.

Диэлектрики – это вещества, основным электрическим свойством которых является способность поляризоваться в электрическом поле и иметь большое сопротивление прохождению электрического тока.

Поляризация – это процесс упорядочения связанных электрических зарядов внутри диэлектрика под действием приложенного напряжения.

Материалы, у которых интенсивно развивается процесс спонтанной поляризации называются сегнетоэлектрики.

Каждый материал обладает диэлектрической прочностью – это основная характеристика электроизоляционных материалов. Диэлектрики всегда подвергаются воздействию высокого напряжения и могут быть разрушены силами электрического поля. Это явление называется пробоем диэлектрика.

Величина напряженности электрического поля, при которой произошел пробой диэлектрика, называется его электрической прочностью. Диэлектрики, используемые в качестве изоляционного материала, могут быть пассивными и активными.

### 13. СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Для оценки свойств электротехнических материалов необходимо учитывать основные характеристики, к которым относятся электрические, механические, термические и физико-химические.

Из всего многообразия свойств главными являются электрические. К ним относятся: электропроводность, поляризация, диэлектрические потери, электропрочность и электрическое старение.

Электропроводность характеризуется удельной проводимостью и удельным сопротивлением. Она носит ионный характер, т.е. носителями зарядов являются ионы.

Диэлектрические потери. При взаимодействии электрического поля на любое вещество часть потребляемой им электрической энергии превращается в тепловую и рассеивается. Рассеянную часть поглощенной диэлектриком электрической энергии называют диэлектрическими потерями.

Поляризация диэлектриков - это, процесс, состоящий в ограниченном смещении или ориентации связанных зарядов в диэлектрике при воздействии на него электрического поля. Степень поляризованности диэлектрика оценивается относительной диэлектрической проницаемостью.

Электрическая прочность – это равная напряжению величина, при которой может быть пробит электроизоляционный материал толщиной в единицу длины. Определяют электрическую прочность проверенным путем. В лаборатории измеряется напряжение, которое пробивает установленной толщины образец электроизоляционного материала. Далее электрическую прочность вычисляют по нижеуказанной формуле:

$$E_{\text{ПР}} = \frac{U}{h}, \text{ где:}$$

$E_{\text{ПР}}$  - электрическая прочность, кВ/мм;

$U$  - напряжение, кВ;

$h$  - толщина образца электроизоляционного материала, мм.

Электрическое старение. В сильном электрическом поле в связи с электропереносом зарядов в диэлектрике происходят необратимые изменения свойств – электрическое старение и пробой, сопровождающийся разрушением твердых диэлектриков. Пробой наступает при достижении некоторого порогового значения напряженности поля, выше которого электрическая прочность нарушается. При пробое ток через диэлектрик катастрофически возрастает и сквозь диэлектрик проходит мощный электрический разряд (искра или дуга). Различные физические и физико-химические механизмы приводят к развитию в диэлектриках необратимых процессов – старения, пробоя и механического разрушения.

Механические свойства. Это способность диэлектрика выдерживать внешние статические и динамические нагрузки без недопустимых изменений первоначальных размеров и формы. При выборе диэлектрического материала в каждом конкретном случае следует учитывать не только электрические свойства, но и механические свойства.

К основным механическим свойствам относят упругость, прочность, сопротивление раскалыванию, стойкость к надрыву.

Повышение механического напряжения приводит к разрушению образца при напряжении  $\sigma_{\text{пр}}$ , которое называется пределом прочности.

Прочность материалов характеризуют пределами прочности при растяжении  $\sigma_r$ , сжатии  $\sigma_{\text{сж}}$  и изгибе  $\sigma_{\text{и}}$ . Материалы, в которых пластическая деформация не наблюдается и образец разрушается (например, стекло, керамика), называются хрупкими. Хрупкие материалы легко разрушаются под действием вибраций и динамических нагрузок. Материалы, в которых участок пластической деформации очень широк, называются пластичными. Для бумаги и картона – прочность на разрыв; для пластмассы – сопротивление раскалыванию; для бумаги, пленки и лакоткани – стойкость к надрыву. Для многих электроизоляционных материалов важным параметром является гибкость, которая обеспечивает сохранение высоких механических и электрических параметров изоляции при самых разнообразных механических деформациях.

Термические свойства. Поведение диэлектрика при нагревании характеризуется рядом свойств, которые в совокупности определяют его допустимую рабочую температуру. К важным термическим свойствам относятся теплопроводность, теплоемкость, плавление, тепловое расширение, нагревостойкость, стойкость к термоударам.

Теплопроводность – процесс отвода теплоты от нагретых проводников и магнитопроводов через слой электрической изоляции.

Теплоемкость – это то количество теплоты, которое необходимо для нагрева тела.

Твердые кристаллические диэлектрики при нагреве плавятся, и для них характерным параметром является температура плавления и температура размягчения.

Диэлектрик, как и другие материалы, при нагревании расширяется. Термические расширение оценивают температурным коэффициентом длины и температурным коэффициентом объема.

Нагревостойкость электрической изоляции определяется по изменениям ее электрической прочности, тангенсу угла диэлектрических потерь, потере массы, механической прочности по сравнению с рабочей температурой. Оценкой нагревостойкости материала может служить температура размягчения. Критерием выхода из строя изоляции может служить уменьшение ее электрической прочности в 2 раза по сравнению со значением до испытаний. Материалы, используемые в изоляции электрических машин, трансформаторов и аппаратов по нагревостойкости разделяют на 7 классов.

Холодостойкость электроизоляции определяется путем сравнения механических характеристик при отрицательной и нормальной температурах.

Стойкость к термоударам определяется для хрупких материалов. Это изоляторы из электротехнического фарфора. При определении стойкости к термоударам нагретые изоляторы погружают в ледяную воду, где выдерживают определенное время.

Физико-химические свойства. К ним относятся: химостойкость, влагостойкость, водопоглощение, тропикостойкость.

При определении химостойкости образцы длительное время выдерживают в условиях наиболее близких к эксплуатационным, после чего определяют изменение их внешнего вида, массы, электрических и других параметров (воздействие масла, топлива, щелочи).

Влагостойкость диэлектрика определяется его способностью сорбировать влагу из окружающей среды (влажного воздуха). В процессе выдержки во влажной атмосфере контролируют изменение параметров материала.

Водостойкость и водопоглощение определяются по изменению параметров диэлектрика в процессе его выдержки в дистиллированной воде.

Тропикостойкость диэлектрика определяется по изменению удельного объема сопротивления, механической и электрической прочности под воздействием тропических климатических факторов: холода, жары, влаги, солнечной радиации, атмосферы, загрязненной морской солью, пустынной или степной пылью, песком, пеплом, химическими соединениями, воздействием микроорганизмов и вредителей животного мира.

## 14. КЛАССИФИКАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Диэлектрические (изоляционные) материалы по агрегатному состоянию классифицируются на твердые, жидкие и газообразные. Области применения и количество типов материалов существенно различаются, поэтому мы рассмотрим самые распространенные.

Твердые диэлектрические материалы. Их в природе большинство и можно ограничиться делением на органические и неорганические. Среди органических диэлектриков наибольшее распространение получили полимерные материалы. Они подразделяются по размерам молекул на низкомолекулярные и высокомолекулярные. Последние в свою очередь делятся по форме молекул на термопластичные и терморезистивные, а по электрофизическим свойствам на полярные и неполярные.

### 14.1. Твердые органические диэлектрики

Полимеры – это высокомолекулярные соединения, состоящие из большого числа повторяющихся звеньев, образованных исходными мономерами. Почти все твердые органические диэлектрики являются высокополимерными материалами. Название полимеры происходит от двух греческих слов: «поли» - много и «мерос» - часть. Действительно, молекулы полимеров состоят из большого количества частиц – десятков и сотен тысяч молекул исходных веществ – мономеров. Название «мономер» происходит от греческого слова «моно», что означает один.

Большие молекулы полимеров могут иметь форму вытянутых в длину нитей, т.е. иметь линейное строение, поэтому и называются линейными полимерами. Например: натуральный и синтетический каучуки, полиэтилен, полистирол и др.

Молекулы полимеров могут быть развиты по всем трем направлениям в пространстве, т.е. иметь пространственное (объемное) строение. Они называются пространственные полимеры. Например: синтетические смолы – бакелит, глифтал и др. Высокополимерные вещества могут быть природными (янтарь, натуральный каучук и др.) и синтетическими (полистирол, поливинилхлорид и др.). Большая часть полимеров

является аморфными веществами, и их поэтому называют смолами, некоторые из полимеров (фторопласт-4) имеют кристаллическое строение и не являются смолами.

Ввиду ограниченности свойств природных полимеров современная электротехника использует главным образом синтетические высокополимерные диэлектрики. Они могут быть получены в результате химических реакций полимеризации или поликонденсации.

Полимеризация – это процесс соединения молекул исходного (мономерного) вещества в большие молекулы высокополимерного вещества без изменения его элементарного состава.

Поликонденсация – это процесс соединения молекул исходных (мономерных) веществ в большие молекулы высокополимерного вещества с выделением побочных веществ: воды, кислот, газов и др. Поликонденсация протекает в несколько этапов.

Термореактивными называют такие материалы, которые в своей конечной стадии производства (в готовом виде) не способны размягчаться при нагревании. К ним относятся: бакелитовые смолы и пластмассы на их основе (гетинакс, текстолит), глифталит и др.

Термопластичными называют такие материалы, которые не могут быть переведены в неплавкое состояние. Они при нагревании размягчаются и постепенно превращаются в густые жидкости. Этим свойством термопластичных материалов пользуются при изготовлении из них гибких изделий: пленок, нитей, а также для производства деталей методом литья под давлением. К таким диэлектрикам относятся полистирол, полиэтилен, поливинилхлорид и др.

Полистирол – твердый прозрачный материал. Он обладает высокими электроизоляционными свойствами и стоек к воде, кислотам и щелочам. Его изготавливают в виде листов, гранул, порошка.

Полистирол – термопластичный диэлектрик, размягчающийся при 110-120°. При 300°C полистирол деполимеризуется, т.е. снова переходит с исходное вещество – стирол. Допустимая рабочая температура 70°C.

Полистирол растворяется в неполярных растворителях: бензоле, толуоле, ксилоле, частично растворяется в ацетоне.

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

Из размягченного полистирола получают гибкие стирольные пленки толщиной 10-300 мм, которые применяют для изоляции жил высокочастотных кабелей, а также в производстве конденсаторов.

Полиэтилены – твердые непрозрачные материалы белого или светло-серого цвета, несколько жирные на ощупь. Электроизоляционные свойства и стойкость к воде у полиэтиленов находятся на таком же высоком уровне, как и у полистиролов. При комнатной температуре полиэтилены не растворяются ни в одном из растворителей. Следует отметить, что все полиэтиленовые изделия нестойки к солнечному свету. Для повышения светостойкости в них вводят сажу и другие красители.

Поливинилхлорид (полихлорвинил) – представляет собой порошок белого цвета, из которого получают горячим прессованием или горячим выдавливанием механически прочные изделия (платы, листы, стержни, трубы и др.), стойкие к минеральным маслам, многим растворителям, щелочам и кислотам. Виниловые изделия легко окрашиваются в различные цвета, отличаются химической стойкостью, обладают высокой механической прочностью, особенно к ударным нагрузкам и имеют хорошие электроизоляционные свойства.

Данный материал поддается всем видам механической обработки, легко сваривается и склеивается.

Полиформальдегид – твердый термопластичный диэлектрик, представляет собой порошок белого цвета, из которого получают изделия с повышенными механическими

характеристиками: высокая твердость, стойкость к истиранию и малый коэффициент трения.

Органическое стекло – высокополимерный, термопластичный прозрачный материал, легко окрашиваемый во многие цвета.

Капрон (поликапроамид) – твердый синтетический материал белого или желтого цвета, получаемый в результате полимеризации.

Капроновое волокно применяется в качестве изоляции обмоточных и некоторых типов монтажных проводов, а также в качестве основы электроизоляционных лакированных тканей. Из капрона изготавливают дюбеля, скобки, сальники, вкладыши подшипников, шестерни, ролики транспортеров, крыльчатки вентиляторов и др.

Глифталевые смолы относятся к группе полиэфирных смол (гликоль, глицерин).

Для обеспечения достаточной гибкости к смоле добавляют касторовое масло. Отличительной способностью является высокая клеящая способность, стойкость к поверхностным разрядам и повышенная нагревостойкость. Клеящие глифталевые лаки нашли большое применение для клейки слюды в производстве твердой и гибкой слюдяной изоляции (миканиты, микаленты).

Природные электроизоляционные смолы

Из природных смол, наибольшее применение в электротехнике получили канифоль, шеллак и битумы.

Канифоль представляет собой хрупкое стеклообразное вещество в виде кусков неправильной формы. Канифоль получают из сока хвойных деревьев. В состав канифоли входят смоляные кислоты: абиетиновая, колофеновая, эфирные масла и др. Канифоль относится к термопластичным материалам, размягчающимся при нагревании, и хорошо растворяется во многих растворителях: скипидаре, бензине, этиловом спирте, ацетоне, минеральном масле и др. В электротехнике канифоль применяется в качестве загустителя минеральных масел, идущих для пропитки бумажной изоляции кабелей, а также в качестве составной части масляно-канифольных заливочных электроизоляционных материалов. Канифоль находит большое применение в качестве флюса при пайке медных проводов.

Одной из важнейших задач электро материаловедения является разработка электроизоляционных материалов 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, не изменяя их веса и габаритов. Большинство органических диэлектриков может работать при температурах, не превышающих 90-105°(классы нагревостойкости Y и A) и только некоторые из них, например лавсан – до 120°С и глифталевые смолы – до 130°С.

Высокой нагревостойкостью обладают электроизоляционные материалы неорганического происхождения, например электрокерамические материалы (фарфор, стеатит), но из них невозможно изготовить гибкие виды изоляции.

В результате многочисленных исследований были разработаны новые кремнийорганические высокополимерные диэлектрики. В основе молекул этих диэлектриков находится силоксановая группа атомов – Si – O – Si. Эти материалы отличаются высокой нагревостойкостью и морозостойкостью. Наша промышленность вырабатывает большое количество кремнийорганических лаков и эмалей, а также пластмасс и резин. По нагревостойкости они относятся к классу H, т.е. могут длительно работать при температуре до 180 °С.

Полиамиды – новые нагревостойкие органические диэлектрики, которые можно использовать при температурах до 200-220°С и низкие температуры до (-190°С) без разрушений. На основе полиимидов изготавливаются эмальлаки для эмалирования обмоточных проводов диаметром от 0,1 до 1,3мм.

Электроизоляционные лаки. Лаки представляют собой коллоидные растворы различных пленкообразующих веществ в специально подобранных органических

растворителях. Пленкообразующими называются вещества, которые в результате испарения растворителя и процессов отвердевания способны образовать твердую пленку. По своему назначению электроизоляционные лаки делятся на: пропиточные, покровные и клеящие.

Воскообразные диэлектрики. Характерными особенностями данных материалов являются их мягкость, незначительная механическая прочность и наличие жирной, плохо смачиваемой водой поверхности, вследствие чего водопоглощение этих материалов практически равно нулю. Из воскообразных диэлектриков в электротехнике находят применение парафины, церезины и галовакс.

Волокнистые электроизоляционные материалы. Волокнистые материалы состоят из волокон: природных, искусственных или синтетических. К природным относятся асбестовые, хлопковые, льняные, натуральный шелк и другие волокна растительного происхождения, например волокна различных деревьев (сосна, ель), идущие на изготовление бумаги. Асбестовые, хлопковые, льняные волокна извлекают механической обработкой асбеста, хлопка и льна. Древесные волокна получают путем химической обработки древесины. Из древесины хвойных пород (сосна, ель) путем ее химической переработки получают техническую целлюлозу или клетчатку, которая является сырьем для изготовления различных электроизоляционных бумаг и картонов. Электроизоляционные бумаги делятся на кабельные, телефонные (для кабелей связи), конденсаторные, пропиточные, намоточные и др.

Текстильные электроизоляционные материалы. Текстильные материалы (пряжа, ткани, ленты и др.) широко применяются в качестве электроизоляционных. Это натуральные волокна растительного и животного происхождения, а также различные синтетические и искусственные волокна. Применение в электротехнике имеют текстильные изделия из стеклянного волокна и асбеста, капроновые волокна, хлопчатобумажные и шелковые ткани.

Электроизоляционные пластмассы. Пластическими массами называются материалы, способные в исходном состоянии приобретать пластичность, т.е. легко воспринимать заданную форму какого-либо изделия и ее сохранять. Пластмассы в подавляющем большинстве являются материалами органического происхождения.

Из пластмассы изготавливают основания электроизмерительных приборов, платы, каркасы катушек, кнопки, корпуса выключателей и розеток и многое другое (см. рис. 9).

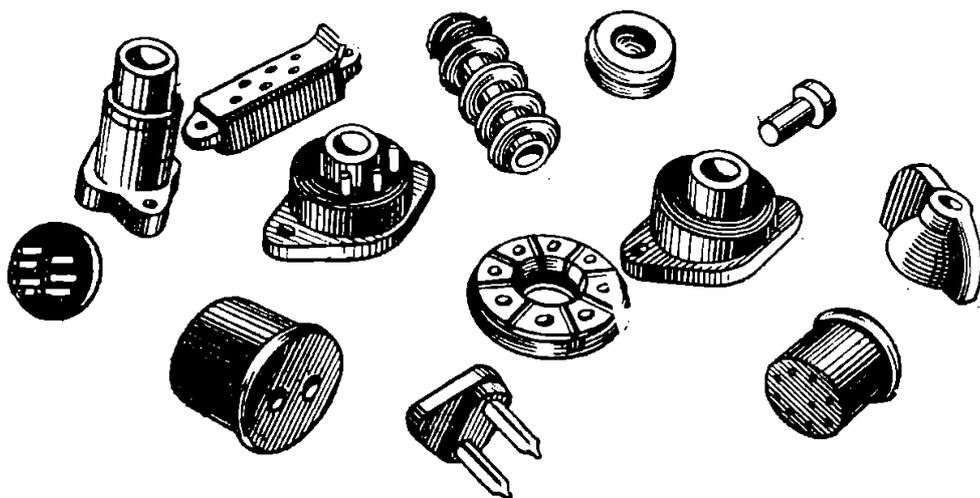


Рис. 9. Электротехнические изделия из пластмасс

Слоистые электроизоляционные пластмассы. Слоистые пластмассы – это материалы, в которых наполнителем служат листовые материалы: бумага или ткани, создающие слоистую структуру. Связующим веществом в них являются термореактивные

фенолоформальдегидные и другие смолы. Из слоистых пластмасс наиболее широкое применение получили гетинакс, текстолит и стеклотекстолит.

Гетинакс - листовой слоистый материал, в котором наполнителем являются листы пропиточной бумаги, собранные в пакеты и спрессованные. Используется для изготовления различного рода плоских электроизоляционных деталей и оснований.

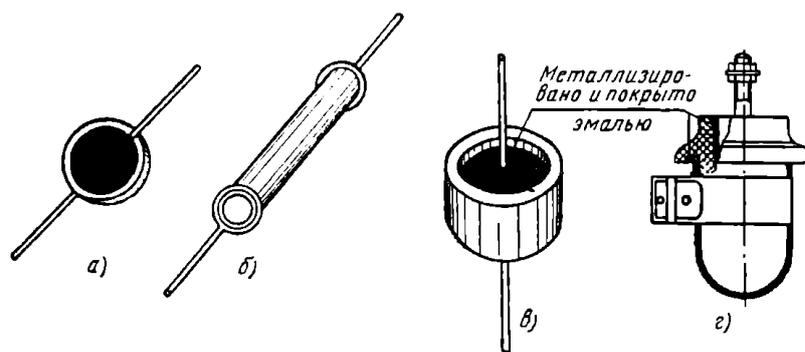
Текстолит отличается от гетинакса тем, что наполнителем в нем является хлопчатобумажная ткань. Он выпускается марок А, Б и Г – на основе бязи и на шифоне.

Электроизоляционные резины. Резины широко применяют в производстве электрических проводов и кабелей, где они выполняют роль электроизоляционных материалов или защитных покровов (шланговые резины). Назначение шланговых резин – защищать изоляцию кабеля от возможных механических и химических воздействий, а также от проникновения в нее влаги. Основным сырьем для изготовления всех резин являются натуральные и синтетические каучуки. Каучук обладает высокой пластичностью (растяжимостью) и принадлежит к группе материалов, называемых эластомерами. Пластичность каучука является свойством, необходимым для производства резин, так как способствует лучшей смешиваемости каучука с вулканизаторами, наполнителями, пластификаторами. На каучук действуют растворители: бензин, бензол, минеральные масла, в которых, он сначала набухает, затем постепенно растворяется. Из физико-химических характеристик наиболее важными являются: сопротивление старению, стойкость к действию различных жидкостей, теплостойкость, морозостойкость и водопоглощение. Эбонит – твердая резина, которая получается, если в натуральный или синтетический каучук ввести большое количество (30-50%) вулканизирующего вещества – серы. Эбонит имеет черную окраску и обладает хорошими механическими и электрическими характеристиками, а также хорошо поддается механической обработке.

## 14.2. Твердые неорганические диэлектрики

Слюда. Представляет собой природный минерал с характерным слоистым строением, позволяющим расщеплять кристаллы слюды на тонкие листочки толщиной до 0,005 мм. Склеивая листочки слюды клеящими смолами или лаками, получают твердую или гибкую слюдяную изоляцию для обмоток электрических машин. Природная слюда имеет сложный химический состав: кремний, калий, магний, алюминий, кислород и водород. Слюда залегает в земле в виде жил вместе с другими минералами, такими как кварц. При разработке природной слюды и изготовлении из нее электроизоляционных материалов образуется около 90% различных отходов. Среди них мелкий отход – скрап. Из очищенного скрапа изготавливают слюдяную бумагу, из которой получают твердые и гибкие электроизоляционные материалы – слюдиниты.

Электрокерамические материалы. Это твердые камнеподобные вещества, которые можно обработать только абразивами. Все электрокерамические материалы по их назначению можно разделить на три группы: изоляторная керамика, конденсаторная и сегнетоэлектрическая.



Применение:  
ролики,  
основания  
предохранителей,  
патронов,  
керамические  
конденсаторы  
различных  
конструкций  
(см. рис.10).

Рис.10. Керамические конденсаторы

Фарфоровые изоляторы. Главной областью применения электротехнического фарфора является производство штыревых, подвесных, опорных, опорно-штыревых, проходных высоковольтных изоляторов и вводов на напряжение до 500 000 В и выше (см. рис. 11, 12).

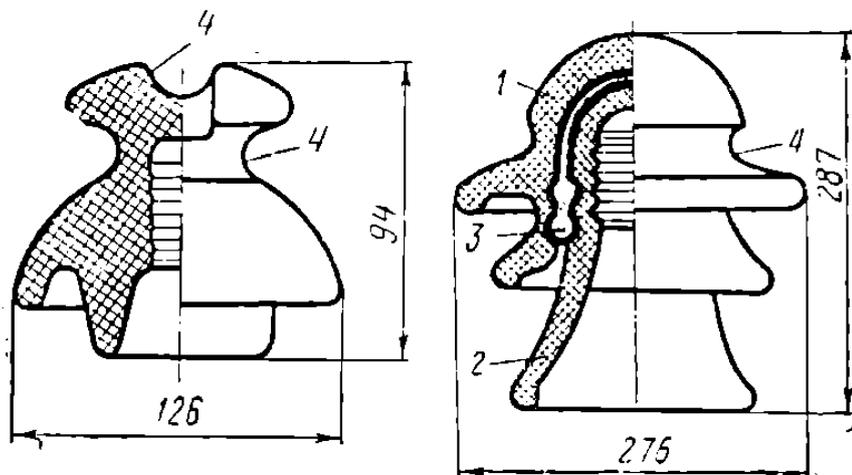


Рис. 11. Штыревые изоляторы

### 14.3. Жидкие диэлектрики

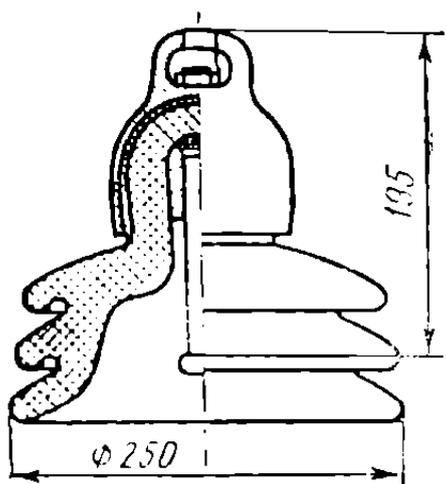


Рис. 12. Подвесной изолятор

Жидкие диэлектрики применяются в электроизоляционной технике в качестве пропитывающих и заливочных составов при производстве электро- и радиотехнической аппаратуры: в электрических аппаратах высокого напряжения, а также в блоках электронной аппаратуры. По применению они делятся на жидкости для конденсаторов, трансформаторов, кабелей, циркулярных систем охлаждения выпрямительных установок и турбогенераторов, масляных выключателей. Применение электроизоляционных жидкостей позволяет обеспечить надежную и длительную работу электрической изоляции, находящихся под напряжением элементов конструкции и отводить от них теплоту, выделяющуюся при работе (см. рис.12).

Жидкие диэлектрики – минеральные масла, синтетические жидкости, смолы, лаки. Применяются в масляных трансформаторах, выключателях, кабелях и конденсаторах. В трансформаторах масло служит для изоляции токоведущих частей и охлаждения путем конвекции (перенос тепла при циркуляции масла); в масляных выключателях – для гашения электрической дуги при разрыве цепи; в кабелях и конденсаторах – для пропитки бумажной изоляции. Основные классы жидких диэлектриков представлены в виде схемы на странице 30 .

Основными характеристиками диэлектрических жидкостей являются диэлектрическая проницаемость, электропроводность и электрическая прочность.



Наиболее распространенными жидкими диэлектриками, применяемыми в качестве электроизоляционных материалов, являются: нефтяные масла — трансформаторное, конденсаторное и кабельное; синтетические жидкие диэлектрики — полихлордифенил (совол, совтол), кремнийорганические и фторорганические; растительные технические масла (касторовое, льняное, конопляное и тунговое) в электроизоляционной технике применяются ограниченно.

Нефтяные масла получают фракционной перегонкой нефти. Выделенные фракции представляют собой сложную смесь углеводородов парафинового, нафтенового и ароматического рядов с небольшой примесью других компонентов, содержащих атомы серы, кислорода и азота.

Нефтяные масла — слабвязкие, практически неполярные жидкости. По химическому составу представляют смесь различных углеводородов парафинового, нафтенового, ароматического и нафтенно-ароматического рядов с небольшим (до 1% масс) содержанием присадок, улучшающих их стойкость к термоокислительному старению, а также температурно-вязкостные характеристики. Нефтяное трансформаторное масло получило наиболее широкое применение в высоковольтных аппаратах: трансформаторах, масляных выключателях, высоковольтных проводах.

Нефтяное конденсаторное масло получают из трансформаторного путем его более глубокой очистки адсорбентами. Его электрические свойства лучше, чем у трансформаторного масла. Используют для пропитки бумажных конденсаторов, в особенности силовых. При пропитке в результате заполнения пор бумаги маслом увеличиваются диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность бумаги, следовательно, возрастают емкость конденсатора и его рабочее напряжение. Нефтяное кабельное масло применяют для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей с рабочим напряжением до 35 кВ в свинцовой или алюминиевой оболочке, а также для заполнения металлических оболочек маслонаполненных кабелей на напряжение до 110кВ и выше. Недостатки нефтяных масел — пожаро- и взрывоопасность, невысокая стойкость к тепловому и электрическому старению, гигроскопичность.

Синтетические жидкие диэлектрики. Наибольшее применение получили синтетические жидкости на основе хлорированных углеводородов (совол, совтол), что связано с их высокой термической устойчивостью, электрической стабильностью, негорючестью.

Применяются для наполнения небольших трансформаторов, блоков электронного оборудования и других электрических аппаратов в тех случаях, когда рабочие температуры велики для других видов жидких диэлектриков. Некоторые перфторированные жидкие диэлектрики могут использоваться для создания испарительного охлаждения в силовых трансформаторах. Недостатки — токсичность некоторых видов фторорганических жидкостей, высокая стоимость. Жидкие диэлектрики

находят применение и для заливки герметичных кожухов, в которых располагаются блоки электронной аппаратуры. Однако, в связи с токсичностью хлорированных углеводородов их применение сначала ограничивалось, а в настоящее время запрещено, хотя в эксплуатации еще имеется их значительное количество.

Жидкие диэлектрики на основе кремнийорганических соединений (полиорганосилоксанов). Они являются нетоксичными и экологически безопасными. Эти жидкости представляют собой полимеры с низкой степенью полимеризации. Полиорганосилоксановые жидкости используют в импульсных трансформаторах, специальных конденсаторах, блоках радиоэлектронной аппаратуры и др.

Растительные масла. К растительным маслам относятся касторовое, тунговое, льняное, конопляное. Растительные масла — слабополярные диэлектрики. Касторовое масло имеет высокую нагревостойкость и используется как пластификатор и для пропитки бумажных конденсаторов. Тунговое, льняное и конопляное масла относятся к «высыхающим» маслам. Высыхание обусловлено не испарением жидкости, а химическим процессом, в основе которого лежит окислительная полимеризация. Используются в качестве пленкообразующих в лаках (в том числе электроизоляционных), эмалях и красках.

#### **14.4. Газообразные диэлектрики**

Газообразные диэлектрики делят на две группы: естественные и искусственные.

Основными газообразными диэлектриками, применяющимися в электротехнике, являются: воздух, азот, водород и элегаз (гексафторид серы) и др. По сравнению с жидкими и твердыми диэлектриками, газы обладают малыми значениями диэлектрической проницаемости и, высоким удельным сопротивлением и пониженной электрической прочностью.

Естественные газообразные диэлектрики.

Наибольшее применение из них в силу своей распространенности получил воздух, даже в тех случаях, когда его присутствие в изоляции нежелательно. Воздух представляет собой смесь, которая состоит из азота  $N_2$  (78,03%), кислорода  $O_2$  (20,93%), углекислого газа  $CO_2$  (0,03%), инертных газов (He, Xe, Ar, Ne, Kr) (0,1 %).

В воздушных линиях электропередачи, сухих трансформаторах, коммутационных аппаратах, распределительных устройствах и т.п. воздух является основной изоляцией. Во многих электрических объектах он играет роль дополнительной изоляции к твердым и жидким диэлектрикам. Азот применяется в качестве изоляции в конденсаторах, высоковольтных кабелях и силовых трансформаторах. Азот  $N_2$  - бесцветный газ, не имеющий запаха. Он бесцветен также в жидком и твердом состоянии. Обладает одинаковой с воздухом электрической проницаемостью, но менее активен, чем воздух, который содержит кислород.

В чистом виде азот применяется сравнительно редко (для высоковольтных конденсаторов постоянной емкости, для наполнения баллонов осветительных ламп). В микроэлектронике газообразный азот применяют в качестве защитной среды, а жидкий — для наполнения ловушек в вакуумных системах.

Водород имеет пониженную электрическую прочность по сравнению с азотом и применяется в основном для охлаждения электрических машин. Замена воздуха водородом приводит к значительному улучшению охлаждения, так как удельная теплопроводность водорода значительно выше, чем у воздуха. Кроме того, при применении водорода снижаются потери мощности на трение о газ и вентиляцию. Поэтому водородное охлаждение позволяет повысить как мощность, так и КПД электрической машины.

Водород  $H_2$  - бесцветный горючий газ, не имеющий запаха; самый легкий газ 1л водорода при нормальных условиях имеет массу 0,09 г). Электрическая прочность  $E_{пр}$  водорода примерно на 40% ниже воздуха.

Водород — очень легкий газ с высокой теплопроводностью и удельной теплоемкостью.

Азот по электрическим характеристикам близок к воздуху, однако в отличие от него не содержит кислорода, который оказывает окисляющее воздействие на соприкасающиеся с ним материалы.

Искусственные газообразные диэлектрики.

К ним относятся элегаз, хладоген 12 и др. Из них в ремонтной практике определенный интерес представляет элегаз.

Гексафторид серы (также элегаз или шестифтористая сера, SF<sub>6</sub>) — неорганическое вещество, при нормальных условиях тяжёлый газ, в 5 раз тяжелее воздуха (плотность 6,7 против 1,29 у воздуха). Соединение было впервые получено и описано в 1900 году. Название «элегаз» шестифтористая сера получила от сокращения «электрический газ». При рабочих давлениях и обычной температуре элегаз - бесцветный газ, без запаха, не горюч.

Наибольшее распространение элегаз получил в герметизированных установках.

Элегаз не стареет, т. е. не меняет своих свойств с течением времени, при электрическом разряде распадается, но быстро рекомбинирует, восстанавливая первоначальную диэлектрическую прочность.

Преимуществами кабеля, заполненного элегазом, является малая электрическая емкость, то есть пониженные потери, хорошее охлаждение, сравнительно простая конструкция. Такой кабель представляет собой стальную трубу, заполненную элегазом, в которой при помощи электроизоляционных распорок укреплены проводящие жилы. Заполнение элегазом трансформаторов делает их взрывобезопасными. Элегаз используется в высоковольтных выключателях, — элегазовых выключателях — так как обладает высокими дугогасящими свойствами.

Он нетоксичен, химически стоек, не разлагается при нагреве до 800°C, распространен в конденсаторах, кабелях и пр.

Инертные газы, благородные газы, редкие газы, химические элементы, образующие главную подгруппу 8-й группы периодической системы Менделеева: гелий He (атомный номер 2), неон Ne (10), аргон Ar (18), криптон Kr (36), ксенон Xe (54) и радон Rn (86).

Промышленное использование инертных газов основано на их низкой химической активности или специфических физических свойствах. Инертные газы нашли широкое применение в области электротехники.

Аргон, ввиду своей неактивности и низкой теплопроводности, используется в смеси с азотом для наполнения электрических ламп. Аргоном и неоном наполняют трубки для световых реклам, при этом они светятся голубым, а неоновые — оранжево-красным. Еще аргон используют в химической лабораторной практике. В промышленности он нашел свое применение для термической обработки легкоокисляемых металлов. Аргон создает защитную атмосферу, в которой можно производить сварку или резку редких и цветных металлов, плавку вольфрама, титана, циркония. Для контроля вентиляционных систем применяют радиоактивный изотоп аргона.

Гелий — инертный газ, используется в качестве низкотемпературного хладагента, например для получения сверхпроводимости. Жидкий гелий используется при изучении многих явлений, например, сверхпроводимость в твердом состоянии. Тепловое движение атомов и свободных электронов в твердых телах практически отсутствует при температуре жидкого гелия.

Кроме того, жидкий гелий выгоден для охлаждения магнитных сверхпроводников, ускорителей частиц и других устройств. Довольно необычным применением гелия в качестве хладагента, является процесс непрерывного смешения <sup>3</sup>He и <sup>4</sup>He, для создания и поддержания температур ниже 0,005 К.

Гелий светится ярко-жёлтым светом, это объясняется тем, что в его сравнительно простом спектре, двойная жёлтая линия преобладает над всеми другими. Жидкий гелий

применяется в качестве хладагента в различных исследованиях, поскольку температура кипения этого газа составляет  $-268,9^{\circ}\text{C}$ .

Другие применения гелия – для газовой смазки подшипников, в счетчиках нейтронов (гелий-3), газовых термометрах, рентгеновской спектроскопии, для хранения пищи, в переключателях высокого напряжения. В смеси с другими благородными газами гелий используется в наружной неоновой рекламе (в газоразрядных трубках).

Неон светится огненно красным светом, так как его самые яркие линии находятся в красной области спектра.

Криптон и ксенон обладают еще меньшей теплопроводностью, чем аргон, поэтому наполненные ими электрические лампы долговечнее и экономичнее, чем таковые, наполненные азотом или аргоном.

Водолазы дышат смесью гелия и кислорода, что позволяет значительно удлинить время их пребывания под водой и резко ослабляет болезненные явления, вызываемые изменением давления при подъеме на поверхность.

## 15. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 15.1. Общие характеристики магнитных материалов

Магнитные свойства имеются у любых материалов. Они обладают способностью при внесении их в магнитное поле намагничиваться, а некоторые из них сохраняют свою намагниченность и после прекращения воздействия магнитного поля.

Магнитные свойства материалов оцениваются величинами, называемыми магнитными характеристиками. Каждая характеристика определяет какое-либо свойство. Для определения величин магнитных характеристик разработаны системы единиц, с помощью которых эти характеристики получают вполне конкретное выражение именованных чисел. Каждая характеристика магнитных материалов выражается математической формулой.

Магнитные свойства материалов характеризуются петлей гистерезиса, кривой намагничивания, магнитной проницаемостью, потерями энергии при перемагничивании.

Магнитная индукция обозначается буквой  $B$  и выражается численно произведением величины напряженности магнитного поля  $H$  на величину абсолютной магнитной проницаемости.

$$B = \mu_a H$$

Остаточная индукция  $B_{\text{ост}}$  - индукция магнитного поля на обратном ходе петли гистерезиса при нулевой напряженности магнитного поля.

В системе единиц СИ величина  $B$  выражается в тесла (Тл), а в системе СГСМ — в гауссах (Гс).

Величина  $\mu_a$  в формуле является произведением:

$$\mu_a = \mu_0 \mu,$$

выражается в гауссах на метр (Гн/м) и называется абсолютной магнитной проницаемостью. В этом произведении  $\mu$ — относительная магнитная проницаемость, она размерности не имеет.

Величина  $\mu_0$  называется магнитной постоянной. В системе СИ выражается формулой генри на метр (Гн/м), а в системе СГСМ  $\mu_0 = 1$  гаусс на эрстед (Гс/э):

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$$

Напряженность магнитного поля обозначается буквой  $H$ . Численная ее величина выражается в системе СИ в амперах на метр (А/м) или в амперах на сантиметр (А/см), в

системе же СГСМ она выражается в эрстедах (э). Отрицательная напряженность магнитного поля  $H_c$  называется коэрцитивной силой материала.

Коэрцитивная сила  $H_c$  - напряженность поля на обратном ходе петли гистерезиса при которой достигается нулевая индукция. Коэрцитивная (лат.) сила — удерживающая сила.

$\mu$  — относительная магнитная проницаемость (или магнитная проницаемость) — величина безразмерная. Относительная магнитная проницаемость характеризует способность материала намагничиваться. Она показывает во сколько раз магнитная индукция поля, созданного в данном материале, больше, чем в вакууме.

В результате намагничивания ферромагнитного материала в нем возникает магнитный поток:  $\Phi = BS$ , где  $S$  — площадь поперечного сечения образца материала. Магнитный поток в системе СИ выражается в веберах (вб), а в системе СГСМ — в максвеллах (мкс),  $1 \text{ вб} = 10^8 \text{ мкс}$

Петля гистерезиса - зависимость индукции от напряженности магнитного поля при изменении поля по циклу: подъем до определенного значения - уменьшение, переход через нуль, после достижения того же значения с обратным знаком - рост и т.п. Гистерезис (греческ.) — запаздывание.

Если напряженность магнитного поля плавно увеличивать от нуля, то магнитная индукция  $B$  помещенного в этом поле магнитного материала будет возрастать по кривой, называемой кривой первоначального намагничивания (см. рис.13).

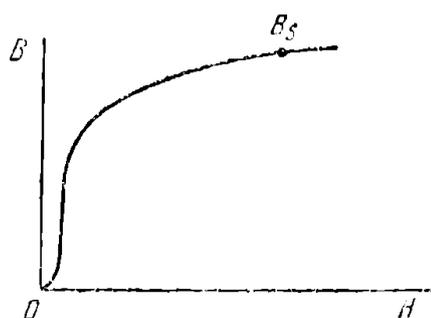


Рис. 13. Кривая зависимости индукции от величины напряженности магнитного поля

Во всех ферромагнитных материалах наблюдается явление, известное под названием магнитного гистерезиса. Оно проявляется при намагничивании материала сначала в одном, а затем в противоположном направлении (см. рис. 14). Если магнитный материал подвергнуть намагничиванию, непрерывно повышая напряженность магнитного поля  $H$ , то магнитная индукция  $B$  будет возрастать по кривой начального намагничивания.

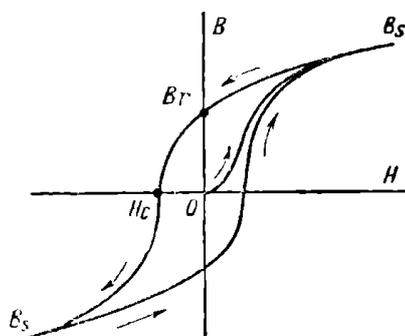


Рис. 14. Кривая намагничивания и петля гистерезиса

## 15.2. Классификация магнитных материалов

В зависимости от магнитной проницаемости  $\mu$  магнитные материалы делятся на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Если  $\mu > 1$ , т.е. является величиной положительной, то такие тела называются парамагнетиками. К ним относятся платина, алюминий, магний, титан, цирконий и тугоплавкие металлы. Они намагничиваются слабо, но в направлении намагничивающего поля.

Если  $\mu < 1$ , т.е. является величиной отрицательной, то такие тела называются диамагнетиками. К ним относятся медь, серебро, золото, бериллий, цинк, полупроводники Ge, Si, сверхпроводники. Они слабо намагничиваются в направлении, противоположном направлению магнитного поля.

Если  $\mu \gg 1$  (значительно больше единицы), что является частным случаем парамагнетиков, такие тела называются ферромагнетики. Это особая группа, в которую входят железо, никель, кобальт, многие редкоземельные металлы, а также химические соединения в сплавах.

Магнитные материалы в зависимости от коэрцитивной силы и магнитной проницаемости условно разделяются на магнитотвердые и магнитомягкие.

Описанные выше магнитные величины являются основными магнитными характеристиками ферромагнитных материалов. Они позволяют оценить способность материалов намагничиваться. Согласно их значениям можно распределить все ферромагнитные материалы на две главные группы.

Первую группу магнитных материалов составляют магнитомягкие материалы, у которых большая магнитная проницаемость и малая коэрцитивная сила, т. е. такие ферромагнетики, которые используются в основном в качестве различных магнитопроводов: сердечников дросселей, трансформаторов, электромагнитов, магнитных систем электроизмерительных приборов и т. п.

Такие материалы должны иметь весьма малые потери на гистерезис и вихревые токи. Они должны обладать большими величинами магнитной проницаемости и в то же время иметь малую коэрцитивную силу  $H_c$  и большую индукцию насыщения  $B_s$ . Наличие в них малой коэрцитивной силы  $H_c$  и высокой индукции насыщения  $B_s$  обуславливает узкую и высокую петлю гистерезиса (см. рис.7), например, для пермаллоя и чистого железа ширина петель не превосходит 0,45 а/см. Эта петля и является характерным признаком всех материалов, входящих в данную группу. Магнитно-мягкие материалы легко перемагничиваются в переменном магнитном поле, поэтому из них изготовляют сердечники и магнитопроводы для электрических машин, трансформаторов и электромагнитов. Магнитомягкие материалы применяются для получения больших значений магнитного потока.

Вторую группу магнитных материалов составляют магнитотвердые материалы, у которых большая коэрцитивная сила и малая магнитная проницаемость. Они применяются для изготовления постоянных магнитов. Постоянные магниты, будучи один раз намагничены, сохраняют состояние намагниченности в течение ряда лет. Для этих материалов характерным являются большая коэрцитивная сила  $H_c$  и большая остаточная индукция  $B_r$ . Петля гистерезиса у таких материалов очень широкая по сравнению с магнитомягкими материалами. Магнитотвердые материалы поэтому трудно перемагничиваются.

Физические процессы, протекающие в ферромагнитных материалах при их намагничивании, весьма сложны. В упрощенном виде их можно описать следующим образом. Известно, что атомы состоят из электронов и ядер. Движение электронов по орбитам и вращение их вокруг своей оси может быть уподоблено электрическому току. Электрический же ток, как известно, создает магнитное поле. Таким образом, движущиеся электроны атомов являются элементарными «магнитиками», которые, складываясь,

создают общий магнитный момент атома, но магнитные моменты атомов направлены в материале хаотично и поэтому их суммарный момент равен нулю.

Под действием же внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов ориентируются в направлении этого поля. Чем выше напряженность внешнего магнитного поля, тем на больший угол поворачиваются магнитные моменты атомов. Такой поворот с повышением напряженности внешнего поля совершается непрерывно, пока все магнитные моменты атомов не выстроятся по полю. Это магнитное состояние ферромагнетика получило название магнитного насыщения.

### 15.3. Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы по области применения и в зависимости от тепловых потерь подразделяются на низкочастотные и высокочастотные. Низкочастотные материалы делятся на материалы с высокой индукцией насыщения и материалы с высокой магнитной проницаемостью. Последние делятся по качеству и уровню свойств.

#### Магнитомягкие материалы для постоянных и низкочастотных магнитных полей.

Помимо высокой магнитной проницаемости и малой коэрцитивной силы эти магнитомягкие материалы должны обладать большой индукцией насыщения, т.е. пропускать максимальный магнитный поток через заданную площадь поперечного сечения магнитопровода. В магнитном материале, используемом в переменных полях, должны быть возможно меньшие потери на перемагничивание, которые складываются в основном из потерь на гистерезис и на вихревые токи. Для уменьшения потерь на вихревые токи для трансформаторов выбирают магнитомягкие материалы с повышенным удельным сопротивлением или собирают магнитопроводы из отдельных изолированных друг от друга тонких листов. В этом случае магнитные потери будут зависеть от толщины листа (ленты). К листовым и ленточным материалам предъявляется требование высокой пластичности. Магнитные свойства материалов зависят также от частоты магнитного поля. Важным требованием к магнитомягким материалам является обеспечение стабильности их свойств во времени, и по отношению к внешним воздействиям, таким, как температура и механические напряжения.

#### Низкочастотные материалы с высокой индукцией насыщения.

К ним относятся железо, электротехнические стали (легированные и нелегированные). Железо технически чистое содержит, хоть и в малых количествах, углерод, кремний, марганец, серу и другие элементы, которые ухудшают его магнитные качества. Наиболее чистое железо – карбонильное и электролитическое – из-за сложной технологии используют только в изделиях небольших размеров.

Электротехнические стали поставляют с гарантированными магнитными свойствами для электротехнической промышленности. Нелегированные стали выпускают таких марок, как: 10895, 20895, 10848, 20848 и др.

Листовую электротехническую сталь маркируют по следующему принципу: первая цифра (1, 2) — структурное состояние и вид прокатки (1 — горячекатаная, 2 — холоднокатаная); вторая цифра — содержание кремния (0 - с Si до 0,4; 1 — до 0,8; 2 — до 1,8; 3 — до 2,8; 4 — до 3,8; 5 — до 4,8 %); третья цифра — удельные потери в стали или магнитная индукция (В) для рекомендуемых условий; последние две цифры — значение коэрцитивной силы.

Применение: малолегированные стали (с содержанием Si до 0,8 %) широко используются для производства якорей и полюсов машин постоянного тока. Среднелегированные (Si до 2,8 %) применяются при изготовлении магнитопроводов машин переменного тока. Высоколегированные (Si до 3,8 % и более) массово употребляют при изготовлении сердечников трансформаторов.

### Низкочастотные материалы с высокой магнитной проницаемостью.

Для достижения больших значений индукций в очень слабых магнитных полях применяют сплавы, отличающиеся большой магнитной проницаемостью. Это сплавы систем: Fe - Ni (пермаллои), Fe-Co, Fe-Al (альсиферы).

Для маркировки магнитомягких сплавов используют буквенно-цифровую систему. Буквами обозначают элементы так, как это принято для маркировки сталей. Дополнительно введены обозначения железа — Ж, рения — И, бериллия - Л, редкоземельных металлов — Ч. Марка сплава содержит число, указывающее среднее содержание в процентах основного элемента (кроме железа), и букву, обозначающую этот элемент. В отличие от сталей, массовые доли других легирующих элементов, как правило, не указывают, а приводят лишь их буквенные обозначения. В конце марки могут стоять буквы А или П, обозначающие повышенное качество сплава и прямоугельность петли гистерезиса соответственно. Например:

79НМ — пермаллой, содержащий 79 % Ni и легированный молибденом;

8Ю — железоалюминиевый сплав, содержащий 8 % Al;

50НП — пермаллой, содержащий 50 % Ni и имеющий прямоугельную петлю гистерезиса.

Магнитомягкие сплавы являются прецизионными: концентрации легирующих элементов поддерживают в узких интервалах, содержание углерода и других примесей ограничено. Частицы карбидов, оксидов и других включений уменьшают  $\mu$  и повышают  $H_c$ .

По качеству сплавы разделяют на три класса:

I - с нормальными магнитными свойствами;

II - с повышенными магнитными свойствами;

III - с высокими магнитными свойствами.

Соответственно нормальное качество обеспечивается выплавкой в открытых печах, повышенное — в вакууме; высокое — в вакуумных индукционных печах с последующими переплавами.

По уровню основных свойств сплавы разделяют на восемь групп.

Большим достоинством пермаллоев является их высокая пластичность, что облегчает технологию получения полуфабрикатов: тонких листов, лент и проволоки, используемых при изготовлении сердечников.

Магнитные свойства пермаллоев меняются под воздействием даже слабых напряжений. Поэтому окончательно изготовленные детали надо подвергать термической обработке и в процессе сборки избегать ударов, сильной затяжки или сдавливания обмоткой.

Магнитные свойства пермаллоев зависят от скорости охлаждения. Термическую обработку пермаллоев проводят для удаления примесей, остаточных напряжений и укрупнения зерна. Она заключается в медленном нагреве их до 1100 - 1150°C в среде, защищающей материал от окисления (вакууме, водороде), выдержке при этой температуре 3 -6 час. в зависимости от размера и массы, медленном охлаждении до 600°C (100°C/ч) и дальнейшем быстром охлаждении (400°C/ч).

Особую группу составляют пермаллои с прямоугельной петлей гистерезиса, которые широко используют в вычислительной технике и устройствах автоматического управления. Отличительная особенность таких материалов — большая остаточная индукция.

Высоконикиелевые сплавы 79НМ, 80НХС, 76НХД применяют для сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов, при толщине 0,02мм – для сердечников импульсных трансформаторов, магнитных усилителей.

Недостатками пермаллоев являются их относительно высокая стоимость, сильная зависимость магнитных свойств от механических напряжений.

Альсиферы при содержании 5,4% Al и 9,6% Si отличаются высокой магнитной проницаемостью. Преимуществом альсиферов является отсутствие в их составе дорогих или дефицитных элементов.

Альсифер характеризуется высокими твердостью (50 HRC) и сопротивлением изнашиванию. Практическому применению мешает природная хрупкость этих сплавов, что делает их абсолютно не деформируемыми и непригодными для обработки резанием. Изделия получают литьем или порошковой технологией. Область применения альсифера – магнитные экраны, корпуса приборов машин, детали магнитопроводов для работы в постоянных или медленно меняющихся магнитных полях. Альсифер хрупок, поэтому его можно размалывать в порошок и применять для изготовления пресованных сердечников и магнитодиэлектриков.

#### Высокочастотные магнитомягкие материалы

К этой группе материалов относятся ферриты. Они представляют собой магнитную керамику, получаемую спеканием оксида, железа с оксидами других металлов. Характерная особенность свойств ферритов — высокое, как у диэлектриков, удельное электрическое сопротивление ( $10^3 - 10^{11}$  Ом·м). Вследствие низкой электропроводности потери на вихревые токи у ферритов минимальны, что обусловило их широкое применение в технике высоких и сверхвысоких частот.

Ферриты — твердые и хрупкие материалы, обрабатывать которые можно только алмазным инструментом. По строению ферриты представляют собой ионные кристаллы. Их кристаллическую решетку образуют отрицательные ионы кислорода и положительные ионы металлов.

В технике преимущественно применяют не простые (однокомпонентные), а сложные ферриты, получаемые из смеси нескольких оксидов двухвалентных металлов. Ценными свойствами обладают ферриты, представляющие твердые растворы ферритов цинка и кадмия. В состав сложных ферритов вводят также оксиды трехвалентных металлов (Cr, Al). Многообразие сочетаний исходных компонентов предоставляет возможность получать ферриты с разнообразными свойствами.

Особенность свойств ферритов состоит в том, что при нагреве начальная магнитная проницаемость сначала возрастает, а затем резко падает при температуре точки Кюри, которая и определяет допустимую рабочую температуру феррита.

Для устройств, работающих на радиочастотах, применяют марганцево-цинковые и никель-цинковые ферриты.

Маркировка ферритов, применяемых на радиочастотах: на первом месте в марке стоит число, обозначающее количественное значение  $\mu$ ; на втором — буквы, определяющие частотный диапазон (Н - низкочастотные, ВЧ — высокочастотные); на третьем буква, обозначающая легирующий оксид: (Н — никель-цинковый, М — марганцево-цинковый).

Пример: 4000НМ, 1000НН, 100ВЧ и др.

### **15.4. Магнитотвердые материалы**

Магнитотвердые материалы используют для изготовления постоянных магнитов. Свойства магнитотвердых материалов оценивают стабильностью в условиях длительной эксплуатации при возможных колебаниях температуры. Нестабильность свойств может вызываться структурными изменениями (структурное старение), а также ударами и вибрацией (магнитное старение). В последнем случае свойства легко восстанавливаются повторным намагничиванием. Магнитотвердые материалы для постоянных магнитов по способу изготовления подразделяют на литые, порошковые и деформируемые.

#### Магнитотвердые литые материалы

К магнитотвердым литым материалам относятся сплавы системы Fe - Ni - Al. Сплав системы Fe - Ni - Al содержит 12 - 35 % Ni и 6,5 - 16 % Al.

Применяют сплавы, дополнительно легированные Си, Со, Ti, Nb. Все они улучшают магнитные свойства, а медь снижает разброс их значений при неизбежных колебаниях состава. К недостаткам литых сплавов системы Fe - Ni - Al относятся их повышенная хрупкость и высокая твердость, что исключает все виды обработки, кроме шлифования. Этим недостаткам лишены порошковые сплавы системы. Сплавы системы Fe - Ni - Al получают спеканием порошков металлов при 1300 °С в атмосфере аргона или иной защитной атмосфере. Такие сплавы используют для мелких и точных по размеру магнитов. По составу порошковые сплавы близки к литым, но по магнитным свойствам несколько уступают им.

Магнитотвердые ферриты также получают спеканием порошков оксидов FeO, BaO, CoO. По своим магнитным свойствам они уступают литым сплавам, однако, будучи диэлектриками, могут использоваться как постоянные магниты в высокочастотных магнитных полях без тепловых потерь.

Деформируемые магнитотвердые сплавы. Сплавы на основе пластичных металлов (Fe, Co, Си) подвергают обработке давлением, что позволяет использовать их как магниты в виде тонких лент и проволоки. Хорошие магнитные свойства, получают после закалки и старения, что объясняется образованием мелкодисперсных ферромагнитных фаз в немагнитной основной фазе. К этим сплавам относятся:

Хромко (30ХК25) 45Fe; 30Cr; 25Co

Викаллоу (52К13Ф) 52Co; 35Fe; 13V

Кунико 50Cu; 21Ni; 29Co

Кунифе 60Cu; 20Ni; 20Fe

Платинакс (ПлК78) 78Pt; 22Co.

Единственный недостаток последнего сплава — присутствие драгоценного металла, следовательно, дороговизна, что ограничивает его применение.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Возросшие требования к технико-экономическим показателям и эксплуатационной надежности мощных трансформаторов, электродвигателей и другого электрооборудования удовлетворяются с помощью различных электротехнических материалов, номенклатура которых обширна. Только при рациональном выборе соответствующих материалов можно создавать новейшее электрооборудование с повышенными удельными характеристиками. Приведенные в учебном пособии сведения помогут студентам хорошо разобраться в свойствах, характеристиках, классификации, маркировке и правильном выборе электротехнических материалов.

## Список литературы

1. Арзамасов, Б.В. Материаловедение: учебник для вузов\Б.В.Арзамасов, В.И.Макарова, Г.Г.Мухин [и др.].-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.-655с.
2. Джаманбалин, К.К. Электротехнические материалы: учебник для студентов, обучающихся в высших учебных заведениях на инженерных специальностях/ К.К.Джаманбалин, О.В.Тарабаева.- Костанай, 2005.- 127 с.
3. Журавлев, Л.В. Электроматериаловедение: учебное пособие для сред. проф. образования\ Л.В.Журавлев.-М.:Академия, 2004.- 312 с.
4. Казанцев, А.П. Электротехнические материалы: учебное пособие для ПТУ/ А.П.Казанцев.- Минск: Дизайн ПРО, 2007.-96 с.
5. Никулин, Н.В. Электроматериаловедение: учебник для ПТУ/ Н.В.Никулин.- 3-е изд., испр. и доп.-М.: Высшая. шк.,1989.- 192 с.
6. Суриков, В.С. Основы электродинамики.- М.:Протон. – 2000.
7. Электротехнические и конструкционные материалы: учебное пособие для СПО/ В.Н.Бородулин, А.С.Воробьев, В.М.Матюхин [и др.]; под ред. В.А. Филиков.- М.: Академия, 2012.-280 с.- (Среднее специальное образование).

Таблица 4

**Коэффициент теплового расширения металлов**

| Металл  | Температура,<br>°С | $\alpha \cdot 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ | Металл                             | Температура,<br>°С | $\alpha \cdot 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ |
|---------|--------------------|---|------------------------------------|--------------------|---|
| Титан   | 27                 | 8,3   | Алюминий                           | 27                 | 23,3  |
|         | 727                | 12,8  |                                    | 627                | 37,8  |
| Железо  | 27                 | 12,0  | Олово ( $\alpha$ -<br>модификация) | 27                 | 16,0  |
|         | 727                | 14,7  |                                    |                    |   |
| Золото  | 27                 | 14,0  | Олово ( $\beta$ -<br>модификации)  | 27                 | 31,4  |
|         | 727                | 17,7  |                                    |                    |   |
| Медь    | 27                 | 16,7  | Магний                             | 27                 | 25,8  |
|         | 727                | 21,8  |                                    |                    |   |
| Серебро | 27                 | 18,9  | Свинец                             | 27                 | 28,5  |
|         | 727                | 25,6  |                                    | 277                | 33,3  |
| Цинк    | 27                 | 63,5  | -                                  | -                  | -   |
|         | 377                | 50,3  |                                    |                    |   |

Таблица 5

**Плотность металлов**

| Металл   | Плотность г/см <sup>3</sup> | Металл  | Плотность г/см <sup>3</sup> |
|----------|-----------------------------|---------|-----------------------------|
| Магний   | 1,74                        | Железо  | 7,87                        |
| Алюминий | 2,70                        | Медь    | 8,94                        |
| Титан    | 4,50                        | Серебро | 10,50                       |
| Цинк     | 7,14                        | Свинец  | 11,34                       |
| Олово    | 7,29                        | Золото  | 19,32                       |

Таблица 6

**Марки литых магнитотвердых материалов**

| Марка сплава | W, кДж/м <sup>3</sup> | Hс, кА/м | Bг, Тл |
|--------------|-----------------------|----------|--------|
| ЮНД 4        | 3,6                   | 40       | 0,50   |
| ЮНД 8        | 5,1                   | 44       | 0,60   |
| ЮНКД 15      | 6,0                   | 48       | 0,75   |
| ЮНКД 18      | 9,7                   | 55       | 0,90   |
| ЮНКД 24      | 18                    | 52       | 1,15   |
| ЮН13ДК25БА   | 28                    | 48       | 1,40   |
| ЮНДК31ТЗБА   | 32                    | 92       | 1,15   |
| ЮНДК34Т5     | 14                    | 92       | 0,75   |
| ЮНДК35Т5     | 18                    | 110      | 0,75   |
| ЮНДК35Т5БА   | 36                    | 110      | 1,02   |

## Характеристики металлов

| Металл   | Температура плавления, °С | Температура кипения, °С | Плотность, Кг/м <sup>3</sup> | Удельная теплоемкость, Дж/(кг * К) | Коэффициент теплопроводности, Вт (м * К) | ТК линейного расширения | Удельное электрическое сопротивление | ТК удельного сопротивления |
|----------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|--|-------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| Ртуть    | -38,9                     | 357                     | 13600                        | 130                                | 10                                       | 61,0                    | 0,958                                | 9                          |
| Цезий    | 28,5                      | 700                     | 1870                         | 234                                | —  | 95,0                    | 0,210                                | 48                         |
| Галлий   | 29,7                      | 2070                    | 5910                         | 381                                | —  | 18,0                    | 0,560                                | —                          |
| Калий    | 63,7                      | 875                     | 870                          | 753                                | 92                                       | 80,0                    | 0,069                                | 58                         |
| Натрий   | 97,8                      | 883                     | 970                          | 1260                               | 125                                      | 70,0                    | 0,046                                | 50                         |
| Индий    | 156,0                     | 2075                    | 7280                         | 243                                | 25                                       | 25,0                    | 0,090                                | 47                         |
| Литий    | 186,0                     | 1220                    | 530                          | 3620                               | 71                                       | —                       | —                                    | —                          |
| Олово    | 232,0                     | 2260                    | 7310                         | 226                                | 65                                       | 23,0                    | 0,120                                | 44                         |
| Кадмий   | 321,0                     | 767                     | 8650                         | 230                                | 93                                       | 30,0                    | 0,076                                | 42                         |
| Свинец   | 327,0                     | 1620                    | 11400                        | 130                                | 35                                       | 29,0                    | 0,210                                | 37                         |
| Цинк     | 420,0                     | 907                     | 7140                         | 390                                | 111                                      | 31,0                    | 0,059                                | —                          |
| Магний   | 651,0                     | 1103                    | 1740                         | 1040                               | 167                                      | 26,0                    | 0,045                                | 42                         |
| Алюминий | 657,0                     | 1800                    | 2700                         | 902                                | 209                                      | 24,0                    | 0,028                                | 42                         |
| Барий    | 710,0                     | 1637                    | 3500                         | 268                                | —  | 17,0                    | 0,500                                | 25                         |
| Серебро  | 961,0                     | 1950                    | 10500                        | 234                                | 415                                      | 19,0                    | 0,016                                | 40                         |
| Золото   | 1063,0                    | 2600                    | 19300                        | 126                                | 293                                      | 14,0                    | 0,024                                | 38                         |
| Медь     | 1083,0                    | 2300                    | 8940                         | 385                                | 390                                      | 16,0                    | 0,017                                | 43                         |
| Бериллий | 1284,0                    | 2500                    | 1850                         | 200                                | 167                                      | 13,0                    | 0,040                                | 60                         |
| Никель   | 1455,0                    | 2900                    | 8900                         | 444                                | 95                                       | 13,0                    | 0,073                                | 65                         |
| Кобальт  | 1492,0                    | 3000                    | 8710                         | 435                                | 79                                       | 12,0                    | 0,062                                | 60                         |
| Железо   | 1535,0                    | 2200                    | 7870                         | 452                                | 73                                       | 11,0                    | 0,098                                | 60                         |
| Палладий | 1554,0                    | 2000                    | 12100                        | 243                                | 72                                       | 12,0                    | 0,110                                | —                          |
| Титан    | 1725,0                    | 4240                    | 4500                         | 577                                | 15                                       | 8,1                     | 0,480                                | 33                         |
| Платина  | 1773,0                    | 2900                    | 21400                        | —                                  | —  | 6,5                     | 0,105                                | —                          |
| Хром     | 1850,0                    | 2430                    | 7100                         | 113                                | —  | 11,2                    | 0,210                                | —                          |
| Торий    | 1850,0                    | 3500                    | 11500                        | 134                                | 71                                       | 9,0                     | 0,186                                | 23                         |
| Цирконий | 1860,0                    | 4900                    | 6500                         | 276                                | 17                                       | 5,4                     | 0,410                                | 45                         |
| Иридий   | 2350,2                    | 4800                    | 22500                        | —                                  | —  | —                       | —                                    | —                          |
| Ниобий   | 2410,0                    | 3300                    | 8570                         | 172                                | 50                                       | 7,2                     | 0,140                                | 30                         |
| Молибден | 260,20                    | 3700                    | 10200                        | 264                                | 151                                      | 5,1                     | 0,057                                | 46                         |
| Тантал   | 2850,0                    | 4200                    | 16700                        | 142                                | 54                                       | 6,5                     | 0,135                                | 38                         |
| Рений    | 3180,0                    | —                       | 20500                        | 138                                | 71                                       | 4,7                     | 0,210                                | 42                         |
| Вольфрам | 3380,0                    | 550                     | 19300                        | 218                                | 168                                      | 7,4                     | 0,055                                | 46                         |

## Магнитные свойства железа

| Материал   | $\mu_{гк}$  | $\mu_{гmax}$ | $B_s$ , Тл | $H_c$ , А/м | $\rho$ , мкОм*м |
|--|-------------|--------------|------------|-------------|-----------------|
| Технически чистое железо                                     | 250-400     | 3500-4500    | 2,18       | 50-100      | 0,1             |
| Электролитическое железо                                     | 600         | 15000        | 2,18       | 30          | 0,1             |
| Карбонильное железо  | 2000-3000   | 20000-21500  | 2,18       | 6,4         | 0,1             |
| Железо, обработанное в водороде особо тщательно              | 60000       | 200000       | 2,18       | 2,4         | 0,1             |
| Электротехническая сталь                                     | 200-600     | 3000-8000    | 1,95-2,02  | 10-65       | 0,17-0,6        |
| Низконикелевые пермаллои                                     | 1500-4000   | 15000-16000  | 1,0-1,6    | 5-32        | 0,45-0,9        |
| Высоконикелевые пермаллои                                    | 7000-100000 | 50-300000    | 0,65-1,05  | 0,65-6      | 0,16-0,85       |
| Супермаллой (пермаллой, легированный молибденом и марганцем) | 100000      | 1500000      | 0,8        | 0,3         | 0,6             |
| Альсифер   | 34500       | 117000       | 1,0        | 1,8         | 0,8             |