

Министерство образования Республики Беларусь  
Филиал БНТУ  
«Минский государственный политехнический колледж»

**ЭЛЕКТРОННОЕ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ  
ПОСОБИЕ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ**

**«Электротехнические материалы»**

для специальностей

2-36 03 31-01 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования (эксплуатация электрооборудования и систем электроснабжения промышленных предприятий)»

2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»

2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств»

Минск 2019

**Авторы:**

Маковеева А.М., Матрашило А.Г.

**Рецензенты:**

Богородова М.Л., преподаватель спецдисциплин филиала БНТУ «МГПК»,  
Дирвук Е.П., доцент кафедры «Профессиональное обучение и педагогика»  
инженерно-педагогического факультета БНТУ, к.п.н., доцент

Учебно-методическое пособие предназначено для самостоятельного и дистанционного изучения учебной дисциплины «Электротехнические материалы» учащимися специальностей:

2-36 03 31-01 «Монтаж и эксплуатация электрооборудования (эксплуатация электрооборудования и систем электроснабжения промышленных предприятий)»;

2-37 01 05 «Городской электрический транспорт»;

2-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»;

2-36 04 32 «Электроника механических транспортных средств».

В учебно-методическом пособии представлен теоретический и практический материал, а также материал, обеспечивающий контроль знаний для проведения текущей и итоговой аттестации.

Белорусский национальный технический университет.

Филиал БНТУ “Минский государственный политехнический колледж”.

пр - т Независимости, 85, г. Минск, Республика Беларусь

Тел.: (017) 292-13-42 Факс: 292-13-42

E-mail: mgpk@bntu.by,

<http://www.mgpk.bntu.by>

Регистрационный № БНТУ/ МГПК- 44.2019

© БНТУ, 2019

© Маковеева А.М., Матрашило А.Г., 2019

## Содержание

- [1 Пояснительная записка](#)
- [2 Учебная программа учебной дисциплины](#)
- [3 Существенные и несущественные ошибки](#)
- [4 Перечень разделов и тем учебной программы](#)
- [5 Теоретический материал по темам учебной дисциплины](#)
  - [5.1 Введение](#)
  - [5.2 Раздел 1 Основы металловедения](#)
  - [5.3 Раздел 2 Проводниковые материалы](#)
  - [5.4 Раздел 3 Диэлектрики](#)
  - [5.5 Раздел 4 Полупроводниковые материалы](#)
  - [5.6 Раздел 5 Магнитные материалы](#)
- [6 Практический материал](#)
- [7 Самоконтроль знаний](#)
- [8 Примерный перечень вопросов к ОКР](#)
- [9 Перечень учебных изданий и информационно-аналитических материалов, рекомендуемых для изучения учебной дисциплины](#)
- [10 Перечень рекомендуемых электронных образовательных ресурсов, сетевых ресурсов](#)
- [11 Обратная связь](#)

## Пояснительная записка

Электронное учебно-методическое пособие (ЭУМП) может использоваться преподавателями, учащимися дневной и заочной формы получения образования для самостоятельного и дистанционного изучения материала учебной дисциплины «Электротехнические материалы».

ЭУМП содержит оглавление с возможностью перехода к избранному разделу, систему гиперссылок, навигацию с помощью кнопок перехода «стрелка влево», «стрелка вправо», систему полнотекстового поиска. Теоретический раздел оснащен следующими кнопками:

- «Назад», позволяющей вернуться в папку с перечнем тем,
- «Далее», обеспечивающей переход к следующей теме программы в соответствии с тематическим планом,
- «Обратная связь», содержащей анкету рефлексии,
- «Самоконтроль», позволяющей перейти к вопросам по изучаемой теме;
- «Вопросы по разделу», обеспечивающей переход к перечню вопросов по темам конкретного раздела.

Программой учебной дисциплины «Электротехнические материалы» предусматривается изучение будущими специалистами способов получения, свойств и области применения конструкционных и электротехнических материалов, применяемых в электротехнических устройствах.

Данная учебная дисциплина состоит из пяти разделов: «Основы металловедения», «Проводниковые материалы», «Диэлектрики», «Полупроводниковые материалы», «Магнитные материалы».

Изучение учебной дисциплины основывается на знаниях, полученных учащимися по общеобразовательным дисциплинам и теоретическим основам электротехники. В свою очередь, знание программного материала учебной дисциплины «Электротехнические материалы» послужит базой при изучении специальных предметов.



## Учебная программа учебной дисциплины

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<p>Познакомить с содержанием дисциплины «Электротехнические материалы», целями ее изучения, местом и ролью в системе специальных дисциплин. Дать понятие о классификации электротехнических материалов по назначению.</p>	<p style="text-align: center;"><b><u>Введение</u></b></p> <p>Содержание дисциплины, цели ее изучения, место и роль в системе специальных дисциплин</p> <p>Понятие о материалах и их видах: конструкционных, инструментальных и специальных.</p> <p>Классификация электротехнических материалов по назначению: проводниковые, диэлектрические, полупроводниковые, магнитные.</p>	<p>Высказывает общее суждение о содержании дисциплины, о целях ее изучения, о месте и роли в системе специальных дисциплин.</p> <p>Определяет классификацию электротехнических материалов по назначению</p>
<b>Раздел 1 Основы металловедения</b>		
<b><u>Тема 1.1 Основные сведения о металлах и сплавах</u></b>		
<p>Сформировать знания о кристаллическом строении металлов и их свойствах. Дать представление о классификации сплавов и особенностях их свойств, о структурных составляющих железоуглеродистых сплавов и их свойствах.</p>	<p>Кристаллическое строение металлов. Виды кристаллических решеток.</p> <p>Превращения в железе при нагревании и охлаждении.</p> <p>Кристаллизацией металлов.</p> <p>Кривые охлаждения и нагревания.</p> <p>Физические, механические, химические и технологические свойства металлов.</p> <p>Классификация сплавов и их свойства. Понятие о диаграмме состояния сплавов.</p> <p>Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов и их свойства.</p>	<p>Объясняет кристаллическое строение металлов, превращения, происходящие в железе при нагреве и охлаждении.</p> <p>Характеризует важнейшие физические, химические, механические и технологические свойства металлов.</p> <p>Высказывает общее суждение о классификации сплавов, структурных составляющих железоуглеродистых сплавов и их свойствах.</p>

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<b><u>Тема 1.2 Сплавы железа с углеродом</u></b>		
<p>Сформировать знания о структуре, химическом составе, свойствах, применении, маркировке углеродистых конструкционных и инструментальных сталей, чугунов, легированных сталей и твердых сплавов.</p> <p>Дать понятие о классификации сталей и чугунов, влиянии постоянных примесей на свойства сталей и чугунов.</p> <p>Дать понятие о влиянии легирующих элементов на свойства стали.</p> <p>Сформировать умение по расшифровке марок углеродистых и легированных сталей и чугунов.</p> <p>Научить определять твердость металлов опытным путем.</p>	<p>Деление железоуглеродистых сплавов на стали и чугуны.</p> <p>Углеродистые стали. Влияние количества углерода и примесей на структуру и свойства стали. Классификация сталей по назначению и количеству углерода. Маркировка сталей, применение.</p> <p>Чугун. Влияние количества углерода и примесей на структуру и свойства. Белый, серый, высокопрочный, ковкий чугуны, их свойства и область применения. Маркировка чугунов.</p> <p>Легированные стали, их классификация и применение. Маркировка легированных сталей. Легированные стали с особыми свойствами: нержавеющие, жаростойкие, жаропрочные, износостойкие, их применение.</p> <p style="text-align: center;"><u>Лабораторная работа № 1</u> Определение твердости Металлов</p>	<p>Описывает структуру, свойства, принципы маркировки, особенности применения углеродистых конструкционных и инструментальных сталей, серых, высокопрочных и ковких чугунов, легированных сталей и твердых сплавов.</p> <p>Определяет классификацию и влияние легирующих элементов на свойства сталей и чугунов.</p> <p>Расшифровывает марки сталей, чугунов, твердых сплавов по алгоритму.</p> <p>Выполняет расчет твердости металлов на основании опытных данных.</p>
<b><u>Тема 1.3 Основы термической и химико-термической обработки металлов</u></b>		
<p>Сформировать знания об основных видах термической и химико-термической обработки металлов</p>	<p>Понятие о термической обработке металлов. Превращения, происходящие в стали при нагреве и охлаждении. Основные виды термической обработки стали: отжиг, нормализация, закалка, отпуск. Общие сведения о поверхностной закалке стали.</p> <p>Химико-термическая обработка стали: цементация, азотирование, цианирование, нитроцементация.</p>	<p>Описывает назначение, технологию, параметры и применение основных видов термической и химико-термической обработки металлов.</p>

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<b>Раздел 2 Проводниковые материалы</b>		
<b><u>Тема 2.1 Физические процессы в проводниках</u></b>		
<p>Дать представление об особенностях строения металлов и основных физических процессах в проводниках.</p> <p>Сформировать знания об основных характеристиках проводников и их классификации.</p>	<p>Особенности строения металлов. Электропроводность металлов. Температурная зависимость удельного электрического сопротивления металлических проводников. Влияние примесей и дефектов на удельное электрическое сопротивление.</p> <p>Классификация проводниковых материалов.</p>	<p>Высказывает общее суждение об особенностях строения металлов и основных физических процессах в проводниках. Объясняет сущность основных характеристик проводниковых материалов и их классификацию.</p>
<b><u>Тема 2.2 Материалы высокой проводимости</u></b>		
<p>Сформировать знания об основных свойствах, маркировке и применении проводниковой меди, алюминия и их сплавов.</p> <p>Дать понятие об особенностях свойств и применении благородных металлов, материалов для контактов, сверхпроводников, криопроводников, припоев и флюсов.</p> <p>Обучить методике проведения микроанализа, научить различать по микроструктуре цветные металлы и сплавы. Сформировать умение по расшифровке марок цветных металлов и их сплавов.</p>	<p>Основные свойства, маркировка и применение проводниковой меди и её сплавов.</p> <p>Основные свойства, маркировка и применение проводникового алюминия и её сплавов.</p> <p>Свойства и применение благородных металлов (серебро, золото).</p> <p>Материалы для контактов.</p> <p>Свойства и применение сверхпроводников и криопроводников.</p> <p>Припой и флюсы.</p> <p><u>Лабораторная работа № 2</u> Анализ структуры и маркировки проводниковых материалов</p>	<p>Описывает свойства, маркировку и применение проводниковой меди, алюминия и их сплавов; особенности свойств и применение благородных металлов, материалов для контактов, сверхпроводников, криопроводников, припоев и флюсов.</p> <p>Проводит микроанализ цветных металлов и сплавов, сравнивает микроструктуры цветных металлов. Расшифровывает марки меди, алюминия и их сплавов.</p>

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<b><u>Тема 2.3 Материалы высокого электрического сопротивления</u></b>		
Сформировать знания о требованиях к материалам высокого сопротивления и сплавам для термопар. Дать понятие о составе, свойствах, маркировке и применении материалов высокого сопротивления.	Основные требования к материалам высокого сопротивления. Классификация. Состав, свойства, маркировка и применение манганина, константана, нихрома и фехраля. Сплавы для термопар.	Формулирует требования к материалам высокого сопротивления и сплавам для термопар. Описывает состав, свойства, маркировку и применение материалов высокого сопротивления.
<b><u>Тема 2.4 Неметаллические проводниковые материалы</u></b>		
Сформировать понятие о составе, свойствах, видах и областях применения неметаллических проводниковых материалов	Угольные проводниковые материалы; их основные свойства и виды. Применение угольных изделий. Композиционные проводящие материалы. Контактные материалы.	Описывает состав, свойства, виды и области применения неметаллических проводниковых материалов.
<b><u>Обязательная контрольная работа № 1</u></b>		
<b>Раздел 3 Диэлектрики</b>		
<b><u>Тема 3.1 Физические процессы в диэлектриках</u></b>		
Сформировать представление о физико-химических процессах, протекающих в диэлектриках под воздействием электрического поля. Дать понятие об анализе качества диэлектриков по заданным параметрам.	Поляризация диэлектриков. Виды поляризации: упругая поляризация (без потерь), поляризация, связанная с потерей энергии. Понятие диэлектрической проницаемости как численной оценки процесса поляризации. Проводимость диэлектриков. Понятие удельного объёмного, удельного поверхностного сопротивления и их зависимость от внешних факторов, структуры и параметров диэлектриков. Понятие токов утечки. Потери в диэлектриках. Векторная диаграмма токов диэлектрика. Понятие тангенса угла электрических потерь и его	Высказывает общее суждение о физико-химических процессах в диэлектриках под воздействием электрического поля. Описывает качества диэлектриков по заданным параметрам.

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<p>Сформировать умения определять удельное объёмное и удельное поверхностное сопротивления диэлектриков.</p> <p>Научить определять электрическую прочность твердых диэлектриков опытным путем.</p> <p>Сформировать умения определять токи утечки и мощности потерь диэлектриков.</p>	<p>зависимость от различных факторов. Численное определение потерь в диэлектрике.</p> <p>Пробой диэлектриков, виды пробоя, механизмы развития пробоя. Электрическая прочность, ее зависимость от различных факторов: однородности поля, давления, температуры, толщины диэлектрика, площади электродов.</p> <p><u><a href="#">Практическая работа № 1</a></u> Расчёт удельного объёмного и удельного поверхностного сопротивления диэлектриков</p> <p><u><a href="#">Лабораторная работа № 3</a></u> Определение электрической прочности твердых диэлектриков</p> <p><u><a href="#">Практическая работа № 2</a></u> Расчёт токов утечки и потерь диэлектриков</p>	<p>Решает задачи по расчету удельного объёмного и удельного поверхностного сопротивлений диэлектриков.</p> <p>Определяет электрическую прочность твердых диэлектриков опытным путем.</p> <p>Решает задачи по расчету токов утечки и мощности потерь диэлектриков.</p>
<p><b><u><a href="#">Тема 3.2 Неэлектрические характеристики диэлектриков</a></u></b></p>		
<p>Сформировать знания об основных механических, тепловых и физико-химических характеристиках диэлектриков и применении их для оценки качества.</p>	<p>Механические характеристики диэлектриков: прочность при растяжении, сжатии и изгибе, ударная вязкость, вибропрочность. Тепловые характеристики: температура плавления, вспышки и размягчения материалов, нагревостойкость, морозостойкость, температурные коэффициенты. Физико-химические характеристики: вязкость жидких диэлектриков, кислотное число, химическая стойкость, влагостойкость, радиационная стойкость, тропическая стойкость.</p>	<p>Объясняет сущность механических, тепловых и физико-химических характеристик диэлектриков и применение их для оценки качества.</p>

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<b><u>Тема 3.3 Газообразные диэлектрики</u></b>		
<p>Сформировать представление о роли газообразных диэлектриков в электротехнических установках.</p> <p>Сформировать знания о свойствах газообразных диэлектриков и особенностях их применения.</p> <p>Научить определять электрическую прочность воздуха опытным путем и анализировать зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами и от площади их поверхности.</p>	<p>Роль газообразных диэлектриков в электротехнических установках. Особенности свойств и основные характеристики газов.</p> <p>Электропроводность газов.</p> <p>Вольт-амперная характеристика. Пробой газов в однородном и неоднородном поле.</p> <p>Применение газообразных диэлектриков (воздух, азот, водород, инертные газы, элегаз, фреон, вакуум) в электротехнических установках.</p> <p style="text-align: center;"><u>Лабораторная работа № 4</u> Определение электрической прочности воздуха</p>	<p>Высказывает общее суждение о роли газообразных диэлектриков в электротехнических установках.</p> <p>Описывает свойства газообразных диэлектриков и особенности их применения.</p> <p>Анализирует опытным путем электрическую прочность воздуха и ее зависимость от расстояния между электродами и от площади их поверхности.</p>
<b><u>Тема 3.4 Жидкие диэлектрики</u></b>		
<p>Познакомить с особенностями жидких диэлектриков.</p> <p>Сформировать знания о свойствах, способах получения и о применении жидких диэлектриков.</p> <p>Научить определять электрическую прочность трансформаторного масла опытным путем.</p>	<p>Особенности свойств жидкостей. Электропроводность и пробой жидких диэлектриков.</p> <p>Влияние степени чистоты жидкости на её электрическую прочность.</p> <p>Нефтяные электроизоляционные масла, их получение, свойства, методы очистки и применение.</p> <p>Синтетические жидкие диэлектрики: совол, совтол, гексол. Их свойства и применение.</p> <p>Кремнийорганические и фторорганические соединения. Их применение, достоинства и недостатки.</p> <p style="text-align: center;"><u>Лабораторная работа № 5</u> Определение электрической прочности трансформаторного масла</p>	<p>Называет особенности жидких диэлектриков.</p> <p>Описывает свойства, способы получения и применение жидких диэлектриков.</p> <p>Анализирует опытным путем электрическую прочность трансформаторного масла.</p>

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<b><u>Тема 3.5 Полимеры</u></b>		
<p>Дать понятие о процессах полимеризации и поликонденсации, о термопластичных и термореактивных диэлектриках.</p> <p>Сформировать знания о основных свойствах и применении полимеров.</p>	<p>Основные понятия о высокополимерных материалах. Процессы полимеризации и поликонденсации. Термопластичные и термореактивные диэлектрики. Полимеризационные полимеры: полиэтилен, полихлорвинил, полистирол, фторопласты, их свойства и применение.</p> <p>Поликонденсационные смолы: фенолформальдегидные полиэфирные, эпоксидные, кремнийорганические, их свойства и применение.</p>	<p>Высказывает общее суждение о процессах полимеризации и поликонденсации, о термопластичных и термореактивных диэлектриках.</p> <p>Описывает свойства и возможности применения полимеров при заданных условиях.</p>
<b><u>Тема 3.6 Пластмассы, пленочные материалы</u></b>		
<p>Дать понятие о составе и особенностях пластмасс, их классификации, методах получения изделий из пластмасс.</p> <p>Сформировать представление о способах получения и применения слоистых пластиков и плёночных материалов.</p>	<p>Понятие о пластмассах. Состав пластмасс, их особенности. Классификация пластмасс. Методы получения изделий из пластмасс.</p> <p>Слоистые пластики.</p> <p>Общие сведения о получении и применении плёночных материалов.</p>	<p>Описывает состав и особенности пластмасс, их классификацию, методы получения изделий из пластмасс.</p> <p>Высказывает общее суждение о получении и применении слоистых и плёночных материалов.</p>
<b><u>Тема 3.7 Резина</u></b>		
<p>Сформировать знания о составе, получении, свойствах, характеристиках и применении резины.</p>	<p>Натуральные и синтетические каучуки.</p> <p>Состав резины и получение резины. Процесс вулканизации. Влияние составляющих на электрические, механические и тепловые свойства резины. Электрические характеристики и особенности свойств резины, применение в электротехнике.</p>	<p>Описывает состав, получение, свойства, характеристики и применение резины.</p>

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<b><u>Тема 3.8 Лаки, эмали, компаунды</u></b>		
Сформировать знания о лаках, эмалях и компаундах, их классификации, составе, особенностях свойств и применении.	Понятие о лаках. Состав лаков их классификация. Требования, предъявляемые к лакам, их применение. Эмали, их классификация, состав, применение, роль пигментов. Компаунды, их классификация, состав и применение.	Описывает классификацию, состав, особенности свойства и применение лаков, эмалей, компаундов.
<b><u>Тема 3.9 Волокнистые материалы</u></b>		
Познакомить с видами волокон, применяемых в электротехнике, и их свойствами. Дать понятие о получении, видах и применении волокнистых материалов. Сформировать представление о дереве и фибре.	Виды волокон, применяемых в электротехнике: природные, синтетические, искусственные, органические, неорганические; их основные свойства и применение. Электроизоляционные бумаги и электрокартоны; виды, получение, применение. Лакоткани: виды, получение, применение. Общие сведения о дереве, фибре.	Называет виды волокон, применяемых в электротехнике, их особенности. Описывает способы получения, свойства и применение волокнистых материалов. Высказывает общее суждение о дереве и фибре.
<b><u>Тема 3.10 Слюда и материалы на ее основе</u></b>		
Сформировать знания о составе слюды, ее свойствах и применении в электротехнике. Дать понятие о получении, свойствах и применении материалов на основе слюды.	Слюда, её состав и применение. Изоляционные материалы на основе слюды: миканиты, микафолы, микаленты, слюдиниты и др. Их получение, свойства и применение. Искусственная слюда, её свойства и применение.	Излагает состав, свойства и применение слюды в электротехнике. Описывает получение, свойства и применение материалов на основе слюды.
<b><u>Тема 3.11 Стекло и керамика</u></b>		
Сформировать знания о составе стекла и керамики, особенностях свойств и применении в электротехнике Дать понятие о видах изоляторов.	Состав стекла, получение, свойства и применение. Электрофарфор, его состав, свойства и применение. Стеатит, конденсаторная керамика; их состав, основные характеристики, применение. Виды изоляторов.	Описывает состав стекла и керамики, особенности, свойств и применение в электротехнике. Определяет виды изоляторов.

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<b><u>Тема 3.12 Активные диэлектрики</u></b>		
Сформировать знания об особенностях свойств и применении активных диэлектриков, жидких кристаллов, электрооптических материалов.	Особенности свойств активных диэлектриков. Свойства и применение сегнетоэлектриков, электретов, пьезоэлектриков, пироэлектриков. Свойства и применение жидких кристаллов. Электрооптические материалы.	Описывает особенности свойств и применение активных диэлектриков, жидких кристаллов и электрооптических материалов.
<b><u>Тема 3.13 Провода и кабели</u></b>		
Сформировать знания о классификации, маркировке, назначении, конструкции и применении проводов и кабелей.  Сформировать умение самостоятельно расшифровывать марки проводов и кабелей с помощью алгоритмов.	Классификация проводов. Обмоточные, установочные, монтажные провода, их виды, назначение, область применения и маркировка. Назначение и маркировка кабелей.  <b><u>Практическая работа № 3</u></b> Изучение конструкции и маркировки проводов и Кабелей	Описывает классификацию, маркировку, назначение, конструкцию и применение проводов и кабелей.  Расшифровывает марки проводов и кабелей.
<b><u>Обязательная контрольная работа № 2</u></b>		
<b>Раздел 4 Полупроводниковые материалы</b>		
<b><u>Тема 4.1 Физические процессы в полупроводниках</u></b>		
Дать представление о классификации и особенностях свойств полупроводниковых материалов. Дать понятие о физических процессах в полупроводниках в зависимости от их основных параметров.	Классификация и особенности свойств полупроводниковых материалов. Зависимость проводимости полупроводников от температуры. Собственные и примесные полупроводники. Концентрация и подвижность носителей заряда. Основные и неосновные носители заряда. Ширина запрещенной зоны.	Высказывает общее суждение о классификации и особенностях свойств полупроводниковых материалов. Описывает физические процессы в полупроводниках в зависимости от их основных параметров.

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
Обучить методике проведения микроанализа. Сформировать умения по определению плотности дислокаций на поверхности полупроводниковой пластины. Сформировать умение измерять сопротивление полупроводников, научить анализировать зависимость сопротивления полупроводников от температуры.	<u><a href="#">Лабораторная работа № 6</a></u> Анализ микроструктуры и определение плотности дислокаций на поверхности полупроводниковой пластины  <u><a href="#">Практическая работа №4</a></u> Определение зависимости сопротивления полупроводников от температуры	Проводит микроанализ полупроводниковой пластины. Определяет плотность дислокаций на поверхности полупроводниковой пластины. Измеряет сопротивление полупроводников анализирует зависимость сопротивления полупроводников от температуры.
<b><u><a href="#">Тема 4.2 Элементарные полупроводники</a></u></b>		
Дать понятие о получении, свойствах, параметрах и применении элементарных полупроводников.	Основные полупроводниковые материалы: германий, кремний, селен. Их получение, очистка, свойства, параметры и применение.	Описывает получение, свойства, параметры и применение элементарных полупроводников.
<b><u><a href="#">Тема 4.3 Сложные полупроводниковые соединения</a></u></b>		
Сформировать знания о строении, получении, свойствах, параметрах и применении сложных полупроводниковых соединений.	Бинарные соединения: $A^{II} B^{VI}$ ; $A^{III} B^V$ ; $A^{IV} B^{VI}$ и др. Их строение, получение, свойства и применение.	Описывает строение, получение, свойства, параметры и применение сложных полупроводниковых соединений.
<b>Раздел 5 Магнитные материалы</b>		
<b><u><a href="#">Тема 5.1 Физические процессы в магнитных материалах</a></u></b>		
Сформировать знания об основных свойствах и характеристиках магнитных материалов.	Основные свойства магнитных материалов. Диамагнетика, парамагнетика, ферромагнетика. Магнитная проницаемость. Явления намагничивания и перемагничивания. Влияние температуры на магнитные свойства.	Формулирует и объясняет основные свойства и характеристики магнитных материалов.

Цели изучения темы	Содержание темы	Результат
<b><u>Тема 5.2 Магнитомягкие и магнитотвердые материалы</u></b>		
<p>Познакомить с классификацией магнитных материалов.</p> <p>Сформировать знания о требованиях, предъявляемых к различным группам магнитных материалов, о их составе, свойствах и применении.</p>	<p>Классификация магнитомягких материалов. Требования к ним. Технически чистое железо и его разновидности. Электротехническая кремнистая сталь, текстурованные стали, их марки, свойства, применение.</p> <p>Характеристики магнитотвёрдых материалов; их классификация, применение. Требования к магнитотвёрдым материалам.</p>	<p>Различает классы магнитных материалов.</p> <p>Определяет требования, предъявляемые к различным группам магнитных материалов, их состав, свойства и применение.</p>
<b><u>Тема 5.3 Магнитные материалы специального назначения</u></b>		
<p>Сформировать знания об особенностях свойств, составе и перспективах использования материалов специального назначения.</p>	<p>Магнитные материалы с прямоугольной петлёй гистерезиса. Термомагнитные сплавы. Магнито-стрикционные материалы. Ферриты для сверхвысоких частот. Их характеристики, состав, свойства и применение.</p>	<p>Описывает особенности свойств, состав и перспективы использования материалов специального назначения.</p>



## **Существенные и несущественные ошибки по дисциплине «Электротехнические материалы»**

### ***Существенные ошибки***

#### **В изложении теоретического материала**

- затруднения в изложении основных терминов, определений, понятий в области материаловедения.

- ошибки в классификации, маркировке конструкционных, инструментальных и проводниковых материалов.

- ошибки в классификации, технологии проведения термической и химико-термической обработки.

- затруднения в классификации, назначении и области применения проводниковых материалов, диэлектриков, полупроводников, магнитных материалов.

#### **При выполнении практических работ**

- нарушение технологии испытания металлов на твёрдость

- ошибки в определении электрической прочности газообразных, твёрдых и жидких диэлектриков.

- ошибки в определении удельного объёмного и удельного поверхностного сопротивления диэлектриков, токов утечки и потерь диэлектриков.

- ошибки в расшифровке маркировки проводниковых материалов, проводов и кабелей.

#### ***- Несущественные ошибки***

#### **В изложении теоретического материала**

- неточное, неполное изложение вопросов классификации, маркировки конструкционных и инструментальных материалов.

- неточное, неполное изложение материала по вопросам термической и химико-термической обработки

- неполное, неточное изложение материала по классификации, назначению и области применения проводниковых материалов, диэлектриков, полупроводников, магнитных материалов.

#### **При выполнении практических работ**

- неточности в испытании металлов на твёрдость.

- неточности в определении электрической прочности газообразных, твёрдых и жидких диэлектриков.

- незначительные ошибки в определении удельного объёмного и удельного поверхностного сопротивления диэлектриков, токов утечки и потерь диэлектриков.

- неточности в расшифровке маркировки проводниковых материалов, проводов и кабелей.



## Перечень разделов и тем учебной программы

Раздел, тема	Количество часов					
	Всего для специ- альностей 2-36 03 31-01 2-36 04 32 2-37 01 05	В том числе на		Всего для специ- альности 2-53 01 05	В том числе на	
		ла- бо- ра- тор- ные	прак- ти- че- ские		ла- бо- ра- тор- ные	прак- тиче- ские
1	2	3	4	5	6	7
<b>Введение</b>	2			2		
<b>Раздел 1 Основы металловедения</b>	10	2		10	2	
1.1 Основные сведения о металлах	2			2		
1.2 Сплавы железа с углеродом	6	2		6	2	
1.3 Основы термической и химико-термической обработки металлов	2			2		
<b>Раздел 2 Проводниковые материалы</b>	12	2		12	2	
2.1 Физические процессы в проводниках	2			2		
2.2 Материалы высокой проводимости	6	2		6	2	
2.3 Материалы высокого электрического сопротивления	2			2		
2.4 Неметаллические проводниковые материалы	1			2		
<i>Обязательная контрольная работа № 1</i>	1			-		
<b>Раздел 3 Диэлектрики</b>	40	6	4	40	6	
3.1 Физические процессы в диэлектриках	10	2	4	10	2	4
3.2 Неэлектрические характеристики диэлектриков	2			2		4
3.3 Газообразные диэлектрики	4	2		4	2	
3.4 Жидкие диэлектрики	4	2		4	2	
3.5 Полимеры	2			2		
3.6 Пластмассы, пленочные материалы	2			2		
3.7 Резина	2			2		
3.8 Лаки, эмали, компаунды	2			2		
3.9 Волокнистые материалы	2			2		
3.10 Слюда и материалы на ее основе	2			2		
3.11 Стекло и керамика	2			2		
3.12 Активные диэлектрики	2			2		
3.13 Провода и кабели	3		2	3		
<i>Обязательная контрольная работа № 2</i>	1			1		2

1	2	3	4	5	6	7
<b>Раздел 4 Полупроводниковые материалы</b>	10	2	2	8	2	2
4.1 Физические процессы в полупроводниках	6	2	2	6	2	2
4.2 Элементарные полупроводники	2			1		
4.3 Сложные полупроводниковые соединения	2			1		
<b>Раздел 5 Магнитные материалы</b>	6			4		
5.1 Физические процессы в магнитных материалах	2			2		
5.2 Магнитомягкие и магнитотвердые материалы	2			1		
5.3 Магнитные материалы специального назначения	2			1		
Итого	80	12	8	76	12	8



# Теоретический материал по темам учебной дисциплины

## Введение

«Электротехнические материалы» или «Материаловедение» является общетехнической дисциплиной. Можно образно сказать, что «Материаловедение», «Инженерная графика» и «Техническая механика» – это три кита, на которых базируются специальные дисциплины, такие, например, как «Электрические машины», «Электрический привод», «Электрические измерения» и др.

**Материаловедение** прикладная наука, изучающая связь между строением и свойствами материалов, а также их изменения при внешних воздействиях (тепловых, механических и т.д.) Теоретической основой материаловедения являются соответствующие разделы физики и химии, однако наука о материалах развивается в основном экспериментальным путем.

**Строение материалов** характеризует их **структура** – совокупность устойчивых связей материала, обеспечивающих его целостность и сохранение основных свойств при внешних и внутренних изменениях.

**Свойство** – категория, которая отражает различие или общность материалов и обнаруживается при их сравнении.

Одним из разделов материаловедения является **металловедение**, которое изучает строение и свойства различных металлов и их сплавов. Первый раздел, который мы будем изучать называется «Основы металловедения» на него отводится 10 (14 для микроэлектроники) часов. В этом разделе мы будем, в основном, изучать конструкционные и инструментальные материалы (по плану перечислить темы). Второй, третий, четвертый и пятый раздел нашего курса посвящены материалам специального назначения, к которым и относятся электротехнические материалы.

**Электротехническими** называют материалы, которые характеризуются определенными свойствами по отношению к электрическому и магнитному полю, и используемые с учетом этих свойств. Так, основные части электрических машин, аппаратов и устройств выполняются из специальных электротехнических материалов, которые обладают помимо свойств обычных конструкционных материалов еще особыми свойствами.

Например, электроизоляционный лак, которым пропитаны обмотки электрической машины, и электротехническая сталь из которой изготовлен сердечник машины, относятся к электротехническим материалам. А вот лак, которым покрыт корпус машины, и сталь, из которой изготовлен вал машины, не являются электротехническими материалами. Действительно, электроизоляционный лак должен обладать хорошей пропитывающей способностью, т.е. его частицы должны глубоко проникать в поры и капилляры обмотки, чтобы создать монолитную изоляцию обмоток электрической машины. Кроме того, пленки этого лака должны иметь хорошие электроизоляционные свойства, чтобы надежно изолировать витки обмотки друг от друга и от корпуса машины. А для отделочного лака, которым покрыт корпус машины, этих свойств не требуется.

Аналогично электротехническая сталь должна обладать большой магнитной проницаемостью, чтобы обеспечить в сердечнике машины большую магнитную индукцию. Кроме того, потери энергии в электротехнической стали должны быть наименьшими. От конструкционной стали, из которой изготовлен вал машины, таких свойств не требуется, она должна обладать высокой механической прочностью. Из этих примеров следует, что электротехнические материалы являются специальными, которые кроме общих свойств, должны обладать определенными электрическими и магнитными свойствами.

По главному своему свойству электропроводности, т.е. способности материалов проводить электрический ток, все электротехнические материалы делят на три группы:

1) **Проводниковые** материалы (им посвящен раздел 2 дисциплины), к которым относятся чистые металлы и их сплавы. Из них изготавливают токоведущие части электрических машин и аппаратов, они должны хорошо проводить электрический ток, т.е. обладать малым электрическим сопротивлением;

2) **Электроизоляционные** материалы (**диэлектрики**) Их будем изучать в разделе 3. Они должны обладать большим электрическим сопротивлением, используют для изоляции токоведущих частей друг от друга и от заземленных частей электрооборудования;

3) **Полупроводники** (раздел 4) по своей способности проводить электрический ток занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. Их применяют для изготовления выпрямителей, усилителей, фотоэлементов и других полупроводниковых приборов.

Кроме того среди электротехнических материалов есть группа материалов, которые обладают способностью намагничиваться. Это **магнитные** материалы (раздел 5) применяемые для создания среды с малым магнитным сопротивлением. Различают:

1) **Магнитомягкие**, из них изготавливают магнитопроводы, сердечники, которые служат для концентрации магнитной энергии;

2) **Магнитотвердые**, из них изготавливают различного рода постоянные магниты.

[НАЗАД](#)

[Самоконтроль](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

## Тема 1.1 Основные сведения о металлах и сплавах

### Кристаллическое строение металлов. Классификация сплавов и их свойства

Вещества в твердом состоянии имеют строение: *кристаллическое* или *аморфное*.

В аморфных веществах атомы расположены беспорядочно. При нагреве они размягчаются и переходят в жидкое состояние при широком интервале температур.

Все металлы и их сплавы в твердом состоянии имеют *кристаллическое строение*, которое характеризуется закономерным (упорядоченным) расположением атомов в пространстве. Каждый атом в кристалле имеет определенное положение. Если соединить атомы воображаемыми линиями в трех взаимно-перпендикулярных направлениях, то получится *пространственная кристаллическая решетка*. Находясь в узлах кристаллической решетки, атомы (или положительно заряженные ионы) совершают колебания относительно своего среднего положения. Со своими ближайшими соседями атомы связаны при помощи валентных электронов. Эти электроны называют *коллективизированными*. Они могут свободно перемещаться, образуя *электронный газ*. Между положительно заряженными ионами и электронным газом, возникают силы электростатического притяжения. Такое притяжение характеризует металлический тип связи, который удерживает отдельные атомы в металле в строго закономерном порядке.

Имеется относительно небольшое количество типов (всего 14) кристаллических решеток, свойственных элементам периодической системы.

Наиболее типичными для металлов являются кристаллические решетки следующих типов:

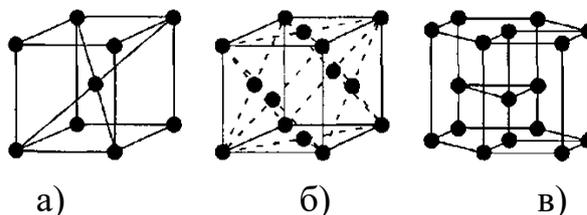


Рисунок 1.1 – Типы кристаллических решеток

1) *Объемно-центрированная кубическая (ОЦК)* – в ней восемь атомов располагаются в вершинах куба и один в центре куба (рисунок 1.1, а). Размер  $a$ , равный длине грани куба, называется параметром решетки, для различных металлов  $a=0,2...0,7$  нм (нанометр;  $1\text{ нм}=10^{-9}\text{ м}$ ). ОЦК решетку имеют железо при комнатной температуре, ванадий, вольфрам, молибден, хром и др.

2) *Гранецентрированная кубическая (ГЦК)* – в ней атомы расположены в вершинах куба и в центрах шести граней (рисунок 1.1, б). В центре куба атома

нет; там свободное пространство. ГЦК решетку имеют алюминий, медь, никель, свинец, серебро и др.

3) **Гексагональная плотноупакованная (ГПУ)** представляет собой шестигранную призму, в основании которой расположены правильные шестиугольники (рисунок 1.1, в). Атомы расположены в вершинах и центрах этих шестиугольников. Еще три атома расположены в вершинах правильного треугольника, находящегося посередине между основаниями. Для ГПУ решетки характерны параметры  $a$  (равен длине грани правильного шестиугольника) и  $c$  (равен высоте призмы). Если  $c/a = 1,633$ , то решетка имеет наибольшую плотность упаковки атомов. ГПУ решетку имеют магний, цинк, титан, цирконий и другие металлы.

Строение металлов, когда атомы образуют геометрически правильную кристаллическую структуру, может быть только в идеальном случае. Исследования показывают, что в строении реального кристалла металла всегда имеются дефекты (точечные, линейные, поверхностные и объемные), от которых зависят физико-механические свойства металлов. Число дефектов возрастает с повышением температуры.

Один и тот же металл при различных температурах и давлениях может иметь разные кристаллические решетки. Такое свойство металлов называют **аллотропией** или **полиморфизмом**.

Ряд элементов: кобальт, титан, марганец, калий, литий, железо и др. имеют две и более модификации решеток. Так, **железо** имеет **две аллотропические формы**:

1)  **$\alpha$ -железо ( $Fe_\alpha$ )** с решеткой ОЦК при температуре ниже  $911^\circ\text{C}$  и от  $1392$  до  $1539^\circ\text{C}$ .

Высокотемпературную модификацию  $\alpha$ -железа иногда называют  **$\delta$ -железо ( $Fe_\delta$ )**.

Немагнитное  $\alpha$ -железо называют иногда  **$\beta$ -железо**.

2)  **$\gamma$ -железо ( $Fe_\gamma$ )** с решеткой ГЦК при температуре  $911-1392^\circ\text{C}$ .

Структура, имеющая ту или иную решетку, называется аллотропической формой или модификацией, которые обозначаются  $\alpha, \beta, \gamma$  и т.д.

Температура, при которой происходит переход металла из одной модификации в другую, называется **температурой аллотропического** или **полиморфного превращения**.

**Основные особенности металлов как кристаллических тел:**

1) основной особенностью является **анизотропия** свойств кристаллов, т. е. различие свойств кристаллов в разных направлениях. Это объясняется неодинаковой плотностью атомов в разных плоскостях кристаллической решетки, т. к. расстояние между атомами в решетках в разных направлениях неодинаково. В отличие от кристаллических тел аморфные тела – **изотропны**, т. е. их свойства

не зависят от направления. (Следует заметить, что технические металлы являются поликристаллическими веществами, состоящими из множества мелких различно ориентированных относительно друг друга кристаллов, и их свойства во всех направлениях усредняются, поэтому можно считать металлы и сплавы по свойствам изотропными);

2) *наличие у металлов плоскостей скольжения*, по которым происходит сдвиг или отрыв (разрушение) под действием внешних сил. У аморфных тел смещение слоев материала происходит не по плоскостям, а беспорядочно, поэтому излом имеет неправильную форму.

3) у металлов переход из твердого состояния в жидкое и, наоборот происходит при *определенной температуре* (температура плавления и кристаллизации соответственно). Аморфные тела переходят в жидкое состояние постепенно, не имея определенной температуры плавления.

**Кристаллизацией металлов** называется образование кристаллов в металлах и сплавах при переходе металла из жидкого состояния в твёрдое (*первичная кристаллизация*), а также перекристаллизация в твердом состоянии из одной модификации в другую при их охлаждении (*вторичная кристаллизация*). Впервые процесс кристаллизации был исследован Черновым. Он установил, что этот процесс состоит из двух стадий.

**Первая стадия** заключается в образовании мельчайших центров кристаллизации.

**Вторая стадия** – рост кристаллов вокруг этих центров. Причиной начала кристаллизации является неоднородность температур в разных участках ещё не застывшего металла. *Центром кристаллизации* могут служить *металлические и неметаллические включения*. *Переход металла из жидкого состояния в твёрдое сопровождается выделением скрытой теплоты кристаллизации. Поэтому, несмотря на охлаждение, температура металла остаётся неизменной до окончания процесса кристаллизации.* Вначале кристаллы растут свободно, т. к. со всех сторон их окружает жидкий металл. Далее кристаллы начинают присоединяться друг к другу, и расти только в направлении, где ещё имеется жидкий металл. Это приводит к тому, что кристаллы, несмотря на их правильное внутреннее строение, имеют неправильную внешнюю форму. Кристаллы неправильной формы называются *зёрнами (кристаллитами или гранулами)*. От величины зёрен зависят свойства металла. Металлы и сплавы с мелкозернистым строением имеют более высокую прочность и лучшую сопротивляемость ударным нагрузкам. Для измельчения зерна металла применяют **модифицирование металлов** – это введение в металлические расплавы *модификаторов* – веществ, небольшое количество которых (не более 10-й доли %) вызывает формирование мелкозернистой структуры из-за большого количества центров кристаллизаций.

Кристаллизацию металлов и сплавов исследуют с помощью термического анализа, заключающегося в регистрации температуры системы через равные промежутки времени, по полученным данным строят **кривые охлаждения** (рисунок 1.2, а) или **кривые нагрева** (рисунок 1.2, б). На кривой охлаждения верхний участок показывает понижение температуры жидкого металла, горизонтальный участок *ав* соответствует процессу затвердевания жидкого металла, нижний участок – охлаждению закристаллизовавшегося металла. С увеличением скорости охлаждения расплава кристаллизация начинается при более низких температурах.

Чтобы вызвать в расплаве выделение твердой фазы, необходимо некоторое переохлаждение  $t_{пх}$  от равновесной температуры  $t_p$ , при которой жидкая и твердая фазы являются термодинамически устойчивыми. Штриховой линией показана кривая охлаждения аморфных веществ.

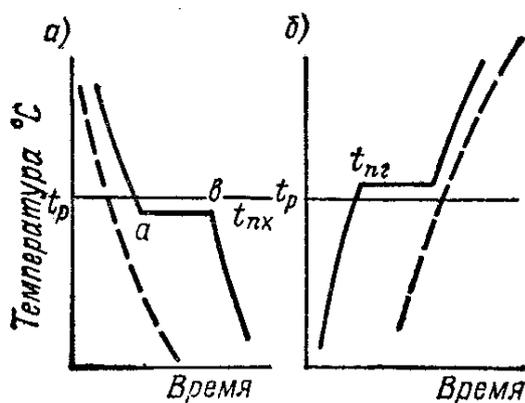


Рисунок 1.2 – Кривые охлаждения и нагрева железа

**Свойства металлов** определяются их природой и строением; различают:

а) **физические свойства** – цвет, плотность, температура плавления, электро- и теплопроводность, магнитная проницаемость, теплоемкость, расширение и сжатие при нагревании, охлаждении и при фазовых превращениях

б) **химические свойства**: способность сопротивляться различным химическим воздействиям, в частности коррозионному воздействию разных активных сред (атмосферы, воды, кислот).

в) **технологические свойства**: ковкость, свариваемость, литейные свойства, прокаливаемость, жидкотекучесть, обрабатываемость резанием.

г) **эксплуатационные свойства**: многие изделия кроме общей прочности должны обладать еще особыми свойствами, характерными для работы данного изделия, например; материалы с особыми упругими свойствами для изготовления силовых пружин, сплавы с малым или заданным коэффициентом теплового расширения для изготовления различных приборов и т. д.

д) **механические свойства** характеризуют работоспособность металла, его способность находиться под нагрузкой, не разрушаясь и вместе с тем хорошо деформироваться (т.е. изменять форму и размеры). К ним относятся:

1) **Прочность** — способность материала сопротивляться действию внеш-

них сил, не разрушаясь и не получая остаточных деформаций.

Предел прочности (или временное сопротивление) при испытаниях на растяжение:

$$\sigma_B = F_{max} / A_0, \text{ Н/мм}^2 \text{ (МПа)},$$

где  $F_{max}$  - максимальное усилие, предшествующее разрушению образца в Н,  $A_0$  – площадь сечения образца до испытания:  $A_0 = \pi d^2 / 4$ ,

где  $\pi = 3,14$ ,  $d$  – диаметр образца до испытания (мм).

2) **Упругость** – свойство материала восстанавливать свою форму после прекращения действия внешних сил.

3) **Пластичность** — способность материала изменять свои формы и размеры без разрушения и сохранять новую форму после прекращения действия сил. Дает возможность обрабатывать металлы давлением (ковать, прокатывать, волочить). Пластичность характеризуют:

– **Относительное удлинение** – отношение абсолютного удлинения образца к его первоначальной длине, выраженное в процентах:

$$\delta = [(l_1 - l_0) / l_0] \cdot 100\%,$$

где  $l_0$  - расчётная длина образца до испытания (мм),

$l_1$  – длина образца после испытания (мм);

- **Относительное сужение** – отношение абсолютного сужения площади поперечного сечения образца после разрыва к его, выраженное в процентах:

$$\psi = [(A_0 - A_{ш}) / A_0] \cdot 100\%,$$

где  $A_{ш}$  – площадь поперечного сечения образца в месте разрыва (мм<sup>2</sup>).

Перечисленные свойства материалов определяются при испытании образцов на растяжение. Разрывные машины имеют два основных механизма: нагружающий и силоизмерительный и снабжены устройством, записывающим диаграмму растяжения в координатах  $F$  (растягивающее усилие),  $\Delta l$  (абсолютная деформация). Растягивающее усилие создает напряжение в испытуемом образце и вызывает его удлинение, когда напряжение превзойдет прочность образца, разрывается.

Участок ОА (прямая линия) показывает, что до точки А удлинение образца пропорционально нагрузке (**предел пропорциональности**), что соответствует закону Гука:  $\sigma = E\varepsilon$ , где  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  - относительная продольная деформация;  $E$  – модуль упругости, характеризующий жесткость металла, его сопротивление деформации.

До точки А<sub>1</sub> деформации упругие (**предел упругости**). За пределом упругости наряду с упругими  $\varepsilon_{el}$  возникают остаточные деформации  $\varepsilon_r$ .

Точкой В на диаграмме отмечено начало горизонтальной площадки, которая показывает, что образец удлиняется без увеличения нагрузки: металл как бы течет. Напряжение, при котором происходит рост деформации без увеличения нагрузки, называется **пределом текучести**:  $\sigma_T = \frac{F_B}{A_0}$ , где  $F_B$  – нагрузка в

точке В. Текучесть характерна для низкоуглеродистой стали, некоторых марок латуни. Стали с повышенным содержанием углерода и другие металлы не име-

ют площадок текучести на диаграмме растяжения. Для таких металлов определяют условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$  (см. рис. Диаграмма растяжения).

Точка С соответствует наибольшей нагрузке, которую может выдержать образец (*временное сопротивление или предел прочности*). Здесь начинается процесс образования шейки и далее идет испытание образца в районе шейки. В точке К происходит разрыв.

4) *Хрупкость* - способность материала разрушаться при приложении резкого динамического усилия. У хрупких материалов (чугун, керамика, фарфор, хром, марганец, кобальт, вольфрам) явление пластической деформации не наблюдается, т.е.  $\delta$  и  $\psi$  близки к нулю.

5) *Твердость* — способность материала сопротивляться внедрению в него индентора в виде шарика, конуса или пирамиды, изготовленного из более твердого материала.

В настоящее время существует более 30 методов измерения твердости, но наиболее широкое применение нашли методы Бринелля, Роквелла, Виккерса.

По *методу Бринелля* стальной закаленный шарик диаметром  $D$  (10; 5; 2,5; 2 или 1 мм) вдавливают в испытуемый образец силой  $F$ . В результате на поверхности образца остается отпечаток в форме шарового сегмента диаметром  $d$ . Величина отпечатка будет тем, меньше, чем тверже металл. Твердость по Бринеллю обозначают HB, размерность МПа или Н/мм<sup>2</sup>, вычисляют по формуле:

$$HB = \frac{F}{A},$$

где  $F$  - нагрузка на шарик, Н;  $A$  - площадь поверхности отпечатка в мм<sup>2</sup>.

По *методу Роквелла* твердость определяют при вдавливании алмазного конуса с углом 120° или стального шарика диаметром  $D = 1,588$  мм (1/16 дюйма). Стальной шарик применяют для нетвердых металлов (до HB220).

Циферблат прибора имеет две шкалы: красную  $B$  — для испытаний шариком и черную  $C$  - для испытания алмазным конусом. Твердость по Роквеллу является величиной условной, характеризующей разность глубин отпечатков. Одно деление шкалы прибора соответствует 2 мкм ( 0,002 мм) глубины проникновения алмазного конуса или шарика в образец. Число твердости по Роквеллу обозначается HR с добавлением индекса шкалы, по которой проводилось испытание, например HRB или HRC. Для испытания очень сверхтвердых материалов применяют алмазный конус при нагрузке 588 Н (60 кгс), отсчеты производят по шкале  $C$ , число твердости обозначают HRA.

*Метод Виккерса* позволяет измерять твердость как мягких, так и очень твердых металлов и сплавов (например, после химико-термической обработки). По этому методу в образец вдавливается четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине 136°. Нагрузка - от 9.8 до 988 Н. Замер отпечатка по диагонали производится с помощью микроскопа, находящегося при приборе. Число твердости обозначают HV:

$$HV = 1,854F/d^2, \text{ МПа,}$$

где  $F$  — нагрузка, Н;  $d$ —среднее арифметическое значение длины обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

б) **Усталость** — это процесс постепенного накопления повреждений, приводящих к изменению свойств, образованию трещин и разрушению образца или изделия под действием повторяющихся знакопеременных (циклических) нагрузок.

Образцы испытывают длительное время (десятки и сотни часов) многократным приложением нагрузок, изменяющихся по знаку и направлению. По результатам испытаний определяют усталостную долговечность — число циклов нагружения, которое выдерживает образец до разрушения при определенном механическом напряжении.

7) **Вязкость** — способность материала поглощать механическую энергию и при этом проявлять значительную пластичность вплоть до разрушения. Вязкие металлы применяют для деталей, которые при работе подвергаются ударной и динамической (быстрвозрастающей) нагрузке.

8) **Ударная вязкость** – способность материала сопротивляться ударным нагрузкам.

**Технологические испытания (пробы).** Эти испытания определяют возможность производить те или иные технологические операции с данным металлом или применять его в тех или иных условиях. Например, испытание (проба) на выдавливание служит для определения способности листового металла к холодной штамповке и вытяжке; испытание на перегиб определяет способность металла выдерживать повторные перегибы и применяется при оценке качества полосового и листового материала, а также проволоки и прутков.

**Металлические сплавы** – вещества, состоящие из двух и более элементов. Элементы, из которых образован сплав, называют **компонентами**.

В жидком состоянии компоненты сплава в большинстве случаев полностью растворимы друг в друге и представляют собой жидкий раствор, в котором атомы различных элементов равномерно перемешаны друг с другом. При кристаллизации компоненты сплава вступают во взаимодействие, от характера которого зависит их строение. Наиболее часто встречающиеся:

1) **Твердый раствор** – сплав, состоящий из двух или более компонентов, один из которых, сохраняя кристаллическую решетку, является растворителем, а другой (или другие) растворяется в кристаллической решетке растворителя, не изменяя ее типа. В отличие от жидкого раствора в твердом растворе атомы расположены с известной, геометрически правильной закономерностью в виде кристаллических решеток. Бывают твердые растворы замещения (см. рисунок 1.3, а) и внедрения (см. рисунок 1.3,б). Так, например, железо образует:

- растворы замещения с большинством металлов;
- растворы внедрения с углеродом (феррит, аустенит), водородом, азотом.

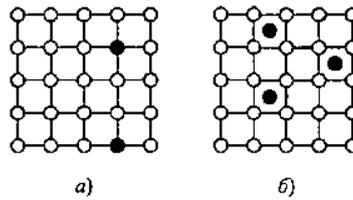


Рисунок 1.3 – Твердые растворы замещения и внедрения.

Растворимость в твердом состоянии может быть *неограниченной* и *ограниченной*. При неограниченной растворимости возможна любая концентрация (от 0 до 100%) растворенного вещества (при концентрации более 50% растворенное вещество становится растворителем).

Для образования твердых растворов замещения с неограниченной растворимостью необходимо соблюдение следующих условий: изоморфность (однотипность) кристаллических решеток сплавляемых компонентов; близость атомных радиусов компонентов, которые не должны отличаться больше чем на 8-13%; близость физико-химических свойств компонентов. Если два компонента сплава не отвечают перечисленным выше условиям, то они могут ограниченно растворяться друг в друге. В реальных сплавах чаще наблюдаются твердые растворы с ограниченной растворимостью.

2) *Химическое соединение* - сплав, компоненты которого вступают в химическое взаимодействие и образуют вещество с постоянным соотношением чисел атомов компонентов ( $\text{Fe}_3\text{C}$  - цементит). Химическое соединение имеет кристаллическую решетку, отличающуюся от типов решеток сплавляемых компонентов. Химические соединения обычно образуются между компонентами, имеющими различия в электронном строении атомов.

3) *Механическая смесь* - это сплав, компоненты которого не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием химического соединения, т.е. это сплав, в котором кристаллы одного компонента расположены между кристаллами другого. Примерами механических смесей являются ледебурит, перлит)

*Системой* называют совокупность фаз, находящихся в равновесии при определенных внешних условиях (температура, давление). Система может быть простой, если она состоит из одного элемента, и сложной — из нескольких элементов.

*Фазой* называется однородная по химическому составу и кристаллическому строению часть системы, отделенная от других частей поверхностью раздела.

Фазами могут быть металлы и неметаллы, жидкие и твердые растворы, химические соединения. Однофазной системой является, например, однородная жидкость, двухфазной — механическая смесь кристаллов двух металлов или металла и неметалла.

*Компонентами* называются вещества, образующие систему. Компонентами могут быть элементы (металлы и неметаллы) или устойчивые химические соединения.

## Диаграммы состояния сплавов

Процесс кристаллизации металлических сплавов и связанные с ним закономерности их строения отражены в виде *диаграмм состояния*, которые представляют собой графическое изображение фазового состояния сплавов в зависимости от *температуры* (ось ординат) и *концентрации компонентов* (ось абсцисс) в условиях равновесия.

Для построения диаграммы состояния используют кривые охлаждения чистых компонентов, образующих систему, и их сплавов различного состава, полученные методом термического анализа. По кривым охлаждения определяют температуру фазовых превращений — *критические точки*.

На кривых охлаждения чистых металлов, которые не претерпевают аллотропических превращений, имеется только по одной критической точке, т.к. кристаллизация чистых металлов протекает при постоянной температуре.

Кривые охлаждения сплавов имеют две критические температуры: верхнюю 1 - *начало* затвердевания сплава; нижнюю 2 - *конец* затвердевания сплава, т.е. процесс кристаллизации сплавов протекает иначе: сначала в интервале температур между точками 1-2, а затем при постоянной температуре 2. Ниже этой температуры происходит охлаждение уже твердого слитка. Первая критическая точка 1, отвечающая началу кристаллизации, называется точкой *ликвидус*, а вторая 2, отвечающая концу кристаллизации, — точкой *солидус*.

Исключением является сплав, называемый *эвтектикой*, который затвердевает при постоянной температуре, как и чистые металлы. Если таких сплавов для данных компонентов два, то один из них называют *эвтектоидом*.

*Эвтектикой* (*эвтектоидом*) называется механическая смесь двух (или более) видов кристаллов, одновременно выделяющихся из жидкого сплава при минимальной температуре (в переводе с греческого «эвтектика» – легко плавящийся).

Если полученные критические температуры нанести на вертикальные линии для чистых металлов и выбранных составов сплавов и соединить одной линией точки ликвидус, а другой — солидус, то получим диаграмму состояния.

Диаграммы состояния сплавов позволяют без проведения опытов определить температуры, при которых происходит плавление, затвердевание сплавов; выяснить, будет ли сплав однородным, каковы его жидкотекучесть, пористость, а также выбрать необходимые виды термической обработки сплава. Пользуясь диаграммами состояния в зависимости от химического состава сплава, устанавливают температурный интервалковки или горячей объемной штамповки сплава, температуру начала и конца заливки металла в литейные формы, температуру выбивки отливок из литейных форм и другие технологические параметры, получают информацию о свойствах сплавов.

В технике наиболее широко применяют сплавы железа с углеродом. В зависимости от содержания углерода сплавы делятся на две большие группы:

- 1) *стали*, содержащие до 2,14 % С,
- 2) *чугуны*, содержащие более 2,14 % С.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

## Тема 1.2 Сплавы железа с углеродом.

### 1.2.1 Углеродистые стали, чугуны. Классификация, маркировка, применение

#### Классификация сталей:

– по химическому составу стали бывают:

а) *Углеродистые стали*:

- 1) низкоуглеродистые (до 0,25% углерода);
- 2) среднеуглеродистые (0,25 - 0,6% углерода);
- 3) высокоуглеродистые (более 0,6% углерода).

б) *Легированные стали*:

- 1) низколегированные (до 2,5% легирующих элементов);
- 2) среднелегированные (2,5 - 10% легирующих элементов);
- 3) высоколегированные (более 10% легирующих элементов).

– по назначению:

- 1) конструкционные;
- 2) инструментальные;
- 3) специального назначения с особыми свойствами;

– по качеству:

- 1) обыкновенного качества;
- 2) качественные;
- 3) высококачественные;
- 4) особо высококачественные.

– по степени раскисления:

- 1) сп – спокойная; раскислена марганцем (Mn), кремнием (Si) и алюминием (Al);
- 2) пс – полуспокойная, раскислена марганцем (Mn) и алюминием (Al);
- 3) кп – кипящая, раскислена марганцем (Mn).

Разливка малораскисленной стали сопровождается бурным выделением пузырьков окиси углерода, напоминающим процесс кипения, поэтому такая сталь называется кипящей. При менее бурном процессе раскисления сталь называют полуспокойной или спокойной. Кипящая сталь уступает по качеству спокойной, так как хуже раскислена и содержит больше кислорода.

В *углеродистой* стали кроме основной примеси - углерода всегда присутствуют постоянные примеси:

1) *кремний* Si (0,1 ...0,37%) способствует устранению пузырей в слитке, повышает сопротивление разрыву, твердость и упругие свойства стали.

2) *марганец* Mn (0,2...0,8%) повышает твердость стали и сопротивление разрыву, уменьшает относительное удлинение и ухудшает свариваемость стали;

3) *сера* S (0,03...0,06%) ухудшает прочность, пластичность и коррозионную стойкость, повышает истираемость и изнашиваемость изделий;

4) *фосфор* P (0,03...0,07%) вызывает в стали хрупкость при обычных температурах и появление трещин при ударной деформации, ухудшает механические свойства за счет образования крупнозернистой структуры. *Сера* и *фосфор*

являются вредными примесями.

С увеличением количества углерода в стали повышается ее прочность и снижается пластичность.

### **Углеродистые конструкционные стали:**

**1) Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества** (ГОСТ 380-94. Сталь углеродистая обыкновенного качества) содержат 0,04-0,06% серы, 0,04-0,07% фосфора, углерода 0,06- 0,49%.

Изготавливают марок: Ст0 ...Ст6, *цифра указывает порядковый номер марки*, а не среднее содержание углерода, хотя с увеличением номера количество углерода возрастает. Г - повышенное содержание марганца; **кп, пс, сп** – степень раскисления.

**Например: Ст5Гпс** - сталь углеродистая конструкционная обыкновенного качества; 5 – условный номер марки; Г - повышенное содержание марганца, пс – степень раскисления стали – полуспокойная,

**Ст1кп** – сталь углеродистая конструкционная обыкновенного качества; 1 – условный номер марки; кп – степень раскисления стали - кипящая,

**Ст6сп** - сталь углеродистая конструкционная обыкновенного качества, 6 – условный номер марки, сп – степень раскисления стали – спокойная.

Применяют для изготовления слабонагруженных деталей машин и элементов конструкций. Из сталей марки Ст3кп, Ст3сп - фасонные профили для ободов колес автомобилей; Ст1, Ст2, Ст3 всех степеней раскисления – заклепки, Ст5пс, Ст5сп – детали клепанных конструкций, крепежные детали, ручки, тяги, рычаги, пальцы и др. детали, работающие от 0 до 425°С.

**2) Углеродистые конструкционные качественные стали** (ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали) содержат не более 0,04 % серы и 0,035% фосфора. Изготавливают марок: сталь 05, 08, 10, 15, 20, ..., 60.

*Цифры – средняя массовая доля углерода в сотых долях %* и далее могут следовать буквы **кп** и **пс** (степень раскисления). Если эти буквы отсутствуют, то это означает, что сталь является спокойной; **Р** - сталь содержит бор.

**Например: Сталь 45** – углеродистая качественная конструкционная сталь со средней массовой долей углерода 0,45%, спокойная;

**Сталь 05кп** - углеродистая качественная конструкционная сталь со средней массовой долей углерода 0,05%, кипящая.

Углеродистые качественные стали широко используются в машиностроении и приборостроении. В зависимости от содержания углерода и термической обработки обладают различными свойствами. Основным недостатком – небольшая прокаливаемость и склонность к перегреву.

Сталь марок 35...55 отличается высокой прочностью (550 МПа), а после термического улучшения у нее появляется и хороший запас пластичности (20%). Из них изготавливают валы, шатуны, зубчатые колеса, роторы и другие детали, испытывающие циклические нагрузки. Из сталей 05...15 – детали, штампуемые в холодном состоянии, с глубокой вытяжкой из листа (кузова автомобилей). Из сталей 45..60, упрочняемых поверхностной закалкой при индукционном нагреве (шейки коленчатого вала, кулачки распределительного ва-

ла автомобиля).

**3) Автоматные конструкционные стали** (ГОСТ 1414-75. Прокат из конструкционной стали высокой обрабатываемости резанием) отличаются хорошей обрабатываемостью резанием, которая достигается за счет повышения содержания серы (до 0,3%), фосфора (до 0,15%), а также свинца (0,15...0,3%) или его аналога селена (до 0,1%).

Сера и фосфор повышают ломкость стружки, свинец и селен образуют в структуре металлические включения, которые создают в очаге резания внутреннюю смазку, из-за которой легче отделяется стружка, и поверхность детали получается гладкой. Ее применяют для изготовления болтов, гаек, винтов, втулок на станках-автоматах в массовом производстве.

**А** – сталь автоматная сернистая; **АС** – автоматная свинцовосодержащая; **Е** – селен, **Г** – марганец; **Х** – хром; **Н** – никель; **М** – молибден. Цифры после букв **А** и **АС** *средняя массовая доля углерода в сотых долях %*. Цифры после букв, обозначающих легирующие элементы, показывают *примерную массовую долю* данного элемента в *целых единицах %*; *отсутствие цифры* после буквы означает, что в марке содержится **до 1,5%** данного элемента.

Марки углеродистых автоматных сталей: **А11, А12, А20, А30, АС35, А40Г, АС14, АС40** и др. Если в марке стали присутствуют другие буквы, то автоматная сталь является легированной (например, **А40ХЕ; АС30ХМ**).

**Например: А12** – автоматная сернистая углеродистая конструкционная сталь со средней массовой долей углерода 0,12 %;

**АС40** – автоматная свинцовосодержащая углеродистая конструкционная сталь со средней массовой долей углерода 0,4 %;

**А40ХЕ** – автоматная сернистая легированная конструкционная сталь со средней массовой долей углерода 0,4%, хрома до 1,5% и селена до 1,5%.

**Углеродистые инструментальные стали** (ГОСТ 1435-99 Прутки, полосы из инструментальной нелегированной стали) изготавливают марок: **У7, У8, У8Г, У9..., У13, У7А, У8ГА, У9А, ... У13А**.

**У** – углеродистая, а далее идут цифры, указывающие *среднюю массовую долю* углерода в *десятых долях процента* (а не в сотых долях, как у качественных сталей). **Г** – повышенное содержание марганца; **А** в конце марки – сталь высококачественная (т.е. более чистая по содержанию серы и фосфора, а также др. вредных примесей).

**Например: У8ГА** – углеродистая инструментальная высококачественная сталь, с повышенной массовой долей марганца и со средней массовой долей углерода 0,8 %.

**У13** – углеродистая инструментальная сталь, со средней массовой долей углерода 1,3 %.

Углеродистые инструментальные стали обладают высокой твердостью, прочностью, хорошо шлифуются при изготовлении инструмента, дешевы и не дефицитны.

Основные недостатки углеродистых сталей их низкая теплостойкость и небольшая прокаливаемость до 5...10 мм. При нагреве выше 200°C их твердость резко снижается. Инструменты из этих сталей могут работать лишь при

небольших скоростях резания.

Из сталей марок У7 (с закалкой 840...900°C в масло + отпуск 240-270°C) изготавливают инструмент для обработки дерева, пневмозубила; из сталей У10...У13 (с закалкой 880°C в воду + отпуск 160...240°C) - штампы высадочные, напильники, метчики для резания мягких материалов; из сталей У7...У10 – проволоку диаметром 0,15...0,6 мм для холодной навивки пружин с последующим отпуском при 250°C.

**Чугун** - железоуглеродистый сплав содержащий углерода свыше 2,14%.

Постоянные примеси содержатся в следующих пределах:

1) *марганец* – до 1,5%, препятствует графитизации чугуна, нейтрализует вредное влияние серы (если Mn в 5-7 раз больше S) . Увеличение его содержания до 0,8-1,0% приводит к повышению механических свойств чугуна (в отливках с тонкими стенками).

2) *кремний* – до 4%, кремний также как и углерод влияют на устойчивость цементита. С ростом их содержания цементит распадается с образованием графита.

3) *фосфор* – до 1,0%, повышает жидкотекучесть и износостойкость, но ухудшает обрабатываемость чугуна.

4) *сера* – до 0,15%, вредная примесь, образует при затвердевании сернистое железо FeS, ухудшает литейные свойства чугуна (снижает жидкотекучесть, увеличивает усадку и повышает склонность к образованию трещин). Сера приводит к понижению прочности чугуна при повышенных температурах (красноломкости).

### **Классификация чугунов:**

а) **по состоянию углерода** (химически связанный или структурно свободный):

1) *белый чугун* (такое название он получил по цвету излома) содержит углерод химически связанный с железом в виде цементита. Белый чугун обладает высокой твердостью, хрупкостью и плохой обрабатываемостью резанием. Основная масса белого чугуна идет на переделку в сталь и называется *переделным*. Его структура состоит из ледебурита и перлита;

2) *серый чугун* (серый излом) содержит углерод в свободном состоянии в виде графитовых включений. Серый чугун отличается от белого меньшей твердостью и хрупкостью;

3) *половинчатый (отбеленный) чугун* характеризуется одновременно наличием в его структуре цементита и графита. Цементит находится в поверхностном слое отливки (охлаждающемся с наибольшей скоростью), а графит — во внутренней полости (сердцевине), охлаждающейся с наименьшей скоростью. Такой чугун имеет высокую износостойкость, но плохо обрабатывается резанием;

б) **по форме графитовых включений** различают:

1) *серый чугун (СЧ) с пластинчатым графитом* получают добавлением в расплавленный металл графитизатора (кремния Si), способствующего распаду цементита белого чугуна и выделению углерода в свободном состоянии в

виде графита *пластинчатой* формы. Эта форма графита наиболее отрицательно сказывается на механических свойствах, так как пластинки графита играют роль концентраторов напряжений, облегчающих разрушение металлической основы чугунов.

СЧ самый дешёвый металлический материал. Качество чугунов контролируется не по составу, а по механическим свойствам. Серые чугуны обладают неплохой прочностью при сжатии, но очень низкой пластичностью. Для улучшения механических свойств серых чугунов их модифицируют, вводя силико-кальций, ферросилиций и другие модификаторы. Модифицированные серые чугуны применяются для изготовления корпусов редукторов, станин станков, деталей металлургического оборудования.

2) **высокопрочный (ВЧ) с шаровидным графитом.** Получают модифицированием серого чугуна магнием (Mg), церием (Ce), висмутом (Bi), что способствует выделению графита *шаровидной* формы, который в меньшей степени ослабляет металлическую основу чугуна. Это обеспечивает повышение прочности и пластичности.

ВЧ имеют хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием. Поэтому они могут использоваться для изготовления более ответственных деталей, например коленчатых валов автомобилей и судовых двигателей, зубчатых колес, крупных прокатных валков и др.

3) **ковкий (КЧ) с хлопьевидным графитом** получают из белого чугуна в процессе длительного графитизирующего отжига, при этом цементит белого чугуна распадается с образованием графита *хлопьевидной* формы (занимает промежуточное положение между пластинчатой и шаровидной формой графита по степени концентрации напряжений и влиянию на прочность).

Название «ковкий чугун» является условным и свидетельствует о лучших пластических свойствах чугуна (вязкий, мягкий) по сравнению с другими чугунами, поэтому КЧ применяются для изготовления тонкостенных отливок авто-тракторных деталей, корпусов вентиляей, рычагов, педалей и др.

4) **чугун с вермикулярным (червеобразным) графитом (ЧВГ)** Графит имеет червеобразную форму (округлые утолщенные короткие включения, большей частью не разветвленные). Такая форма определяет не только высокие механические свойства чугуна, но и более высокие электро- и теплопроводность по сравнению с ВЧ. Для получения в структуре вермикулярного графита СЧ модифицируют, как и при получении ВЧ, но в меньшем количестве.

ЧВГ сочетает в себе положительные свойства СЧ (высокие литейные свойства и теплопроводность) и ВЧ (высокие прочность и пластичность).

**Маркировка чугунов:** первые буквы означают тип чугуна: **СЧ** - серый чугун, **ВЧ** - высокопрочный чугун, **КЧ** – ковкий чугун, **ЧВГ** – чугун с вермикулярным графитом. За буквами следует одно или два числа, характеризующие механические свойства чугунов. *Первое число* указывает значение *временного сопротивления при растяжении*  $\sigma_s$  в МПа  $\cdot 10^{-1}$  (например, для ВЧ 50  $\sigma_s = 500$  МПа), а *второе* - значение *относительного удлинения*  $\delta$  в процентах.

**Например: КЧ 30-6** – ковкий чугун с минимальным значением времен-

ного сопротивления при растяжении  $\sigma_{\epsilon}=300$  МПа и относительным удлинением  $\delta=6\%$ .

**СЧ 24** – серый чугун с минимальным значением временного сопротивления при растяжении  $\sigma_{\epsilon}=240$  МПа.

**ЧВГ30** – чугун с вермикулярным графитом с минимальным значением временного сопротивления при растяжении  $\sigma_{\epsilon}=300$  МПа.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

## 1.2.2 Легированные стали. Назначение, применение, маркировка

**Легированными** называют стали, в состав которых вводятся один или несколько легирующих элементов для получения заданных свойств. Высокие эксплуатационные характеристики легированных сталей обнаруживаются только после закалки и отпуска.

### **Влияние легирующих элементов:**

1) **Хром** – увеличивает твердость, прочность и коррозионную стойкость, при содержании хрома более 13 % - сталь нержавеющая.

2) **Никель** — придаёт стали высокую прочность, не снижая пластичности и вязкости. Повышает прокаливаемость, устойчивость против коррозии.

3) **Кремний** – при его содержании более 0,4-0,6% повышаются упругие свойства стали. Улучшает прокаливаемость, повышает кислотоустойчивость. При содержании до 4% повышает коррозионные свойства стали. При содержании до 10% повышает жаростойкость.

4) **Марганец** - при содержании более 1% повышает твердость, износостойкость, стойкость при ударных нагрузках без снижения пластичности, увеличивает прокаливаемость. При содержании менее 1% улучшает свариваемость, ковкость.

5) **Вольфрам** – повышает твердость, прочность, позволяет получать сквозную прокаливаемость и осуществлять закалку на воздухе.

6) **Ванадий** – измельчает зерно, повышает твердость и прочность.

7) **Кобальт** – увеличивает ударную вязкость, жаростойкость.

8) **Молибден** – повышает упругость, прочность, красностойкость, коррозионную стойкость.

9) **Титан** – измельчает зерно, повышает прочность, коррозионную стойкость, противостоит межкристаллитной коррозии.

10) **Алюминий** - повышает жаростойкость и окалиностойкость.

11) **Медь** - повышает антикоррозионные свойства стали.

### **Классификация легированных сталей:**

#### **а) по химическому составу:**

1) низколегированные (до 2,5% легирующих элементов);

2) среднелегированные (2,5 – 10% легирующих элементов);

3) высоколегированные (более 10% легирующих элементов).

#### **б) по назначению:**

1) конструкционные;

2) инструментальные;

3) специального назначения с особыми свойствами;

#### **в) по качеству:**

качественные; высококачественные – А; особо высококачественные – Ш.

### **Маркировка легированных сталей:**

Для маркировки легированных сталей принята буквенно-цифровая система обозначения (ГОСТ 4543-71). Каждый легирующий элемент имеет следующие обозначения:

А – азот (N);	К – кобальт (Co);	Р – бор (В);
Б – ниобий (Nb);	Кд – кадмий (Cd)	Ш – магний (Mg);
В – вольфрам (W);	Л – бериллий (Be);	Т – титан (Ti);
Ви – висмут (Bi);	М – молибден (Mo);	У – углерод (С);
Г – марганец (Mn);	Н – никель (Ni);	Ф – ванадий (V);
Гл – галлий (Ga);	П – фосфор (P);	Х – хром (Cr);
Д – медь (Cu);	С – кремний (Si), или	Ц – церий (Zr);
Е – селен (Se);	свинец (Pb);	Ю – алюминий.

Если в начале марки легированной стали стоит *двухзначное число*, то это *средняя массовая доля* углерода в *сотых долях %*. Если *однозначное* – в *десятих долях %*. Если перед маркой *цифра не стоит*, то углерода содержится *около 1,5%*. *Цифры, следующие за буквами* указывают примерную *массовую долю легирующих элементов* в целых единицах %. Если в стали содержится *менее 1,5%* легирующих элементов, то *цифра после букв не ставится*.

**Например: 12ХН2** – легированная сталь со средней массовой долей углерода 0,12%, хрома до 1,5% и никеля 2%.

У некоторых легированных сталей в конце марки может стоять буква **А** (высококачественная) или **Ш** (особо высококачественная, в марках шарикоподшипниковых и быстрорежущих сталей – полученная электрошлаковым переплавом). Если буква **А** расположена в середине марки, то это указывает на содержание в ней азота, а если буква **А** расположена в начале марки, то это означает хорошую обрабатываемость на станках автоматах (автоматная сталь). Если маркировка начинается с буквы **Ш** (сталь шарикоподшипниковая), **Р** (сталь быстрорежущая).

**Особую маркировку имеют:**

1) **Шарикоподшипниковые стали** (ГОСТ801-78. Сталь подшипниковая) содержат около 1% углерода, хром указывается *в десятых долях %*. Буквы **С, Г** указывают, что сталь легирована кремнием (а не свинцом) и марганцем для улучшения прокаливаемости. Буквы **Ш** и **В** в конце марки указывают метод получения стали: **Ш** – электрошлаковый, **В** – вакуумно-дуговой переплавы.

**Например: ШХ 9** – шарикоподшипниковая легированная конструкционная сталь со средней массовой долей углерода 1 %, и средней массовой долей хрома 0,9%;

**ШХ15СГ** – шарикоподшипниковая конструкционная легированная сталь со средней массовой долей углерода 1 %, средней массовой долей хрома 1,5%, кремния до 1,5 % и марганца до 1,5 %.

2) **Быстрорежущая инструментальная сталь** (ГОСТ 19265. Прутки полосы из быстрорежущей стали) содержит около 1% углерода. Марки: **Р9, Р6М3, Р18Ф2, Р14Ф4, Р18К5Ф2**, и др.

*Цифры* после буквы **Р** указывают массовую долю вольфрама в % (до 18%). В обозначении марок не указывают массовую долю хрома (3- 4%) и молибдена (до 1%) ванадия – в сталях марок **Р18, Р6М5, Р9К5, Р6М5К5, Р9М4К8** и **Р9АМ9К5**. В конце марки **МП** – материал порошковый; **Ш** – полученная электрошлаковым переплавом.

**Например: Р6М3** – быстрорежущая инструментальная легированная сталь со средней массовой долей вольфрама 6%, молибдена 3%, углерода около 1%.

**Р9М5-Ш** – быстрорежущая инструментальная легированная сталь со средней массовой долей вольфрама 9%, молибдена 5%, углерода около 1%, полученная электрошлаковым переплавом.

### **Легированные конструкционные стали:**

а) **Шарикоподшипниковые стали:** для изготовления тел качения и подшипниковых колец небольших сечений используют стали **ШХ6, ШХ9, ШХ15**, а больших сечений **ШХ15СГ**.

б) **Рессорно-пружинные стали** содержат более 0,5% углерода и легированы марганцем, хромом, вольфрамом, ванадием, никелем. Марки: **55С2, 60С2А, 70С3А, 60С2ХА, 60СГА** и др. Обладают высоким пределом упругости и выносливости при достаточной пластичности. Изготавливают пружины и рессоры автомобилей, вагонов.

Для пружин малого сечения применяют углеродистые рессорно-пружинные стали: **сталь 65...85, 85А**.

в) **Стали специального назначения** (ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные):

#### **1) Нержавеющие:**

– **хромистые (12Х13, 20Х13, 40Х13)** содержат 0,1...0,45 % углерода и не менее 13% хрома;

– **хромистоникелевые (04Х18Н10, 12Х18Н10Т, 12Х21Н5Т)** содержат 0,1...0,45 % углерода, 18-21% хрома и 5-10% никеля.

#### **2) Жаростойкие стали.**

**Жаростойкость** – способность материалов сопротивляться газовой коррозии при высоких температурах (выше 550°C) в течение длительного времени. Основным способом повышения жаростойкости легирование сталей хромом, алюминием, кремнием, которые образуют на поверхности изделий прочные и тугоплавкие оксидные пленки.

Все **неражавеющие стали** являются и **жаростойкими**, т.к. содержат более 13 % хрома. Чем больше хрома, тем больше жаропрочность: **15Х5** (при температуре 700°C), **12Х17** (до 900°C), **15Х28** (1100-1150°C).

#### **3) Жаропрочные стали.**

**Жаропрочность** – способность материала сопротивляться пластичным деформациям и разрушению при высокой температуре. Легирующие элементы, повышающие жаропрочность: молибден, вольфрам, ванадий и в меньшей мере хром и никель. Стали марок: **12Х1МФ, 25Х2М1Ф** (рабочая температура 450-580°C) используют в котлостроении; **15Х12ВНМФ, 15Х11МФ, 11Х11Н2** предназначены для длительной эксплуатации при температуре до 600°C, их используют для изготовления деталей паровых турбин; **12Х18Н10Т, 45Х14Н14В2М, 10Х11Н20ТЗР** применяют для изготовления деталей, работающих при 500-700°C. Стали марок **Х6С, Х9С2, Х10С2М, Х13Н7С2** получили

название *сильхромы*, их применяют для изготовления клапанов двигателей, крепежных деталей моторов с рабочими температурами 600-900 °С.

4) *Износостойкие (высокомарганцевые) стали (110Г13)* используют для деталей работающих в условиях абразивного изнашивания и при больших нагрузках; плохо обрабатываются резанием. Изделия из них получают ковкой или литьем.

### **Инструментальные легированные стали**

а) *Быстрорежущая инструментальная* является основным материалом для большинства режущих инструментов. Важнейшие свойства сталей теплоустойчивость (600-650° С) в сочетании с высокой твердостью, износостойкостью и повышенным сопротивлением пластической деформации.

#### **б) Штамповые стали:**

1) *Штамповые стали холодного деформирования* должны обладать высокой поверхностной твердостью, прочностью, вязкостью для восприятия ударных нагрузок. Различают:

- стали с содержанием углерода 1% марок **X, X9, XГ, 9XC, X12M, X6BF, X12Ф** используют для малонагруженных инструментов;

- стали с пониженным содержанием углерода **6X3ФC, 6XC, 6XB2C; 7X3** используют при высоких динамических нагрузках;

- стали с повышенным содержанием хрома **X12, X12Ф1, X12M, X12BM** обладают повышенной прокаливаемостью (до 250 мм) и износостойкостью, используются для тяжело нагруженного штампового инструмента.

2) *Штамповые стали горячего деформирования* должны обладать жаропрочностью и хорошей теплопроводностью, чтоб отводить тепло от рабочей поверхности. Их легируют хромом, никелем, марганцем. Различают:

- *горячештаповые (молотовые)* стали марок: **5XHM, 5XHB, 5XHT, 5XHCВ, 4XMФC;**

- *высокотемпературные* (рабочая температура 650-670°С) стали легируют вольфрамом: **3X2B8, 4X5B2ФC, 4X4BFM.**

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

## Тема 1.3 Основы термической и химико-термической обработки металлов

### 1.3.1 Основные виды термической обработки: отжиг, нормализация, закалка, отпуск

ТО называется тепловая обработка металлов и сплавов, которая заключается в нагреве сплава до определённой температуры (выше критических точек), выдержке при этой температуре до окончания процесса перекристаллизации, и охлаждении с определённой скоростью (рисунок 1.4,а). При ТО происходит изменение структуры и свойств сплавов (повышается прочность, твёрдость, износостойкость, улучшается обрабатываемость).

Любая термическая обработка состоит из трёх основных операций, следующих друг за другом: **нагрев** до определённой температуры (наклонный участок 1 на рисунке 1.4, б), **выдержка** при заданной температуре (горизонтальный участок 2), **охлаждение** (наклонный участок 3).

Операции ТО характеризуются температурой нагрева ( $t, ^\circ\text{C}$ ) временем ( $\tau, \text{ч}$ ) выдержки, нагрева и охлаждения.

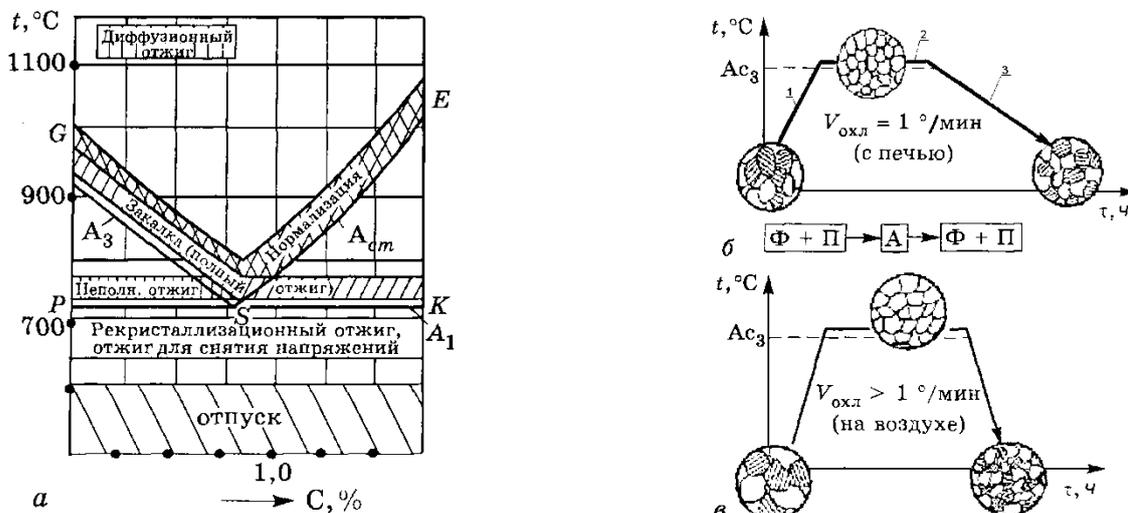


Рисунок 1.4 –Термическая обработка

Основной для выбора видов и режимов ТО сталей является часть диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C с содержанием углерода до 2,14% и расположенная ниже линии солидус (см. рисунок 1.4, а).

#### Основные виды ТО:

**Отжиг** – вид ТО, который заключается в нагреве стали до заданной температуры (выше или ниже линии  $GSK$ ), выдержке при этой температуре и медленном охлаждении обычно вместе с печью (см. рисунок 1.4, а).

**Отжиг** – *предварительный вид ТО, используется после обработки давлением (ОД) для снятия наклепа в материале и после литья для устранения неоднородностей микроструктуры, а также перед обработкой реза-*

*нием, закалкой и т.д. Твердость стали снижается, пластичность повышается, внутренние напряжения снимаются.*

**а) отжиг I рода** (без фазовых превращений):

**1) диффузионный** или **гомогенизирующий отжиг** применяют для слитков легированной стали с целью устранения химической неоднородности сплава за счет диффузии. Нагрев должен быть высоким (1100 - 1200 °С), т. к. только в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания химического состава по всему объёму заготовки. Выдержка 8-20 ч и медленное охлаждение.

**2) дорекристаллизационный** или **возврат** – восстановление свойств сплава после деформации до уровня тех, которые были до деформации при температуре 200 - 400 °С. Возврат применяется для снятия наклепа, уменьшения искажений в кристаллических решетках. Наклёп – искажение кристаллической решётки и вытягивание зёрен металла в результате пластической деформации.

**3) рекристаллизационный отжиг** или **рекристаллизация** применяется для снятия наклёпа (когда недостаточно возврата). Он заключается в нагреве до 650-760 °С, выдержке в течение 0,5-1,5 ч с последующим медленным охлаждением.

**б) отжиг II рода** (с фазовыми превращениями, т.е переход  $\alpha - Fe$  в  $\gamma - Fe$  и наоборот):

**1) полный отжиг** применяется для **доэвтектоидных** сталей с целью измельчения зерна и снятия остаточных напряжений. Сталь нагревают на 30 – 50 °С выше линии **GS** ( $Ac_3$ ), выдерживают при этой температуре и медленно охлаждают вместе с печью (графическое изображение показано на рисунке 1.4, б). При этом понижается твёрдость и прочность стали, повышается вязкость и пластичность.

**2) неполный отжиг** отличается от полного тем, что сталь нагревают, на 30-50 °С выше линии **PSK**, ( $Ac_1$ ), выдерживают и медленно охлаждают с печью до температуры 650-700 °С, а затем охлаждение ведется на воздухе.

**3) изотермический отжиг** применяется для измельчения зерна, снижения твердости и снятия внутренних напряжений. Сталь нагревают до температур на 20-30 °С выше линии **GS** ( $Ac_3$ ), выдерживают и быстро охлаждают до температур 680-620 °С (ниже температуры точки  $Ar_1$  на 50-100 °С), выдерживают при этой температуре до полного распада аустенита, затем сталь охлаждают на воздухе. Преимущество изотермического отжига – уменьшение длительности процесса.

**4) нормализация (нормализационный отжиг)** - вид ТО, который заключается в нагреве до температуры на 30 - 50 °С выше **GSE** ( $Ac_3$  или  $Ac_m$ ), выдержке в течение 0,5-3 часа и охлаждении на воздухе (см. рисунок 1.4, в). **Нормализация может быть как предварительным, так и окончательным видом ТО.**

**Закалка** – операция ТО, при которой сталь нагревается до температуры получения аустенитной структуры: **конструкционные** стали нагревают на 20-40 °С выше **GS** ( $Ac_3$ ), а **инструментальные** – на 30-50 °С выше **PSK** ( $Ac_1$ ), вы-

держивается некоторое время при этой температуре, а затем быстро охлаждается. **Основной целью закалки является повышение твёрдости. В результате закалки повышается также твёрдость, износостойкость, коррозионная стойкость.**

**Выбор режимов закалки.** При закалке стремятся получить структуру *мартенсита*, которая обеспечивает максимальную твёрдость стали. Для этого охлаждение должно вестись со скоростью, большей критической.

**Критической скоростью закалки** называется та наименьшая скорость охлаждения, при которой в структуре стали получается чистый М.

**Стали, имеющие в своём составе менее 0,3%С, считаются незакаливаемыми.**

**Нагрев под закалку** осуществляется в печи и расплавленных солях. **Скорость и время нагрева** деталей зависят от температуры в печи, степени легирования стали, конфигурации деталей, мощности и типа печи, объёма садки и способа укладки деталей.

**Прокаливаемость стали** – способность стали закаливаться на большую или меньшую глубину.

**Закаливаемость стали** – способность стали к получению максимальной твёрдости при закалке.

**Охлаждение при закалке** ведётся в разных жидкостях (закалочных средах). Самыми распространёнными закаливающимися жидкостями является **вода, раствор солей** (для углеродистых и низколегированных сталей) **и минеральные масла** (для легированных сталей).

#### **Виды объёмной закалки**

1) **Закалка в одном охладителе** заключается в быстром охлаждении нагретого до нужной температуры изделия в воде, масле или других охладителях.

2) **Закалка в двух средах** (через воду в масло) состоит в том, что нагретое изделие сначала охлаждается в воде до температуры 500-550°С, после чего быстро переносится в масло. Медленное охлаждение в масле уменьшает внутренние напряжения и деформацию. Этот способ применяется **для инструментов из углеродистых сталей.**

3) **Ступенчатая закалка.** Сначала нагрев, затем охлаждение в соляных ваннах, имеющих температуру на 180-250°С выше  $M_n$  (температура начала мартенситного превращения). Деталь выдерживается там, пока температура не выравняется по всему сечению. Окончательное охлаждение ведётся на воздухе (уменьшаются внутренние напряжения и деформации). Этот способ применяется для изделий из **углеродистой стали с размером в поперечнике до 10-12мм.** Изделия из **легированной стали** можно закалывать этим способом и при больших сечениях.

4) **Закалка с самоотпуском** применяется для инструментов, от которых требуется высокая твёрдость поверхностного слоя в сочетании с вязкой сердцевиной (зубила, молотки, кувалды). Сущность этого способа состоит в охлаждении нагретой детали в воде или масле. Затем инструмент с горячей ещё сердцевиной извлекают из охладителя и окончательно охлаждают на воздухе. За счёт оставшейся теплоты внутренних слоёв производится отпуск.

5) **Закалка с обработкой холодом** предусматривает охлаждения закалённой стали до температуры ниже  $0^{\circ}\text{C}$ . В структуре сталей после закалки всегда присутствует  $A_{\text{ост}}$ . Обработку холодом проводят для уменьшения его количества. Это особенно важно для сталей, которые используются **для изготовления мерительного инструмента, пружин и деталей подшипников**. Обработку холодом выполняют сразу же после закалки, а затем проводят низкий отпуск.

**Поверхностная закалка** – процесс ТО, заключающийся в нагреве поверхностного слоя изделия до температуры выше  $A_{c3}$  (линия **GS**) для доэвтектоидной и выше  $A_{c1}$  (линия **PSK**) для заэвтектоидной стали с последующим охлаждением с целью получения структуры М в поверхностном слое.

#### **Виды поверхностной закалки:**

1) **закалка ТВЧ** изделий осуществляется в индукторе (катушке), состоящий из одного или нескольких витков медной трубки. Через индуктор пропускают переменный ток высокой частоты (500-15000Гц). При этом вокруг индуктора возникает магнитное поле, а в детали генерируются вихревые токи, которые нагревают поверхность детали до температуры закалки, после чего следует резкое охлаждение водой и низкий отпуск.

2) **Газоплазменная** поверхностная закалка заключается в нагреве поверхностного слоя детали пламенем сгорающего газа, имеющего  $2400-3000^{\circ}\text{C}$  и последующем охлаждении водой. Толщина закаленного слоя 2-4 мм, твердость HRC 50-56.

3) **Закалка в электролите** основана на том, что при пропускании тока через электролит (5-10% р-р кальцинированной соды) на катоде, которым является закаливаемая деталь, образуется газовая рубашка водорода. Ток при этом сильно возрастает, и деталь нагревается, после чего, отключив ток, можно сразу закалить её в том же электролите.

**Отпуск производится для снижения закалочной хрупкости, уменьшения внутренних напряжений после закалки и получения требуемой структуры.**

**Отпуск** является финишной ТО и заключается в нагреве стали до температуры ниже линии **PSK** ( $A_{c1}$ ), выдержке при этой температуре с последующим охлаждением с определённой скоростью.

В зависимости от температуры отпуск делят на:

1) **Низкий отпуск** проводят при нагреве до  $250^{\circ}\text{C}$ , после чего следует выдержка в течение 1-1,5ч и охлаждение. Применяется для режущих и измерительных инструментов, а также после цементации. Структура – мартенсит отпуска ( $M_{\text{отп}}$ ). Твёрдость стали 58 – 63 HRC.

2) **Средний отпуск** проводят при нагреве до  $350-500^{\circ}\text{C}$ , затем выдержка от 1-8 ч и охлаждение на воздухе. Применяют для пружин, рессор и некоторых видов штампового инструмента. Структура – троостит отпуска ( $Tr_{\text{отп}}$ ) или троосто-мартенсит. Твёрдость стали 40 – 50 HRC.

3) **Высокий отпуск** проводят при температуре  $500-680^{\circ}\text{C}$  в течение 1-6 ч. Для легированных сталей применяют охлаждение в воде или масле с целью предотвращения отпускной хрупкости. Этот вид отпуска используют для нагруженных конструкционных деталей с целью обеспечения прочности и вяз-

кости. После высокого отпуска – структура сорбит отпуска ( $Cp_{отп}$ ). Твёрдость стали 25 -30 HRC.

ТО, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют *улучшением*.

*Улучшение повышает прочность стали, снижает температуру порога хладноломкости.*

### **1.3.2 Химико-термическая обработка стали: цементация, азотирование, цианирование**

**ХТО** называется технологический процесс, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя деталей различными элементами, с целью изменения состава, структуры и свойств их поверхностного слоя.

При ХТО одновременно протекает три процесса:

- 1) образование химического элемента в активированном атомарном состоянии путем испарения или в результате химической реакции;
- 2) адсорбция атомов химического элемента поверхностью, которая подлежит обработке;
- 3) диффузия адсорбированных на поверхности атомов в глубь изделия.

**Цементацией** стали называется технологический процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали *углеродом*. Цементация применяется для деталей, работающих в условиях трения и высоких контактных давлений (зубчатые колёса, валы, распределительные валы).

*Цементации подвергаются детали из низкоуглеродистых и низколегированных сталей (15ХР, 20ХР, 20Х, 20ХНР, 18ХГТ, 12ХН3).* Глубина цементованного слоя стали 0,5-4 мм.

*После цементации изделия подвергаются закалке и низкому отпуску.*

В результате такой обработки *твёрдость поверхностного слоя высокая при сохранении вязкой сердцевины.*

Применяют два вида цементации:

- 1) **твёрдую**, при которой карбюризатором, т. е. науглероживающим веществом служит смесь древесного угля и углекислых солей ( $BaCO_3$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $K_2CO_3$ ). Соли добавляют к древесному углю в количестве 10-30% для ускорения процесса. Детали укладывают в металлические ящики и пересыпают твёрдым карбюризатором так, чтобы они не соприкасались друг с другом и со стенками и дном ящика. Сверху ящик закрывают крышкой и щели замазывают огнеупорной глиной. Ящики устанавливают в печь и нагревают до температуры 910-950°C. При такой температуре уголь взаимодействует с кислородом воздуха, сохранившегося в порах засыпки по реакции:  $2C+O_2=2CO$ .

Оксид углерода разлагается на диоксид углерода  $CO_2$  и атомарный углерод  $C_{ат}$ , т.е.  $2CO=CO_2+C_{ат}$ .

Углекислые соли ускоряют процесс, предотвращают спекание частиц карбюризатора, а также разлагаясь, увеличивают количество  $CO$  и  $CO_2$ .

Цементация в твёрдом карбюризаторе – длительный процесс (для получения слоя в 1 мм при температуре 930°С длительность процесса 10 ч), поэтому применяется в мелкосерийном и индивидуальном производстве.

**2) газовую**, которую применяют для деталей в массовом производстве. В качестве карбюризатора применяют природный газ (метан -  $\text{CH}_4$ ).  $\text{CH}_4=2\text{H}_2+\text{C}_{\text{ат}}$ ,  $2\text{CO}=\text{CO}_2+\text{C}_{\text{ат}}$ . Газовая цементация осуществляется в конвейерных печах. Деталь помещают в печь на металлических поддонах, специальных подвесках. Продолжительность выдержки при температуре 930-950°С для слоя глубиной 1мм составляет 4-5ч.

**Преимущества газовой цементации:**

- 1) меньшая продолжительность процесса;
- 2) возможность точного регулирования процесса за счёт изменения состава газа;
- 3) возможность производить закалку прямо из печи при температуре 840-860°С.

**После цементации** сталей с крупнозернистой структурой применяют двойную **закалку**. После закалки цементованные детали во всех случаях подвергают **низкому отпуску** при температуре 160-180°С.

В результате ТО поверхностный слой приобретает структуру мелкоигольчатого мартенсита и аустенита остаточного.

**Азотирование** – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали **азотом** при нагреве до 500-600°С в аммиаке ( $\text{NH}_3$ ).

**В результате азотирования повышается твёрдость и износостойкость.**

**Азотированию подвергают детали из среднеуглеродистых сталей, которые прошли закалку и высокий отпуск.** После азотирования детали шлифуют или полируют. Детали, подвергаемые азотированию, укладываются в герметичные камеры, куда подаётся аммиак, который при нагреве разлагается с образованием азота ( $2\text{NH}_3=6\text{H}+2\text{N}_{\text{ат}}$ ). Длительность процесса зависит от необходимой толщины азотированного слоя (30-60часов). Слой составляет 0,3-0,5мм.

При высокой температуре аммиак разлагается, выделяющийся при этом азот проникает в поверхность стали, образуя с железом химические соединения – нитриды, отличающиеся очень высокой твёрдостью. Азотирование производится в герметизированных камерных печах.

**Нитроцементация** – насыщение поверхностного слоя стали **углеродом и азотом** из смеси газов ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ).

**При высокой температурной нитроцементации** температура 830-950°С. **Насыщение идёт в основном углеродом.** Продолжительность процесса 4-10ч.

**После высокотемпературной нитроцементации** осуществляют **закалку 800-825°С и низкий отпуск при температуре 160-180°С.** Толщина слоя 0,2-0,8мм. Структура – мелкоигольчатый мартенсит + аустенит остаточный.

**Низкотемпературная нитроцементация** (550-570<sup>o</sup>C) – насыщение идёт в основном азотом. Проводится для инструмента из быстрорежущей стали. Длительность процесса 1,5-3ч.

**Перед низкотемпературной нитроцементацией осуществляют закалку и высокий отпуск.** Толщина слоя 0,02-0,04мм.

**Цианирование** – поверхностное насыщение **углеродом и азотом** из расплавленных цианистых солей NaCN с добавками солей NaCl, BaCl и др.

**Высокотемпературное цианирование** (780-930<sup>o</sup>C) – насыщение в основном углеродом, затем закалка и низкий отпуск. Глубина слоя 0,16-0,35мм и в нем содержится примерно 0,7% С и 0,1% N.

**Низкотемпературное цианирование** (550-570<sup>o</sup>C) – используется с целью повышения режущих свойств инструмента из быстрорежущей стали. Глубина слоя 0,02-0,06мм. **Насыщение идёт в основном азотом.**

**Перед цианированием – закалка и высокий отпуск.**

<a href="#">НАЗАД</a>	<a href="#">Самоконтроль по разделу 1</a>	<a href="#">Обратная связь</a>	<a href="#">ДАЛЕЕ</a>
-----------------------	---	--------------------------------	-----------------------

## Тема 2.1 Физические процессы в проводниках

### Электропроводность металлов. Классификация проводниковых материалов.

*Проводниковые материалы* обладают способностью проводить электрический ток и характеризуются весьма малым или заданным удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ .

По агрегатному состоянию проводниковые материалы разделяют на:

1) *Газообразные* – все газы и пары, в том числе и пары металлов. При достаточно малых значениях напряженности электрического поля  $E$  они являются диэлектриками и обладают очень высоким удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ . Однако при напряженности электрического поля, которая обеспечивает начало ионизации, газ может стать проводником, в котором перенос электрических зарядов осуществляется электронами и ионами. Если в единице объема сильно ионизированного газа наступает равенство между числом электронов и положительных ионов, то такой газ представляет собой особую проводящую среду, называемую *плазмой*. Проводимость газов и паров используют в различных газоразрядных приборах.

2) *Жидкие* – расплавы металлов и растворы (в частности, водные) и расплавы солей, кислот и других веществ с ионным строением молекул. Растворы и расплавы солей, кислот и щелочей, проводящие электрический ток, называют *электролитами* или проводниками *второго 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. Большинство металлов имеют высокую температуру плавления. Только ртуть и некоторые специальные сплавы (например, сплавы системы индий-галлий) могут быть использованы в качестве жидких проводников при нормальной температуре. Электролиты используют в технологии изготовления различных элементов радиоэлектронных устройств.

3) *Твердые* – металлы и сплавы. В Периодической системе химических элементов Д.И.Менделеева 75% элементов – металлы. В твердом состоянии металлы имеют кристаллическую структуру, для которой характерен особый вид металлической связи между атомами. При прохождении электрического тока через контакт различных металлов не происходит переноса вещества одного металла в другой, как это имеет место при прохождении тока в электролитах, поскольку перенос электрических зарядов осуществляется только электронами. Механизм прохождения электрического тока через твердые и жидкие металлы обусловлен направленным движением свободных электронов под воздействием электрического тока, который создается приложенным извне напряжением. Поэтому твердые и жидкие металлы называют проводниками с *электронной (металлической)* электропроводностью или проводниками *первого рода*.

**По характеру применения** в радиоэлектронных приборах проводниковые материалы разделяют на материалы:

1) **высокой проводимости** (удельное электрическое сопротивление  $\rho < 0,1$  мкОм • м). К ним относятся железо, медь, алюминий, золото, серебро и др., используют как основу в контактных материалах и припоях, для изготовления проводов, микропроводов, проводящих покрытий и пленок, различных токопроводящих деталей.

2) **с высоким сопротивлением** (удельное электрическое сопротивление  $\rho > 0,3$  мкОм • м). Используют в качестве резистивных материалов и материалов для термопар. Наиболее известные: медно-марганцевые (манганины), медно-никелевые (константаны), сплавы железа, никеля и хрома (нихромы).

3) **сверхпроводники** – материалы, обладающие ничтожно малым удельным электрическим сопротивлением при очень низких температурах. Свойством сверхпроводимости обладают ртуть, алюминий, свинец, ниобий, соединения ниобия с оловом, титаном и др.

4) **неметаллические проводники** (уголь, графит, сажа, бороуглеродистые пленки, высокоионизированные газы).

### **Свойства проводниковых материалов:**

а) **Механические свойства:** прочность, твёрдость, упругость, вязкость, ударная вязкость, пластичность, хрупкость, усталость.

б) **Технологические свойства:** ковкость, свариваемость, обрабатываемость резанием, жидкотекучесть, усадка и др. Технологические свойства определяются комплексом физико-химических свойств материала. Для определения свойств материала проводят соответствующие лабораторные испытания.

в) **Физико-химические свойства:** цвет, плотность, температура плавления, теплопроводность, тепловое расширение, электропроводность, магнитные свойства, поглощение газов, коррозионная стойкость и др. Физико-химические свойства оценивают:

1) **удельным электрическим сопротивлением**  $\rho$ , для образцов правильной формы  $\rho = R \frac{S}{l}$ , где  $R$  - сопротивление образца, Ом;  $S$  - площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;  $l$  - длина образца, м. Величину  $\rho$  измеряют в Ом•м, однако для практических целей 1 Ом•м слишком большое значение, поэтому этот параметр чаще всего выражают в более мелких единицах: 1 Ом•м =  $10^6$  мкОм•м =  $10^6$  Ом•мм<sup>2</sup>/м (для серебра  $\rho = 0.016$  мкОм•м.)

Наличие примесей и дефектов в кристаллической решетке увеличивает  $\rho$ .

2) **удельной электрической проводимостью**  $\gamma = \frac{1}{\rho}$ , См/м. Зависит от температуры, чем выше температура, тем меньше проводимость.

3) **температурным коэффициентом удельного электрического сопротивления**  $\text{TK}_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta\rho}{\Delta T}$ , 1/град, где  $\Delta\rho$  - элементарное приращение сопротивления проводника, соответствующее элементарному приращению температуры  $\Delta T$ . Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления, выраженный в  $\text{K}^{-1}$ , обозначается  $\alpha_\rho = \frac{1}{\rho_0} \frac{\rho_1 - \rho_0}{T_1 - T_0}$ , где  $\rho_0$  - удельное сопротивление при температуре  $T_0$ , которую обычно принимают равной  $20^\circ\text{C}$ ;  $\rho_1$  - то же при температуре  $T_1$ . Для металлов  $\alpha_\rho = 9 \dots 65 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$  (ртуть...никель).

4) **коэффициентом теплопроводности**. Если через пластину площадью  $S$  и толщиной  $\Delta l$  за время  $t$  проходит тепловой поток энергии  $\theta$ , то между поверхностями противоположных граней создается разность температур  $\Delta T$ , связанная с  $\theta$  соотношением:  $\theta = \lambda S \frac{\Delta T}{\Delta l}$ . Параметр  $\lambda$ , называют **коэффициентом теплопроводности** проводников, который прямо пропорционален их удельной проводимости  $\gamma$ . Чем выше электропроводность металла, тем больше его теплопроводность. Поэтому теплоотводящие устройства, например мощных резисторов, полупроводниковых приборов, изготавливают из металлов с высокой электропроводностью (медь, алюминий и сплавы на их основе).

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

## 2.2 Материалы высокой проводимости

### 2.2.1 Проводниковые медь и алюминий и их сплавы.

К материалам этого типа предъявляются следующие требования: минимальное значение удельного электрического сопротивления  $\rho$ ; достаточно высокие механические свойства (главным образом предел прочности при растяжении и относительное удлинение при разрыве); способность легко обрабатываться, что необходимо для изготовления проводов малых и средних сечений; способность образовывать контакты с малым переходным сопротивлением при пайке, сварке и других методах соединения проводов; коррозионная стойкость. Для улучшения свойств эти материалы подвергаются термической обработке - отжигу, закалке и старению. Отжиг влияет на мягкость материала и уменьшает напряжения в отливках. Закалка и старение повышают механические свойства.

**Медь** – металл красноватого цвета. ГЦК – решётка не претерпевает превращений при нагреве. Обладает высокой электро- и теплопроводностью, пластичностью и коррозионной стойкостью, отличной обрабатываемостью давлением в холодном и горячем состоянии, хорошей способностью к пайке и сварке. Медь плохо обрабатывается резанием, имеет невысокие литейные свойства. Температура плавления  $1083^{\circ}\text{C}$ ; в литом состоянии механическая прочность меди невысокая  $\sigma_e = 160$  МПа, но пластичность хорошая  $\delta = 25\%$ . Холодная пластическая деформация повышает  $\sigma_e$  до 450 МПа, но пластичность при этом снижается.

ГОСТ 859-2001 распространяется на медь, изготавливаемую в виде:

1) **катодов** следующих марок: М00к, М0к, М1к, М2к.

**Маркировка:** к - катодная медь, цифры отражают содержание меди: 00 (99,99%), 0 (99,97%), 1 (99,95%) и 2 (99,93%).

2) **литых и деформированных полуфабрикатов** следующих марок: М00б, М0б, М1б, М1р, М1ф, М2р, М3р, М1, М2, М3 и др.

**Маркировка:**

б - бескислородная, р и ф - раскисленная, цифры (0 до 3) – условный порядковый номер, чем больше цифра, тем больше примесей в меди.

**Пример: Медь марки М00б** – медь бескислородная с порядковым номером 00.

**Медь марки М00к** – медь катодная со средней массовой долей меди 99,99%, остальное примеси.

**Различают:**

**МТ** – твердая медь; получают при холодной протяжке; обладает высоким пределом прочности при растяжении, твердостью и упругостью; применяют для проводов воздушных линий, распределительных силовых щитов, коллекторов электрических машин, как правило, в неизолированном виде.

**ММ** - мягкая (отожженная) медь, имеет электропроводимость на 3...5% выше, чем у твердой меди; применяют для токопроводящих шин, кабелей, обмоточных и монтажных проводов.

**МВ** - вакуумная медь, выплавляемая в вакуумных индукционных печах

(не более 0,01% примесей).

Основная масса меди используется для приготовления сплавов на её основе (латуней и бронз), которые имеют более высокие механические свойства.

**Латуни** – сплавы меди, в которых основным легирующим элементом является цинк (до 45%). Дешевле меди, хорошие литейные свойства, работают при отрицательных температурах. По технологическим свойствам бывают *деформируемые* (обрабатываемые давлением) и *литейные* (предназначены для изготовления отливок).

**Деформируемые латуни согласно ГОСТ 15527 – 2004:**

**а) Простые (двойные) латуни**

Двойные латуни Л96, Л90, Л85 (84-97% меди) называют *томпаками*. Латунь Л80 называют *полутомпаком*. Широко применяются в технике более дешёвые латуни Л70, Л68, Л63, Л60.

**Маркировка:**

Л – латунь, цифра – средняя массовая доля меди в %, остальное цинк.

**Пример: Л60** – простая (двойная) латунь со средней массовой долей меди 60%, остальное (40%) – средняя массовая доля цинка.

Прочность двойных латуней (Л96...Л60) возрастает по мере увеличения содержания цинка, улучшается их обрабатываемость резанием, но снижается их коррозионная стойкость. Для улучшения технологических свойств латуни легируют различными элементами.

**б) Специальные (многокомпонентные) латуни** в своём составе кроме меди и цинка содержат легирующие элементы.

**Маркировка:**

Л – латунь	Н – никель	Б – бериллий
А – алюминий	О – олово	Ф – фосфор
Ж – железо	С – свинец	Кд – кадмий
Мц – марганец	К – кремний	Су – сурьма
Мг – магний	Мш – мышьяк	Т – титан
	Ц – цинк	

**Первые две цифры** – средняя массовая доля *меди в %*, последующие – средняя массовая доля других элементов в % в том же порядке как и буквы. Остальное – массовая доля цинка.

**Пример: ЛАЖ60-1-1** – деформируемая специальная латунь, со средней массовой долей меди 60 %, алюминия 1%, железа 1 %, остальное (38%) – средняя массовая доля цинка. Различают:

1) **Алюминиевые** (ЛА77-2, ЛАЖ60-1-1, ЛАН59-3-2 и др.). За счёт легирующих элементов повышенная стойкость к щелочам и разбавленным кислотам. Недостаток – подверженность коррозионному растрескиванию, ухудшение паяемости.

2) **Марганцевая** (ЛМц58-2). Более высокая прочность, твёрдость, коррозионная стойкость.

3) **Железомарганцевая** (ЛЖМц59-1-1). Высокая прочность и вязкость, коррозионная стойкость в атмосфере и морской воде.

4) **Оловянные** (ЛО90-1, ЛО70-1, ЛО62-1, ЛО60-1). Повышенная корро-

зионная стойкость в морской воде.

5) **Свинцовые** (ЛС74-3, ЛС64-2, ЛС63-3, ЛС59-1, ЛС58-3, ЛС58-2). Хорошие антифрикционные свойства.

6) **Кремнистые** (ЛКБО62-0,2-0,04-0,5; ЛОК59-1-0,3). Более устойчивые к коррозионному растрескиванию.

7) **Мышьяковые** (ЛМш68-0,05). Высокая коррозионная стойкость в морской и пресной воде при повышенных температурах.

**Литейные латуни ГОСТ 17711 – 93. Маркировка:** буквы – то же; **цифры после Ц** – средняя массовая доля **цинка в %**, последующие – средняя массовая доля других элементов в % в том же порядке, как и буквы. Остальное – средняя массовая доля меди.

**Пример:** ЛЦ16К4 – литейная латунь со средней массовой долей цинка 16%, кремния 4%, остальное (80%) - средняя массовая доля меди.

Различают:

1) **Свинцовые ЛЦ40С** (изготавливают втулки вкладыши, сепараторы подшипников).

2) **Марганцевая ЛЦ40Мц1,5** (детали простой конфигурации, работающие при ударных нагрузках).

3) **Марганцево-железная ЛЦ40Мц3Ж** (детали сложной конфигурации, гребные винты и их лопасти).

4) **Марганцево-алюминиевая ЛЦ40Мц3А** (детали несложной конфигурации).

5) **Марганцево-свинцовая ЛЦ37Мц2С2К** (антифрикционные детали, арматура).

6) **Алюминиевая ЛЦ30А3** (арматура для судостроения).

7) **Оловянно-свинцовая ЛЦ25С2** (для изготовления штуцеров гидросистемы автомобилей).

8) **Алюминиево-железо-марганцевая ЛЦ23А6Ж3Мц2** (гайки, червячные винты).

9) **Кремнистая ЛЦ16К4** (детали, работающие при температуре до 250 °С и в морской воде).

10) **Кремнисто-свинцовая ЛЦ14К3С3** (подшипники, втулки).

**Бронза** – сплав меди с оловом, алюминием, бериллием, кремнием и другими элементами. Отличаются малой объемной усадкой при литье, хорошо обрабатываются резанием, давлением и хорошо паяются. По химическому составу бронзы делятся на **оловянные** (имеют ограниченное применение из-за дефицитности олова) и **безоловянные**. По технологическим свойствам бывают **деформируемые** (обрабатываемые давлением) и **литейные** (предназначены для изготовления отливок).

**Маркировка деформируемых бронз:** **Бр** - бронза, затем следуют буквы и цифры, показывающие легирующие элементы и среднюю массовую долю этих элементов в %, остальное средняя массовая доля меди. Буквы, обозначающие легирующие элементы такие же, как и в маркировке латуней.

**Пример:** БрАЖ9-4 – бронза деформируемая, безоловянная, со средней массовой долей алюминия 9%, железа 4%, остальное (87%) - средняя массовая

доля меди.

**Маркировка для литейных бронз** после букв **Бр** следует буквенное обозначение основного легирующего элемента и цифра, указывающая его среднюю массовую долю в %, а затем следуют буквы и цифры для других легирующих элементов.

**Пример: БрО10С10** – бронза литейная, оловянная, со средней массовой долей олова 10%, свинца 10%, остальное (80%) - средняя массовая доля меди.

**Бронзы безоловянные деформируемые** – ГОСТ 18175 – 78 применяются как заменители дефицитных оловянных бронз. Различают:

1) **Алюминиевые БрА5** (детали работающие в морской воде, детали для химической промышленности), **БрА7** (пружины и пружинящие детали, скользящие контакты), **БрАЖ9-4** (шестерни, втулки, седла клапанов в авиапромышленности), **БрАМц9-2** (трубные доски конденсаторов, износостойкие детали, винты, валы, детали для гидравлических установок) и др.

2) **Бериллиевые БрБ2** (пружины, пружинящие детали ответственного назначения, износостойкие детали всех видов, искрящие инструменты).

3) **Кремневые БрКМц3-1** (пружины, пружинистые детали, детали для судостроения и сварных конструкций),

4) **Марганцевые БрМц5** (детали и изделия, работающие при повышенных температурах).

5) **Кадмиевые и магниевые БрКд1; БрМг0,3** (коллекторы электродвигателей, детали контактной сварки и др.).

6) **Серебряная БрСр0,1** (коллекторные кольца, обмотки роторов турбогенераторов).

7) **Хромовая БрХ1** (электроды для сварки, электродетали, оборудование сварочных машин).

**Бронзы безоловянные литейные** – ГОСТ 493–79, наибольшее распространение получили алюминиевые (**БрА9Мц2Л, БрА10Ж3Мц2, БрА11Ж6Н6**). *Буква Л в конце марки* означает, что бронза литейная (для отдельных сплавов).

**Бронзы оловянные деформируемые** – ГОСТ 5017 – 74 . Марки: **БрОФ8-0,3; БрОФ7-0,2;** и др.

**Бронзы оловянные литейные** – ГОСТ 613 – 79. Марки: **БрОЗЦ12С5; БрО5С25; БрО10Ф1;** и др.

### 2.2.2 Свойства, маркировка и применение проводникового алюминия и его сплавов. Материалы для контактов

**Алюминий** имеет ГЦК решётку, не претерпевает превращений при нагреве. У алюминия хорошая деформируемость и свариваемость. Электропроводность алюминия составляет 60% электропроводности меди. Температура плавления  $657^{\circ}\text{C}$ ; температурный коэффициент удельного электрического сопротивления  $\alpha_{\rho} = 42 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Алюминий на воздухе покрывается защитной пленкой оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , которая является антикоррозионной защитой, но с др. стороны

при соединении алюминиевых проводов образуются большие переходные сопротивления.

**Алюминий** (ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный), выпускаемый в жидком виде, в виде чушек, слитков, ленты и т.д., бывает высокой А999, А995, А99, А98, А97, А95 и технической чистоты А85; А8; А5; А5Е; А7Е; А0 и др.

**Маркировка:** **А** – алюминий; **цифры после А** – массовая доля алюминия в % (не менее), всегда 99 целых, а цифры указывают значения после запятой; **Е** в конце марки – алюминий применяется в электротехнической промышленности.

**Примеры:** **А999** - алюминий первичный с массовой долей алюминия 99,999%, остальное примеси.

**А99** - алюминий первичный с массовой долей алюминия 99,99%, остальное примеси.

**А0** - алюминий первичный с массовой долей алюминия 99,00%, остальное примеси.

Алюминий марок **А999** и **А995** используют для изготовления анодной и катодной фольги электролитических конденсаторов и в микроэлектронике для получения тонких пленок.

Алюминий марок **А99**, **А97** и **А95** используют для корпусов электролитических конденсаторов, статорных и роторных пластин воздушных конденсаторов. Из алюминиевой фольги и ленты изготавливают экраны радиочастотных коаксиальных кабелей.

Сплавы алюминия делятся на деформируемые и литейные.

**Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые** по ГОСТ 4784-97 выпускают в виде деформируемого полуфабриката (листы, профили, прутки, проволока и т.д.).

**Маркировка:** **АД** – алюминий деформируемый; **Д** – дуралюмин; **АК** - алюминиевый ковочный сплав; **В** – высокопрочный сплав; **АМг** – сплав алюминий-магний. Цифры после букв **Д**, **К**, **В** – условный номер сплава. Цифры после **АМг** и **АМц** - средняя массовая доля магния или марганца в сплаве в %.

**Примеры:** **Д16** – дуралюмин с условным номером 16.

**АК8** - алюминиевый ковочный сплав с условным номером 8.

**АМг4** – алюминий-магний сплав, магния 4%.

**Дуралюмины** (**Д1**, **Д16**) – сплавы системы Al-Cu-Mg-Mn, характеризуются высокой прочностью и пластичностью. Достоинство: высокая удельная прочность (используется в самолётостроении, **Д16** - кузова грузовых автомобилей). Недостаток: пониженная коррозионная стойкость.

**Высокопрочные сплавы** (**В95**, **В96**) – сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu. Прочность этих сплавов достигает 700 МПа, но при меньшей пластичности, чем у дуралюминов.

**Ковочные сплавы** (**АК4**) – дуралюмины, но с добавкой Si. Отличаются высокой пластичностью. С ростом содержания меди прочность сплавов увеличивается, а пластичность падает. Из этих сплавов штамповкой при 450-470 С получают детали самолётов и судов. **АК4** – деталей двигателей внутреннего сгорания.

### **Литейные алюминиевые сплавы.**

**Маркировка** согласно ГОСТ 1583 – 93:

Буква **А** – сплав алюминиевый литейный. Остальные буквы – элементы сплава: **К** - кремний, **М** - медь, **Н** - никель, **Ц** - цинк, **Су** - сурьма, **Мг** - магний, **Кд** - кадмий, **Мц** - марганец. Цифры после букв обозначают среднюю массовую долю соответствующего элемента в %, . В конце марки: **ч** – чистый, **пч** – повышенной чистоты, **оч** – особо чистый; **с** – селективный.

**Примеры:** **АК9** - алюминиевый литейный сплав со средней массовой долей кремния 9%.

**АК9Ц6** – алюминиевый литейный сплав со средней массовой долей кремния 9%, цинка 6%.

**АК5Моч** - алюминиевый литейный сплав со средней массовой долей кремния 5%, меди не менее 1,5 %, особо чистый.

**АМг10** - алюминиевый литейный сплав со средней массовой долей магния 10%.

**АК2М2** - алюминиевый литейный сплав со средней массовой долей кремния 2%, меди 2%.

Сплавы системы алюминий-кремний получили название **силумины**. Они обладают хорошими литейными свойствами, не склонны к образованию трещин и усадочных дефектов. Наиболее широко применяется сплав АК12 (10-13% Si), обладающий высокой коррозионной стойкостью. Но его механические свойства не высоки и его часто заменяют силуминами с добавками Mg, Cu, Mn, Ti (АК9М2, АК5М, АМг10). Такие сплавы более прочны и тверды. Из силуминов получают корпуса компрессоров, поршни двигателей, головки и блоки цилиндров, крышки и т.д.

Сплавы: **АК9ч** используют для изготовления блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания, **АК7ч** – для картеров мостов грузовых автомобилей, картеров сцепления.

**Никель** — обладает хорошими механическими свойствами: прочностью, пластичностью, стоек к окислению. Применяется в электровакуумной технике в качестве электродов и конструкционных деталей ламп и приборов; для защиты декоративных покрытий изделий из железа. В микроэлектронике для формирования контактных площадок как защитный слой, для пайки и сварки внешних выводов микросхем. Удельное эл. сопротивление  $\rho = 0,073$  мкОм • м. Температура плавления 1455 °С; температурный коэффициент удельного электрического сопротивления  $\alpha_\rho = 65 \cdot 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>.

**Серебро** - обладает высокой прочностью. Благодаря стойкости к окислению на воздухе при температуре до 200С и высокой теплопроводности используется в сплавах с кадмием и медью для контактов электроаппаратов, реле. В чистом виде - для контактов в слаботочных цепях и электродов в керамических и слюдяных конденсаторах. В тонких плёнках - для получения слоев с высокой проводимостью. Входит в состав припоев. Удельное эл. сопротивление  $\rho = 0,016$  мкОм • м. Температура плавления 961 °С;  $\alpha_\rho = 40 \cdot 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>.

**Золото** – обладает высокой пластичностью и инертностью к агрессивным средам, поэтому используется как контактный материал для коррозионно-устойчивых покрытий электродов, фотоэлементов. В микроэлектронике и радиотехнике его применяют в качестве выводов навесных компонентов микросхем и соединений контактных площадок, в качестве инертного защитного слоя элементов интегральных схем. Удельное эл. сопротивление  $\rho = 0,024$  мкОм • м. Температура плавления  $1063^\circ\text{C}$ ; температурный коэффициент удельного электрического сопротивления  $\alpha_\rho = 38 \cdot 10^{-4}$  К<sup>-1</sup>.

**Материалы для контактов.** Различают:

а) **Разрывные контакты**, которые обеспечивают управляемое замыкание и размыкание электрических цепей. Основным недостатком этих контактов является возникновение между ними электрических искровых и дуговых зарядов, что вызывает эрозию, коррозию и сваривание. Их делят на:

1) **Слаботочные контакты**, для них применяют:

- серебро, кадмий; их преимущество заключается в увеличении скорости гашения дуги за счёт паров кадмия и кислорода. Используются в радиоаппаратуре, приборах автоматики, авиационного и морского оборудования.

- золото в сплаве с платиной, серебром и никелем применяется в потенциометрах, измерительных приборах.

- платина с присадкой никеля, серебра, золота, иридия применяется в прецизионных реле, работающих без дуговых разрядов.

- вольфрам наиболее стоек к образованию дуги, контакты не свариваются.

2) **Сильноточные контакты** - изготавливают из металлокерамических материалов. Серебряная или медная фаза обеспечивает высокую электропроводность и теплопроводность контактов. Тугоплавкая фаза препятствует свариванию контактов.

б) **скользящие контакты** обеспечивают переход электрического тока от неподвижной части устройства к подвижной. Применяются в потенциометрах, реостатах, генераторах, двигателях постоянного тока. Для них применяют:

1) **Пружинные металлические материалы** - бронзы (кадмиевые, кадмиево-оловянные, бериллиевые); обладают повышенной механической прочностью, стойкостью к истиранию. Применяются в потенциометрах, переключателях, реостатах и других элементах.

2) **Электротехнические угольные материалы** - для изготовления щёток, угольных электродов, для элементов дуговых печей. Ценным свойством угольных материалов для скользящих контактов является то, что отдельные чешуйки природного графита легко отделяются и скользят по его поверхности.

[НАЗАД](#)

[Самоконтроль](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 2.2.3 Материалы высокой проводимости

#### Свойства и применение сверхпроводников и криопроводников.

##### Припой и флюсы

При понижении температуры удельное электрическое сопротивление металлов уменьшается и при весьма низких (криогенных) температурах от 10 К (-263 °С) и ниже электрическое сопротивление металлов приближается к нулю. Это явление называется *сверхпроводимостью*, а материалы называют *сверхпроводниками*.

Явление сверхпроводимости было открыто в 1911г. нидерландским физиком Х. Камерлинг-Оннесом, который обнаружил, что электрическое сопротивление кольца из замороженной ртути внезапно падает до очень малого значения, которое невозможно измерить.

При температурах близких к абсолютному нулю меняется характер взаимодействия электронов между собой и атомной решёткой так, что становится возможным притягивание одноименно заряженных электронов и образование электронных (куперовских) пар. Куперовские пары обладают большой энергией связи. При этом сопротивление равно нулю.

Известно 35 чистых металлов (алюминий, олово, индий, иридий, ртуть, тантал, ванадий, цинк и др.) и более тысячи различных сплавов и соединений, у которых возможен переход в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводимостью не обладают серебро, медь, золото и ферромагнитные материалы: железо, никель, кобальт и их сплавы.

Особенность сверхпроводников состоит в том, что однажды наведенный в сверхпроводящем контуре электрический ток будет длительно (годами) циркулировать по этому контуру без заметного уменьшения своей силы и притом без всякого дополнительного подвода энергии извне. Подобно постоянному магниту такой контур создает в окружающем пространстве магнитное поле. Другим свойством сверхпроводников является то, что они при переходе в сверхпроводящее состояние становятся идеальными диамагнетиками. Поэтому внешнее магнитное поле не проникает в сверхпроводящее тело. Если переход материала в сверхпроводящее состояние происходит в магнитном поле, то поле «выталкивается» из сверхпроводника (см. рисунок 2.1).

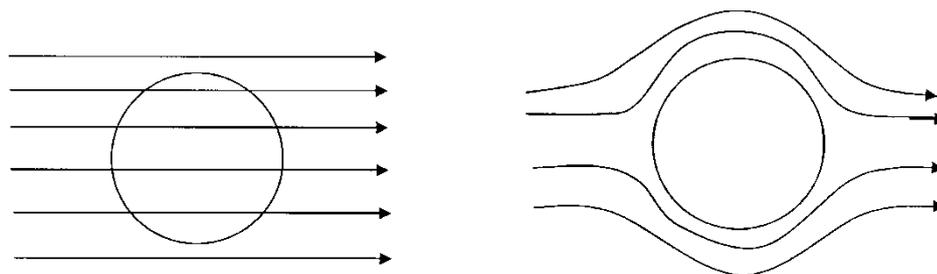


Рисунок 2.1 – Переход материала в сверхпроводящее состояние

Критическая температура охлаждения, при которой происходит переход вещества в сверхпроводящее состояние, называют температурой сверхпрово-

димого перехода или критической температурой перехода  $T_{кр}$ . Переход в сверхпроводимое состояние является обратимым. При повышении температуры до  $T_{кр}$  материал возвращается в нормальное (несверхпроводящее) состояние.

Самой высокой критической температурой среди чистых металлов обладает ниобий - (9,22 К), а самой низкой - иридий (0,14 К). Критическая температура сверхпроводников зависит от их химического состава, кристаллической структуры и других факторов.

Известные сверхпроводники имеют весьма низкие критические температуры перехода  $T_{кр}$ . Поэтому устройства, в которых их используют, должны работать в условиях охлаждения жидким гелием (температура сжижения гелия при нормальном давлении примерно 4,2 К). Это усложняет и удорожает производство и эксплуатацию сверхпроводниковых материалов.

Возможности использования явления сверхпроводимости определяются также значениями критической напряженности магнитного поля  $H_{кр}$  и критическими значениями магнитной индукции  $B_{кр}$ .

По физико-химическим свойствам сверхпроводниковые материалы разделяют на:

1) *мягкие* (ртуть, олово, индий, свинец) для них характерны низкие температуры плавления и отсутствие внутренних напряжений;

2) *жесткие* (тантал, титан, цинк, ниобий и др.) отличаются наличием значительных внутренних напряжений;

3) *твердые* (сплавы с искаженными кристаллическими решетками) сохраняют сверхпроводимость даже при относительно больших плотностях тока и сильных магнитных полях.

С позиций термодинамики сверхпроводниковые материалы делят на:

1) *сверхпроводники первого рода* к ним относят чистые металлы за исключением ниобия, ванадия, технеция. Их основным недостатком является низкое значение критической напряженности магнитного поля  $H_{кр}$  и то, что сверхпроводящее состояние в этих материалах исчезает уже в слабых магнитных полях при небольших плотностях тока.

2) *сверхпроводники второго рода* отличаются более высокими значениями критической температуры  $T_{кр}$  и более высокими критическими значениями магнитной индукции  $B_{кр}$ . Их недостатком является то, что они теряют свойство сверхпроводимости в определенном интервале напряженностей магнитного поля ( $H_{кр1}$  -  $H_{кр2}$ ). К ним относят сверхпроводящие сплавы и некоторые чистые металлы - *ниобий Nb, ванадия V, технеций Tc*.

3) *сверхпроводники третьего рода* отличаются неоднородным составом и наличием дефектов структуры. Это позволяет достигать очень больших значений тока (плотность тока выше  $10^9$  А/м<sup>2</sup>) в сильных магнитных полях с индукцией  $B$  от 10 до 50 Тл. К ним относят сплавы и химические соединения: ниобия с оловом, ниобия с титаном, ниобия с цирконием и титаном и др.

Сверхпроводники используют для создания сверхсильных магнитных полей, для изготовления обмоток электромашин и трансформаторов, обладающих малой массой и высоким КПД, для мощных линий передачи энергии, накопителей электроэнергии.

Так затраты энергии на охлаждение соленоида до температуры 4,2К оказывается в 1000 раз меньше чем затраты на энергию, необходимую для питания током обычного электромагнита той же мощности. Отмеченное явление отталкивания двух сверхпроводников друг от друга (вследствие отталкивания их магнитных полей) позволяет создать опоры без потерь в электромашинах.

Сверхпроводящие сплавы на основе ниобия являются наиболее технологичными - позволяют получить провода диаметром 0,2 - 0,4 мм, так как являются легко деформируемыми. Нашли также применение сплавы на основе интерметаллических соединений, получаемых методами порошковой металлургии - это станнид ниобия, германид ванадия. Они имеют более высокую критическую температуру (18,2 - 20,2К), большую критическую индукцию (24,5Тл при 4,2 К) и большую допустимую плотность тока ( $2 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>). Их недостатком является хрупкость и трудность получения из них проводов.

Часто сверхпроводниковые провода покрывают «стабилизирующей» оболочкой из меди или другого хорошо проводящего электрический ток и тепло металла, что дает возможность избежать повреждения основного материала сверхпроводника при случайном повышении температуры.

### **Криопроводники**

Некоторые металлы могут достигать при низких (криогенных) температурах (ниже -173° С) весьма малого значения удельного электрического сопротивления  $\rho$ , которое в сотни и тысячи раз меньше, чем удельное электрическое сопротивление при нормальной температуре, но не переходят в сверхпроводящее состояние при этой температуре. Материалы, обладающие такими свойствами, называют *криопроводниками* (*гиперпроводниками*).

Физически явление криопроводимости не сходно с явлением сверхпроводимости и объясняется резким снижением интенсивности колебаний кристаллических решёток, что уменьшает рассеяние электронов, составляющих ток в проводниках.

Удельное электрическое сопротивление обусловлено наличием примесей и физическими дефектами решётки, поэтому для криопроводников необходимо применять хорошо отожженный материал высокой чистоты, который обладает минимальным удельным сопротивлением в рабочем диапазоне температур от -240 до -190° С

Плотность тока в криопроводниках при рабочих температурах в тысячи раз превышает плотность тока в них при нормальной температуре, что определяет их использование в сильноточных электротехнических устройствах, к которым предъявляются высокие требования по надежности и взрывобезопасности. Применение криопроводников в электрических машинах, кабелях и т.п. имеет существенное преимущество по сравнению со сверхпроводниками. Если в сверхпроводниковых устройствах в качестве охлаждающего агента применяют жидкий гелий, работа криопроводников обеспечивается благодаря более высококипящим и дешевым хладагентам – жидкому водороду (-252,6° С), неону (-245,7° С), азоту (-195,6° С). Это упрощает и удешевляет производство и эксплуатацию устройства. Однако необходимо учитывать технические трудности, которые воз-

никают при использовании жидкого водорода, образующего при определенном соотношении компонентов взрывоопасную смесь с воздухом.

В качестве криопроводников используют *медь, алюминий, серебро, золото.*

### **Припой и флюсы**

Пайкой называют процесс соединения друг с другом двух или нескольких металлических или покрытых слоем металла неметаллических деталей с использованием расплавленного промежуточного материала (*припоя*), температура которого ниже, чем у соединяемых деталей.

Пайку широко применяют в различных отраслях техники. Современная технология позволяет паять углеродистые, легированные и нержавеющие стали, цветные металлы и сплавы. В машиностроении пайку применяют при изготовлении лопаток и дисков мелких турбин, трубопроводов, радиаторов, сосудов промышленного значения, газовой аппаратуры и т.д. В электропромышленности и приборостроении пайку применяют при изготовлении электро- и радиоламп, телевизоров, деталей электромашин, плавких предохранителей и т.д.

Припой должны обладать хорошей жидкотекучестью, т.е. легко растекаться в расплавленном состоянии и заполнять узкие зазоры и щели; малым интервалом температур кристаллизации, высокой механической прочностью, высокой электропроводностью.

Название марок припоев определяется металлами, входящими в них в наибольшем количестве (олово - О, свинец - С, алюминий - А, серебро - Ср, сурьма - Су, медь - М, цинк - Ц, висмут - Ви, кадмий - К). Обозначение драгоценного или редкого металла, входящего в состав припоя, присутствует в названии марки даже при малых количествах этого металла в сплаве. Марка припоя выбирается в зависимости от рода соединяемых металлов и сплавов, требуемой механической прочности, коррозионной стойкости и удельной электрической проводимости припоя (при пайке токоведущих частей).

Качество и прочность паяного соединения зависит от правильного выбора припоя, которые в зависимости от температуры плавления делятся на:

а) *мягкие*, имеющие температуру плавления до  $400^{\circ}\text{C}$ . Их подразделяют на: 1) *низкотемпературные с температурой плавления свыше  $145^{\circ}\text{C}$  до  $400^{\circ}\text{C}$* . К ним в основном относятся оловянно-свинцовые, например, ПОС-90, ПОС-40, ПОС-18, цифры в конце марки указывают содержания олова в %. Добавка кадмия повышает проводимость и механическую прочность контакта (например, припой марки ПОСК-47).

2) *легкоплавкие с температурой плавления до  $145^{\circ}\text{C}$* . Для придания припоям таких свойств в их состав вводят индий, висмут, кадмий. Например: сплав Вуда (50% висмут, 25% свинец, 12,5% олова, 12,5% кадмий) имеет температуру плавления всего  $60,5^{\circ}\text{C}$ .

б) *твердые или тугоплавкие*, которые плавятся при температуре выше  $400^{\circ}\text{C}$ . К ним относят:

1) *медно-цинковые припой*, например: ПМЦ-36 (36% меди, остальное цинк), ПМЦ-48, ПМЦ-54 с температурой плавления  $800\text{...}900^{\circ}\text{C}$ ;

2) *серебряные*, например: ПСр-70, ПСр-45, ПСр-25 с температурой плав-

ления 600...900°С, цифра в конце марки указывают содержание серебра в %. Применяются при пайке особо ответственных изделий электронной промышленности.

3) **чистая медь** марок М1 и М2 с температурой плавления 1083°С.

4) **латунь** Л62 (805°С) и Л68 (835°С).

Мягкие припои используют для пайки внутренних выводов корпусов микросхем, проволочных выводов навесных компонентов, герметизации корпусов, лужения наружных выводов корпусов микросхем, коммутационных слоев печатных плат, мест монтажа бескорпусных интегральных микросхем.

Твердые припои отличаются тугоплавкостью и высокой механической прочностью, но технология пайки значительно сложнее и проводится в специальных электрических печах.

Перед пайкой поверхности деталей должны быть очищены от грязи, жира и окисных пленок, что необходимо для защиты основного металла и припоя от окисления для лучшего растекания припоя и обеспечения более прочной пайки. Для этой цели применяют **флюсы**: для **мягких** припоев хлористый цинк, нашатырь, канифоль и спецпасты; для **твердых** припоев борную кислоту, буру и др.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

## Тема 2.3 Материалы высокого электрического сопротивления

### Состав, свойства, маркировка и применение манганина, константана, нихрома и фехраля.

К таким материалам относятся сплавы, имеющие при нормальных условиях удельное электрическое сопротивление не менее 0,3 мкОм·м. Эти материалы достаточно широко применяются при изготовлении различных электроизмерительных и электронагревательных приборов, образцовых сопротивлений, реостатов и т.д.

Основными параметрами этих материалов являются:

- 1) *удельное сопротивление* ( $\rho$ ),
- 2) *температурный коэффициент удельного электрического сопротивления* ( $\alpha_{\rho}$ ),
- 3) *предельная температура* ( $T_{пр}$ ), при которой элемент, из этого материала может работать без изменения своих свойств.

К материалам данной группы относят сплавы:

- 1) **на основе меди** — манганин, константан;
- 2) **на основе железа** — нихром, фехраль, хромаль.

**Манганин** - выпускается в виде проволоки диаметром 0,02-1 мм для изготовления проволочных сопротивлений. Достоинство — слабая зависимость сопротивления от температуры. Используют для обеспечения постоянства сопротивления в электроизмерительных устройствах. В контакте с медью манганин имеет малое значение термоЭДС, благодаря чему снижается погрешность при точных измерениях, что позволяет широко использовать его при изготовлении резисторов и электроизмерительных приборов самых высоких классов точности.

Для стабилизации манганина в него вводят 0,2-0,5% железа и 0,2-0,5% алюминия.

$T_{пр}$  нестабилизированного манганина — 60°C.

$T_{пр}$  стабилизированного манганина — 200°C.

$T_{пл} = 960^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 0,40 \dots 0,52$  мкОм · м.

МНМцЗ-12 - манганин, 3%-никеля, 12%-марганца, 85%-меди.

**Константан** обладает малой величиной температурного коэффициента сопротивления.

Образование сплошной оксидной плёнки позволяет использовать его в качестве естественной изоляции между витками в реостатах. Высокие механические характеристики, сочетающиеся с пластичностью, позволяют изготавливать из этого сплава тончайшую проволоку, ленты, полосы и фольгу. Высокое значение термоЭДС в паре с медью и железом позволяет использовать его при изготовлении термопар. Наличие в составе константана достаточно большого количества дорогого и дефицитного никеля ограничивает его использование в изделиях массового производства.

$T_{пл} = 1270^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 0,45 - 0,52$  мкОм · м;  $T_{пр} = 450^\circ\text{C}$ .

МН-40 — константан, никеля 40%, меди 60%.

МНМц-40-1.3 – константан, никеля 40%, 1,3% марганца, остальное медь.

**Нихром, фехраль и хромаль** – являются жаростойкими материалами, применяемыми в электронагревательных приборах и печах, где необходима длительная работа при температуре от 800 до 1200 °С. В процессе работы на поверхности проволоки образуется плотная защитная оксидная плёнка, предохраняющая материал от дальнейшего окисления и разрушения.

**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 нагревостойкости сплава; содержание хрома придает высокую тугоплавкость. Нихромовая проволока применяется для изготовления проволочных резисторов, потенциометров, паяльников, электропечей и пленочных резисторов интегральных схем.

$T_{пл} = 1380-1420^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho = 1,02 - 1,36 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ;  $T_{пр} = 900-1100^{\circ}\text{C}$ .

X20H80 - нихром, 20% - хрома, 80% - никеля.

XI5H60 — ферронихром, 15% - хрома, 60% - никеля, 25% - железа.

**Фехраль и хромаль** - хромоалюминиевые сплавы, намного дешевле нихромов, так как хром и алюминий сравнительно дешевле и менее дефицитны, чем никель. Однако они менее технологичны, более твердые и хрупкие. Из них получают проволоку большего диаметра и ленты с большим поперечным сечением, поэтому их используют в электронагревательных устройствах большей мощности и промышленных электрических печах.

**Фехраль:**  $T_{пл} = 1500^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho = 1,3 - 1,4 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ;  $T_{пр} = 900-1200^{\circ}\text{C}$ .

X25Ю5 — фехраль, 25% - хрома, 5% - алюминия, 70% - железа.

X15Ю5 — фехраль, 15% - хрома, 5% - алюминия, 80% - железа.

**Материалы для термопар.** Для изготовления термопар используют проводники, обладающие большим и стабильным коэффициентом термоЭДС:

- копель (44% никеля, 56% меди);  $\rho = 0,465 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ;

- алюмель (95% никеля, 5% алюминия, кремния, марганца);

$\rho = 0,305 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ;

- хромель (90% никеля, 10% хрома);  $\rho = 0,66 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ;

- платинородий (90% платины, 10% родия);  $\rho = 0,19 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ;

Термопары применяют для измерения температур:

1) до 350°С – медь-константан, медь-копель;

2) до 600°С – железо-константан; железо-копель, хромель-копель;

3) до 900...1000°С – хромель-алюмель;

4) до 1600°С – платинородий-платина;

5) для криогенных температур – железо-золото.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

## 2.4 Неметаллические проводниковые материалы

### Угольные проводниковые материалы. Композиционные проводящие материалы

**Неметаллические проводниковые материалы** – это электроугольные материалы, изготавливаемые методом порошковой технологии из смеси углеродистых материалов (графита, кокса, сажи и антроцита). В исходный состав электроугольных материалов вводят также металлические порошки (медный, свинцовый, оловянный и др.). Кроме того, в производстве электроугольных материалов применяют связующие вещества (каменноугольные, кремнеорганические и др. смолы). Исходным материалом для производства электроугольных изделий являются:

1) **Природный графит** – кристаллическое вещество, одна из форм углерода слоистой структуры. Легко отслаивается, что ценно для работы скользящих контактов. Это свойство также используют и при изготовлении сухих смазочных материалов. Добывают природный графит обогащением специальных руд. Искусственные графиты получают перекристаллизацией углей при температуре 2250-2500 °С. Они имеют более чистый состав, чем природные графиты. Графит выпускают в виде прутков, пластин, брусков. Изделия из графита можно использовать только в инертной среде или в вакууме при температуре до 2000 °С, а в среде кислорода и двуокиси углерода – при температуре до 500 °С.

2) **сажа** представляет собой мелкодисперсный углерод с примесью смолистых веществ.

3) **антрацит** - блестящий, черного цвета ископаемый уголь с наиболее высокой степенью изменения структуры, используется в виде угольных материалов (измельченный антрацит со связкой, обожженный при температурах до 3000 °С) для угольных электродов, работающих при высоких температурах, и в виде угольных порошков для микрофонов.

К неметаллическим проводникам также относят:

1) **Пиролитический углерод** получают в процессе термического разложения без доступа кислорода (пиролиза) газообразных углеводородов в камере, где находятся стеклянные или керамические заготовки оснований для непроволочных резисторов.

2) **Бороуглеродистые пленки** получают в результате пиролиза бороорганических соединений. Они обладают малым температурным коэффициентом удельного электрического сопротивления  $TK^{\rho}$ .

Природный графит, пиролитический углерод, бороуглеродистые пленки и сажу используют для изготовления непроволочных линейных резисторов, угольных электродов.

Угольные материалы используют для изготовления щеток, которые служат для образования скользящего контакта между неподвижной и вращающейся частями электрической машины. Заготовки электрощеток и др. изделий из электроугольных материалов разрезают на мелкие части фрезами, затем в изделиях сверлят отверстия под гибкие соединительные провода.

Промышленность выпускает щетки:

1) **Графитные** (марки Г); изготавливают из натурального графита, отличаются мягкостью, не вызывают шума при работе и применяются при окружных скоростях 20-35 м/с.

2) **Угольно-графитные** (марок Т и УГ), изготавливают из графита, сажи, кокса и связующих смол. Обладают повышенной твердостью и поэтому могут очищать оксидные пленки на коллекторах и кольцах электрических машин. Эти щетки *применяют при окружных скоростях 10-30 м/с.*

3) **Металлографические** - изготавливают из порошков графита и меди (в которые входят также порошки олова и серебра), применяются при окружных скоростях 30-40 м/с.

4) **электрографитированные** (марки ЭГ), подвергаются графитированию.

**Проводящие композиционные материалы** представляют собой механические смеси мелкодисперсных порошков металлов и их соединений с органической или неорганической связкой.

Композиционные материалы сочетают в себе ряд ценных свойств: большое удельное электрическое сопротивление, слабо зависящее от температуры; возможность управления электрическими свойствами с изменением состава; сравнительно простую технологию изготовления.

Основными недостатками композиционных материалов являются повышенный уровень собственных шумов, зависимость сопротивления от частоты, старение при длительной нагрузке.

Для изготовления композиционных резисторов смешивают проводящий материал, органические и неорганические связующие, наполнитель и пластификатор.

По назначению их можно разделить на композиционные материалы для получения беспроволочных композиционных резисторов, проводников и резисторов толстопленочных микросхем, металлизации металлокерамических корпусов.

Проводящие композиционные материалы применяются в виде паст или порошков:

1) **Кермет** – композиция в виде порошка от светло- до темно-серого цвета. В состав которого входят окись кремния и порошок хрома (вместо хрома в композицию могут входить серебро и палладий в соотношении 5:4) - 90%. Композиционные материалы типа кермета получили название **металлоглазуревых**.

Технология их приготовления сводится к размельчению и смешиванию порошков металлов с окисью кремния при наличии растворителя. Полученную пасту наносят на подложку, подвергают термообработке при температуре 1100°C и получают пленки толщиной 20...25 мкм. Такие пленки обладают термостойкостью, влагостойкостью, стабильностью характеристик.

2) **Проводящие пасты** должны обеспечивать низкое удельное электрическое сопротивление пленок и малую активность при контакте с химически активными материалами при высокой температуре.

В их состав входят функциональный материал (мелкодисперсные порошки металлов), постоянное связующее (стекло) и временное связующее вещество

(смесь нескольких органических жидкостей).

Электрические свойства проводящей пасты определяются входящими в ее состав порошками металлов. Наибольшее применение нашли пасты на основе благородных металлов – серебра, золота, платины, палладия и их сплавов.

3) **Резистивные пасты** отличаются от проводящих по составу функциональных материалов, в качестве которых используются те же металлы в комбинации с изоляционными и полупроводниковыми материалами. Проводящие и временные связующие элементы у них те же. Изменяя процентное содержание компонентов в пасте, можно получать резистивные пленки с сопротивлением в широком диапазоне.

**Контактолы** - токопроводящие пасты, клеи, эмали, применяемые для получения электрических контактов в радиоэлектронике. Они представляют собой композиции на основе эпоксидных и кремнийорганических смол с добавлением порошков металлов с высокой тепло- и электропроводностью. Приготовленный состав хранится при температуре ниже нуля в парах растворителя.

Контактолы обладают следующими свойствами: высокая прочность и эластичность; хорошие антикоррозионные свойства; низкая плотность; удельное электрическое сопротивление в 5... 100 раз выше, чем у мягких припоев.

В зависимости от типа металлического наполнителя выделяют контактолы, содержащие серебро, никель, палладий, золото, посеребренный никель и др.

<a href="#"><u>НАЗАД</u></a>	<a href="#"><u>Вопросы по разделу 2</u></a>	<a href="#"><u>Обратная связь</u></a>	<a href="#"><u>ДАЛЕЕ</u></a>
------------------------------	---	---------------------------------------	------------------------------

## Тема 3.1 Физические процессы в диэлектриках

### 3.1.1 Поляризация, виды поляризации

*Диэлектриком* называется вещество, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле.

Для диэлектрика характерно:

1) *отсутствие* (или незначительное количество) *свободных электрических зарядов*, способных участвовать в электропроводности. Поэтому для диэлектрика характерно большое сопротивление прохождению постоянного тока.

2) *наличие сильно связанных зарядов*.

Под действием внешнего электрического поля напряженностью  $E$  происходит *смещение связанных зарядов относительно своих устойчивых положений*, т.е. происходит *ориентация зарядов внешним* электрическим полем. Это явление называется *поляризацией*. В результате в объеме диэлектрика возникает внутреннее электростатическое поле  $E_{вн}$ , обусловленное заряженными частицами самого вещества (рисунок 3.1), а суммарное поле в диэлектрике  $E_{д} = E - E_{вн} > 0$ .

При отсутствии внешнего поля каждый элемент объема, содержащий достаточно большое число молекул, не имеет электрического момента из-за разупорядоченной ориентации электрических моментов отдельных молекул. Под действием внешнего электрического поля за счет упорядочения расположения зарядов молекул в пространстве каждый элементарный объем диэлектрика будет иметь электрический момент, отличный от нуля и равный сумме электрических моментов всех поляризованных молекул диэлектрика, находящихся в этом объеме.

*Степень поляризации* диэлектрика характеризуется параметром  $P$  — *поляризованностью*, которая численно равна электрическому моменту единицы объема поляризованного диэлектрика.

*Электрическая поляризация* — это состояние вещества, при котором электрический момент некоторого объема вещества отличен от нуля.

Диэлектрики, в которых поляризация возникает только под действием электрического поля, называются *линейными* или пассивными и применяются в технике в качестве электроизоляционных материалов и в конденсаторах.

Электроизоляционные материалы — диэлектрические материалы, предназначенные для создания электрической изоляции токоведущих частей электрических машин и устройств.

Диэлектрики, которые поляризуются благодаря механическому воздействию, называются *пьезоэлектриками*, а явление — *пьезоэлектрическим эффектом*.

Диэлектрики, в которых возникает самопроизвольная поляризация в определенном интервале температур, называются *сегнетоэлектриками*, а явление — *спонтанной поляризацией*.

Пьезоэлектрики и сегнетоэлектрики являются нелинейными диэлектриками и относятся к классу *активных* диэлектриков. К этому же классу относятся диэлектрики с особыми оптическими свойствами, способные сохранять по-

ляризованное состояние и создающие тем самым электрическое поле в окружающем пространстве после снятия внешнего поля.

Для количественной оценки степени поляризации диэлектрика пользуются характеристикой, называемой **диэлектрической проницаемостью**  $\varepsilon$ . Различают:

1) **абсолютную диэлектрическую проницаемость**  $\varepsilon^*$  - это величина, характеризующая способность диэлектрика образовывать электрическую емкость; ее размерность — [Ф/м].

2) **относительную**, или просто **диэлектрическую проницаемость**  $\varepsilon$ .

Связь между абсолютной и относительной диэлектрическими проницаемостями определяется соотношением  $\varepsilon^* = \varepsilon\varepsilon_0$ , где  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная, характеризующая электрическое поле при отсутствии его взаимодействия с веществом, т.е. она характеризуют электрическое поле в вакууме:  $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$  [Ф/м] =  $8,85 \cdot 10^{-12}$  [Ф/м] = 8,85 [пФ/м].

**Относительная диэлектрическая проницаемость**  $\varepsilon$  является безраз-

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0}$$

мерной величиной и определяется соотношением

С точки зрения существования внутреннего электростатического поля в диэлектрике относительная диэлектрическая проницаемость показывает во сколько раз ослабляется поле в диэлектрике по сравнению с полем в вакууме при одинаковом заряде, создающем это электрическое поле, т.е.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_D} = \frac{E}{E - E_{вн}} > 1$$

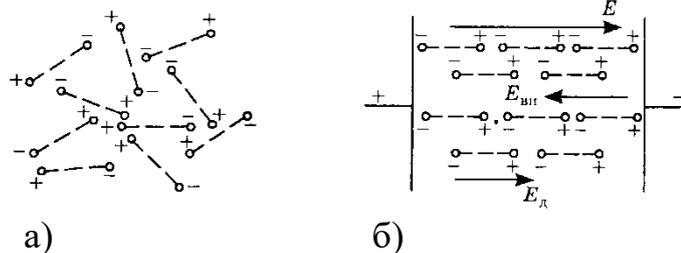


Рисунок 3.1 – Расположение зарядов в диэлектрике: а – при отсутствии внешнего поля, б – при помещении в электрическое поле.

Третье определение диэлектрической проницаемости вытекает из рассмотрения конденсатора, к пластинам которого приложено постоянное напряжение, а между обкладками вносится диэлектрик (рисунок 3.2).

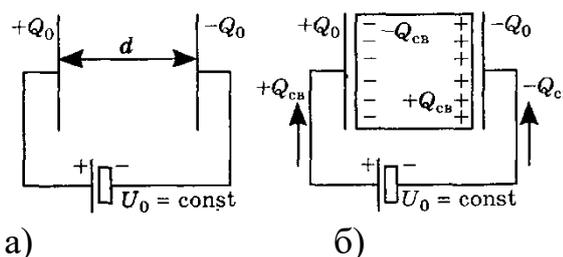


Рисунок 3.2 – Схема конденсатора: а – без диэлектрика; б - с диэлектриком

При отсутствии между обкладками конденсатора диэлектрика на них от источника  $U_0$  накапливается свободный заряд  $Q_0$  и емкость конденсатора (рисунок 3.2, а) определяется соотношением

$$C_0 = \frac{Q_0}{U_0}.$$

При внесении между обкладками конденсатора диэлектрика (рисунок 3.2, б) в нем за счет поляризации образуется связанный заряд  $Q_{CB}$ , который уменьшает напряженность электрического поля между обкладками до значения  $E_d$ . Однако, напряженность поля в соответствии с выражением  $E = U/d$  определяется только геометрией конденсатора и напряжением внешнего источника. Следовательно, уменьшение напряженности поля в конденсаторе должно компенсироваться. Это происходит за счет натекания на обкладки от источника  $U_0$  дополнительного заряда, обратного по знаку  $Q_{CB}$ . В таком случае емкость конденсатора с диэлектриком будет определяться соотношением

$$C_d = \frac{Q_0 + Q_{CB}}{U_0}.$$

Следовательно,  $C_d > C_0$  за счет наличия диэлектрика между обкладками конденсатора. Это неравенство тем больше, чем выше степень поляризации диэлектрика, характеризуемая диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ .

Отношение емкости конденсатора с диэлектриком к емкости конденсатора без диэлектрика количественно характеризует способность диэлектрика поляризоваться, что выражается в увеличении емкости конденсатора с диэлектриком:

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_0} = \frac{(Q_0 + Q_{CB})}{U_0} \cdot \frac{U_0}{Q_0} = \left(1 + \frac{Q_{CB}}{Q_0}\right) \geq 1.$$

Следовательно, относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз увеличивается емкость конденсатора с диэлектриком по сравнению с емкостью конденсатора того же размера без диэлектрика.

Диэлектрическую проницаемость можно рассчитать по экспериментально измеренной емкости, используя для расчета выражение для емкости плоского конденсатора, зная его геометрические размеры:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d},$$

где  $S$  - площадь обкладки конденсатора;  $d$  - расстояние между обкладками.

С другой стороны, при заданных размерах конденсатора можно, изменяя материал диэлектрика ( $\varepsilon$ ), получить требуемое значение емкости.

**Таким образом, для получения конденсатора максимальной емкости при минимальных размерах нужен диэлектрический материал с большим значением  $\varepsilon$ , а для изоляции проводов и радиодеталей друг от друга нужен диэлектрический материал с минимальным значением  $\varepsilon$  с целью уменьшения паразитных емкостей.**

### Виды поляризации диэлектриков

В зависимости от природы частиц, составляющих материал, и сил связи между ними в диэлектриках наблюдаются различные виды поляризации:

**а) упругая поляризация (без потерь):**

1) **Электронная поляризация** обусловлена упругим смещением и деформацией электронных оболочек относительно ядер атомов и ионов (рисунок 3.3).

При отсутствии внешнего поля центры положительного и отрицательного зарядов располагаются таким образом, что электрический момент зарядов равен нулю. При наложении внешнего поля происходит деформация орбиты, а точнее рассредоточение отрицательного заряда, т.е. появляется асимметрия зарядов и возникает электрический момент:  $m = qx$ .

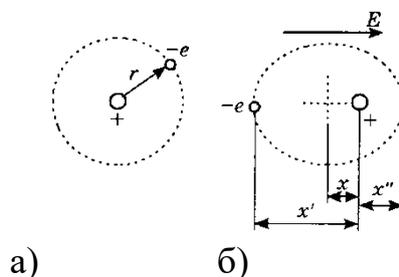


Рисунок 3.3 – Механизм электронной поляризации: а – при отсутствии внешнего поля; б – при наложении электрического поля

Возникновение электрического момента и есть электрическая поляризация. Поскольку  $x \ll r$ , смещение центров зарядов весьма незначительно ( $10^{-17}$  м). Это связано с тем, что напряженность внешнего поля намного меньше напряженности поля электростатического взаимодействия ( $E_{внеш} = 10^2 \dots 10^3$  В/см,  $E_{внутр} = 5 \cdot 10^{11}$  В/см).

Электронная поляризация присуща всем диэлектрикам и является единственным видом для неполярных диэлектриков. Время установления поляризации  $\tau \approx 10^{-15}$  с, т.е. поляризация мгновенна и затрат энергии внешнего поля на нее нет.

**В зависимости от механизма поляризации все диэлектрики можно разделить на:**

- **полярные** – группа материалов, содержащих постоянные электрические диполи, которые способны к переориентации во внешнем электрическом поле. В полярных диэлектриках наблюдается электронная и дипольно-релаксационная поляризация. Они имеют худшие электрические свойства по сравнению с неполярными диэлектриками и применяются в качестве электроизоляционных материалов в области низких частот. Полярными диэлектриками являются: эпоксидные смолы, лавсан, органическое стекло, поливинилхлорид и др.

- **неполярные** – группа материалов, не содержащих электрические диполи, которые способны к переориентации во внешнем электрическом поле.

В неполярных диэлектриках наблюдается в основном электронная поляризация. Они применяются как высококачественные электроизоляционные материалы в области высоких и сверхвысоких частот. Неполярными диэлектриками являются: воздух, полистирол, полиэтилен, бензол и др.

2) **Ионная поляризация** обусловлена упругим смещением ионов относительно положения равновесия (рисунок 3.4) и характерна для ионных диэлектриков (по структуре и виду химической связи). При помещении ионного диэлектрика в электрическое поле ионы смещаются относительно своих устойчивых положений на незначительное расстояние  $\delta$ , меньше размера элементарной ячейки  $a$ . В результате поляризации возникает электрический момент  $m = q(a \pm 2\delta)$ .

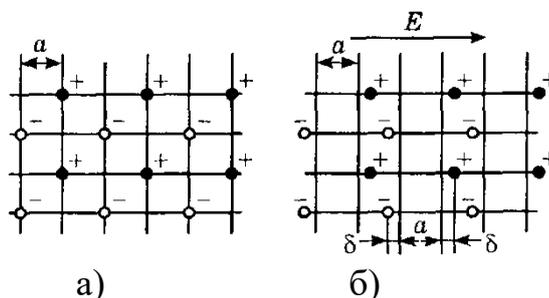


Рисунок 3.4 – Механизм ионной поляризации: а – при отсутствии внешнего поля; б – при наложении электрического поля

Время установления поляризации  $\tau \approx 10^{-13}$  с, т.е. поляризация почти мгновенна. Она успевает произойти при частотах внешнего поля, соответствующих частотам световых колебаний. При частоте менее  $10^{13}$  Гц затрат энергии внешнего поля на поляризацию нет.

**б) поляризация, связанная с потерей энергии:**

1) **Дипольно-релаксационная поляризация** возникает в ионных поляризованных диэлектриках, состоящих из дипольных молекул.

Внешнее электрическое поле создает момент вращения дипольной молекулы, т.е. ориентирует связанные заряды по полю (рисунок 3.5). Расчет момента вращения показывает, что в процессе ориентации диполя возникает электрический момент  $m$ , т.е. происходит поляризация диэлектрика.

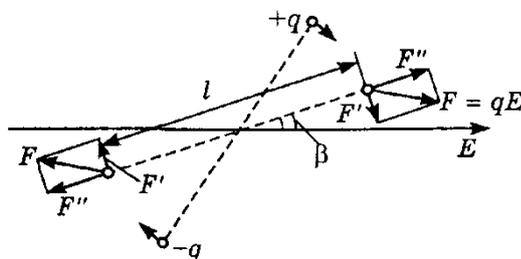


Рисунок 3.5 – Механизм дипольно-релаксационной поляризации.

Сила внешнего поля  $F = qE$ . Составляющая силы внешнего поля  $F'$  создает момент вращения  $M_{вр} = F'l = F \sin \beta \cdot l = qlE \sin \beta = mE \sin \beta$ , зависящий от электрического момента  $m$ . Здесь  $\beta$  - угол между направлениями электрического момента диполя и напряженности внешнего поля.

Время поляризации или релаксации -  $\tau = 10^{-2} \dots 10^{-10}$  с и определяется типом

диполей, а также силой химической связи между молекулами. Это свидетельствует о том, что данный вид поляризации замедленный и требует затрат энергии внешнего поля на ориентацию молекул. Это выражается в выделении теплоты, т.е. нагреве диэлектрика в процессе поляризации.

Поляризация протекает вначале быстро, а затем замедляется, т.е. ослабевает. Отсюда происходит название — релаксационная, т.е. ослабевающая или замедляющаяся.

2) **Электронно-релаксационная поляризация** возникает в диэлектриках, имеющих дефекты структуры, когда в узле кристаллической решетки отсутствует ион. В силу электронейтральности системы в месте дефекта должны находиться электрон или дырка, принадлежащие всем соседним ионам и поэтому слабо с ними связанные. Их принадлежность к соседним ионам равновероятна, а хаотическое перемещение не создает электрического момента в системе.

В случае приложения внешнего электрического поля большая часть "дефектных" зарядов сравнительно легко смещается полем, что приводит к асимметрии электрических зарядов и возникновению электрического момента в объеме диэлектрика, т.е. возникает электронно-релаксационная поляризация.

Величина  $\varepsilon$  в зависимости от степени дефектности структуры материала может достигать высоких значений. Время релаксации  $\tau$  находится в пределах от  $10^{-7}$  до  $10^{-11}$  с.

3) **Ионно-релаксационная поляризация** возникает в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой структурных элементов решетки, в частности, в стеклах. Слабо связанные ионы могут смещаться внешним полем на расстояния, превышающие постоянную решетки. При снятии поля ионы сравнительно медленно возвращаются к центрам равновесия под действием теплового хаотического движения. Время релаксации  $\tau \approx 10^{-5} \dots 10^{-7}$  с и достаточно большие расстояния смещения ионов свидетельствуют о том, что этот вид поляризации требует затрат энергии внешнего поля, т.е. в диэлектрике происходят необратимые потери энергии, выделяемые в виде теплоты.

В реальном диэлектрике может быть несколько видов поляризации с различным временем  $\tau$ . Если все поляризационные процессы присутствуют в диэлектрике и происходят независимо друг от друга, то поляризованность и, соответственно, диэлектрическая проницаемость диэлектрика является суммой всех составляющих поляризации.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 3.1.2 Проводимость диэлектриков. Потери в диэлектриках. Векторная диаграмма токов. Пробой диэлектриков. Виды пробоя

**Электропроводностью (проводимостью)** называется способность вещества проводить электрический ток под действием постоянного электрического поля.

Носителями зарядов могут быть электроны (дырки), ионы и молионы — заряженные группы молекул (коллоидные частицы). В связи с этим электропроводность бывает:

1) **Электронная** - характерна для проводников (металлов), полупроводников и относительно реже встречается у диэлектриков.

2) **Ионная** - наблюдается у кристаллических диэлектриков за счет ионов самого вещества или ионов примесей. Однако она особенно характерна для аморфных веществ — смол, лаковых пленок, компаундов, стекол, а также для жидких диэлектриков, прохождение ионных токов в которых сопровождается явлением электролиза, т.е. переносом вещества с образованием вблизи электродов новых химических веществ. Это явление используется при нанесении различных покрытий.

3) **Молионная** - по своей физической сущности довольно близка к ионной и наблюдается в коллоидных системах, представляющих собой смесь двух веществ (фаз), одно из которых в виде макроскопических частиц находится во взвешенном состоянии в другом веществе. Из коллоидных систем наиболее часто используются в электроизоляционной технике **эмульсии** (обе фазы — жидкости) и **суспензии** (одна фаза — твердое вещество, другая — жидкость). При наложении внешнего поля молионы приходят в движение, и процесс сопровождается явлением электрофореза, который отличается от электролиза тем, что не происходит образование новых веществ, а лишь меняется концентрация одной фазы в другой за счет осаждения молионов на электродах. Примером практического использования электрофореза является покрытие металлических предметов каучуком и смолами из их суспензий. Молионная электропроводность наблюдается у жидких лаков и компаундов, увлажненных масел и т.д.

Электропроводность диэлектриков в большинстве случаев носит ионный характер, т.е. носителями зарядов являются ионы, так как они часто оказываются слабо закрепленными в узлах решетки. На электропроводность твердых диэлектриков большое влияние оказывают различные примеси, которые обычно легче диссоциируют с образованием свободных ионов, чем основной диэлектрик. Объемная электропроводность при низких температурах обусловлена передвижением слабо закрепленных ионов, в частности ионов примеси.

При повышенных температурах электропроводность обусловлена переносом ионов основного вещества диэлектрика, освобожденных из узлов кристаллической решетки.

У диэлектриков различают два вида электропроводности: объемную, которая определяется током объемной утечки  $I_v$ , и поверхностную, обусловленную током поверхностной утечки  $I_s$ .

В связи с этим в диэлектриках различают два вида удельных со-

противлений:

1) **удельное объемное сопротивление**  $\rho_V$  количественно определяет способность диэлектрика пропускать электрический ток  $I_V$  через объем диэлектрика. Оно равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, вырезанного из исследуемого материала, при прохождении тока через противоположные грани. Если для измерения берется не куб, а плоский образец материала, то при однородном поле

$$\rho_V = R_V \frac{S}{h}, \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

где  $R_V$  – объёмное сопротивление, Ом;  $S$  - площадь электрода, м<sup>2</sup>;  $h$  – толщина диэлектрика, м.

2) **удельное поверхностное сопротивление**  $\rho_S$  определяет способность пропускать электрический ток  $I_S$  по поверхности диэлектрика. Оно равно сопротивлению квадрата любых размеров на поверхности диэлектрика, ток через который идет от одной стороны к противоположной. Если для измерения берется не квадрат, а прямоугольник, то

$$\rho_S = R_S \frac{a}{l}, \text{ Ом},$$

где  $R_S$  - поверхностное сопротивление, Ом  $a$  – длина электрода, м;  $l$  – расстояние между электродами, м;

Общее сопротивление изоляции определяется как эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных сопротивлений  $R_V$  и  $R_S$  :

$$R_{\text{изол}} = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S}.$$

Поверхностная электропроводность диэлектрика часто зависит от состояния его поверхности, а именно от степени его увлажнения и загрязнения. С повышением влажности электропроводность диэлектрика увеличивается. У диэлектриков, не обладающих влагопроницаемостью (например, керамика), объемная проводимость обычно не зависит от влажности окружающего воздуха.

Электропроводность диэлектриков зависит от содержания примесей. Чем выше содержание примесей, тем меньше удельное объемное сопротивление изоляционного материала.

Удельное объемное и поверхностное электрические сопротивления твердых диэлектриков зависят от температуры, влажности и величины приложенного напряжения.

Влияние напряженности внешнего поля на электропроводность диэлектрика сказывается только в области полей, близких к пробивным.

Электропроводность многих изоляционных материалов зависит не только от строения и химического состава, но и от технологии их изготовления.

**Диэлектрические потери** связаны со сложными явлениями, которые происходят в материале при воздействии на него электрического поля. Они

проявляются на постоянном и переменном токе. Однако качество диэлектрика на постоянном токе обычно характеризуется не диэлектрическими потерями, а удельным объемным и поверхностным сопротивлениями.

При воздействии электрического поля на любое вещество часть потребляемой им электрической энергии превращается в тепловую и рассеивается. Рассеянную часть поглощенной диэлектриком электрической энергии называют **диэлектрическими потерями**. Причины необратимых потерь:

- нагрев за счет протекания тока сквозной проводимости;
- потери энергии за счет замедленных видов поляризации.

При включении диэлектрика в цепь **постоянного напряжения** происходит резкий скачок тока, а затем уменьшение его до постоянного значения, называемого током **сквозной проводимости**  $I_{ск}$  (или током утечки). Он вызван перемещением свободных зарядов в диэлектрике в процессе электропроводности и не изменяется со временем (если не происходит электроочистка диэлектрика или его старение).

**$I_{ск}$  вызывает диэлектрические потери.**

Спадающий во времени ток, обусловленный перераспределением свободных зарядов, называют **абсорбционным**  $I_{аб}$ . Он обусловлен смещением связанных зарядов в ходе медленных поляризаций и вызывает рассеяние энергии в диэлектрике.

Ток, сопутствующий электронной и ионной поляризации, называют током **смещения** (емкостным током); его мгновенное значение обозначают  $I_{см}$ . Он спадает в течение  $10^{-16} \dots 10^{-15}$  с, поэтому не вызывает рассеяние энергии в диэлектрике.

Таким образом, ток, проходящий через диэлектрик, представляет собой сумму токов смещения  $I_{см}$ , абсорбции  $I_{аб}$  и сквозного  $I_{ск}$ :  $I = I_{см} + I_{аб} + I_{ск}$ .

Так как абсорбционный ток быстро затухает, то электропроводность изолирующих материалов при постоянном напряжении определяется по сквозному току:

$$\gamma = \frac{I_{ск}}{U},$$

где  $I_{ск} = I - I_{см} - I_{аб}$ ;  $I$  – общий ток, проходящий через диэлектрик, А;  $U$  – приложенное напряжение, В.

При определении электропроводности диэлектрика необходимо измерять ток, когда  $I_{см} + I_{аб} = 0$ .

Следовательно, при постоянном напряжении потери, вызванные током абсорбции, имеют место только в период, когда происходит процесс медленных поляризаций, т.е. при включении конденсатора.

При **переменном напряжении**  $I_{абс}$  имеет место, если время релаксации процесса медленных поляризаций меньше или соизмеримо с полупериодом

приложенного напряжения. В этом случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике под воздействием на него электрического поля, т.е. диэлектрические потери, обусловливаемые токами  $I_{ск}$  и  $I_{абс}$ , наблюдаются в течение всего времени воздействия приложенного напряжения.

На векторной диаграмме токов, протекающих через конденсатор с диэлектриком при переменном напряжении (см. рисунок 3.6), **емкостной ток**  $I_{см}$  опережает напряжение  $U$  по фазе на угол  $90^\circ$  и поэтому не создает потерь мощности в диэлектрике.

**Ток абсорбции**  $I_{абс}$  определяется поляризациями, процесс установления которых связан с потерями энергии, поэтому он имеет составляющие: **реактивную**  $I_{ра}$  и **активную**  $I_{аа}$

**Сквозной ток**  $I_{ск}$  совпадает по фазе с приложенным напряжением.

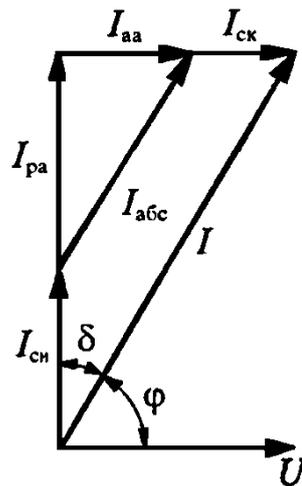


Рисунок 3.6 – Векторная диаграмма токов, протекающих через диэлектрик при переменном напряжении

**Суммарный ток**  $I$  имеет составляющие: **реактивную**  $I_p = I_{см} + I_{ра}$  и **активную**  $I_a = I_{аа} + I_{ск}$  и опережает напряжение на угол  $\varphi < 90^\circ$ .

Угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи, называют **углом диэлектрических потерь**. В соответствии с векторной диаграммой токов  $tg\delta = I_a / I_p$ ,

где  $tg\delta$  - **тангенс угла диэлектрических потерь**, который является важным параметром, характеризующим качество диэлектрика при работе на переменном напряжении.

Введение безразмерного параметра  $tg\delta$  удобно потому, что не зависит от формы и размеров участка изоляции, а определяется лишь свойствами диэлектрического материала.

**Чем больше тангенс угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ , тем выше нагрев диэлектрика в электрическом поле заданной частоты и напряжения, тем больше потери в диэлектрике, тем хуже диэлектрик. Для хороших диэлектриков  $tg\delta \leq 10^{-4}$ .**

Поскольку ток абсорбции со временем уменьшается, то сопротивление изоляции возрастает. После завершения переходного процесса в установившемся режиме через диэлектрик протекает только ток сквозной проводимости  $I_{ск} = I_y$ .

Истинное сопротивление диэлектрика определяется сквозным током и называется сопротивлением изоляции

$$R_{изол} = \frac{U}{I_y}, \text{ Ом,} \quad \text{тогда ток утечки} \quad I_y = \frac{U}{R_{изол}}, \text{ А.}$$

Мощность потерь в диэлектрике равна  $P = UI_y$ , Вт.

Удельные диэлектрические потери  $\Delta P = \frac{P}{V}$ , Вт/м<sup>3</sup>, где  $V$  - объем диэлектрика, м<sup>3</sup>.

**Пробой диэлектриков.** Явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля называют **пробоем**.

Если проводящий канал проходит от одного электрода к другому и замыкает их, происходит **полный пробой**. Если проводящий канал не достигает хотя бы одного из электродов, происходит **неполный пробой**. При **частичном** пробое пробивается лишь газовое или жидкое включение твердого диэлектрика. У твердых диэлектриков кроме пробоя по объему возможен пробой по поверхности, такой пробой называют **поверхностным**.

Минимальное напряжение, приводящее к пробоему диэлектрика, называют **пробивным** напряжением  $U_{np}$ . Пробивное напряжение  $U_{np}$  растет с увеличением толщины диэлектрика  $h$ .

Для характеристики способности материала противостоять разрушению в электрическом поле используют напряженность электрического поля, приводящую к пробоему, называемую **электрической прочностью**:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \text{ МВ/м,}$$

где  $U_{np}$  - величина приложенного к диэлектрику напряжения, при котором произошел пробой, кВ;

$h$  – толщина материала в месте пробоя, мм.

**1 кВ/мм=1МВ/м=10<sup>6</sup> В/м.**

**Пробой твердых диэлектриков** – это электрический и тепловой процесс.

**Электрический пробой** – начинается с процесса ударной ионизации, возникающей при больших напряжениях, приложенных к диэлектрику. В результате частых соударений свободных электронов с молекулами и атомами диэлектрика освобождаются новые электроны. Они создают электронную лавину, пронизывающую твердый диэлектрик по всей его толщине. При этом диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства. Этот вид пробоя протекает почти мгновенно, в течение  $10^{-8} \dots 10^{-5}$  с,

**Тепловой пробой** – это явление теплового разрушения диэлектрика по каналу, соединяющему два противоположных электрода диэлектрика. В ре-

зультате в канале будет проходить ток проводимости. Этот ток вызывает выделение тепла и нагрев этого канала, что приведет к возрастанию тока сквозной проводимости и сплошному прожиганию или расплавлению твердого диэлектрика. Тепловой пробой возникает, когда нарушается равновесие между теплотой, выделяющейся в диэлектрике, и теплотой, которая отводится в окружающую среду. Тепловой пробой развивается в течение  $10^{-3} \dots 10^2$  с, т.е. во много (миллионы) раз медленнее электрического пробоя.

**Электрохимический пробой (электрическое старение)** обусловлен медленными изменениями химического состава и структуры диэлектрика, которые развиваются под действием электрического поля или частичных разрядов в диэлектрике или в окружающей диэлектрик среде. Время развития электрохимического пробоя (его называют еще *временем жизни*  $\tau_{жс}$  диэлектрика) может достигать  $10^3 \dots 10^8$  с. С увеличением напряженности электрического поля в диэлектрике или температуры диэлектрика, как правило,  $\tau_{жс}$  уменьшается. Процесс электрохимического пробоя развивается в электрических полях с напряженностью, значительно меньшей, чем электрическая прочность диэлектрика.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

## Тема 3.2 Неэлектрические характеристики диэлектриков

### Механические, тепловые и физико-химические характеристики диэлектриков

К основным механическим свойствам относятся:

1) **Упругость** – свойство материалов восстанавливать свою форму после прекращения действия внешней силы.

2) **Механическая прочность** на разрыв, сжатие и изгиб, то есть способность материалов сопротивляться разрушению под воздействием внешних сил. Характеризуется такими показателями как предел прочности при растяжении, сжатии и изгибе, и выражается в мегапаскалях (Н/мм<sup>2</sup>).

Для диэлектрических материалов (слоистых, волокнистых) значения механической прочности сильно зависят от направления приложения нагрузки. Для таких диэлектриков как стекло, керамика, многие виды пластмасс предел прочности при сжатии значительно больше, чем при разрыве и изгибе. У металлов эти величины имеют один и тот же порядок. Механическая прочность многих диэлектриков зависит:

— от площади поперечного сечения. Так предел прочности стекловолокна при диаметре 0,01 мм равен пределу прочности бронзы;

— от температуры (как правило, уменьшаясь с ее ростом);

— от длительности воздействия нагрузок (многие термопластичные материалы дают заметные деформации, так называемое пластическое течение материала).

Механическая прочность гибких материалов (бумаги, лакотканей, пленок) характеризуется таким условным параметром, как **стойкость к надрыву**. Для пластмасс важным параметром является **сопротивление раскалыванию**.

3) **Ударная вязкость** – способность материалов сопротивляться действию динамических нагрузок, определяется методом испытания на ударный изгиб. Высокой ударной вязкостью обладает полиэтилен - свыше 100 кДж/м<sup>2</sup>, в то же время для керамики она составляет всего 2-5 кДж/м<sup>2</sup>.

4) **вибропрочность** материалов, то есть способность диэлектрика выдерживать без разрушения длительные вибрации (колебания определенной частоты и амплитуды).

5) **Твердость** – это способность поверхностного слоя электроизоляционных материалов противостоять деформации при местном силовом контактом воздействии индентера (полированный шарик из закаленной стали диаметром 5 мм).

б) **Гибкость** – способность сохранять высокие механические и электрические параметры изоляции при самых разнообразных механических деформациях.

К тепловым свойствам относятся:

1) **Теплопроводность** – это способность диэлектрика проводить теплоту; оценивается **коэффициентом теплопроводности**  $\gamma_t$ , который определяется количеством теплоты, прошедшей через единицу площади в единицу времени

при градиенте температуры 1 К/м. От способности изоляции проводить теплоту зависят нагревание проводника и электрическая прочность изоляции. Особое значение имеет теплопроводность сравнительно толстой изоляции в устройствах высокого напряжения.

2) **Нагревостойкость** – это способность диэлектрика функционировать при повышенных температурах или при резкой смене температур без недопустимого ухудшения его свойств. Определяется той температурой, при которой происходит недопустимое изменение эксплуатационных характеристик диэлектрика.

Для электроизоляционных материалов установлено семь классов нагревостойкости и соответствующая им максимальная рабочая температура: Y (90°C); A(105); E (120); B (130); F (155); H (180); G (свыше 180).

3) **Тепловое расширение** – это свойство диэлектрика изменять свои линейные размеры под действием температуры. Тепловое расширение оценивается **температурным коэффициентом линейного расширения**  $\text{TKl}$ .

4) **Холодостойкость** – это способность электрической изоляции работать при низких температурах без недопустимого ухудшения эксплуатационных характеристик.

При понижении температуры электроизоляционные свойства диэлектриков, как правило, повышаются. Однако ряд механических свойств может ухудшаться.

К физико-химическим свойствам относятся:

1) **Кислотное число** – это количество миллиграммов едкого калия (KOH) который необходим для нейтрализации свободных кислот, содержащихся в одном грамме диэлектрика. Кислотное число определяется у электроизоляционных жидкостей, чем выше кислотное число, тем больше свободных кислот в жидком диэлектрике, а значит, выше его проводимость, так как кислоты под действием электрического напряжения легко распадаются на ионы, которые ухудшают электроизоляционные и другие свойства диэлектриков.

2) **Химическая стойкость** – это способность электроизоляционных материалов противостоять химически активным веществам.

Для определения химостойкости образцы материалов помещают в среду, близкую к эксплуатационной или более интенсивной по концентрации химически активных элементов и неблагоприятную по температурным условиям, и выдерживают определенное время. После этого определяют изменения массы, внешнего вида и других показателей.

3) **Растворимость** - процесс частичного или полного проникновения друг в друга различных материалов при их соприкосновении в процессе изготовления или эксплуатации изделий. Это свойство важно для подбора растворителей лаков и для оценки стойкости электроизоляционных материалов к действию различных жидкостей, с которыми они контактируют.

4) **Светостойкость** - способность материалов сохранять свои эксплуатационные характеристики под действием светового облучения

5) **Радиационная стойкость** - способность диэлектрика сохранять свои эксплуатационные характеристики при воздействии ионизирующего излучения.

Наиболее подвержены действию облучения органические диэлектрики, так как в результате длительного или интенсивного облучения может произойти разрушение любого полимера. Неорганические диэлектрики, такие как кварц, слюда, оксиды бериллия и циркония, менее подвержены влиянию облучения. Радиационное излучение может вызывать не только ухудшение свойств диэлектриков, но и придавать им новые свойства (радиационная сшивка полимеров, легирование полупроводников и т.п.).

6) **Влагостойкость** – это способность материала сохранять свои эксплуатационные свойства при воздействии влаги, которая, проникая в поры материала, вызывает снижение его электрических характеристик. Влажностные свойства диэлектриков определяются:

- **гигроскопичностью** (влагопоглощаемостью) – способностью материала поглощать водяные пары из окружающей атмосферы;
- **водопоглощаемостью** – способностью материала поглощать воду;
- **влагопроницаемостью** – способностью материала пропускать сквозь себя пары воды. Имеет большое практическое значение при оценке защитных покрытий.

7) **Вязкость** представляет собой коэффициент внутреннего трения при относительном перемещении частиц жидкости; если вязкость жидкости мала, то ее частицы подвижны, то есть жидкость обладает хорошей текучестью. Вязкость определяет пропитывающую способность жидких диэлектриков. Чем меньше вязкость пропиточных электроизоляционных составов, тем глубже проникают их частицы в поры волокнистой изоляции обмоток.

8) **Тропическая стойкость** определяется у диэлектриков, применяемых в электрооборудовании поставляемом в страны с тропическим климатом (Индия, Цейлон, Эфиопия). В этих условиях электроизоляционные материалы подвергаются:

- высокой температуре воздуха 45 °С - 55 °С;
- резкому изменению температуры в течение суток на 40 °С;
- высокой влажности воздуха 80 - 96 %;
- солнечной радиации;
- воздействию плесневых грибков, бактерий, вредителей животного мира;
- воздействию воздуха, содержащего соли, пыль, пепел.

Эти факторы оказывают разрушающее воздействие на такие органические материалы, как хлопчатобумажные и шелковые ткани, а также многие пластмассы с древесными и хлопчатобумажными наполнителями. Наиболее стойкими к тропическим воздействиям являются материалы неорганического происхождения (электрокерамика).

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### Тема 3.3 Газообразные диэлектрики Электропроводность газов и их пробой

Преимуществом газов перед остальными диэлектриками является высокое удельное сопротивление, малый тангенс угла диэлектрических потерь, малая (близкая к единице) диэлектрическая проницаемость. Наиболее важным свойством газов является их способность восстановить электрическую прочность после разряда.

Основным недостатком газообразной электрической изоляции является низкая электрическая прочность, однако в ряде случаев этот недостаток не имеет значения.

В качестве газообразных диэлектриков применяют:

1) **Воздух** – смесь состоящая из азота  $N_2$  (78,03%), кислорода  $O_2$  (20,93%), углекислого газа  $CO_2$  (0,03%) и инертных газов (0,1%). Электрическая прочность воздуха условно принимается равной единице:  $E_{пр.в} = 1$ . Воздух является основным изолирующим материалом в воздушных конденсаторах, на участках воздушных линий электропередач. Но чаще всего он является вспомогательным диэлектриком, окружающим детали и узлы.

2) **Азот  $N_2$**  – бесцветный газ, не имеющий запаха, инертен; при комнатной температуре реагирует только с литием, при нагревании соединяется с магнием и калием, при очень высокой температуре с кислородом и водородом. Обладает одинаковой с воздухом диэлектрической проницаемостью и электрической прочностью. Чистый азот применяют для высоковольтных конденсаторов постоянной емкости, для наполнения баллонов осветительных ламп.

3) **Водород  $H_2$**  – бесцветный горючий газ, не имеющий запаха, самый легкий, электрическая прочность примерно на 40% ниже воздуха. При поджигании смеси, состоящей из двух объемов водорода и одного объема кислорода, происходит почти мгновенное соединение газов, которое сопровождается взрывом. Такая смесь называется *гремучим газом*. Кроме того, смесь водорода с хлором в соотношении 1:1 взрывается на свету, поэтому при работе с водородом необходимо соблюдать осторожность. Водород обладает свойствами, особо благоприятными для использования в качестве охлаждающей среды вместо воздуха, так как имеет высокую удельную теплопроводность и теплоемкость. Крупные электрические машины также заполняются водородом для снижения потерь мощности на трение ротора в газе и замедления старения органических компонентов изоляции. Применяется в качестве восстановительной среды при пайке и термической обработке.

4) **Инертные газы:**

**Гелий  $He$**  – самый легкий из всех инертных газов, не горит, не поддерживает горение. Обладает уникальными свойствами: имеет самую низкую электрическую прочность  $E_{пр}$  (примерно в 17 раз меньшую, чем у воздуха), самую низкую по сравнению со всеми газами температуру сжижения; диэлектрическая проницаемость жидкого гелия почти не отличается от диэлектрической проницаемости газов; коэффициенты термического расширения газообразного и жидкого гелия одного порядка.

Благодаря чрезвычайно низкой теплоте испарения сжиженный гелий применяют в качестве низкотемпературного хладагента. В микроэлектронике гелий применяют в качестве индикаторного газа при контроле герметичности микросхем.

**Аргон  $Ar_2$**  - бесцветный инертный газ, почти в 2 раза тяжелее воздуха. Обладает совокупностью благоприятных свойств: относительно низким потенциалом ионизации, химической инертностью, невысокой теплопроводностью, более простой по сравнению с другими инертными газами технологией получения и очистки.

Применяется в газоразрядных приборах и осветительных лампах, в микроэлектронике в качестве защитного газа при микропайке, микросварке; при сборке и межоперационном хранении приборов в инертной среде; как газ-носитель при производстве полупроводниковых материалов.

5) **электроотрицательные газы** с высокой молекулярной массой и плотностью, содержащие галогены (фтор, хлор и др.). Для их ионизации требуется большая энергия, поэтому по сравнению с воздухом имеют более высокую электрическую прочность. К ним относят **элегаз** ( $SF_6$  – гексафторид серы), **фреон** ( $CCL_2F_2$ ), перфторированные углеводороды, т.е. углеводороды, в которых все атомы водорода заменены атомами фтора.

**Элегаз** имеет электрическую прочность в 2,5 раза выше, чем у воздуха, обладает низкой температурой кипения и высокой плотностью, в 5,1 раза тяжелее воздуха и может быть сжат до давления в 2 МПа без сжижения; не токсичен, химически стоек, не разлагается при нагревании до 800 °С. Недостаток элегаза - высокая стоимость, для удешевления его используют в смеси с более дешевым азотом. Применяется в газонаполненных высоковольтных конденсаторах и в качестве электроотрицательного газа при контроле герметичности схем.

**Электрическая прочность** газов  $E_{np}$  зависит от однородности электрического поля, давления газа  $P$ , расстояния между электродами  $h$ , частоты тока  $f$ .

**При высоком давлении газа  $P$**  увеличение электрической прочности  $E_{np}$  связано с уменьшением длины свободного пробега электронов, а **при малом давлении** – с уменьшением вероятности столкновения электронов с молекулами газа.

**Пробой при высоком вакууме** можно объяснить явлением взрывания электронов на поверхности электродов.

На зависимости электрической прочности от давления газа  $P$  основано применение газов в качестве электрической изоляции в вакуумных конденсаторах и кабелях, заполненных газом под давлением. Высокую электрическую прочность вакуума широко используют в технике, например при конструировании электровакуумных приборов.

Значительное влияние на электрическую прочность воздуха оказывает **форма электродов и расстояние между ними**.

При различных электродах со скругленными краями степень их скругления оказывает весьма существенное влияние на электрическую прочность воздуха, **снижая ее с уменьшением радиуса кривизны**. Также влияет состояние поверхно-

сти электродов: для получения наиболее высокой прочности *электроды должны обладать гладкой поверхностью и перед пробоем очищаются от пыли.*

*При уменьшении расстояния между электродами до 0,1 мм и менее электрическая прочность газов увеличивается, что связано с уменьшением вероятности столкновения электронов с молекулами газа и трудностью формирования разряда, так как свободные электроны и ионы при таких малых расстояниях не успевают приобрести энергию, достаточную для ударной ионизации.*

### **Электропроводность газов. Вольт-амперная характеристика.**

#### **Пробой газов в однородном электрическом поле**

Образование электрически заряженных частиц в газообразных диэлектриках вызывается *ионизацией газа* внешними источниками энергии (внешними ионизаторами: космическими и солнечными лучами, радиоактивными излучениями Земли).

Находясь в беспорядочном тепловом движении, некоторая часть отрицательно и положительно заряженных частиц воссоединяются, друг с другом образуя электрически нейтральные атомы и молекулы газа. Этот процесс называется *восстановлением и рекомбинацией.*

Если между металлическими электродами заключить какой-то объем газа, и приложить к электродам электрическое напряжение, то на заряженные частицы в газе будут действовать электрические силы, вызывающие напряженность электрического поля. Под действием этих сил электроны и ионы будут перемещаться от одного электрода к другому, создавая электрический ток в газе. Изменение величины тока в зависимости от напряжения, приложенного к объему газа, выражается графически в виде кривой называемой вольт-амперной характеристикой (ВАХ, см. рисунок 3.7) .

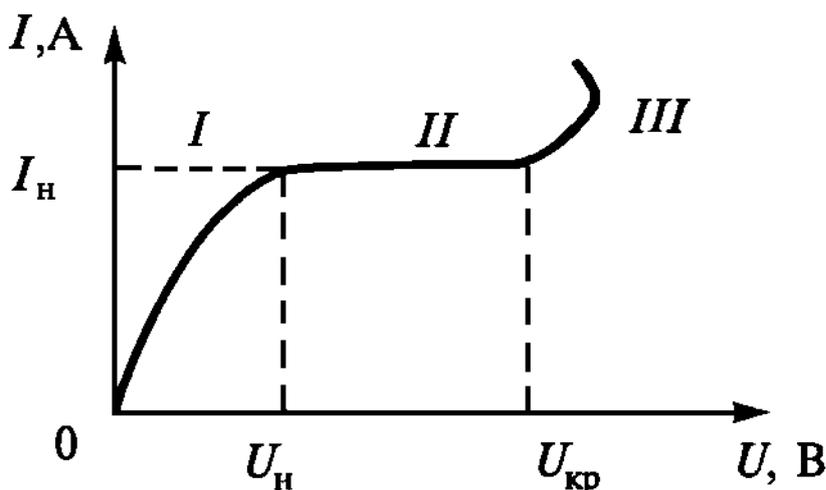


Рисунок 3.7 – Вольт-амперная характеристика

В области слабых электрических полей (область I), ток в газе возрастает пропорционально величине приложенного напряжения. В этой области изменение тока происходит согласно закону Ома, т. к. наряду с ионизацией заряженных частиц происходит и их рекомбинация.

В области II ток проводимости не зависит от напряжения, так как все ио-

ны и электроны в газовом промежутке разряжаются на электродах, не успев рекомбинировать, здесь происходит накопление энергии заряженными частицами газа. Максимальный ток, не зависящий от приложенного напряжения, называется *током насыщения*  $I_n$ .

При критическом напряжении  $U_{кр}$  энергии заряженных частиц достаточно для совершения *ударной ионизации*, которая выражается в резком возрастании скорости заряженных частиц, вследствие чего происходят частые соударения их с нейтральными частицами газа. В результате электроны отделяются от своих атомов, при этом образуются новые электрически заряженные частицы: свободные электроны и ионы. Их образование происходит весьма интенсивно. В области ударной ионизации (область III) ток в газе интенсивно возрастает, при малейшем повышении напряжения процесс ударной ионизации сопровождается резким уменьшением величины удельного объемного сопротивления. Развитие процесса ударной ионизации в газе приводит к пробое данного объема газа. ***В момент пробоя газа ток в нем резко возрастает, а напряжение снижается к нулю.***

Однородное поле образуется между электродами одинаковой геометрической формы с большой площадью поверхности (например, плоскость-плоскость, шар-шар), когда их диаметр в 10 раз больше расстояния между ними.

Ударная ионизация электронами составляет основу пробоя газа. Однако электронная лавина еще не достаточна для образования пробоя, так как не создает проводящего пути между электродами.

Кроме явления ударной ионизации, создающей первую лавину заряженных частиц, при пробое газа большую роль играют фотоны. Параллельно с явлением ударной ионизации газа происходит переход электронов на более высокие энергетические уровни. Эти электроны не теряют связь с ядром и, не задерживаясь на возбужденных уровнях, возвращаются на нормальные, излучая энергию в виде световых частиц фотонов. Таких молекул значительно больше, чем ионизированных. Они создают новые очаги ионизации и образуют фотоэлектронные лавины, что значительно ускоряет процесс пробоя газа.

В результате дальнейшего развития ударной ионизации возникает электронная лавина, которая, двигаясь к положительному электроду, встречает лавинный поток положительных ионов, направленных к отрицательному электроду. В результате в образовавшейся в газовом промежутке проводящей *газоразрядной плазме*, в которой плотности положительных ионов и электронов равны, возникает пробой газа, который происходит в виде искрового разряда, то есть светящихся искр, соединяющих поверхности металлических электродов, помещенных в газовой среде.

Пробой газа происходит мгновенно, при расстоянии между электродами  $h = 1$  см, время пробоя примерно  $10^{-8}$  с.

### **Пробой газов в неоднородном электрическом поле.**

Неоднородное поле образуется между электродами, если хотя бы один из них имеет малую площадь. В основном неоднородные электрические поля существуют в газоразрядных приборах, между контактами реле, между провода-

ми линий электропередачи.

Пробой газа в неоднородном поле, как правило, происходит при меньшем пробивном напряжении по сравнению с пробоем того же слоя газа в однородном электрическом поле.

Особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда в виде «короны», который сопровождается свечением и разрушением молекул. При дальнейшем повышении напряжения корона перерастает в *кистевой разряд*, который затем превращается в *искровой*. При большой мощности неоднородного электрического поля образуется *дуговой разряд*, который сопровождается образованием озона (соединение из трех атомов кислорода, образуется при разряде электричества; газ с характерным запахом) и оксидов азота и характерным шипением, потрескиванием и своеобразным свечением.

Часто возникает пробой на границе раздела с твердым диэлектриком. Такой пробой в технике называют *поверхностным*. На поверхностное пробивное напряжение в области низких частот сильное влияние оказывает влажность воздуха, степень запыления изолятора и химический состав пыли.

Поверхностное пробивное напряжение можно повысить, увеличивая путь поверхностного разряда. С этой целью поверхность изолятора часто делают ребристой.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 3.4 Жидкие диэлектрики

#### **Нефтяные масла, синтетические жидкие диэлектрики. Свойства, применение и их пробой**

Предназначаются для пропитки электрической изоляции трансформаторов, конденсаторов, кабелей с целью повышения её электрической прочности и отвода тепла в процессе конвекции для дугогашения в масляных выключателях.

По химической природе жидкие диэлектрики делятся на:

#### **1 Нефтяные масла:**

**1.1 Трансформаторное масло** – жидкость от почти бесцветного до темно-желтого цвета, которую получают фракционной перегонкой нефти. Эти масла являются смесью углеводородов парафинового, нефтенового и ароматического рядов с небольшой примесью атомов серы, кислорода, азота.

Чтобы получить трансформаторное масло, необходимо очистить масляный дистиллят, который остается после отгонки от нефти от легких нефтепродуктов (бензина, керосина). Дистилляции очищают серной кислотой, затем нейтрализуют щелочью, промывают водой и сушат при температуре 75-85°C, продувая через него воздух. Для очистки от примесей и механических загрязнений масла фильтруют через адсорбенты- вещества, имеющие сильно развитую поверхность (силикагель, инфузорные земли).

#### **Основные свойства:**

1) малая вязкость, что весьма важно, так как слишком вязкое масло хуже отводит теплоту потерь от обмоток и сердечника трансформатора и хуже пропитывает пористую изоляцию;

2) температура застывания – 70°C ( что особенно важно для аппаратуры, работающей при низкой температуре окружающей среды);

3) электрическая прочность  $E_{пр} = 10...25$  МВ/м (очень чувствительна к увлажнению, но при сушке восстанавливается);

4) теплоемкость и теплопроводность масла увеличиваются с ростом температуры (при свободной конвекции масло отводит теплоту от погруженных в него обмоток и сердечника трансформатора в 25...30 раз интенсивнее, чем воздух).

Применяют трансформаторное масло в качестве изолирующей и охлаждающей среды в силовых и импульсных трансформаторах, высоковольтных выключателях как дугогасящая среда.

**1.2 Конденсаторное масло** получают из высококачественной нефти или в результате дополнительной очистки адсорбентами трансформаторного масла. Операцию очистки кислотой и щелочью проводят так же как для трансформаторного масла, но более длительно и тщательно для удаления из него растворенного воздуха, что снижает диэлектрические потери.

Его используют для пропитки изоляции в бумажных и пленочных конденсаторах, что позволяет уменьшить габаритные размеры, массу и стоимость конденсаторов.

**1.3 Кабельное масло** отличается от трансформаторного повышенной вязкостью, а от конденсаторного пониженными электрическими свойствами, используется в чистом виде или в виде пропиточного состава для бумажной изоляции. В последнем случае в масло вводят канифоль для увеличения вязкости, чтобы избежать вытекания через бумажную изоляцию кабеля.

#### **Недостатки нефтяных масел:**

- 1) подверженность старению;
- 2) легкая воспламеняемость ;
- 3) гигроскопичность (категорически запрещается хранить их в открытой таре).

4) Важной характеристикой масла является его электрическая прочность, которая очень чувствительна к увлажнению.

## **2 Синтетические жидкости**

**2.1 Хлорированные углеводороды** получают заменой некоторых или даже всех атомов водорода атомами хлора у различных углеводородов.

Наиболее часто применяют полярные продукты хлорирования дифенила. Наиболее известные из них: совол, совтол, гексол

**Совол** - бесцветная вязкая жидкость с неприятным запахом. Относительная диэлектрическая проницаемость совола совпадает с относительной диэлектрической проницаемостью изоляционных бумаг и выше в два раза, чем у трансформаторного масла.

Поэтому его применяют при пропитке конденсаторов, что увеличивает емкость конденсатора и повышает электрическую прочность.

Совол является не горючим и может длительно выдерживать температуру 120-150°C, он не окисляется, что составляет его главное преимущество перед нефтяными маслами. Температура застывания совола минус 5°C.

Недостатки: токсичность; большая вязкость (в 5 – 6 раз выше вязкости трансформаторного масла);

малая морозостойкость; высокая стоимость, он примерно дороже в 10 раз трансформаторного масла.

**Совтол** представляет собой смесь 65% совола и 35% трихлорбензола.

Вязкость и температура застывания совтола близки к трансформаторному маслу. Остальные свойства совтола аналогичны свойствам совола.

Применяют вместо трансформаторного масла для взрывоопасных конденсаторов.

**Гексол** представляет собой негорючую смесь (1:4 по объему) полихлордифенила и гексахлорбутадиена с очень низкой температурой застывания минус 70°C.

Он обладает такими положительными свойствами в отличие от совола, совтола и трансформаторного масла, как незначительная вязкость даже при минусовых температурах, большой диапазон рабочих температур (может быть рекомендован для эксплуатации при окружающей температуре, ниже минус

60°C), не образует взрывоопасные смеси, имеет большой срок службы, большую электрическую прочность изоляции, не взаимодействует с твердыми материалами ( медью, сталью, алюминием) и, в отличие совола и совтола, может быть рекомендован для применения в шунтирующих выключателях вместо трансформаторного масла.

**2.2 Кремнийорганические жидкости** – это продукт синтеза кремнистых и углеродистых соединений, свойства которых определяются типом органических радикалов.

Характеризуются высокой нагревостойкостью, низкой температурой застывания, малым температурным коэффициентом вязкости, химической инертностью, малыми диэлектрическими потерями и низкой гигроскопичностью.

Применяют для пропитки бумажных конденсаторов и для гидрофобизации изоляционных лент, для пропитки и заливки конденсаторов, работающих в интервале температур от -60°C до +100°C.

**2.3 Фторорганические жидкости** представляют собой производные углеводородов, у которых атомы водорода замещены фтором. Их пары не образуют с воздухом взрывоопасных смесей. Они обладают малыми диэлектрическими потерями, ничтожно малой гигроскопичностью, высокой нагревостойкостью (некоторые жидкости могут длительно работать при температуре 200°C и выше), высокой теплопроводностью, полной негорючестью, высокой дугостойкостью.

Применяют для пропитки и заливки конденсаторов и трансформаторов, для испытания элементов радиоэлектроники при низких и высоких температурах.

**Пробой жидких диэлектриков.** Жидкие диэлектрики представляют собой низкомолекулярные вещества органического происхождения.

Их электрофизические свойства зависят от строения молекул и наличия примесей. Примеси образуются при окислении и разложении углеводородных фракций, при поглощении воды и попадании частичек волокнистых материалов.

Электропроводность жидких диэлектриков обусловлена перемещением ионов. Носителями зарядов могут быть различные частицы, находящиеся во взвешенном состоянии.

Очистка жидких диэлектриков от примеси повышает удельное сопротивление, однако полностью удалить примеси не возможно.

Процесс электрического пробоя начинается с инжекции в жидких диэлектриках электронов с катода и образования электронных лавин. Пробой завершается, когда плазменный канал замыкает электроды.

Присутствующие в жидкости пузырьки газа ионизируются, выделяя энергию, которая приводит к местному перегреву. Это ведет к образованию газового канала между электродами и в результате к пробую жидкости.

Примеси воды в масле снижают значение пробивного напряжения. Если вода находится в масле в виде эмульсии, т.е. в виде мельчайших капель, кото-

рые втягиваются в места, где напряженность поля велика, то в этом месте начинается развитие пробоя.

Увеличение пробивного напряжения с ростом температуры объясняется переходом воды из суспензии в молекулярно растворенное состояние.

Рост пробивного напряжения при уменьшении температуры ниже нуля градусов объясняется образованием льда и ростом вязкости масла.

Возрастание пробивного напряжения в области температур 60-80°C объясняется влиянием вида распределения воды в масле - вода находится в стадии молекулярного раздробления, переходя в нее из состояния эмульсии.

Снижение пробивного напряжения с дальнейшим увеличением температуры объясняется обычным тепловым эффектом.

Увеличение пробивного напряжения в области низких температур является следствием вымерзания воды. Снижение пробивного напряжения ниже температуры - 90, - 95°C, т.е. когда масло находится уже в твердом состоянии, объясняется образованием в нем трещин.

Особенно большое влияние на электрическую прочность масла оказывает содержание эмульсионной влаги. Влияние влаги особенно заметно в случае наличия в трансформаторном масле органических волоконцев, которые, впитывая в себя влагу, образуют под действием электрического поля проводящие мостики между электродами, значительно уменьшая пробивное напряжение.

Существенное влияние на электрическую прочность трансформаторного масла оказывает содержание в нем газовых включений. В силу этого включение напряжения после заливки масла в трансформатор следует производить, выждав некоторое время, во избежание пробоя масла.

Длительность приложения напряжения заметно сказывается на электрической прочности трансформаторного масла. При увеличении времени экспозиции трансформаторное масло значительно снижает свое пробивное напряжение.

На величине пробивного напряжения жидких диэлектриков резко сказывается форма электродов и расстояние между ними аналогично тому, как это наблюдается у газовых диэлектриков.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 3.5 Полимеры

#### Классификация полимеров. Полимеризационные полимеры, их получение, свойства, применение

**Полимеры** – высокомолекулярные соединения, являющиеся основами пластических масс, они связывают в единое целое другие компоненты и придают материалу определённые свойства, т. е. полимерное вещество является **связующим**.

**Полимеры** – это соединения, в молекулах которых одинаковые звенья повторяются многократно, их получают из **мономеров** – веществ, каждая молекула которых способна образовывать одно или несколько составных звеньев. Полимерные соединения состоят в основном из углерода и водорода, иногда в их составе имеются атомы кислорода, хлора, азота, кремния, фтора и других элементов. **Структура макромолекул полимера может быть:**

- 1) линейной;
- 2) разветвленной;
- 3) сетчатой.

**Полимеризация** – реакция образования полимера из молекул мономера без выделения низкомолекулярных побочных продуктов. Эта реакция происходит под действием температуры, высокого давления и катализатора. При этом непрочная двойная связь разрывается и молекулы соединяются друг с другом в цепочку. Обычно в результате полимеризации получают линейные полимеры. Они эластичны, могут образовывать гибкие и прочные волокна и плёнки. Легко размягчаются и расплавляются. Благодаря таким свойствам их называют **термопластичными (термопластами)**. Они способны к повторной переработке.

**Поликонденсация** – реакция образования полимера из мономеров с выделением низкомолекулярных веществ. В результате получают материалы, обладающие большой жесткостью, нерастворимы, расплавляются при высоких температурах, а многие ещё до температуры плавления разрушаются химически, обугливаются или сгорают. Они не способны к образованию волокон и плёнок. Благодаря изменению химических свойств исходного мономера такие материалы называются **термореактивными (реактопласты)**.

Термопласты не склонны к хрупкому разрушению, изготавливаются без наполнителя. Реактопласты хрупкие, поэтому использование наполнителя обязательно. У термореактивных полимеров в процессе их отверждения происходит переход от линейной к сетчатой структуре. **Наполнитель** – вещество, которое вводят для придания необходимых эксплуатационных свойств (**прочности, электропроводности, облегчения переработки, снижения стоимости**).

На свойства полимеров влияет не только химический состав, но и физическая структура вещества. Линейные аморфные и кристаллизующиеся полимеры могут находиться в стеклообразном, высокоэластичном и вязкотекучем состоянии.

В **стеклообразном** состоянии полимеры обладают хрупкостью. Температура, при которой полимер приобретает эластичность, называют температурой **стеклования**.

Полимеры, находящиеся в **высокоэластичном** состоянии в широком интервале температур, называются **эластомерами или каучуками**.

**Кристаллические** полимеры обычно содержат кристаллическую и аморфную фазы.

В промышленности иногда наряду с названием **полимер** используют термин **смола**.

К числу **природных смол**, имеющих значение в электроизоляционной технике относят:

1) **Шеллак** – продукт жизнедеятельности некоторых насекомых на ветвях тропических деревьев. При длительном нагревании переходит в неплавкое и нерастворимое состояние. Применяется в виде спиртового раствора для изготовления клеящих лаков, слюдяной изоляции и лакировки деталей.

2) **Канифоль** – хрупкая смола, получаемая из смолы хвойных деревьев. Растворяется в спирте, бензине, нефтяных маслах, растворителях. Применяется для изготовления лаков, компаундов, как составная часть электроизоляционных смол. Добавляется к нефтяному маслу для пропитки бумажной изоляции, в качестве флюса при пайке.

3) **Янтарь** – ископаемая смола растений с температурой плавления выше 300 °С. Применяется в электроизмерительных приборах.

Природные смолы представляют собой органические соединения в основном растительного и биогенного происхождения. При нагревании они размягчаются и плавятся.

### **Полимеризационные синтетические полимеры.**

Полистирол – твердый прозрачный материал, неполярный диэлектрик с высокими электроизоляционными свойствами. Получают полимеризацией мономерного стирола. По способу получения делятся на блочный и эмульсионный. Температура размягчения  $T_r=110-120^{\circ}\text{C}$ ; теплостойкость  $78^{\circ}\dots 80^{\circ}$ , водостоек; малое значение  $\text{tg } \delta$ , устойчив к действию щелочей и ряда кислот. Недостатки: хрупкий при пониженных температурах; склонен к старению с образованием трещин, растворим в бензоле, толуоле, хлороформе, концентрированной кислоте.

Полистирол - один из лучших высококачественных диэлектриков. Применяется для изготовления каркасов, корпусов, плат, для изоляции и изготовления полистирольных лаков.

Полиэтилен – твердый белый или светло-серый материал без запаха, неполярный диэлектрик; получают полимеризацией этилена, имеет значительное количество кристаллической фазы. Температура размягчения  $110-130^{\circ}\text{C}$ , высокая морозостойкость  $-70^{\circ}\text{C}$ , высокая влагостойкость, устойчив к действию щелочей, кислот (кроме азотной). Обладает высокой прочностью, хорошими диэлектрическими свойствами, нетоксичен. Полиэтилен низкого давления имеет более высокие механические свойства и более высокую температуру плавления чем полиэтилен высокого давления. Недостатки: тепловое старение, которое приводит к образованию трещин на поверхности изделий; в сильных электрических полях происходят структурные изменения, снижающие качество изоляции.

Применяется в электротехнике, радиоэлектронике, кабельной промышленности, для изготовления каркасов, катушек, деталей, работающих в цепях высокой частоты, при изготовлении кабелей и проводов в виде пленок толщиной 0,02...0,2 мм.

Полипропилен – линейный неполярный полимер, получаемый полимеризацией газа пропилена аналогично получения полиэтилена низкого давления. Обладает такими же электроизоляционными свойствами как полиэтилен, имеет температуру размягчения 160-170°C, повышенную температуру плавления, более хорошую холодостойкость и гибкость чем полиэтилен. Применяют как комбинированный бумажно-плёночный диэлектрик в силовых конденсаторах и в обмоточных проводах.

Поливинилхлорид (ПВХ) – белый мелкодисперсный порошок, является линейным полярным полимером; получают полимеризацией газообразного мономера винилхлорида в присутствии эмульгаторов (желатина, поливинилового спирта) и инициаторов (перекиси водорода, перекиси ацетилена). Достоинства: удельное электрическое сопротивление не изменяется при повышении температуры до 90°C; не растворяется в воде, бензине, спирте. Недостатки: Набухает в ацетоне, бензоле; растворяется в дихлоретане и метилхлориде; при нагреве более 140°C разлагается с выделением хлористого водорода. Газ вредно действует на организм человека и вызывает коррозию аппаратуры. Ухудшаются физико-механические свойства.

Латексный поливинилхлорид используют для изготовления прочных пластиков, мягкой пленки, технической пасты и изоляционных изделий.

Суспензионный поливинилхлорид выпускают для кабельного светостойкого изоляционного материала, для кабельного пластика и для изготовления винипласта.

Винипласт – твёрдый, не содержащий пластификатора полимер, получаемый горячим прессованием порошкообразного поливинилхлорида. Имеет хорошие электроизоляционные свойства, механическую прочность на удар, до 40°C устойчив к действию концентрированных кислот, щелочей, хлора.

Применяется для изоляции водопогруженных электродвигателей, для пленок разделения катодных и анодных пластин, в аккумуляторных батареях и др. электрической аппаратуре, работающей в условиях повышенной влажности и воздействия кислот; для изготовления гальванических ванн, кислотостойкой посуды.

Полиметилметакрилат (оргстекло) – прозрачный бесцветный материал, полярный диэлектрик, который получают полимеризацией эфиров метакриловой кислоты. Имеет малую гигроскопичность, высокую химическую стойкость, легко склеивается полярными растворителями. Применяют для изготовления корпусов приборов, шкал, линз и в качестве дугогасящего материала.

Фторопласты – кристаллические полимеры фторпроизводных этилена, где атомы водорода замещены фтором, материалом, который прочно связывается с углеродом, что повышает теплостойкость и химическую стойкость. В радиотехнике наиболее часто используют:

1) Фторопласт-4 - белый материал с высокой плотностью. Цифра 4 указы-

вают на число атомов фтора в молекуле мономера. Выпускается также под названием фторлон-4, а за рубежом – под названием тефлон. Рабочий диапазон температур  $-250...+250$  °С, высокие диэлектрические свойства, химически стойкий, не растворяется ни в одном растворителе, не горит, его устойчивость к химическому воздействию выше, чем у золота, платины, стекла, фарфора; не подвержен действию грибков. Недостатки: выделение ядовитого газообразного фтора при температуре  $400$  °С, низкая радиационная стойкость, сложная технология переработки, высокая стоимость, склонность к хладотекучести.

Изготавливают тонкие конденсаторные и электроизоляционные плёнки, химическую посуду; применяют в оснастке для температурных испытаний, так, как хорошо переносит резкую смену температуры.

2) Фторопласт-3 – полимер, имеющий замену в элементарном звене одного атома фтора на атом хлора. Имеет более высокие механические свойства и влагостойкость, чем фторопласт-4; остальные свойства несколько хуже, чем у фторопласта-4, а технология получения проще. Применяют главным образом в виде суспензий для антикоррозионных покрытий.

Кремнийорганические полимеры (полисилоксаны) являются промежуточным звеном между органическими и неорганическими материалами. Могут быть термопластичными с линейным строением и терморезистивными с образованием пространственных структур. Способны длительно выдерживать температуру до  $200$  °С и кратковременно до  $500$  °С, имеют высокие электроизоляционные свойства, дугостойкость, не смачиваются водой, устойчивы к грибковой плесени; имеют высокую стоимость. Применяются для получения пластмасс, клеев, лаков, компаундов.

### **Поликонденсационные смолы.**

В реакции поликонденсации участвуют не менее двух химических веществ. Образуются полимеры пространственной структуры, из которых получают прочные, теплостойкие терморезистивные материалы. Продуктами поликонденсации являются:

1) **Фенолоформальдегидные смолы** получают поликонденсацией фенола в водном растворе формальдегида при  $t=70-90$  °С в присутствии катализатора (кислоты или щелочи). Обладают высокой прочностью, хорошими электроизоляционными свойствами и способностью функционировать в любых климатических условиях. Эти смолы подразделяют на резольные и новолачные.

Если поликонденсация происходит с избытком формальдегида в присутствии щелочи, то получают бакелитовую смолу, которая может находиться в трех стадиях: резол, резитол, резит.

Резольные смолы – терморезистивные материалы, полярные диэлектрики. Применяются для изготовления слоистых пластиков (текстолита, гетинакса), для композиционных пресс-материалов (фенопластов), трубок, клеев.

Если поликонденсация проходит с избытком фенола в соляной или щавелевой кислоте, то получают твердые, хрупкие прозрачные материалы, называемые новолаками. Они термопластичны, растворяются в спирте, ацетоне и др. органических растворителях; имеют невысокие электроизоляционные свойства и низкую стойкость к искровым разрядам. Применяются для изготовления кор-

пусов, приборов, плат, разъёмов, кнопок, и ручек управления радиоаппаратуры, для изготовления лака и как заменитель шеллака.

2) **Полиэфирные смолы** получают в результате поликонденсации различных многоатомных спиртов (гликоля, глицерина и др.) и многоосновных кислот. По физическим свойствам близки к природным смолам (канифоль, шеллак). Наибольшее распространение получили:

- *Лавсановая смола*, ее получают поликонденсацией терефталевой кислоты и этиленгликоля. Может иметь кристаллическое или аморфное строения. Лавсан кристаллического строения применяют для изготовления волокон, пряжи, тканей, тонких изоляционных пленок и используют для изоляции проводов и кабелей. Аморфный лавсан используют для изготовления эмалированных проводов, при производстве электроизоляционных лаков.

- *Глифталевая смола*, ее получают поликонденсацией трехатомного спирта глицерина и фталевого ангидрида при  $t = 150-200^{\circ}\text{C}$  в алюминиевых котлах. Имеют высокую нагревостойкость, гибкость и клеящую способность. Применяют как основу для клеящих, пропиточных и покрывных лаков, пленки которых стойки к нагретому минеральному маслу; для изготовления лаков, пластмасс, клеев.

- *Поликарбонаты* - это полиэферы угольной кислоты; имеют хорошие электрические и механические свойства, хорошую химическую стойкость. Применяют для изготовления слоистых пластиков, компаундов, пленок для изоляции в электрических машинах.

3) **Кремнийорганические смолы** – терморезистивные полимеры с пространственной структурой; обладают высокой нагревостойкостью и хорошими диэлектрическими свойствами, химической инертностью. Применяются для изготовления стеклотекстолита, слюдяной изоляции, компаундов, лаков, эмалей, резиностеклотканей и др..

4) **Эпоксидные смолы** - получают в результате хлорирования глицеринов с многоатомными фенолами в щелочной среде. В чистом виде термопластичные низкоплавкие жидкие материалы, которые растворяются во многих органических растворителях, длительно хранятся, не меняя свойств. При добавлении отвердителей смолы образуют толстый монолитный слой изоляции без выделения побочных продуктов. Применяют для лаков, клеев, заливочных компаундов. В жидком виде эпоксидные смолы токсичны, а отвердевшие уже не оказывают на человека вредного воздействия.

5) **Полиамиды** - термопластичные полярные диэлектрики с линейной структурой. Обладают высокой механической прочностью, эластичностью и химической прочностью, не высокими электрическими параметрами. Наиболее распространены: капрон и нейлон, которые применяют для получения синтетического волокна

Из полиамидов изготавливают устойчивые к коррозии изолирующие крепежные винты, гайки, шайбы, детали выключателей.

6) **Полиимиды** - органические полимеры с высокой нагревостойкостью (длительно выдерживают до  $300^{\circ}\text{C}$ ), с очень высокой холодностойкостью (сохраняют работоспособность до  $-269^{\circ}\text{C}$ ) и с хорошими диэлектрическими свой-

ствами. Полиимидные пленки применяют в конденсаторах, в нагревостойких кабелях, в качестве подложек в микросхемах; полиимидные лаки используют для эмалирования проводов и пропитки катушек, в качестве межслойной изоляции интегральных схем.

7) *Полиуретаны* – линейные термопластичные материалы, которые после отвердевания превращаются в термореактивные полимеры. Устойчивы к окислению, действию кислот, влаги, большинству органических растворителей. Температура плавления ниже, чем у полиамидов, а электроизоляционные свойства лучше. Применяются для изготовления пряжи, ткани, нитей, лаков, компаундов, клеев, каучуков; для защиты приборов от вибрации, тепла и механических перегрузок.

<a href="#"><u>НАЗАД</u></a>	<a href="#"><u>Обратная связь</u></a>	<a href="#"><u>ДАЛЕЕ</u></a>
------------------------------	---------------------------------------	------------------------------

### 3.6 Пластмассы, пленочные материалы.

#### Состав, классификация пластмасс. Получение изделий из пластмасс

Пластические массы (пластмассы) объединяют группу твердых или упругих материалов, которые состоят полностью или частично из полимерных соединений, которые являются *связующими*. Пластмассы формуруются в изделия методами, основанными на использовании их пластических деформаций.

*Связующие вещества* – природные и синтетические смолы, цемент, стекло. Содержание связующего вещества в пластмассах колеблется в пределах 30...60%.

В состав сложных пластмасс, кроме связующего вещества, входят:

1) *Наполнитель* - вещество, которое вводят для придания необходимых эксплуатационных свойств (прочности, электропроводности, облегчения переработки, снижения стоимости). К наиболее распространенным наполнителям относятся: древесная или минеральная мука (*порошковые наполнители*), асбестовое или хлопчатобумажное волокно (*волокниты*), а также стекловолокно (*стекловолокниты*), листы бумаги (*гетинаксы*), различные ткани (*текстоиты*).

Введение наполнителей уменьшает объемную усадку пластмасс, однако повышает гигроскопичность и ухудшает их электроизоляционные свойства, поэтому в пластмассах с высокими диэлектрическими характеристиками наполнитель часто отсутствует. Обычно пластмассы содержат 40...70% наполнителя.

2) *Пластификаторы* - вещества, которые вводят для повышения пластичности и холодостойкости. Однако большое количество пластификатора приводит к понижению теплостойкости и механической прочности пластмасс. В качестве пластификаторов применяют маслообразные синтетические жидкости с высокой температурой кипения (стеарин, олеиновую кислоту, сульфитную целлюлозу).

3) *Отвердитель (ингибитор)* - ускоряет переход термореактивных пластмасс в неплавкое или термопластичных смол в твердое состояние.

4) *Смазывающие вещества* - повышают текучесть материала при переработке и предупреждают прилипание изделия к форме (*воск, стеарин, трансформаторное масло*).

5) *Стабилизаторы* – вещества, которые вводят для торможения процесса старения пластмасс.

6) *Красители*.

#### Основные свойства пластмасс:

1) *Коррозионная стойкость*. Основные виды пластмасс противостоят не только атмосферной коррозии, но и воздействию различных кислот, щелочей, солей, растворителей.

2) *Стойкость к износу*. Многие пластмассы отличаются низким коэффициентом трения и малым износом.

3) **Диэлектрические свойства.** Большинство пластмасс хорошие диэлектрики.

4) **Оптические свойства.** Некоторые пластмассы называются органическими стёклами. Они бесцветны, прозрачны, способны пропускать лучи света.

5) **Внешний вид.** Изделия из пластмасс имеют твёрдую и блестящую поверхность. Они не нуждаются в окрашивании и лакировке, т.к. в процессе производства, путём добавления различных пигментов можно получить любые цвета и оттенки.

6) **Простота переработки в изделие.** Коэффициент использования материала при переработке пластмасс 0,95 -0,98.

7) **Доступность сырья.** Синтетические пластмассы получают путём химических превращений из простых химических веществ, которые в свою очередь получают из доступных видов сырья.

**Недостатки:**

1) **Низкая теплостойкость** (работа в определённых интервалах температур).

2) **Низкая твёрдость.**

3) **Ползучесть** - непрерывная пластическая деформация материала под действием постоянной нагрузки при любой температуре.

4) **Прочность** - механическая прочность самых жёстких пластмасс в 1,5 раза меньше, чем у металлов.

5) **Старение** – изменение свойств пластмассы под действием нагрузки, теплоты, влаги, света, воды.

Пластмассы можно классифицировать по различным свойствам:

1) **По применению :**

- на конструкционные (для изготовления корпусов приборов, ручек управления и других деталей);

- электроизоляционные (для каркасов катушек, панелей, плат и пр.);

- специальные (магнитодиэлектрики, электропроводные и др.).

2) **По нагревостойкости** пластмассы разделяют на несколько классов:

**A** с нагревостойкостью до 120°C; к нему относятся пластмассы на основе фенол- и меламиноформальдегидных смол с органическими наполнителями, текстолит, гетинакс;

**B** с нагревостойкостью до 130 °C; к нему относятся те же пластмассы, что и в классе **A**, но с неорганическими наполнителями;

**F** с нагревостойкостью до 155°C; к нему относятся сложные пластики на основе стекла или асбеста;

**C** с нагревостойкостью до 180°C; к нему относятся прессованные и слоистые пластмассы на основе асбеста и стекла с кремнийорганической связкой.

3) **По химическим свойствам :**

- **Термопластичные пластмассы (термопласты)** обладают способностью под действием температуры и давления плавиться и при охлаждении

затвердевать, принимая требуемую форму. Изделия из термопластов могут перерабатываться многократно.

- **Терморезактивные пластмассы** размягчаются под действием температуры и давления и при дальнейшем нагревании необратимо переходят в неплавкое и нерастворимое состояние, сохраняя приобретенную форму. Терморезактивные пластмассы не поддаются вторичной переработке.

4) **По способу переработки** пластмассы разделяются на пресс-порошки и пресс-материалы, листовые и фасонные слоистые материалы и пленочные материалы.

5) **По используемым связующим смолам:** пластмассы на основе кремнийорганических, эпоксидных, фенолформальдегидных, эфирных смол.

Пленочные электроизоляционные материалы их состав, основные характеристики, марки, применение

**Пленочными** считаются материалы, у которых толщина значительно меньше длины.

Свойства пленок обусловлены свойствами исходных полимеров, поэтому их можно разделить на:

а) **Неполярные пленки.** К ним относятся:

1) **Полистирольная пленка (ПС)** упаковочная выпускается толщиной 0,03 мм и шириной 20... 100 мм. Ориентированную пленку для радиодеталей получают методом выдавливания размягченного при температуре 140...160°C блочного полистирола с одновременным растягиванием в продольном и поперечном направлениях, выпускается толщиной 0,02...0,1 мм и шириной 20. ..100 мм.

К достоинствам ориентированной полистирольной пленки относят высокую влагостойкость и малые диэлектрические потери, к недостаткам - сравнительно невысокую температуру размягчения и низкую механическую прочность при нагревании.

Применяют для изготовления высокочастотных конденсаторов и кабелей.

2) **Полиэтиленовую пленку (ПЭ)** ориентированную толщиной 0,03...0,2 мм получают выдавливанием с одновременным растягиванием сжатым воздухом.

Полиэтиленовые пленки обладают следующими свойствами:

- высокая морозостойкость, сохраняет основные свойства до температуры 60°C ниже нуля;

- низкая влагопроницаемость, что позволяет применять полиэтиленовую пленку;

- при нагревании до температуры выше 110°C дают усадку, что обеспечивает дополнительное уплотнение изоляции обмоток;

- подвержены воздействию нефтяного масла и при достаточно высокой температуре растворяются в нем, что ограничивает их применение в конденсаторах, кабелях и монтажных проводах;

- наиболее дешевые.

Для повышения температуры размягчения и увеличения прочности на разрыв полиэтиленовые пленки облучают электронами или  $\gamma$ -лучами, что не вызывает изменения электрических свойств, химической стойкости и влагостойкости. Облученные (иррадированные) пленки кратковременно выдерживают нагревание до температуры 250°C.

3) **Полипропиленовая пленка (ПП)** выпускается толщиной до 5 мкм, ориентированна в двух направлениях. По свойствам она во многом схожа с полиэтиленовой, что объясняется сходством исходных полимеров; обладает более высокой, чем у полиэтиленовой пленки, рабочей температурой (до 110...130°C), низкой паро- и газопроницаемостью.

Применяют для изготовления высоковольтных конденсаторов качестве комбинированной бумажно-пленочной изоляции.

4) **Политетрафторэтиленовую пленку (ПТФЭ)** или пленку из фторопласта-4 толщиной 0,005...0,2 мм получают снятием с заготовки стружки-ленты на токарном станке. Полученная неориентированная пленка по физико-механическим свойствам не отличается от фторопласта-4. В процессе прокатки пленка приобретает ориентацию. При этом степень ориентации зависит от толщины пленки. Ориентированная пленка обладает следующими свойствами: механическая и электрическая прочность выше, чем у фторопласта-4, дает усадку при нагревании, высокая морозо- и нагревостойкость на высоких частотах, высокая стоимость.

Фторопластовые пленки выпускают нескольких видов. Пленка электроизоляционная применяется для изоляции проводов, работающих при температурах от -60 до +250°C. Пленка изоляционная применяется для межслойной изоляции в устройствах, работающих при температуре от -60 до +250°C. Пленка конденсаторная ориентированная применяется для изготовления конденсаторов, работающих при температуре от -60 до +200°C.

**б) Полярные пленки.** Чаще всего применяется:

1) **Полиэтилентерефталевая (лавсановая)** пленка нашла широкое распространение в электротехнике и радиопромышленности благодаря высокой прочности на разрыв и надрыв, хорошим электрическим свойствам, химической стойкости, устойчивости к действию органических растворителей, повышенной нагревостойкости, влагостойкости.

Недостатком лавсановой пленки является излишняя жесткость и упругость. Применяют для изготовления конденсаторов и кабелей, а также для изоляции обмоток низковольтных электрических приборов.

2) **Поливинилхлоридная пленка (ПВХ)**, ее обычно получают из хлорированного поливинилхлорида. Она обладает невысокими электрическими свойствами и низкой нагревостойкостью, что ограничивает ее применение.

3) **Винилпластовая пленка** неориентированная и ориентированная выпускается толщиной 0,02...0,7 мм; каландрированная (обработка материалов на ка-

ландре – машине, состоящей из системы валов, между которыми пропускают материал для придания ему гладкости, лоска или глянца) - толщиной 0,3... 1,0 мм.

Применяют как влагостойкий и химически стойкий материал для изоляции водопогруженных электродвигателей.

4) **Полиамидная пленка (ПАМ)** выпускают толщиной 0,05...0,12 мм и шириной 1200... 1300 мм.

Она обладает высокой механической прочностью; невысокими электрическими параметрами, которые существенно ухудшаются при нагревании и воздействии влаги; малой газопроницаемостью; высокой стоимостью.

Применяют как бензо- и маслостойкий герметизирующий материал в основном в кабельной технике для изоляции проводов с наружным покрытием из поливинилхлорида или полиэтилена.

5) **Поликарбонатная пленка (ПК)** применяется преимущественно при изготовлении конденсаторов низкого напряжения, а также для высоковольтной изоляции.

6) **Пленка из эфиров целлюлозы** является наиболее ранним типом полимерных изоляционных пленок. Ее применяют для изготовления малогабаритных намоточных конденсаторов низкого напряжения.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 3.7 Резина.

#### Состав и получение резины. Особенности свойств резины

Полимеры, которые при нормальной температуре подвержены большим обратимым деформациям растяжения (до многих сотен процентов), называются *эластомерами*. Эластомерами являются все каучуки и резины.

На основе каучука получают также твердые резины, которые имеют относительное удлинение на разрыв всего несколько процентов (2...6%). Такими являются пластмассы на основе каучука.

Каучуки бывают *натуральные* и *искусственные (синтетические)*.

*Натуральный каучук* (НК) получают из млечного сока (латекса) тропических растений гевеи, каучуконосных кустарников коксагыз и др.

В естественном состоянии каучук - аморфное вещество, а в растянутом состоянии имеет упорядоченное расположение молекул, характерное для кристаллических тел. После снятия растягивающего усилия каучук снова приобретает аморфное состояние. Натуральный каучук неполярен. Он легко растворяется в эфире, бензине, минеральных маслах; не растворяется в воде; при нагревании до температуры 90°C размягчается, а при температуре ниже нуля становится твердым и хрупким.

Сырьем для *синтетических каучуков* (СК) служат спирт, попутные продукты нефтедобычи, природного газа и нефтепереработки. Наиболее близкими по свойствам к натуральному каучуку являются *синтетические каучуки углеводородного состава*:

1) *Бутадиеновый каучук* (СКБ) применяют для изготовления эбонитовых изделий и оболочек кабелей. Его получают полимеризацией бутадиена в присутствии катализатора (металлического натрия), Он является каучуком общего назначения. Недостатком является малая клейкость, что препятствует изготовлению из него электроизоляционной резины.

2) *Бутадиенстирольный каучук* (СКС) имеет хорошие диэлектрические свойства, хорошо сопротивляется тепловому старению и действию многократных деформаций.

Его получают эмульсионной полимеризацией стирола и бутадиена при температуре 50 °С.

3) *Бутилкаучук* применяют для изготовления электроизоляционных резин. Его получают при совместной полимеризации изобутилена и изопрена. Он обладает высокой механической прочностью, хорошей химической стойкостью, газонепроницаемостью, стойкостью к тепловому старению, озоностойкостью. В промышленности также синтезируют:

1) *Изопреновый каучук* (СКИ) обладает более высокой механической прочностью и эластичностью, чем остальные синтетические каучуки, но меньшей клейко-

стью и эластичностью, чем натуральный. Его получают полимеризацией изопрена в присутствии катализатора (лития или его соединений). Является заменителем натурального каучука и относится к группе каучуков общего назначения.

2) **Полихлоропреновый каучук** применяют для защитных оболочек кабелей, которые по влагостойкости не уступают свинцовым. Обладает следующими свойствами: высокая механическая прочность, близкая к натуральному каучуку; повышенная стойкость к действию нефтяных масел и технических растворителей; высокая стойкость к воздействию света и озоностойкость; по электрическим свойствам уступает другим синтетическим каучукам.

3) **Полисилоксановый каучук** применяют для изготовления прокладок и изоляции. Получают на основе кремнийорганических соединений. Он имеет хорошие диэлектрические свойства, высокие термо- и морозостойкость; светостойкость и озоностойкость; растворяется в углеродах, концентрированных кислотах и щелочах.

Синтетические каучуки подразделяются на каучуки **общего назначения** (универсальные) и **специального назначения** (теплостойкие, морозостойкие, маслостойкие, кислотоупорные и др.).

Натуральный и синтетический каучуки в чистом виде не используются, так как имеют ряд недостатков, к которым относятся малая стойкость к действию повышенных и пониженных температур и растворителей, малая прочность при растяжении, большое водопоглощение.

Для устранения этих недостатков каучук подвергают **вулканизации**, которая состоит в нагревании каучука с предварительно введенными вулканизирующими веществами (сера, металлический натрий, перекись бензола и др.). Под влиянием повышенной температуры в каучуке происходит частичный разрыв двойных связей цепочных молекул и их «сшивание» через атомы серы. В зависимости от количества введенной серы получают различные продукты. При содержании серы 1...3% получают мягкую **эластичную резину**, а при 30...35% - **пластмассы на основе каучука (твердую резину)**.

Кроме каучука и вулканизаторов для производства резин используют **ускорители полимеризации** (дифенил, оксид цинка и др.), **наполнители** (сажу, углекислый марганец, мел и др.), **пластификаторы** (стеариновую и олеиновую кислоты, парафины и др.), **красители** (охру, ультрамарин и др.).

**Резине** свойственны хорошая вибростойкость, высокая эластичность, повышенная химическая стойкость, достаточная механическая прочность, хорошие электроизоляционные характеристики, устойчивость к износу. Она хорошо сочетается в эксплуатации с такими материалами, как ткань, асбест.

К **недостаткам резины** относятся: низкая нагревостойкость (при повышении температуры и влажности ухудшаются диэлектрические и механические свойства резины, она высыхает и растрескивается); плохая стойкость к действию нефтяных масел и других неполярных жидкостей (бензина, бензола и

др.); неустойчивость к воздействию света, особенно ультрафиолетового; в присутствии озона быстро стареет и трескается.

Резины применяют для изоляции проводов и кабелей, изготовления прокладок, шайб, изолирующих трубок, диэлектрических перчаток, электроизоляционных ковриков.

К основным *пластмассам на основе каучука* относят:

1) **Эбонит** – твердая резина, которую получают при вулканизации натурального каучука, синтетического бутадиенового каучука или синтетического бутадиенстирольного каучука, в который добавляют 25...30% серы и наполнители (эбонитовую пыль, тальк и др.).

Эбонит имеет сравнительно высокие электроизоляционные свойства; он устойчив к действию кислот и щелочей, не растворяется в органических растворителях, также имеет высокую дугостойкость и стойкость к ударным нагрузкам. Незначительное удлинение при разрыве, всего 2...6%. Эбонит хорошо обрабатывается резанием и полируется.

К недостаткам эбонита относятся низкая теплостойкость (сохраняет свои свойства в интервале температур 50...80°C), склонность к холодной текучести; он стареет под действием тепла и света.

Эбонит выпускается в виде пластин толщиной 0,5...32 мм, стержней диаметром 5.. .75 мм и трубок с внутренним диаметром 3.. .50 мм.

2) **Эскапон** получают полимеризацией синтетического бутадиенового каучука при повышенном давлении и температуре 250...270°C в пресс-формах. Он не содержит серы.

По механическим и химическим свойствам близок к эбониту, однако по сравнению с эбонитом обладает меньшими диэлектрическими потерями, повышенной нагревостойкостью; не подвержен старению.

Выпускается в виде плит толщиной до 20 мм, стержней, трубок.

Применяется для изготовления изделий, работающих на высоких частотах, и эскапоновых локотканей.

3) **Асбодин** представляет собой композицию на основе каучука, асбестового волокна и железного сурика с вулканизирующими добавками. Он имеет повышенные нагревостойкость и дугостойкость, устойчив к воздействию плесневых грибков, надежно работает в тропических условиях, имеет также пониженную текучесть и длительность термообработки в пресс-формах (примерно 16 ч). Применяют в качестве низковольтного изоляционного материала.

4) **Хлоркаучук** получают при хлорировании каучука. Он обладает хорошими электроизоляционными свойствами, стойкостью к действию кислот, щелочей, хлора, но растворяется в ароматических углеводородах; негорюч и имеет низкую нагревостойкость.

5) *Изомеризованный каучук* получают при обработке каучука в присутствии кислого катализатора - серной кислоты. Он обладает электроизоляционными свойствами и водостойкостью выше, чем у хлоркаучука, устойчив к действию кислот, щелочей и растворителей.

[НАЗАД](#)

[Самоконтроль](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 3.8 Лаки, эмали, компаунды

#### Состав, классификация, применение лаков и компаундов

**Лаки** – это коллоидные растворы пленкообразующих веществ в соответствующих летучих растворителях.

Основными составляющими лака являются:

1) **пленкообразующие вещества**, способные давать пленку (растительные высыхающие масла, смолы, битумы, эфиры целлюлозы, полиэфирные и кремнийорганические соединения);

2) **растворители** (бензол, толуол, спирт, сероуглерод, ацетон и др.);

3) **пластификаторы** - вещества, придающие пленке пластичность (касторовое масло);

4) **сиккативы** (от лат. высушивающий) - твердые или жидкие вещества, которые вводятся в некоторые лаки для ускорения высыхания;

5) **красители**;

6) **разжижжители**, добавляемые в лак для получения консистенции в соответствии с требованиями технических условий (лаковый керосин, бензин, скипидар).

При сушке лака растворитель улетучивается, а пленкообразователь в результате химических реакций переходит в твердое состояние, образуя лаковую пленку. **По режиму сушки** электроизоляционные лаки делят:

1) **Лаки холодной сушки** хорошо высыхают при комнатной температуре 20...25°C.

2) **Лаки горячей сушки** приобретают оптимальные свойства при температуре сушки выше 70 °С. Они, как правило, обладают более высокими электрическими и механическими свойствами.

**По назначению** электроизоляционные лаки делят на **пропиточные, покрывные и клеящие**. Один и тот же лак может использоваться в качестве пропиточного, покрывного и клеящего.

**Пропиточные лаки** служат для пропитки пористой и волокнистой изоляции. Их изготавливают холодного и горячего отверждения.

Пропиточные лаки должны иметь необходимые изоляционные свойства, хорошие пропитывающую и цементирующую способности, быстро отвердевать и нормально функционировать в диапазоне рабочих температур.

В процессе пропитки воздух вытесняется из пор и заполняется лаком, который после высыхания имеет более высокие электрическую прочность и теплопроводность, чем воздух, что важно для отвода теплотерь. Кроме того, после пропитки у изоляции повышается пробивное напряжение; уменьшается гигроскопичность; улучшаются механические свойства.

К **пропиточным лакам** относят:

1) **Кремнийорганические лаки**, их применяют для пропитки стекловолкнистой обмотки проводов кабелей и изготовления стеклотекстолита.

2) **Битумно-масляные лаки** состоят из смеси черных и масляных лаков.

В состав черных лаков входят битумы, которые определяют черный цвет жидкого лака и лаковой пленки. Битумы бывают природными (ископаемые), которые называют асфальтами, и искусственными (нефтяные), которые представляют собой тяжелые продукты перегонки нефти. Черные лаки дешевле масляных, образуют менее гигроскопичные пленки, но они менее эластичны и более подвержены действию растворителей, а при нагревании склонны к размягчению. Поэтому в качестве электроизоляционных используют битумно-масляные лаки. В качестве растворителей для этих лаков используют ароматические углеводороды (бензол, толуол и др.), а также скипидар

Битумно-масляный лак также применяют для изготовления лакотканей.

3) **Масляно-алкидные лаки** получают взаимодействием многоосновных карбоновых кислот с многоатомными спиртами.

**Покрывные лаки** служат для защиты изделий от воздействия атмосферной влаги и паров агрессивных веществ. К ним предъявляются следующие требования: высокие электроизоляционные свойства; высокая теплостойкость; высокая радиационная стойкость; высокая гидрофобность и плотность, защищающие поверхность от проникновения воды и др. веществ; хорошая адгезия к покрываемым поверхностям.

К **покрываемым лакам** относят:

1) **Кремнийорганические лаки**, их используют для изготовления нагревостойких обмоточных проводов со стекловолоконистой изоляцией; для защиты *p-n*-переходов, печатных плат, изоляционных деталей из гетинакса, стеклотекстолита.

2) **Лаки на поливинилацетатной и полиуретановой основе**, их используют для изготовления медных эмалированных проводов.

3) **Масляные лаки**, их используют для изготовления обмоточных проводов.

4) **Полиамидный лак**, его используют для повышения нагревостойкости изоляции обмоточных проводов, работающих при температуре 200...220°C.

5) **Полиимидный лак** используют для межслойной изоляции тонких пленок в гибриднопленочных интегральных схемах и для изготовления фольгированных диэлектриков.

6) **Целлюлозные лаки** представляют собой растворы термопластичных эфиров целлюлозы, которые в большинстве случаев сохнут при комнатной температуре. Наибольшее распространение получили нитроцеллюлозные лаки (нитролаки), которые обладают высокой механической прочностью; хорошей устойчивостью к воздействию воздуха, влаги, масел; хорошим блеском.

Нитролак используют также для пропитки хлопчатобумажных оплеток проводов.

**Эмали** представляют собой разновидность покрывных лаков, в состав которых вводится неорганический наполнитель – пигмент.

Пигменты повышают твердость, теплопроводность, влагостойкость покрытий и придают им соответствующий цвет. В качестве наполнителей используют железный сурик, оксиды цинка, титана и др.

Эмали используют в основном в качестве защитных покрытий поверхностей различных деталей и элементов радиоэлектроники и для декоративной отделки корпусов электрорадиотехнических приборов.

Лаки и эмали маркируют буквенно-цифровыми обозначениями. Буква обозначает химическую основу основного компонента лака, первая цифра указывает назначение лака, а последующие - его порядковый номер в соответствующей группе. Например, обозначение лака ПЭ-993 расшифровывается так: ПЭ - полиэфирный, 9 - электроизоляционный, 93 - порядковый номер в группе полиэфирных лаков.

**Клеящие лаки** применяют для склеивания между собой твердых материалов (фольгированных диэлектриков, листов пакетов трансформаторов, пластинок расщепленной слюды и др.) Общие требования: высокая клеящая способность, хорошие электрические и механические свойства, высокая адгезия к склеиваемым материалам и технологичность.

К **клеящим лакам** относят:

1) **Полиуретановые клеи** отличаются высокой влагостойкостью и используются для склеивания пластмасс, стекол, керамики, тканей, резин, металлов. Применяются до температуры 150 °С .

2) **Эпоксидные клеи** холодного и горячего (при температуре 200 °С ) отверждения используют для выравнивания коэффициентов линейного расширения клея и соответствующего материала.

3) **Клеи марок БФ** используют для приклейки полупроводниковых слитков, пластин и кристаллов.

4) **Карбонильный клей** представляет собой вязкую жидкость желтоватого цвета, в которую перед употреблением вводят катализатор (перекись бензола), после чего он может храниться 4...6 ч. Обладает относительно высокой механической прочностью; стоек к воздействию масел, керосина, бензина; недостаточно водостоек. Его применяют для склеивания керамических материалов.

5) **Глифталевый лак** представляет собой синтетическую алкидную смолу, модифицированную канифолью и растительным маслом, которая обладает высокой клеящей способностью и высокой прочностью шва. Применяется для приклейки пластин и кристаллов полупроводниковых материалов на подложки.

**Компаунды** - изоляционный материал из асфальтовых и парафинистых веществ и масел (от англ. compound - составной, смешанный), представляют собой механические смеси из электроизоляционных материалов, не содержащие растворителей.

По сравнению с лаками компаунды обеспечивают лучшую влагостойкость и влагонепроницаемость изоляции, так как при охлаждении после пропитки полностью затвердевают без следов испаряющегося растворителя.

В исходном состоянии компаунды могут быть жидкими или твердыми.

В *жидкие компаунды* перед употреблением вводят отвердитель, в результате чего они постепенно отвердевают, превращаясь в монолитный твердый диэлектрик.

*Твердый компаунд* предварительно нагревают при соответствующей температуре для получения массы с определенной вязкостью.

В зависимости от применяемых смол могут быть:

1) *Термопластичные компаунды*, размягчаются при нагревании и отвердевают при охлаждении. При этом температура пропитки не должна вызывать термического разрушения изделия и вытекания компаунда при работе.

2) *Термореактивные компаунды* в исходном состоянии являются жидкостями. Для повышения нагревостойкости, механической прочности и уменьшения склонности к растрескиванию в термореактивные компаунды вводят наполнители (кварц, фарфоровую муку). Они, как правило, обладают более высокой нагревостойкостью по сравнению с термопластичными, так как при нагревании отвердевают необратимо, т.е. уже не размягчаются. Однако залитые термореактивным компаундом детали в большинстве случаев не ремонтпригодны и при повреждении залитой детали требуется ее замена.

По назначению компаунды разделяют на:

1) *Пропиточные компаунды*, они как и аналогичные лаки, служат для пропитки пористых и волокнистых материалов.

2) *Заливочные компаунды* служат для заполнения сравнительно больших полостей и промежутков в различных деталях, а также для нанесения сравнительно толстых покрытий на детали, узлы и блоки.

Наибольшее распространение получили синтетические компаунды:

1) *Эпоксидные компаунды* представляют собой модификации эпоксидных смол с отвердителями, пластификаторами и наполнителями.

Применяют в качестве заливочных составов для изготовления трансформаторов, работающих в тяжелых условиях.

2) *Кремнийорганические компаунды* представляют собой вязкие жидкости, которые после полимеризации превращаются в упругие твердые вещества.

Применяют для герметизации полупроводниковых приборов и интегральных схем методом прессования и заливки в формы.

3) *Полиэфирные компаунды* изготавливают на основе ненасыщенных полиэфиров в сочетании со стиролом и др. мономерами. Применяют для герметизации опытно-электронных приборов и интегральных схем.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 3.9 Волокнистые материалы.

#### Виды волокон и лакотканей, их основные свойства и применение.

Волокнистые материалы состоят преимущественно из частиц удлиненной формы – волокон, промежутки между которыми заполнены воздухом у непропитанных материалов и природными или синтетическими смолами у пропитанных. Преимуществами многих волокнистых материалов являются невысокая стоимость, довольно большая механическая прочность, гибкость и удобство обработки. Недостатки – невысокие электрическая прочность и теплопроводность, более высокая, чем у массивных материалов того же состава, гигроскопичность. Пропитка улучшает свойства волокнистых материалов.

**Непропитанные волокнистые материалы** по виду исходного сырья можно подразделить на материалы из:

- 1) *растительных волокон*;
- 2) *бумаги, картона, хлопчатобумажной пряжи и ткани*;
- 3) *животных волокон* (натуральный шелк);
- 4) *искусственных и синтетических волокон* (ацетатный шелк, капрон и др.);
- 5) *неорганических волокон* (стекловолокно, асбест).

К материалам из растительных волокон одним из первых можно отнести **дерево**, получившее широкое применение в электротехнике из-за его дешевизны и легкости механической обработки. Основой дерева, как и всякого растительного волокна, является органическое вещество - целлюлоза, представляющая собой полимерный углеводород  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , молекулы которого имеют вид длинных цепей с числом звеньев до двух тысяч. В каждом элементарном звене молекулы содержится по три гидроксильных группы ОН, обуславливающих полярность целлюлозы. Эти группы смещаются в электрическом поле по отношению ко всей молекулярной цепи, что создает эффект дипольно-релаксационной поляризации. Поэтому целлюлоза имеет относительно большие диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon_r = (6,5...7)$ ; и тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta = (0,005...0,01)$ .

Более тяжелые породы деревьев имеют большую механическую прочность, чем легкие. Прочность поперек волокон у дерева меньше, чем вдоль.

К недостаткам дерева относятся высокая гигроскопичность, нестандартность свойств, низкая нагревостойкость. При пропитке дерева льняным маслом или различными смолами свойства улучшаются.

В электротехнике дерево применяется для изготовления деревянных опор линий электропередачи, крепежных деталей трансформаторов высокого и низкого напряжения, пазовых клиньев электрических машин и т.п.

**Бумага и картон** – листовые или рулонные материалы коротковолокнистого строения, состоят в основном из целлюлозы. Наиболее тонкий и высоко-

качественный вид электроизоляционной бумаги - конденсаторная бумага, ее изготавливают из сульфатной древесной целлюлозы. В качестве диэлектрика конденсаторную бумагу обычно используют в несколько слоев с применением различных пропиточных масс, которыми могут быть различные неполярные, полярные, жидкие, полужидкие и твердые пропиточные массы. Применение нескольких слоев обеспечивает перекрытие сквозных отверстий и проводящих включений в отдельных листах. Однако бумага не является высокочастотным диэлектриком. На переменном токе она используется до частоты 10 кГц.

Широко используется в качестве электроизоляционных материалов *электрокартон*. Это связано с его низкой стоимостью и хорошими технологическими свойствами. В сочетании с высокой стабильностью и механической прочностью при пропитке электрокартона трансформаторным маслом можно получить изоляцию с высокими электрическими параметрами. Применяется картон в качестве основного твердого диэлектрика в силовых трансформаторах.

В качестве конструкционного и изоляционного материала широко применяется *листовая и трубчатая фибра*. Она изготавливается из тонкой бумаги, пропускаемой через раствор хлористого цинка. После намотки на стальной барабан и получения слоя нужной толщины, в котором отдельные слои бумаги прилипают друг к другу, фибра срезается с барабана, тщательно промывается водой и прессуется.

Фибра неустойчива к воздействию влаги, поэтому она не применяется для деталей, требующих сохранения точных размеров, так как при поглощении влаги фибра меняет свои размеры. При нагревании до температуры 180°C фибра медленно обугливается и при температуре примерно 300 °C воспламеняется.

**Пропитанные волокнистые материалы** – это лакоткани, лакобумаги и электроизоляционные ленты, которые представляют собой гибкие электроизоляционные материалы, пропитанные электроизоляционным лаком. Основа пропитанных материалов - ткань или бумага - обеспечивает высокую механическую прочность, гибкость и определенную эластичность. Электроизоляционные лаки, заполняя при пропитке поры ткани, образуют на поверхности после высыхания прочную пленку, которая обеспечивает хорошие электрические свойства и стойкость к действию влаги.

*Лакоткани* изготавливают на основе *хлопчатобумажных, шелковых и стеклянных тканей из синтетических волокон*. Они находят применение в электрических машинах, аппаратах, кабельных изделиях в виде различных лент, прокладок, оберток и др.

В зависимости от типа пропитывающего лака лакоткани подразделяются на:

1) *светлые (желтые)*, изготавливаемые на масляных лаках, имеют высокие электрические характеристики, устойчивы к воздействию нефтяных масел, бен-

зина, воды, но имеют повышенную склонность к тепловому старению, в процессе которого возрастает жесткость при нагревании.

2) *черные* - на масляно-битумных лаках; обладают более высокими, чем светлые, электрическими характеристиками, влагостойкостью и меньшим тепловым старением, но не стойки к воздействию масел и бензина.

Лакоткани, в которых в качестве основы используется капроновая ткань, превосходят по своей эластичности шелковые, но они менее устойчивы к резкому повышению температуры, например при пайке изолированных проводников.

Лакоткани на основе стеклотканей с различными типами пропитывающих составов (масляных, кремнийорганических, фторопластовых) отличаются высокой устойчивостью к воздействию температуры, влажной среды и других факторов.

Для электроизоляционной техники используются различные типы волокон, в том числе асбестовые волокна, получаемые из минерала *асбест* сложного состава.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 3.10 Слюда и материалы на ее основе.

#### Состав и применение слюды и материалов на ее основе.

**Слюда** является важнейшим природным электроизоляционным материалом и обладает такими качествами, как высокая электрическая прочность, нагревостойкость, влагостойкость, гибкость, механическая прочность. Обладает слоистой структурой, способна расщепляться на тонкие пластинки. При нагревании сохраняет сравнительно хорошие механические и электрические свойства и относится к электроизоляционным материалам высшего класса нагревостойкости. Температура плавления 1145-1400° С. Слюда является весьма ценным природным минеральным электроизоляционным материалом.

По химическому составу представляет собой водные алюмосиликаты, важнейшими из которых являются мусковиты и флогопиты, электроизоляционные и механические свойства первых значительно выше. Природная слюда применяется для изоляции электрических машин высоких напряжений и больших мощностей (турбо- и гидрогенераторы, тяговые электродвигатели), в конденсаторах, радиолампах, электронных лампах, лампах накаливания, для изоляции нагревательных приборов.

Кроме природных слюд применяются также и синтетические. Синтетическая слюда получается в процессе расплавления шихты специально подобранного состава в высокотемпературной печи с последующим весьма медленным охлаждением расплава, в результате чего кристаллизуется синтетическая слюда, называемая **фторфлогопитом**. Она обладает более высокой химической стойкостью, нагревостойкостью, радиационной стойкостью, чем природный флогопит. Однако из-за сравнительно высокой стоимости ограничена в применении. Ее используют для изготовления окон волноводов, счетчиков частиц высокой энергии, конденсаторов с высокой рабочей температурой, для изготовления штамповых деталей, работающих в интервале температур от -200 до +800° С.

Слюдяные электроизоляционные материалы изготовляют на основе пластинок **щипаной** природной или синтетической слюды. К ним относятся:

1) **Миканиты** представляют собой листовые или рулонные материалы, получаемые склеиванием между собой пластинок щипаной слюды. В качестве склеивающих материалов применяются различные, преимущественно синтетические, смолы или лаки. Часто листовые материалы на основе щипаной слюды называют миканитами, гибкие называются микалентой, а рулонные материалы – микафолием.

**Микафолий** – один или несколько слоев щипаной слюды, склеенных лаком между собой с бумажной или стекловолоконистой подложкой, покрывающей слюду с одной стороны. Он применяется для изготовления твердой изоляции стержней якорных обмоток машин высокого напряжения, а изготов-

ляется из флогопита или мусковита с глифталевым, полиэфирным или кремнийорганическим связующим веществом.

**Микалента** клеится из щипаной слюды крупных размеров только в один слой и имеет подложки из стеклоткани, стеклосетки или микалентной бумаги с двух сторон. Микалента является основной изоляцией обмоток многих электрических машин высокого напряжения.

**Термоупорный (нагревостойкий) миканит** не содержит органического связующего вещества. Изготавливается он на основе флогопита, связующим веществом которого служит фосфорнокислый аммоний (аммофос). Такой миканит, применяемый для изготовления изоляции электронагревательных приборов, можно использовать при температуре несколько сотен градусов.

2) **Слюдиниты** и **слюдопласты** являются разновидностью слюдяной бумаги, получаемой из слюдяных отходов без предварительной ручной щипки. Слюдиниты, называемые за рубежом *самикой*, изготавливают из мусковита. По сравнению с миканитами более монолитны и однородны по толщине, имеют более высокую рабочую температуру и электрическую прочность.

3) **Слюдокерамика** получается в процессе обжига спрессованной мелкокристаллической слюды (мусковита и фторфлогопита) со связующим компонентом (85%-м раствором ортофосфорной кислоты). Применяют в качестве термостойкой изоляции установочных и вакуумплотных деталей, элементов корпусов полупроводниковых приборов интегральных схем, изоляторов радиоламп.

4) **Микалекс** - состав из порошкообразной слюды и стекла, получают в электропечах в результате термической обработки с последующим отжигом. Используют в радио и электровакуумной технике (платы переключателей, гребенки катушек индуктивности, панели малогабаритных воздушных конденсаторов).

5) **Прессмика** – плотный материал, который получают горячим прессованием измельченной синтетической слюды без связующего компонента. Применяют для изготовления проходных и антенных изоляторов, конденсаторов, работающих при температуре до 400 С.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 3.11 Стекло, керамика.

#### Состав, получение, свойства и применение стекла и керамики.

**Стеклами** называют аморфные тела, получаемые в результате переохлаждения расплава независимо от их химического состава и температурной области затвердевания, приобретающие в результате постепенного увеличения вязкости механические свойства твердых тел, причем процесс перехода из жидкого состояния в твердое является обратимым.

В состав стекла введена большая часть элементов Периодической системы Д.И. Менделеева. От состава стекла, а также от соотношения между компонентами зависят свойства стекла.

По химическому составу имеющие практическое значение стекла делятся на три основных типа: **оксидные** (на основе оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др., они имеют наиболее широкое применение), **галогенидные** (на основе галогенидов  $\text{BeF}_2$ ), **халькогенидные** (на основе сульфидов, селенидов и теллуридов).

Наиболее широко применяются оксидные стекла, которые в зависимости от состава делятся на ряд классов и групп:

**по виду оксида-стеклообразователя** – силикатные, боратные, фосфатные, германатные, алюмосиликатные и т.д;

**по содержанию щелочных оксидов** - бесщелочные (могут содержать щелочно-земельные оксиды  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ), малощелочные, многощелочные.

Стекла получают в результате «варки» исходных компонентов стекла в стекловаренных печах и при быстром охлаждении расплавленного материала. При расплавлении шихты в результате реакции составляющих оксидов и удаления летучих составных частей ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ) получается однородная стекломасса, из которой вырабатывают стеклянные изделия., которые затем подвергаются отжигу при достаточно высокой температуре с последующим медленным охлаждением для устранения механических напряжений.

**Свойства стекол.** Наиболее высокие показатели механических свойств имеют кварцевые и бесщелочные стекла, а наиболее низкие – стекла с повышенным содержанием оксидов  $\text{PbO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ . Теплопроводность стекла по сравнению с другими телами исключительно низкая (наибольшую теплопроводность имеют кварцевое и боросиликатное стекла). Термическая стойкость стекла прямо пропорциональна его прочности при разрыве и обратно пропорциональна его упругости и коэффициенту линейного расширения. Химическая устойчивость стекла зависит от сопротивляемости его разрушающему воздействию различных реагентов – воды, кислот, щелочей. Для электротехнических стекол химическая устойчивость имеет в ряде случаев существенное значение. Наибольшей стойкостью к воздействию влаги обладает кварцевое стекло.

**Электрические свойства** сильно зависят от состава стекла. Большинство стекол характеризуется ионной проводимостью. Некоторые специальные виды стекол - халькогенидные, ванадиевые (полупроводниковые) - имеют электронную или смешанную проводимость. Наименьшую электропроводность имеет кварцевое стекло, а наибольшую - высокощелочное. Обычно более химически устойчивые стекла имеют меньшую электропроводность. Электропроводность стекол очень быстро возрастает при увеличении температуры из-за увеличения подвижности ионов. Удельное объемное сопротивление промышленных стекол при невысоких температурах колеблется в пределах  $10^8 \dots 10^{15}$  Ом м.

Диэлектрические потери в стеклах складываются из потерь проводимости и потерь релаксационных и структурных; тангенс угла диэлектрических потерь стекол увеличивается с ростом содержания щелочных оксидов при малом содержании оксидов тяжелых металлов.

Самую низкую диэлектрическую проницаемость имеет кварцевое стекло (3,7...3,8) и стеклообразный борный ангидрид (3,1 ...3,2), у которых наблюдается преимущественно электронная поляризация.

Пробой стекол вызывается электрическими и тепловыми процессами. При постоянном напряжении электрическая прочность стекла весьма велика и достигает 500 МВ/м, а при увеличении температуры резко снижается. В переменном электрическом поле электрическая прочность стекол 17...80 МВ/м.

В зависимости от назначения все электроизоляционные стекла можно разделить на **шесть групп**:

1) **Конденсаторные стёкла** применяются в качестве диэлектрика в конденсаторах высокочастотных устройств. Конденсаторные стёкла имеют повышенную относительную диэлектрическую проницаемость, высокую электрическую прочность и малый тангенс угла диэлектрических потерь.

2) **Установочные (изоляторные) стёкла** применяются при изготовлении установочных деталей, изоляторов, и т.п. В соответствии со своим назначением имеют высокую нагревостойкость при достаточно хороших электроизоляционных свойствах.

3) **Ламповые стёкла** применяются для изготовления баллонов и «ножек» ламп. Так как эти стёкла находятся в контакте с металлом (например, вольфрамом) и должны хорошо с ним свариваться, для них необходимо подбирать значение температурного коэффициента расширения, равное температурному коэффициенту расширения металла.

4) **Стеклоэмали** представляют собой легкоплавкое непрозрачное вещество, которое наносится на поверхность изделия с целью защиты от коррозии, электрической изоляции, и для придания эстетического вида. Применяется для покрытия металлов, трубчатых резисторов, а также в качестве диэлектрика в некоторых типах конденсаторов.

5) **Стёкла-наполнители** применяется при изготовлении некоторых видов пластмасс в качестве неорганического наполнителя для улучшения механических свойств пластмассы.

б) **Стекловолокно** представляет собой длинные гибкие нити (диаметром 4-7 мкм). Из него изготавливают стеклоткани и стеклотекстолиты, которые используют как электроизоляционные прокладки, подставки и т.п. Достоинствами стекловолокна являются высокая гибкость, механическая прочность, высокая нагревостойкость, малая гигроскопичность и хорошие электроизоляционные свойства. Особый вид стекловолокна – **световоды** представляют собой световедущее волокно, состоящее из световедущей жилы с высоким показателем преломления света и изоляционной оболочки с меньшим показателем преломления света. Они широко применяются для передачи различной информации в вычислительной технике, телевидении, фототелеграфии и т.п.

**Керамика** - это материал, получаемый в результате обжига формовочной массы заданного химического состава из минералов и оксидов металлов. При соответствующем выборе состава керамики из нее можно получить материалы, обладающие разнообразными свойствами. Многие керамические материалы имеют высокую механическую прочность и нагревостойкость, высокие электрические характеристики, отсутствие механических деформаций при длительном приложении нагрузки, большую, чем у органических материалов, устойчивость к электрическому и тепловому старению.

В электротехнической и радиоэлектронной промышленности керамическая технология применяется для изготовления диэлектрических, полупроводниковых, пьезоэлектрических, магнитных, металлокерамических и других изделий.

**Процесс производства керамических изделий** состоит из следующих основных этапов: приготовление керамической массы, формование изделий, сушка, отжиг. В некоторых случаях обожженные изделия могут подвергаться дополнительной механической обработке и металлизации обычно методом выжигания серебра.

**Электротехнический фарфор** – основной керамический материал, используемый в производстве широкого ассортимента низковольтных и высоковольтных изоляторов и других изоляционных элементов с рабочим напряжением до 1150 кВ переменного и до 1500 кВ постоянного тока.

Основными компонентами фарфора являются сырьевые материалы минерального происхождения – глинистые вещества (каолин и глина, кварц, полевой шпат, гипс, пегматит).

Изделия из фарфоровой массы получают различными способами обточкой, прессовкой, отливкой в гипсовые формы, выдавливанием через отверстие нужной конфигурации. После оформления изделия их сушат, глазируют и обжигают. Глазировка необходима для уменьшения гигроскопичности фарфоровых изоляторов, а также увеличения их механической прочности.

Недостатками фарфора являются ухудшение электроизоляционных свойств с повышением температуры, относительно большое значение тангенса угла диэлектрических потерь, что затрудняет его использование на высоких частотах.

Поэтому для изготовления высокочастотных высоковольтных изоляторов применяют **стеатитовую керамику (стеатиты)**, которая изготавливается на основе тальковых минералов, основной кристаллической фазой которых является метасиликат магния  $MgO, SiO_2$ .

Стеатитовые материалы характеризуются высокими значениями удельного электрического сопротивления, в том числе при высокой температуре, малым тангенсом угла диэлектрических потерь за исключением материала, предназначенного для производства крупных высоковольтных изоляторов.

К числу высоковольтных изоляторов относятся:

**стационарные для оборудования распределительных устройств и аппаратуры** (опорные, проходные, вводы, маслonaполненные, покрышки разного назначения);

**линейные для линий электропередачи** (подвесные и штыревые).

Стеатиты также характеризуется высокими механическими свойствами, стабильностью параметров при воздействии различных внешних факторов (влаги, температуры, высокого напряжения и др.). Благодаря высоким электро-механическим свойствам стеатит применяют для изготовления высокочастотных установочных деталей, высоковольтных и низковольтных конденсаторов, высоковольтных, антенных, внутриламповых, пористых и других изоляторов. Пластичный высокочастотный высоковольтный стеатитовый материал СПК-2 применяется для изготовления крупногабаритных изоляторов, а непластичные СНЦ, СК-1, Б-17, С-55 и С-4 – для электроизоляционных деталей и высокочастотных конденсаторов.

**Конденсаторная керамика** отличается высоким значением относительной диэлектрической проницаемости, малым тангенсом угла диэлектрических потерь, позволяющими использовать её в качестве диэлектрика в керамических конденсаторах.

Различают конденсаторную керамику:

1) **высокочастотную** с диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon = 10 \dots 230$ ) и тангенсом угла диэлектрических потерь на частоте 1 МГц не более 0,0006;

2) **низкочастотную** с диэлектрической проницаемостью ( $\epsilon = 900$ ) и тангенсом угла диэлектрических потерь на частоте 1000 Гц в пределах от 0,002...0,025.

Основную часть этих материалов составляют рутит (диоксид титана). В принятом обозначении такие составы имеют букву Т (титановая керамика); следующая цифра обычно обозначает номинальную диэлектрическую проницаемость. Эти материалы называют также **микондами**. При длительном воздей-

ствии постоянного напряжения титановая керамика подвергается электрохимическому старению.

Для повышения температурной стабильности в керамику вводят компоненты с положительным значением температурного коэффициента диэлектрической проницаемости. Такие материалы называют *термокомпенсированными*, к ним относятся титано-циркониевая, лантановая, станнатная керамика.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 3.12 Активные диэлектрики

#### Свойства и применение активных диэлектриков. Электрооптические материалы.

Диэлектрики, свойствами которых можно управлять с помощью внешних энергетических воздействий (электрических, магнитных, тепловых полей и т.д.), а также использовать эти воздействия для создания функциональных элементов электроники, относятся к группе **активных** диэлектриков. Различают: **сегнето-, пьезо- и пироэлектрики; электреты; электрооптические материалы** и др.

**Сегнетоэлектрики** - вещества, обладающие спонтанной (самопроизвольной) поляризацией в определенном диапазоне температур, направление которой может быть изменено под действием внешнего электрического поля.

**Спонтанной** называется поляризация, которая возникает в диэлектрике под влиянием внутренних процессов, без внешних воздействий и связана с особенностями сегнетоэлектриков.

Объем сегнетоэлектрика разделен на **домены** – макроскопические области с различным направлением векторов спонтанной поляризации  $P_c$ . В отсутствие внешнего электрического поля суммарная поляризованность образца в целом равна нулю. При воздействии внешнего электрического поля векторы спонтанной поляризации диполей ориентируются в основном в направлении поля, что вызывает эффект очень сильной поляризации, следствием чего является сверхвысокое значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ .

Доменное строение сегнетоэлектриков является следствием нелинейной зависимости поляризованности  $P$  от напряженности электрического поля  $E$ , которая при циклическом изменении напряженности поля имеет вид замкнутой кривой и носит название **диэлектрической петли гистерезиса**.

Температура  $T_k$ , при которой возникает (при охлаждении) или исчезает (при нагревании) спонтанная поляризация, называется **сегнетоэлектрической точкой Кюри**, ниже которой сегнетоэлектрик обладает доменной структурой и характерными сегнетоэлектрическими свойствами, а выше которой происходит распад доменной структуры и сегнетоэлектрик переходит в параэлектрическое состояние. При температуре, соответствующей точке Кюри, значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  максимальна.

Рассмотренные особенности поляризации впервые были открыты у кристалла сегнетовой соли, отсюда и название сегнетоэлектрики.

В настоящее время известно несколько сотен сегнетоэлектриков, которые по типу химической связи и физическим свойствам принято подразделять на:

1) **ионные** кристаллы, к которым относятся **титанат бария; титанат свинца; ниобат калия; барий-натриевый ниобат** или сокращенно **БАНАН** и

др.; они нерастворимы в воде, обладают значительной механической прочностью, легко получают методами керамической технологии.

2) **дипольные** кристаллы, к которым относятся **сегнетова соль; триглицинульфат; дигидрофосфат калия** и др., обладают малой механической прочностью и растворимостью в воде, благодаря чему можно вырастить крупные монокристаллы этих соединений из водных растворов.

Сегнетоэлектрики находят применение для изготовления малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью, материалов с большой нелинейностью поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств, для модуляции и преобразования лазерного излучения, в пьезо- и пирозлектрических преобразователях.

Электрооптические свойства сегнетоэлектрических кристаллов используют для модуляции лазерного излучения, осуществляемого электрическим полем, приложенным к кристаллу. Отметим, то все сегнетоэлектрики обладают пьезоэлектрическим эффектом, однако обратное несправедливо.

**Пьезоэлектрики** – это вещества с сильно выраженным пьезоэлектрическим эффектом.

**Прямой пьезоэлектрический эффект** называют явление поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. Возникающая при этом поляризованность  $P$  прямо пропорциональна приложенному механическому напряжению:  $P = d\sigma$ , где  $d$  – коэффициент пропорциональности, называемый пьезоэлектрическим модулем (пьезомодулем). Материалы с прямым пьезоэффектом используют для преобразования механических напряжений или смещений в электрические сигналы (звукосниматели, приемники ультразвука, датчики деформаций).

При **обратном пьезоэффекте** происходит изменение формы диэлектрика под действием приложенного электрического поля. При этом размеры меняются по линейному закону. Обратный пьезоэффект используют для преобразования электрических сигналов в механические (акустические излучатели, генераторы ультразвука).

В различных пьезопреобразователях используют **кристаллы кварца, сульфата лития, сегнетовой соли, ниобата и танталата лития**. Широко применяется для изготовления пьезопреобразователей пьезоэлектрическая керамика, изготавливаемая в основном на основе твердых растворов **цирконата-титаната свинца** (сокращенно **ЦТС**). Пьезокерамика используется для изготовления малогабаритных микрофонов, телефонов, детанаторов, датчиков давления, деформаций, ускорений, вибраций, пьезорезонансных фильтров, пьезотрансформаторов и др.

**Пирозлектрики** – диэлектрики, обладающие пирозлектрическим эффектом, который состоит в изменении спонтанной поляризованности диэлектриков

при изменении температуры. К типичным линейным пьезоэлектрикам относятся **турмалин** и **сульфат лития**. Пьезоэлектрики спонтанно поляризованы, но, в отличие от сегнетоэлектриков, направление их поляризации не может быть изменено электрическим полем. Пьезоэффект используется для создания тепловых датчиков и приемников лучистой энергии, предназначенных, в частности, для регистрации инфракрасного и сверхчастотного излучения. Значительным пьезоэффектом обладают некоторые сегнетоэлектрические кристаллы, к числу которых относятся **ниобат бария-стронция**, **триглицинсульфат (ТГС)**, **ниобат** и **танталат лития**.

**Электреты** – диэлектрики, способные длительное время сохранять поляризованное состояние и создавать в окружающем их пространстве электрическое поле за счет предварительной электризации или поляризации. Остаточная поляризация в электретах в отличие от пьезоэлектриков и поляризованных сегнетоэлектриков скомпенсирована не полностью, что приводит у них к отличной от нуля внешней напряженности поля, которая может быть очень высокой.

В зависимости от способа получения различают:

1) **Электроэлектреты** получают воздействием на диэлектрик только электрического поля при комнатной температуре. Свободные носители зарядов (ионы и электроны), ускоренные электрическим полем, бомбардируют поверхность диэлектрика в промежутке между диэлектриком и электродом и создают тем самым заряженный поверхностный слой.

2) **Термоэлектреты** получают при охлаждении нагретого или расплавленного диэлектрика в сильном электрическом поле. После охлаждения подвижность полярных молекул или свободных зарядов резко уменьшается и диэлектрик может сохранять остаточную поляризацию длительное время .

3) **Фотоэлектреты** получают при совместном действии электрического поля и световой энергии на материалы, обладающие фотопроводностью. После прекращения воздействия световой энергии носители разноименных зарядов оказываются «замороженными» у противоположных сторон диэлектрика, который превращается в электрет.

4) **Радиоэлектреты** получают при воздействии на диэлектрик радиоактивного излучения (ускоренных заряженных частиц). В результате ударной ионизации поверхностного слоя или внедрения в поверхностный слой диэлектрика ускоренных заряженных частиц на поверхности диэлектрика образуется заряженный слой.

5) **Трибоэлектреты** получают при трении двух диэлектриков. При плотном контакте двух диэлектриков электроны диэлектрика с меньшей работой выхода переходят в диэлектрик с большей работой выхода.

С течением времени заряд электрета изменяется, что связано с разрушением остаточной поляризации. Время, в течение которого значение стабилизиро-

ванного заряда уменьшается в 2,72 раза, называют *временем жизни электрета*. Оно может равняться десяткам лет, а для хороших электретов – сотням лет.

Электреты разрушаются при плавлении или воздействии сильного переменного электрического поля, ультразвука и поля высокой частоты.

Электреты применяют при изготовлении электростатических вольтметров, элементов электрической памяти, дозиметров проникающей радиации, для световой записи информации на диэлектрическую пленку (аналогично записи на магнитную ленту). Синтетические пленочные электреты применяют в качестве мембран в микрофонах, в вибропреобразователях. Природные электреты не применяются для изготовления изделий радиоэлектроники.

### **Электрооптические материалы.**

Для эффективного использования оптического излучения лазеров и других генераторов света необходимо управлять этим излучением. Для изменения основных параметров излучения (амплитуды, частоты, фазы, вектора поляризации и управления световым лучом) используют специальные устройства - модуляторы лазерного излучения, которые изготавливают из материалов, обладающих электрооптическим эффектом.

*Электрооптический эффект* заключается в изменении показателей преломления диэлектрика под воздействием электрического поля. Зависимость показателей преломления от напряженности электрического поля может быть линейной и квадратичной, поэтому электрооптические материалы подразделяются на:

1) *материалы с линейным электрооптическим эффектом* к ним относятся кристаллы, не имеющие центра симметрии (дигидрофосфат, дидейтерофосфат, ниобат лития, титанат лития).

2) *материалы квадратичным электрооптическим эффектом* к ним относятся кристаллы, имеющие центра симметрии (перовскиты) и изотропные среды (например, жидкости: нитробензол, сероуглерод).

**Жидкие кристаллы** обладают динамическим эффектом рассеяния света. У них под воздействием внешнего электрического поля непрерывно хаотично изменяется показатель преломления диэлектрика.

**Жидкокристаллическое состояние** – это термодинамически устойчивое агрегатное состояние, при котором вещество находится в промежуточном состоянии между твердым кристаллом и жидкостью и сохраняет анизотропию физических свойств твердых кристаллов и текучесть жидкостей. Жидкокристаллическое состояние существует лишь в определенном интервале температур между точкой кристаллизации и точкой превращения вещества в изотропную жидкость. При понижении температуры жидкий кристалл переходит в твердое состояние, а при повышении превращается в изотропную жидкость.

Свойства жидких кристаллов сходны со свойствами сегнетоэлектриков.

Они также разделены на домены – области с одинаковыми направлениями осей молекул. Отличительными особенностями жидких кристаллов является большое время переориентации диполей по сравнению с сегнетоэлектриками, а также наличие петли гистерезиса и максимума диэлектрической проницаемости лишь на очень низких частотах, менее 1 Гц.

Под действием слабого электрического поля оси молекул с высокой диэлектрической проницаемостью ориентируются параллельно полю. При достижении напряжением некоторого порогового значения устойчивая доменная структура разрушается и возникает ячеистая. Появляется гидродинамическое течение, которое при дальнейшем повышении напряжения становится турбулентным, а вещество оптически неоднородным. Прозрачный в исходном состоянии жидкий кристалл в таком неупорядоченном состоянии становится мутным, как матовое стекло, и рассеивает свет во всех направлениях. После снятия электрического поля эффект динамического рассеивания исчезает. Время установления (1...10 мс) и исчезновения (20...200 мс) состояния динамического равновесия характеризует быстродействие жидких кристаллов.

Способность жидких кристаллов изменять интенсивность проходящего через них света под действием электрического поля используют в устройствах оптической обработки информации, устройствах отображения информации, например в малогабаритных устройствах с питанием от батареек – наручных часах, микрокалькуляторах и др.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 3.13 Провода и кабели

#### Классификация, назначение и область применения проводов и кабелей

**Провод электрический** – это неизолированный или изолированный проводник электрического тока, состоящий из одного (одножильный провод) или нескольких (многожильный провод) проволок (чаще всего медных, алюминиевых или, значительно реже, стальных). Провода используют при сооружении линий электропередач (ЛЭП), изготовлении обмоток электрических машин, монтаже радиоаппаратуры, в устройствах связи и т.д.

**Кабелем** называют устройство, состоящее из одного или нескольких изолированных друг от друга проводников, заключенных в герметическую защитную оболочку из резины, пластмассы, алюминия или свинца. Кабель, имеющий поверх защитной оболочки покрытие (броню) из стальных лент, плоской или круглой проволоки (для защиты от механических повреждений), называется **бронированным**. Если защитные или броневые оболочки кабеля не покрыты джутовой пропитанной пряжей, то такой кабель называют **голым**.

Для передачи и распределения электрической энергии, соединения различных приборов и их частей, изготовления обмоток электрических машин применяют:

- обмоточные провода
- монтажные провода
- установочные провода и шнуры
- кабели.

**Обмоточные провода** применяют для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. В качестве проводникового материала в обмоточных проводах применяют медь и алюминий. Различают:

1 ) **Эмалированные обмоточные провода** (рисунок 3.8) – наиболее перспективные среди обмоточных проводов, так как имеют наименьшую толщину изоляции (0,007...0,065 мм). Применяя такую проволоку, можно увеличить мощность электрической машины за счет большего числа витков в объеме обмотки.

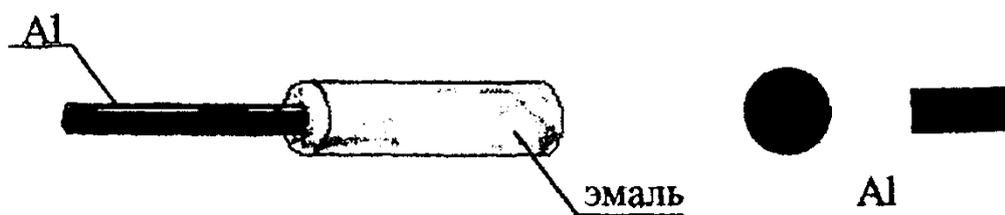


Рисунок 3.8 – Обмоточный провод с эмалевой изоляцией

Эмалевая изоляция наносится на эмалировочных станках в виде гибкого лакового покрытия.

Важнейшими характеристиками эмалированных проводов являются эластичность, нагревостойкость и электрическая прочность.

2) **Обмоточные провода с волокнистой изоляцией** (рисунок 3.9) имеют большую толщину изоляции (0,05...0,17мм) по сравнению с эмалированными проводами. В качестве волокнистой изоляции применяют пряжу: хлопчатобумажную, шелковую, из капроновых, асбестовых, лавсановых и стеклянных волокон.

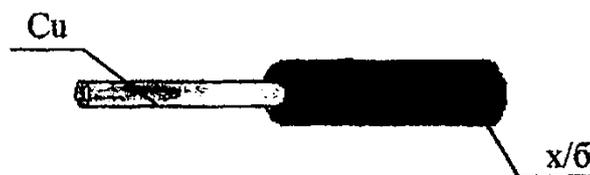


Рисунок 3.9 – Обмоточный провод с волокнистой изоляцией

В качестве пленочной изоляции для проводов, применяют кабельную и конденсаторную бумагу, хорошо пропитанную минеральным маслом. Проволока с пленочной бумажной изоляцией обеспечивает высокую электрическую прочность обмоткам трансформаторов. Для повышения механической прочности изоляции из бумажной ленты ее покрывают х/б или капроновой пряжей.

Обмоточные провода с волокнистой изоляцией обладают следующими свойствами:

- невысокие электроизоляционные свойства, т.к. все виды волокнистой изоляции гигроскопичны, т.е. поглощают влагу из воздуха;
- обмотки из проводов с волокнистой изоляцией требуют тщательной сушки и пропитки изоляционными лаками или компаундами.

3) **Провода с эмалево-волокнистой изоляцией** (рисунок 3.10) поверхностно имеют изоляцию из х/б, шелковой, капроновой или стеклянной пряжи. Такие обмоточные провода применяют для изготовления тяговых, шахтных электродвигателей, электрических машин и аппаратов, которые эксплуатируются в более тяжелых условиях и требуют защиты эмалевой изоляции.

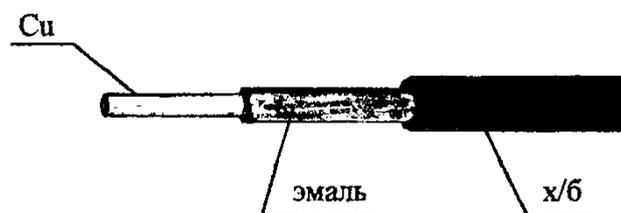


Рисунок 3.10 – Обмоточный провод с эмалево-волокнистой изоляцией

### **Маркировка обмоточных проводов**

Если первая буква - **П** (провод), то токоведущая жила медная, если первая буква **А**, а затем **П**, то токоведущая жила алюминиевая.

Буквы, стоящие за *П* и *АП* - *материал изоляции*: *ЭЛ* - из лакостойкой эмали; *ЭВ* - из высокопрочной эмали; *ЭТ* - из теплостойкой эмали; *Б* - из х/б пряжи (волокна); *Ш* - из натурального шелка; *Л* - из лавсана; *К* - из капрона; *ШК* - из искусственного шелка и капрона; *С* – стекловолнистая.

Если в конце марки стоит буква *О* или цифра **1**, то провод имеет один слой изоляции; если - *Д* или **2** - два слоя изоляции.

*Примеры некоторых марок обмоточных проводов*: *АПБД* – обмоточный алюминиевый провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи; *АПСД* - обмоточный алюминиевый провод, изолированный двумя слоями обмотки из стекловолнистого, пропитанной нагревостойким лаком; *АПЛБД* - обмоточный алюминиевый провод, изолированный обмоткой, состоящей из одного слоя лавсанового волокна и одного слоя хлопчатобумажного волокна; *ПЭВБО* – обмоточный медный провод, изолированный высокопрочной эмалью и одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи; *ПЭВБД* - обмоточный медный провод, изолированный высокопрочной эмалью и двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи.

**Монтажные провода** состоят из медных или алюминиевых жил, которые покрывают изоляционной резиной или полихлорвиниловым пластиком, а также х/б, шелковой или капроновой пряжей и синтетической пленкой. Наибольшей гибкостью обладают многопроволочные провода, жила которых состоит из большого числа тонких проволок. Монтажные провода выпускают с лужеными медными жилами, что облегчает пайку проводов.

Для распознавания монтажных проводов их изоляционные оболочки обычно окрашивают в разные цвета. Монтажные провода применяются в основном короткими отрезками для неподвижной прокладки при внутри- и межблочных соединениях приборов, аппаратов и других электрических и радиотехнических устройств.



Рисунок 3.11 – Монтажный провод с полихлорвиниловой изоляцией

*Примеры некоторых марок монтажных проводов*: *МРП* - монтажный провод из одной медной жилы с резиновой изоляцией в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной парафином; *МРПЭ* - то же, но поверх хлопчатобумажной оплетки имеется экран из медных луженых проволок; *МГВ* - монтажный провод многопроволочный гибкий с изоляцией из полихлорвинилового пластика; *МГВЛ* - то же, но с лакированной хлопчатобумажной оплеткой; *МГВЛЭ* - то же, но экранированный.

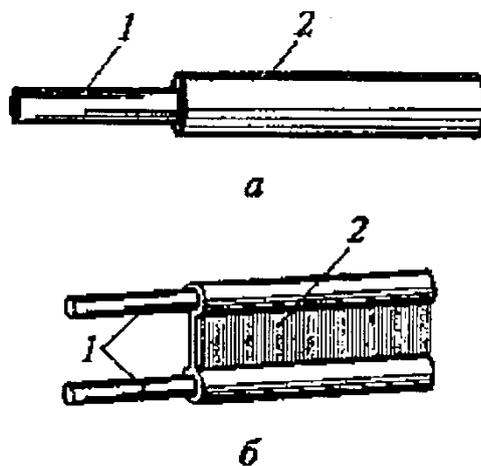
**Установочные провода и шнуры** служат для распределения электрической энергии, а также для присоединения электродвигателей, светильников и др. потре-

бителей тока к сети. Токопроводящие жилы установочных проводов и шнуров изготавливают из медной и алюминиевой проволоки. Для обеспечения большей гибкости жилы шнуров и некоторых типов проводов являются многопроволочными. Провода и шнуры с полихлорвиниловой изоляцией выпускают без защитных оболочек. Установочные провода выпускают одно-, двух-, трех-, четырех- и многожильными на напряжение 220, 380, 500, 2000 и 3000 В переменного тока. Шнуры выпускают двухжильными, т.е. состоящими из двух изолированных и свитых друг с другом жил. Их изготавливают на напряжение до 220 В переменного тока.

**Маркировка установочных проводов и шнуров** складывается из букв и цифр. Первая буква - **материал жилы**: *А* - алюминий. При отсутствии этой буквы жила медная; вторая буква: *П* - провод; *ПП* - провод плоский; третья и последующие буквы - **материал изоляции и защиты**: *Р* - резиновая; *В* - полихлорвиниловая; *П* - полиэтилен; *О* - изолированные жилы в оплетке из х/б пряжи; *Н* - негорючая резиновая оболочка; *Ф* - фальцованная (металлическая) оболочка; *Г* - с гибкой жилой; *Д* - провод двухжильный; *Т* - с несущим тросом.

**Цифровая часть** например: 3 x 2,5, где 3 - количество жил; 2,5 - сечение каждой мм<sup>2</sup>. В маркировке соединительных шнуров должна присутствовать буква *Ш*.

**Примеры некоторых марок установочных проводов:** *ПВ* (рисунок 3.12, а) - установочный провод с медной жилой, изолированной полихлорвиниловым пластиком; *АПВ* - установочный провод с алюминиевой жилой, изолированной полихлорвиниловым пластиком; *АПП* - установочный провод с алюминиевой жилой с полиэтиленовой изоляцией; *ППВ* (рисунок 3.12, б) - установочный провод ленточный (плоский) с медными жилами, уложенными параллельно и заключенными в полихлорвиниловую изоляцию; *АППВ* - то же, но с алюминиевыми жилами; *ПР* - установочный провод медный с резиновой изоляцией в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной противогнилостным составом (рисунок 3.13).



а - марки ПВ; б марки ППВ (ленточный двухжильный провод); 1 - однопроволочная жила; 2 - изоляция из полихлорвинилового пластика

Рисунок 3.12 - Провода установочные с изоляцией из полихлорвинилового пластика



1- однопроволочная жила; 2 – изоляция из вулканизированной резины;  
3 – оплетка из х/б ткани;

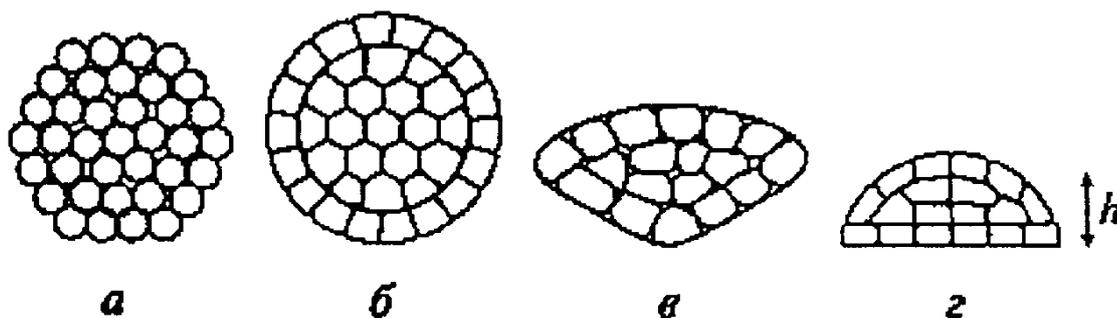
Рисунок 3.13– Установочный провод с резиновой изоляцией пластика

При выборе установочных проводов учитывают: условия прокладки; требуемое количество жил; их сечение (мм); напряжение, при котором провода будут эксплуатироваться.

**Кабели** применяют для передачи и распределения электрической энергии. Токопроводящие жилы изготавливают из мягкой медной проволоки (марка ММ), а также из алюминиевой мягкой или твердой проволоки (марки АМ и АТ). В одножильных кабелях применяют жилы круглой формы, в двухжильных - круглой и сегментной, а в трех- и четырехжильных кабелях – секторной (см. рисунок 3.14).

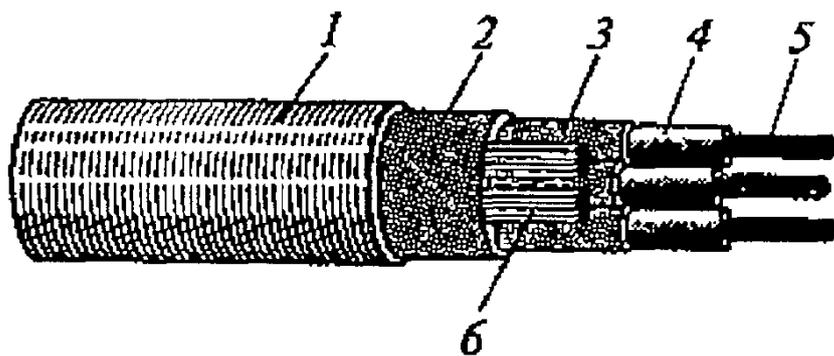
Для передачи и распределения электрической энергии в установках с напряжением до 500, 3000 и 6000 В переменного тока применяют кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией (см рисунки 3.15, 3.16).

На напряжение 20, 35 кВ и выше выпускают силовые кабели с бумажной пропитанной изоляцией (рисунок 3.17).



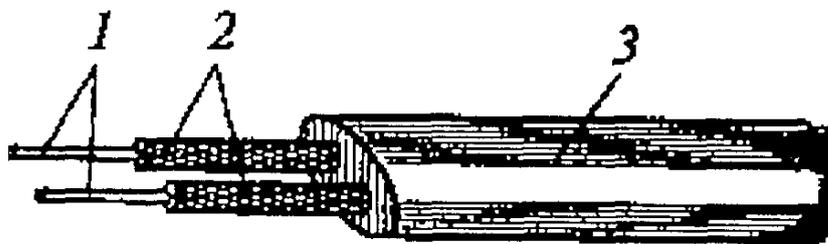
*a*- круглая неуплотненная жила; *б* – круглая уплотненная жила; *в* – секторная уплотненная жила; *г* – сегментная уплотненная жила

Рисунок 3.14 – Многопроволочные жилы кабелей



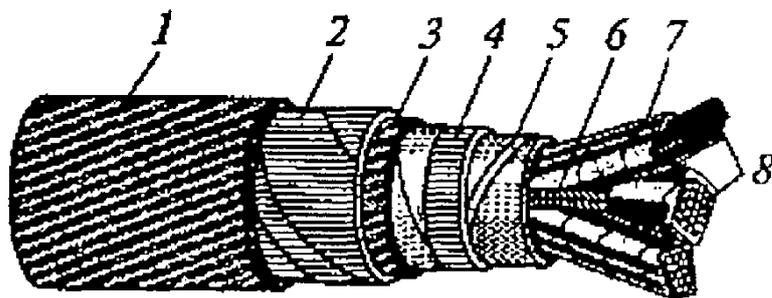
1 –свинцовая; 2 – поясная изоляция; 3 – покрытие (обмотка) из прорезиненной ленты; 4- - изоляция из вулканизированной резины; 5 – медная многопроволочная жила; 6 – междуфазное заполнение.

Рисунок 3.15 – Силовой кабель с резиновой изоляцией в свинцовой оболочке, небронированный (марки СРГ)



1 - однопроволочные жилы; 2 – изоляция жил из вулканизированной резины; 3 – оболочка из полихлорвинилового пластика

Рисунок 3.16 – Силовой кабель с резиновой изоляцией жил в оболочке из полихлорвинилового пластика



1 – верхний защитный покров из грубой пропитанной пряжи; 2 – броневой покров из стальных лент; 3 – защитный покров; 4 – свинцовая оболочка; 5 – поясная изоляция; 6 – междуфазное заполнение; 7 – бумажная пропитанная изоляция; 8 – медные многопроволочные жилы

Рисунок 3.17 – Силовой кабель с бумажной изоляцией жил в свинцовой оболочке, бронированный (марки СБ)

Система *маркировки кабелей*: медные токопроводящие жилы не обозначаются специальной буквой, а алюминиевые жилы обозначаются буквой А, которая ставится в начале марки кабеля: **П** – полиэтилен, **В** – поливинилхлоридный пластикат, **Р** – резина, **Пс** – самозатухающий полиэтилен, **Пв** – вулканизированный полиэтилен.

Бумажная пропитанная изоляция не имеет буквенного обозначения. Третья буква марки кабеля обозначает тип защитной оболочки: **А** – алюминиевая, **С** – свинцовая, **П** – полиэтиленовая, **В** – поливинилхлоридная, **Р** – резиновая, **НР** – оболочка из резины, не поддерживающая горения. Последние буквы обозначают и защитное покрытие: **Б** – броня из двух стальных оцинкованных лент с антикоррозийным защитным покровом, **Би** – то же, но не с горючим защитным покровом, **Р** – отсутствие защитных покровов поверх брони или оболочки, **К** – броня из круглых стальных оцинкованных проволок с защитным покровом, **П** – броня из плоских стальных оцинкованных проволок с защитным покровом, **Бб** – броня из профилированной стальной ленты, **Шв (Шп)** – защитный покров из впрессованного шланга из поливинилхлоридного пластика (полиэтилена).

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[Вопросы по разделу 3](#)

[ДАЛЕЕ](#)

## 4.1 Физические процессы в полупроводниках

### Классификация, назначение, особенности свойств полупроводников.

Полупроводниковые материалы обладают проводимостью, которой можно управлять, изменяя напряжение, температуру, освещенность и другие факторы. По способности проводить электрический ток полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками.

Диапазон значений удельного электрического сопротивления:

- для проводников при комнатной температуре от  $1,6 \cdot 10^{-8}$  до  $1 \cdot 10^{-6}$  Ом•м;
- низкочастотных изоляционных материалов от  $10^6 \dots 10^8$  до  $10^{14} \dots 10^{16}$  Ом•м;
- полупроводников  $1 \cdot 10^{-6} \dots 10^9$  Ом•м. Эти границы условны и в определенном диапазоне перекрываются, что связано с особенностями этих групп материалов.

Одной из особенностей полупроводниковых материалов является их поведение при изменении температуры.

У *проводниковых* материалов при температуре, стремящейся к нулю, *удельная электрическая проводимость увеличивается*, а при переходе в сверхпроводящее состояние - приобретает бесконечно большие значения (рисунок 4.1, кривая 1).

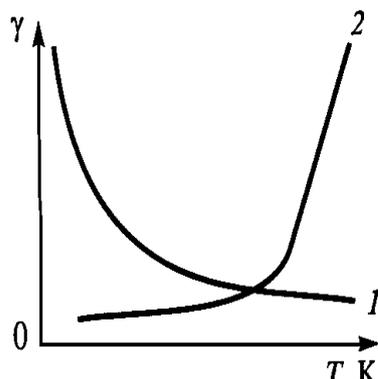


Рисунок 4.1 – Зависимость удельной проводимости металлов (1) и полупроводников (2) от температуры

В отличие от проводников у *полупроводников* при уменьшении температуры их (рисунок 4.1, кривая 2) *удельная электрическая проводимость уменьшается*, а при стремлении температуры к 0 К ( $-273^\circ\text{C}$ ) полупроводники *прекращают проводить электрический ток и переходят в разряд диэлектриков*.

*При повышении температуры удельная электрическая проводимость у полупроводников резко увеличивается*. Такой характер поведения полупроводников при изменении температуры позволяет использовать тепло для управления их удельной электрической проводимостью.

В проводниковых материалах *проводимость связана с появлением свободных зарядов*, что вызвано изменением температуры и внутренним строением полупроводника.

Для появления свободных носителей заряда в полупроводниковом мате-

риале требуется *внешняя энергия (тепловая, механическая нагрузка, облучение ядерными частицами, электрическое или магнитное поля и т.д.)*.

Если носители заряда появились под действием тепла, то они называются **равновесными**.

В результате воздействия на полупроводник других видов энергии образуются дополнительные *неравновесные* носители зарядов.

**Электропроводность полупроводника резко изменяется при введении в него даже незначительного числа атомов примесного вещества.** Она зависит не только от количества, но и от вида постороннего элемента. Например, при введении в химически чистый германий 0,001 % мышьяка его удельная проводимость увеличивается в 10 000 раз.

**Основные свойства полупроводников:**

1) в большом интервале температур их удельное сопротивление уменьшается, т.е. они *имеют отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления*;

2) при введении в полупроводник малого количества примесей их удельное сопротивление резко изменяется;

3) они чувствительны к различного рода внешним воздействиям - *свету, ядерному излучению, электрическому и магнитному полям, давлению и т.д.*

4) Полупроводники допускают обратное преобразование электрической энергии в тепловую, световую или механическую.

**Классификация полупроводниковых материалов.** 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, углерод, фосфор, сера, сурьма, мышьяк, серое олово, йод. Простые полупроводники не всегда отвечают требованиям современного производства полупроводниковых приборов.

Для создания материалов с различными свойствами широко используют *сложные неорганические или органические полупроводниковые соединения*.

**Сложные неорганические полупроводники** образованы атомами различных химических элементов таблицы Д.И.Менделеева. Они бывают:

1) *двойные (бинарные) соединения типа  $A_x^m B_y^n$* ;

2) *тройные соединения типа  $A_x^m B_y^n C_z^k$* , где верхние индексы *m*, *n* и *k* обозначают номер группы Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, а нижние *x*, *y* и *z* - число атомов этого элемента в соединении;

3) *твердые растворы*, например, *гидрированные некристаллические полупроводниковые материалы на основе кремния*.

Среди бинарных соединений широкое практическое применение нашли:

1) **Полупроводниковые соединения типа  $A^{III} B^V$** . Они являются ближайшими аналогами кремния и германия и представляют собой химические соединения металлов III группы Периодической системы химических элементов

Д.И.Менделеева (*бор, индий, галлий, алюминий*) с элементами V группы (*азот, фосфор, сурьма, мышьяк*).

Применяют для изготовления светодиодов, туннельных диодов, транзисторов, солнечных батарей, датчиков Холла, оптических фильтров и термоэлектрических генераторов, тензометров и др. приборов.

2) *Полупроводниковые соединения типа  $A^{II}B^{VI}$* . Они являются двойными соединениями *халькогенов* с металлами II группы Периодической системы химических элементов Д.И.Менделеева *цинком, кадмием, ртутью*. К *халькогенам* относят *серу S, селен Se и теллур Te*, а соединения с этими элементами называют (сульфиды, селениды, теллуриды) *халькогенидами*.

Их применяют для создания промышленных люминофоров, фоторезисторов, высокочувствительных датчиков Холла и приемников далекого инфракрасного излучения.

3) *Полупроводниковые соединения типа  $A^{VI}B^{VI}$*  являются *халькогенидами свинца*. К ним относятся *сульфид свинца PbS, селенид свинца PbSe и теллурид свинца PbTe*.

Эти соединения являются узкозонными полупроводниками. Их используют для изготовления фоторезисторов в инфракрасной технике, инфракрасных лазеров, тензометров и термогенераторов, работающих в интервале температур от комнатной до 700 °С.

Все **органические твердые полупроводниковые материалы** делят на:

1) *Молекулярные кристаллы* представляют собой полициклические низкомолекулярные ароматические соединения. К ним относят *нафталин, фталоцианин, антрацен, коронен* и др.

2) *Молекулярные комплексы* – полициклические низкомолекулярные соединения с электронным взаимодействием между молекулами вещества, которые обладают большей электропроводностью чем молекулярные кристаллы. К ним относят *виолантрен-йод, изовиолантрен-калий*.

3) *Металлоорганические комплексы* - низкомолекулярные вещества, молекула которых содержит в центре атом металла (фталецианин меди).

4) *Полимерные полупроводники* – материалы с длинными цепями сопряжения и сложным физико-химическим строением.

5) *Пигменты* – красители, обладающие полупроводниковыми свойствами. К полимерным пигментам относят *индиго, эозин, пинацианол, радофлавин, радамин* и др. К природным пигментам относят *хлорофил, каротин* и др.

Органические полупроводники применяют для изготовления терморезисторов с высокой температурной стабильностью пьезо-элемента, резонансных контуров в интегральных схемах, радиационных дозиметров, детекторов инфракрасного излучения, фоторезисторов, квантовых генераторов, тензодатчиков с высокой чувствительностью.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[Самоконтроль](#)

[ДАЛЕЕ](#)

## 4.2 Элементарные полупроводники

### **Получение, свойства и применение германия, кремния, селена.**

#### Классификация полупроводниковых материалов

Полупроводниковые материалы по химическому составу и кристаллической структуре подразделяют на неорганические и органические полупроводники. Широкое практическое применение получили неорганические полупроводниковые материалы, к которым относятся кристаллические и аморфные (стеклообразные) полупроводники.

К классу кристаллических полупроводников относятся элементарные полупроводники, а также химические соединения и твердые растворы на основе химических соединений.

Элементарными полупроводниками (некоторые из них относят к металлам, но в определенных условиях они проявляют свойства полупроводников) являются двенадцать элементов периодической системы Менделеева

- элемент 3 группы - В (бор);
- элементы 4 группы - С (углерод), Si (кремний), Ge (германий), Sn (олово);
- элементы 5 группы - Р (фосфор), As (мышьяк), Sb (сурьма);
- элементы 6 группы - S (сера), Se (селен), Те (теллур);
- элемент 7 группы - J (йод).

Из элементарных полупроводников в современной электронной технике широкое применение получили кремний и германий.

#### **Кремний – атомный номер 14.**

Кремний является одним из самых распространенных элементов в земной коре, где его содержится 29,5% (по массе). По распространенности кремний занимает среди элементов второе место после кислорода.

#### **Свойства.**

Кремний образует темно-серые с металлическим блеском кристаллы, имеющие кубическую гранцентрированную решётку типа алмаза с периодом  $a = 5,43 \text{ \AA}$ , ширина запрещенной зоны 1,12 эВ при 300 К плотностью 2,33 г/см<sup>3</sup>. Кремний плавится при температуре 1417°С, кипит при 2600 °С; прозрачен для длинноволновых ИК-лучей; показатель преломления (для  $\lambda = 6 \text{ мкм}$ ) 3,42; диэлектрическая проницаемость 11,7. Кремний – хрупкий материал; заметная пластическая деформация начинается при температуре выше 800°С.

В химическом отношении кристаллический кремний при комнатной температуре является относительно инертным веществом. Он нерастворим в воде, не реагирует со многими кислотами в любой концентрации. Хорошо растворяется лишь в смеси азотной и плавиковой кислот и в кипящих щелочах. Кремний устойчив на воздухе при нагревании до 900°С. При нагревании кремний легко взаимодействует с галогенами, а при температурах 1100 ÷ 1300°С способен непосредственно соединяться с азотом с образованием нитрида Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Кремний хорошо растворим во многих расплавленных металлах (Al, Ga, Sn, Au, Ag и

др.). С рядом металлов (Cr, Mo, Fe, Cu, Mg и др.) он образует устойчивые химические соединения – силициды.

Плавление кремния сопровождается некоторым увеличением его плотности (примерно на 10%) и скачкообразным уменьшением удельного сопротивления (примерно в 30 раз). В расплавленном состоянии кремний имеет удельное электрическое сопротивление порядка  $10^{-4}$  Ом·м и ведет себя подобно жидким металлам, т.е. характеризуется малой подвижностью и высокой концентрацией носителей заряда.

### **Получение.**

Получение кремния полупроводниковой чистоты состоит из следующих этапов:

- превращение кремния в легколетучее соединение, которое после очистки может быть легко восстановлено;
- очистка соединения физическими и химическими методами;
- восстановление соединения с выделением чистого кремния;
- окончательная кристаллизационная очистка и выращивание монокристаллов.

### **Применение.**

Кремний является основным материалом при изготовлении транзисторов, аналоговых и цифровых интегральных микросхем (ИМС). В качестве активных элементов цифровых ИМС преимущественно используются полевые МДП-транзисторы или биполярные транзисторы.

Значительную долю полупроводниковых приборов составляют кремниевые дискретные приборы. Это выпрямительные, импульсные и СВЧ-диоды, биполярные транзисторы, полевые транзисторы, приборы с зарядовой связью. Кремниевые транзисторы могут работать на частотах порядка 10 ГГц. На основе кремния создают лучшие стабилитроны (имеют напряжение стабилизации от 3 до 400 В) и тиристоры.

Наиболее масштабной областью применения кремниевых дискретных приборов является силовая электроника и силовая преобразовательная техника (вентили, тиристоры, мощные транзисторы). Мощные кремниевые приборы могут работать при напряжении до 10 кВ и пропускать ток до 7000 А. Эти приборы используются в системах и устройствах преобразования электрической энергии, в автомобилях, в источниках вторичного питания с бестрансформаторным входом, в роботах, сварочных аппаратах, электротранспорте, бытовой электронике и др.

Применяются также кремниевые фоточувствительные приборы, особенно фотодиоды. Спектр чувствительности фотодетекторов (0,3–1,1 мкм) хорошо согласуется со спектром излучения многих полупроводниковых источников света. Солнечные батареи изготавливают на основе кремниевых фотоэлементов. Принцип их действия основан на генерации неравновесных носителей заряда при поглощении фотонов и последующем их разделении внутренним по-

лем р-п-перехода, КПД составляет 10–21%. Детекторы ядерных излучений, датчики Холла и тензодатчики (благодаря сильной зависимости удельного сопротивления от механических деформаций) производят на основе кремния. Кремниевые приборы могут работать при температурах до 180÷200 °С.

### **Германий – атомный номер 32.**

#### **Свойства.**

Температура плавления 936 °С, собственное удельное сопротивление 0,47 Ом·м при температуре 20°С, собственная концентрация носителей заряда  $2,5 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>, ширина запрещенной зоны 0,665 эВ при 300 К, диэлектрическая проницаемость 16. В нормальных условиях чистый германий прозрачен для электромагнитного излучения с длиной волны более 1,8 мкм. При комнатной температуре подвижность электронов примерно в два раза превышает подвижность дырок.

Чистый германий обладает металлическим блеском, высокой твердостью и хрупкостью. Кристалл германия обладает структурой алмаза. Кристаллический германий химически устойчив на воздухе при комнатной температуре. При нагревании до температур свыше 650°С окисляется, образуя двуокись германия GeO<sub>2</sub>.

При комнатной температуре германий нерастворим в воде, соляной и разбавленной серной кислотах. Растворим в смеси азотной и плавиковой кислот, растворе перекиси водорода. При нагревании интенсивно взаимодействует с галогенами, серой и сернистыми соединениями.

Германий практически не взаимодействует с графитом и кварцевым стеклом. Жидкий германий интенсивно поглощает водород, причем водород является электрически нейтральной примесью.

Относительно невысокая температура плавления германия и малое давление насыщенного пара при этой температуре существенно упрощает технику очистки и выращивания монокристаллов германия.

#### **Получение.**

Основными источниками промышленного получения германия являются побочные продукты цинкового производства, коксования углей, германиевые концентраты, получаемые из медно-свинцово-цинковых руд.

Процесс получения германия состоит из следующих этапов:

- получение тетрахлорида германия GeCl<sub>4</sub>, представляющего собой жидкость с температурой кипения 83 °С;
- очистка методами экстракции и ректификации;
- гидролиз:  $\text{GeCl}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{GeO}_2 + 4\text{HCl}$ ;
- восстановление GeO<sub>2</sub> водородом при  $T = 650 \div 700$  °С.

Последняя стадия совмещается с плавлением образующегося порошка германия и направленной кристаллизацией расплава. В дальнейшем полученные слитки подвергают зонной плавке для получения особо чистого германия или используют при выращивании легированных монокристаллов.

### **Применение.**

Германий используется, в первую очередь, в диодах и транзисторах. Выпрямительные плоскостные диоды рассчитаны на прямые токи от 0,3 до 1000 А при падении напряжения не более 0,5 В. Недостатком германиевых диодов являются невысокие обратные напряжения.

Германиевые транзисторы могут быть низко- и высокочастотными, мощными и маломощными. Нанесение пленочной изоляции на SiO<sub>2</sub> позволяет изготавливать германиевые транзисторы по планарной технологии. Германий, легированный золотом используется в импульсных диодах. Благодаря высокой подвижности зарядов германий применяют при изготовлении датчиков Холла.

Оптические свойства германия позволяют использовать его для изготовления фототранзисторов и фотодиодов, оптических линз (для инфракрасных лучей), оптических фильтров, а также счетчиков ядерных частиц. Рабочие температуры германиевых приборов находятся в диапазоне от -60°C до +70°C. Невысокий верхний предел является существенным недостатком германия.

<a href="#"><u>НАЗАД</u></a>	<a href="#"><u>Обратная связь</u></a>	<a href="#"><u>ДАЛЕЕ</u></a>
------------------------------	---------------------------------------	------------------------------

### 4.3 Сложные полупроводниковые соединения Бинарные соединения. Их строение, свойства и применение

**Сложные полупроводники** — неорганические химические соединения, обладающие полупроводниковыми свойствами. К сложным полупроводниковым материалам относятся также аморфные и стеклообразные полупроводники.

К двойным полупроводниковым фазам относятся двойные полупроводниковые соединения и твердые растворы на их основе. Химические связи в этих фазах смешанные с преобладанием ковалентной, иногда это ковалентно-ионно-металлические связи, реже — ковалентно-ионные. Двойные алмазоподобные полупроводниковые фазы возникают при образовании  $sp^3$ -гибридных химических связей и для них характерно тетраэдрическое расположение атомов в первой координационной сфере. К двойным алмазоподобным фазам относятся многие соединения классов  $AIII BV$ ,  $AIV BV$ ,  $AIV BV$ ,  $AIII_2 BV_3$ , твердые растворы на основе этих соединений, а также карбид кремния, который является единственным бинарным соединением, образованным полупроводниковыми элементами IV группы. Широкое применение в полупроводниковом приборостроении имеют двойные полупроводниковые соединения  $AIII BV$ ,  $AIV BV$ ,  $AIV BV$ .

#### **Полупроводниковые соединения $AIII BV$**

Являются ближайшими электронными аналогами кремния и германия, относятся к алмазоподобным полупроводникам. Образуются в результате взаимодействия элементов IIIA подгруппы Периодической системы (бора, алюминия, галлия, индия) с элементами VA подгруппы (азотом, фосфором, мышьяком и сурьмой). Висмут и таллий не образуют соединений рассматриваемого ряда. За счет частичного перераспределения электронов атомы  $AIII$  и  $BV$  в такой структуре оказываются разноименно заряженными. Поэтому связи в кристаллах  $AIII BV$  не полностью ковалентные, а частично ионные. Соединения  $AIII BV$  принято классифицировать по металлоидному ряду: нитриды, фосфиды, арсениды, антимониды. Фосфиды, арсениды и антимониды имеют кристаллическую кубическую решетку типа сфалерита. Для нитридов характерна гексагональная решетка типа вюрцита. В решетке того и другого типов каждый атом элемента III группы находится в тетраэдрическом окружении четырех атомов элемента V группы и наоборот. Структура сфалерита не имеет центра симметрии.

В кристаллах  $AIII BV$  реализуется донорно-акцепторная связь. Из четырех ковалентных связей, которыми каждый атом встраивается в решетку, три образуются обобществлением валентных электронов атомов  $AIII$  и  $BV$ , а четвертая связь осуществляется неподеленной парой валентных электронов атомов  $BV$ .

За исключение антимонидов все соединения разлагаются при нагревании. Температура плавления соединений лежит выше температуры плавления образующих его компонентов (исключение — антимонид индия).

Полупроводниковые соединения образуют гомологический ряд, в котором наблюдается закономерное изменение многих свойств при изменении атомных номеров компонентов. Внутри каждой группы соединений аналогов (фосфидов, арсенидов и антимонидов) наблюдается уменьшение температуры плавления, твердости и ширины запрещенной зоны с ростом суммарного атомного номера и атомных масс входящих в соединение элементов и возрастание подвижности носителей заряда, особенно электронов. Подвижность носителей заряда в полупроводниках АПВV определяется в основном рассеянием электронов и дырок на оптических тепловых колебаниях решетки.

Основным методом промышленного получения монокристаллов соединений АПВV является метод Чохральского, для разлагающихся соединений в варианте с жидкостной герметизацией расплава (см. методы выращивания кристаллов). Используются также методы направленной кристаллизации. Легирование кристаллов с целью получения необходимых электрофизических свойств осуществляется в процессе выращивания.

Наиболее широко применение среди этой группы материалов имеют арсенид галлия и фосфид индия. Для изготовления ряда приборов электронной техники применяются также арсенид индия, антимонид индия, антимонид галлия и другие материалы.

Соединения АПВV используются в производстве полупроводниковых приборов различного назначения: СВЧ-интегральные схемы, светодиоды, фоторезисторы, лазеры, приемники ИК-излучения, туннельные диоды и др.

На основе соединений АПВV образуются твердые растворы замещения. При изменении состава твердого раствора можно управлять шириной запрещенной зоны соединений. Изменение ширины запрещенной зоны сопровождается соответствующим смещением спектров оптического поглощения и пропускания, люминесценции и фоточувствительности. С изменением состава твердого раствора изменяются значения диэлектрической проницаемости и показателя преломления в ряде систем при определенных соотношениях между компонентами можно получить качественно новое сочетание свойств. Например, в твердых растворах  $GaAs_{1-y}Py_y$  и  $Al_xGa_{1-x}As$  сочетаются достаточно широкая запрещенная зона и высокий квантовый выход межзонной излучательной рекомбинации. На основе тройных и четверных твердых растворов соединений АПВV создаются гетеропереходы и приборы на их основе.

### **Полупроводниковые соединения АПВVI**

К соединениям АПВVI относят халькогениды цинка, кадмия и ртути. Среди них выделяют сульфиды, селениды и теллуриды. Оксиды указанных металлов в эту группу полупроводниковых соединений не входят (см. Оксидные полупроводники). Соединения АПВVI являются алмазоподобными полупроводниками и кристаллизуются в структуре сфалерита или вюрцита.  $CdS$ ,  $CdSe$ ,  $CdTe$ ,  $ZnS$  могут существовать как в кубической структуре сфалерита, так и в гексагональной структуре вюрцита.

Химическая связь носит смешанный ковалентно-ионный характер. Ионная составляющая связи в этих соединениях достигает 45-70%. Большая доля ионной составляющей связи в соединениях АІІВVI по сравнению с полупроводниками АІІВV обусловлена большими различиями в электроотрицательности элементов, образующих соединение. Это приводит к большим значениям ширины запрещенной зоны и более низким значениям подвижности носителей заряда в рядах изоэлектронных аналогов. С ростом средней атомной массы во всех трех гомологичных рядах закономерно уменьшается ширина запрещенной зоны и температура плавления соединений. В ряду халькогенидов сульфиды — селениды — теллуриды уменьшается температура плавления, ширина запрещенной зоны, удельное сопротивление, подвижность носителей заряда возрастает.

Один из основных механизмов образования фаз переменного состава на основе этих соединений (особенно в случае соединений с большой шириной запрещенной зоны) состоит в том, что избыточные атомы компонентов располагаются в узлах своей подрешетки, а в другой подрешетке возникают вакансии, образуются растворы вычитания (см. твердые растворы). Удельное сопротивление и тип проводимости в этих соединениях определяются не столько легирующими примесями, сколько характерными для них структурными дефектами, связанными с отклонением их состава от стехиометрического. Избыток металлической составляющей обуславливает электронную проводимость, избыток халькогенов — дырочную.

Большинство соединений АІІВVI относится к технологически трудным материалам. Высокие температуры плавления и большие значения упругости пара составляющих компонентов затрудняют получение совершенных монокристаллов. Поликристаллические халькогениды обычно получают путем их осаждения из растворов (ZnS, CdS, CdSe) или сплавлением исходных компонентов (ZnSe, ZnTe, CdTe), монокристаллические — направленной кристаллизацией, сплавлением компонентов или выращиванием из расплава или с помощью химических реакций в газовой фазе.

Халькогениды обладают высокой чувствительностью к излучению в области от инфракрасной до рентгеновской. У них достаточно сильно проявляются фоторезистивные и люминесцентные свойства, некоторые из них обладают пьезоэлектрическим эффектом.

Монокристаллы ZnS и спеченные поликристаллические блоки обладают высокой прозрачностью в области ИК-спектра, и используются в качестве входных окон и линз в оптико-электронных устройствах. Наличие пьезоэлектрического эффекта у пленок ZnS позволило применять их в некоторых акустических устройствах. Сульфид цинка (ZnS) и сульфид цинка-кадмия  $ZnXCd_{1-X}S$  используются для изготовления квантоскопов голубого и синего цвета излучения, квантоскопов и приемников УФ-излучения.

Селенид цинка ZnSe проявляет фоторезистивные, фото- и электролюминесцентные свойства, имеет высокую прозрачность в ИК-области. Оптическую

керамику на основе ZnSe применяют для изготовления входных окон и линз в оптико-электронных устройствах. Теллурид цинка ZnTe обладает электролюминесцентными и фоторезистивными свойствами.

Наилучшие солнечные элементы на основе CdTe включают гетеропереход с CdS в качестве оконного слоя. Оксид олова используется как прозрачный контакт и просветляющее покрытие. p-i-n-структуры с гетеропереходом CdTe/ZnTe обладают высокой подвижностью носителей заряда, а солнечные элементы на их основе — высокими значениями КПД, от 10 до 16%.

Теллурид кадмия (CdTe) и теллурид цинка-кадмия (CdZnTe) используются для изготовления электрооптических модуляторов, приемников радиационного и ИК-излучения и других оптических элементов ИК-оптических систем. Селенид кадмия, сульфид и сульфоселенид кадмия используются для изготовления преобразователей длин волн лазерного излучения, квантоскопов красного, оранжевого, желтого и зеленого цвета излучения.

### **Полупроводниковые соединения A<sup>IV</sup>B<sup>VI</sup>**

Соединения этого класса кристаллизуются либо в кубической структуре типа NaCl (PbS, PbSe, PbTe, SnTe, высокотемпературная модификация GeTe), либо в орторомбической структуре, которую можно рассматривать как деформированную решетку типа NaCl (GeS, GeSe, низкотемпературная модификация GeTe, SnS, SnSe). Связи между атомами в соединениях этого типа смешанные ионно-ковалентные.

Основное применение в полупроводниковом приборостроении имеют кристаллы халькогенидов свинца PbS, PbSe, PbTe. Это узкозонные полупроводники, ширина запрещенной зоны составляет, соответственно для PbS, PbSe, PbTe — 0,39, 0,27 и 0,32 эВ. Электрофизические свойства халькогенидов свинца сильно зависят от степени отклонения от стехиометрии: при избытке атомов свинца кристаллы имеют n-тип проводимости, при избытке халькогена — p-тип проводимости. Атомы элементов I группы (Na, Cu, Ag), замещают свинец и являются акцепторами, атомы трехвалентных металлов, заменяя свинец, являются донорами, донорами в этих материалах являются атомы галогенов.

Энергетические уровни большинства примесей в халькогенидах свинца сливаются с краем соответствующей зоны, поэтому концентрация носителей заряда в них практически не зависит от температуры, вплоть до наступления собственной электропроводности.

Тонкие пленки и поликристаллические слои халькогенидов свинца обладают высокой фоточувствительностью в далекой ИК-области спектра. Благодаря хорошим фотоэлектрическим свойствам халькогениды свинца используются для изготовления фоторезисторов и применяются в качестве детекторов ИК-излучения. Тонкопленочные детекторы на основе сульфида свинца работают в спектральном интервале 0,6-3 мкм и интервале температур 77-350 К в зависимости от предъявляемых требований и особенностей их применения. В список наиболее распространенных областей применения ИК-фотоприемников на ос-

нове сульфида свинца (PbS) входят звездные, спектрографические датчики, медицинские, исследовательские инструменты, сортирующие, счетные, контролируемые приборы, регистраторы пламени, системы определения положения тепловых источников, управление ракетами, следящие системы, исследования в области летательных аппаратов, измерение мощности в лазерных системах.

При низких температурах в халькогенидах свинца возможна эффективная излучательная рекомбинация, что позволяет создавать на их основе лазеры инжекционного типа. Халькогениды свинца широко используются в инфракрасной оптоэлектронике, в основном для изготовления лазеров и светодиодов, работающих в среднем и дальнем ИК-диапазонах. Кроме этого, халькогениды свинца обладают благоприятным сочетанием свойств для изготовления термоэлектрических генераторов. Твердые растворы на основе халькогенида свинца используются для изготовления фотоприемников с высокой спектральной чувствительностью в диапазоне 8-14 мкм. Халькогениды свинца относятся к числу хорошо известных перспективных термоэлектрических материалов, работающих в области средних температур (600 - 900 К). В последние годы интерес к этим материалам возрос в связи с возможностью значительного увеличения термоэлектрической добротности в тонкопленочных структурах на основе халькогенидов свинца.

### **Тройные полупроводниковые соединения**

Химические связи в тройных полупроводниковых соединениях, так же как и в двойных, носят смешанный ковалентно-ионный или ковалентно-ионно-металлический характер. Специфика связей обусловлена наличием атомов трех сортов. Тройные полупроводниковые соединения могут быть разделены на одноанионные (двухкатионные) и двуханионные (однокатионные). Примером одноанионных соединений могут служить соединения типа  $A_2B_4CV_2$ ,  $A_2B_4CV_3$  двуханионных —  $A_2B_2CV_2$ ,  $A_2B_2CV_4$ .

Тройные полупроводниковые соединения образуются при возникновении  $sp^3$ -гибридных связей и характеризуются тетраэдрическим расположением атомов в пространстве. Кристаллизуются в структуру сфалерита, вюрцита, халькопирита, но в одной из подрешеток содержатся атомы двух сортов, размещенные либо упорядоченно, либо неупорядоченно. В случае неупорядоченного размещения атомов двух сортов в соответствующей решетке возникает структура сфалерита или вюрцита, в случае упорядоченного размещения кубическая решетка испытывает тетрагональное искажение и возникает структура халькопирита (антихалькопирита), которую можно рассматривать как удвоенную вдоль оси  $c$  в направлении ячейку сфалерита.

Однако в полупроводниковом приборостроении лишь ограниченное количество тройных полупроводниковых соединений находит применение.

<a href="#">НАЗАД</a>	<a href="#">Вопросы по разделу 4</a>	<a href="#">Обратная связь</a>	<a href="#">ДАЛЕЕ</a>
-----------------------	--------------------------------------	--------------------------------	-----------------------

## 5.1 Физические процессы в магнитных материалах

### 5.1.1 Основные свойства магнитных материалов. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает некоторый магнитный момент  $M$ . Магнитный момент единицы объема вещества называют намагниченностью  $J_m$ .

$$J_m = dM/dV, \text{ А/м.}$$

Намагниченность является векторной величиной, в изотропных телах она направлена либо параллельно, либо антипараллельно напряженности магнитного поля  $H$ .

Намагниченность связана с напряженностью магнитного поля с соотношением

$$J_m = k_m \times H,$$

где  $k_m$  - магнитная восприимчивость - безразмерная величина, характеризующая способность вещества намагничиваться в магнитном поле.

Проявление магнетизма в веществе обусловлено процессами движения электронов, которые образуют круговые токи, обладающие магнитными моментами. Магнитный момент электрона складывается из орбитального магнитного момента (вследствие движения электрона вокруг ядра) и спинового момента (вследствие вращения электрона вокруг собственной оси).

По поведению в магнитном поле все материалы делятся на диамагнетики и парамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики.

Диамагнетики характеризуются очень малой отрицательной величиной магнитной восприимчивости ( $k_m \approx -10^{-5}$ ), которая в большинстве случаев не зависит от температуры и напряженности поля. Индуцированный магнитный момент направлен против направления поля и  $m = 1 + k_m < 1$ . Диамагнетики выталкиваются из неоднородного магнитного поля. К диамагнетикам относятся инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и др.), большинство полупроводников (кремний, германий, арсенид гелия), органические соединения, неорганические стекла и др., а также все вещества в сверхпроводящем состоянии.

Парамагнетики характеризуются малой положительной величиной магнитной восприимчивости ( $k_m \approx 10^{-2} - 10^{-5}$ ), не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. В парамагнетиках атомы обладают собственным магнитным моментом даже в отсутствии внешнего магнитного поля, однако из-за теплового движения эти магнитные моменты распределены хаотично так, что намагниченность вещества в целом равна нулю. Внешнее магнитное поле вызывает преимущественную ориентацию магнитных моментов атомов в одном направлении. Тепловая энергия противодействует созданию магнитной упорядоченности. Поэтому магнитная восприимчивость сильно зависит от температуры

и для большинства твердых парамагнетиков подчиняется закону Кюри - Вейса:  $\chi_m = C/(T - q)$ , где  $C$  и  $q$  - постоянные величины для данного вещества.

Парамагнетики втягиваются в неоднородное магнитное поле. К парамагнетикам относятся: кислород, окись азота, соли железа, никеля, кобальта, щелочные металлы, алюминий, платина.

Ферромагнетики обладают большими положительными значениями  $\chi_m$  (до сотен тысяч и миллионов) и сложной нелинейной зависимостью  $\chi_m$  от температуры и внешнего поля. Характерными особенностями ферромагнетиков являются способность сильно намагничиваться при обычных температурах в слабых полях и переход в парамагнитное состояние выше определенной температуры, так называемой точкой Кюри.

Антиферромагнетики характеризуются небольшой величиной магнитной восприимчивости ( $\chi_m \gg 10^{-3} - 10^{-5}$ ) и отличаются ее особой температурной зависимостью. По мере повышения температуры, начиная от ОК,  $\chi_m$  растет, достигая максимума при температуре, называемой точкой Нееля, и далее начинает падать, подчиняясь закону Кюри - Вейса. В антиферромагнетиках атомы обладают одинаковыми магнитными моментами, которые направлены в противоположных направлениях и взаимно компенсируются. Антиферромагнетизм выражен у марганца, хрома.

Ферримагнетики характеризуются большой величиной магнитной восприимчивостью ( $\chi_m \gg 10^4 - 10^6$ ), точкой Кюри  $T_k$ , меньшей, по сравнению с ферромагнетиками величиной намагниченности насыщения. В отсутствие внешнего магнитного поля ферримагнетики имеют антипараллельное расположение магнитных моментов соседних атомов или ионов, но при этом суммарный магнитный момент не равен нулю. Ферримагнетизм наблюдается у ферритов.

### **5.1.2 Явления намагничивания и перемагничивания. Понятие о потерях**

В монокристаллах ферромагнитных веществ существуют направления легкого и трудного намагничивания. В отсутствие внешнего поля магнитные моменты доменов самопроизвольно ориентируются вдоль одной из осей легкого намагничивания. Энергия, которую необходимо затратить для намагничивания монокристаллического образца до насыщения вдоль одной из осей легкого намагничивания, значительно меньше, чем вдоль оси трудного намагничивания. При наличии внешнего поля самым энергетически выгодным направлением является ось легкого намагничивания, составляющая наименьший угол с направлением внешнего поля.

Зависимость магнитной индукции макрообъема ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля называют кривой намагничивания.

Возрастание индукции под действием внешнего поля обусловлена смещением доменных границ и поворотом магнитных моментов доменов.

В полях относительно малой напряженности (область I) намагничивание происходит в основном за счет роста доменов, имеющих векторы намагничен-

ности близкие к направлению внешнего поля и, соответственно, уменьшения доменов, обладающих наибольшим углом направления магнитного момента по отношению к внешнему полю. Начальному участку кривой соответствует обратимое (упругое) смещение доменных границ. После снятия поля доменные границы возвращаются в прежнее положение.

В области II смещение доменных границ носит необратимый, скачкообразный характер. В этом процессе участвует значительно большее число доменов, чем на начальном участке, процесс намагничивания идет более интенсивно и кривая намагничивания становится круче.

При дальнейшем усилении поля (область III) возрастает роль механизма поворота магнитных моментов доменов из направления легкого намагничивания в направлении поля, т.е. в направлении более трудного намагничивания.

После окончания процесса поворота наступает техническое насыщение намагниченности (область IV). Величина индукции достигает значения насыщения  $B_s$ . Незначительное возрастание индукции обусловлено слагаемым  $m_0H$  и увеличением намагниченности самого домена.

При уменьшении напряженности магнитного поля вектор намагниченности будет поворачиваться в направлении оси легкого намагничивания.

Когда поле станет равным нулю индукция будет иметь некоторое значение  $B_r$ , называемое остаточной индукцией. При приложении поля противоположного знака возникают домены, у которых направление векторов намагниченности близко к направлению поля. Эти домены растут и при некотором значении поля индукция обращается в нуль.

Напряженность размагничивающего поля -  $H_c$ , при которой индукция в ферромагнетике, предварительно намагниченного до насыщения, обращается в нуль, называют коэрцитивной силой.

Увеличение напряженности поля до значений, больших  $-H_c$ , вызывает перемагничивание ферромагнетика вплоть до насыщения ( $-B_s$ ). Изменение магнитного состояния ферромагнетиков при его циклическом перемагничивании характеризуется явлением гистерезиса. Петлю гистерезиса, полученную при индукции насыщения, называют предельной. Величины  $B_r$  и  $H_c$  являются параметрами предельной петли гистерезиса. Совокупность вершин петель гистерезиса образуют основную кривую намагничивания ферромагнетиков.

Крутизна кривой намагниченности (т.е. легкость, с которой намагничивается материал) характеризуется магнитной проницаемостью.

Для ферромагнетиков характерно явление магнитострикции - изменение линейных размеров при намагничивании. Магнитострикция оценивается величиной относительной деформации в направлении магнитного поля:  $l = \Delta l/l$ . Величина и знак коэффициента магнитострикции зависит от типа структуры, кристаллографического направления, напряженности магнитного поля и температуры. Магнитострикция сопровождается появлением внутренних напряжений, деформацией кристаллической решетки, что препятствует смещению доменных границ и затрудняет процесс намагничивания ферромагнетиков в слабых полях. Поэтому высокой магнитной проницаемостью обладают магнитные материалы с малыми коэффициентами анизотропии и магнитострикции.

Вихревые токи возникают в проводящей среде за счет э.д.с. самоиндукции. Динамическая петля гистерезиса шире статистической поскольку к потерям на гистерезис добавляются потери на вихревые токи, которые увеличиваются пропорционально частоте.

Для уменьшения потерь на вихревые токи необходимо использовать магнитный материал с повышенным удельным сопротивлением, либо собирать сердечник из тонких листов, изолированных друг от друга.

Вихревые токи оказывают размагничивающее действие на сердечник - уменьшается индукция и эффективная магнитная проницаемость. Переменный магнитный поток неравномерно распределен по сечению магнитопровода.

Явление затухания электромагнитной волны при ее распространении в проводящей среде используется при создании электромагнитных экранов. Для эффективной защиты толщина стенок экрана должна превышать глубину проникновения  $D$  электрического поля в вещество.

Потери на магнитное последствие обусловлены отставанием магнитной индукции от изменения напряженности магнитного поля. Время установления стабильного магнитного состояния от долей миллисекунды до нескольких минут и существенно возрастает с понижением температуры. Физическая природа потерь на магнитное последствие во многом аналогична релаксационной поляризации диэлектриков.

<a href="#">НАЗАД</a>	<a href="#">Обратная связь</a>	<a href="#">ДАЛЕЕ</a>
-----------------------	--------------------------------	-----------------------

## 5.2 Магнитомягкие и магнитотвердые материалы

### 5.2.1 Классификация магнитомягких материалов. Требования, свойства, применение

**Магнитомягкие материалы** (МММ) должны иметь высокую магнитную проницаемость, малую коэрцитивную силу, большую индукцию насыщения, узкую петлю гистерезиса, малые магнитные потери. Их можно разделить на следующие группы:

**а) Технически чистое железо** (низкоуглеродистая сталь) представляет собой магнитомягкий материал, свойства которого сильно зависят от содержания примесей.

Магнитные свойства железа сильно зависят от его чистоты и способа обработки.

В зависимости от способа получения чистого железа различают:

1) **Электролитическое** железо, получаемое в процессе электролиза сернокислого или хлористого железа, применяется в постоянных полях;

2) **Карбонильное** железо, получаемое термическим разложением пентакарбонила железа  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ . Его получают в виде порошка и используют для изготовления сердечников, работающих на повышенных частотах.

**б) Кремнистая электротехническая сталь** содержит менее 0,05% углерода, от 0,7 до 4,8% кремния и относится к магнитомягким материалам широкого применения. Легирование стали кремнием приводит к существенному повышению удельного электрического сопротивления, которое растет линейно от 0,1 мкОм·м при нулевом содержании кремния до 0,60 мкОм·м при содержании кремния 5,0%, к увеличению начальной  $\mu_{rn}$  и максимальной магнитной проницаемости  $\mu_{max}$ ,

Сталь маркируется четырьмя цифрами:

**первая** означает структурное состояние и вид прокатки (1 - горячекатаная изотропная, 2 - холоднокатаная изотропная, 3 - холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой);

**вторая** - примерное содержание кремния в %;

**третья** – удельные потери при перемагничивании, чем больше цифра, тем больше потери.

Вместе первые три цифры обозначают тип стали, **четвертая** – порядковый номер стали. Например. 1212; 12.13; 1411; 1512; 2011; 2212; 3411; 3405 и др.

Электротехническая сталь выпускается в виде отдельных листов, рулонов или ленты и предназначена для изготовления магнитопроводов. Для уменьшения потерь на вихревые токи на листы стали может быть нанесен электроизоляционный лак.

**в) Пермаллои** относятся к магнитомягким материалам, обладающим высо-

кой магнитной проницаемостью в слабых полях, и представляют собой железоникелевые сплавы. Такие сплавы характеризуются тем, что значения магнитной анизотропии и магнитострикции равны нулю; это является одной из причин особенно легкого намагничивания пермаллоев. Пермаллои подразделяются на **высоконикелевые** (72... 80 % никеля) и **низконикелевые** (40... 50% никеля).

*Из железоникелевых сплавов с высокой магнитной проницаемостью* можно выделить следующие группы:

**нелегированные низконикелевые пермаллои** - марок 45Н и 50Н (содержание никеля 45 и 50%); обладают наиболее высокой индукцией насыщения, поэтому их применяют для сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей и деталей магнитных цепей, которые работают при повышенных индукциях без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием.

**низконикелевые пермаллои** (50% Ni), легированные хромом и кремнием - 50НХС - обладает повышенным сопротивлением и используется для сердечников импульсных трансформаторов, а также в устройствах связи для звуковых и высоких частот.

**высоконикелевые пермаллои, легированные** соответственно молибденом, хромом и кремнием, хромом и медью - 79НМ, 80НХС, 76НХД применяются для сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов, при толщине 0,02 мм - для сердечников импульсных трансформаторов, магнитных усилителей;

**сплавы, обладающие текстурой и прямоугольной петлей гистерезиса** - 50НП, 65НП, 34НКП.

Все сплавы содержат в небольших количествах марганец и кремний. В марках пермаллоев буква **Н** означает никель, **М** - марганец, **Х** - хром, **Д** - медь, **К** - кобальт, **С** - кремний, **П** - прямоугольную петлю гистерезиса. Сплавы с улучшенными свойствами обозначают дополнительно буквой **У**.

Сплавы изготавливаются в виде холоднокатаных лент толщиной 0,02...2,5 мм, шириной 30...250 мм, горячекатаных листов, горячекатаных и кованых прутков.

**г) Ферриты** – неметаллические материалы, состоят из оксидов железа и оксидов двухвалентных металлов.

Их получают методом керамической технологии. Изделия из ферритов формируются прессованием в стальных пресс-формах, выдавливанием через мундштук, горячим литьем под давлением, горячим прессованием.

Магнитомягкие ферриты используют для изготовления сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, магнитных антенн, статоров и роторов высокочастотных электрических моторов небольшой мощности, деталей отклоняющих систем телевизионной аппаратуры.

## 5.2.2 Характеристики магнитотвердых материалов

К магнитотвердым материалам относятся магнитные материалы с широкой петлей гистерезиса и большой коэрцитивной силой  $H_c$ . Чем «тверже» магнитный материал, т.е. чем выше его коэрцитивная сила  $H_c$ , тем меньше его магнитная проницаемость  $\mu$ . Основными характеристиками магнитотвердых материалов являются коэрцитивная сила  $H_c$ , остаточная индукция  $B_r$ , максимальная удельная магнитная энергия, отдаваемая во внешнее пространство  $\frac{W_{max}}{2}$ , Дж/м<sup>2</sup>.

Постоянный магнит при замкнутом магнитопроводе практически не отдает энергию во внешнее пространство, так как почти все магнитные силовые линии замыкаются внутри сердечника, и магнитное поле вне сердечника отсутствует. Для использования магнитной энергии постоянных магнитов в замкнутом магнитопроводе создают воздушный зазор определенных размеров и конфигурации, магнитное поле в котором используют для технических целей. Магнитный поток постоянного магнита с течением времени уменьшается. Это явление называется *старением* магнита. Оно может быть обратимым и необратимым. В случае обратимого старения при воздействии на постоянный магнит ударов, толчков, резких колебаний температуры, внешних постоянных полей происходит снижение его остаточной магнитной индукции  $B_r$  на 1...3%; при повторном намагничивании свойства таких магнитов восстанавливаются. Если со временем в постоянном магните произошли структурные изменения, то повторное намагничивание не устраняет необратимого старения.

**По назначению** магнитотвердые материалы подразделяют на материалы для *постоянных магнитов* и материалы *для записи и хранения информации* (звуковой, цифровой, видеоинформации и др.)

**По составу и способу получения** магнитотвердые материалы подразделяют на:

а) **литые высококоэрцитивные сплавы**. Эти материалы имеют основой сплавы железо-никель-алюминий (Fe-Ni-Al) и железо-никель-кобальт (Fe-Ni-Co) и могут быть легированы медью, титаном, кремнием, ниобием. Они являются основными материалами для изготовления постоянных магнитов. Эти сплавы относят к прецизионным, так как их качество в решающей степени определяется строгим соблюдением технологических факторов. Их получают в результате *дисперсионного твердения* сплава при его охлаждении с определенной скоростью от температуры плавления до температуры начала распада на фазы, одна из которых близка к чистому железу и является сильномагнитной, а вторая – слабомагнитной.

Для улучшения магнитных свойств сплавы подвергают кристаллической текстуре, которая создается при направленной кристаллизации сплава (особые условия охлаждения сплава). В результате возникает микроструктура в виде

ориентированных столбчатых кристаллов. При этом наблюдается увеличение всех магнитных параметров. Магнитная энергия  $W_{max}$  повышается на 60...70% по сравнению с обычной кристаллизацией.

Марки сплавов обозначаются буквами: Б - ниобий, Д - медь, К - кобальт, Н - никель, Т - титан, Ю - алюминий, А - столбчатая структура. Цифры указывают процентное содержание элемента.

Изделия из этих сплавов получают в основном методом литья. Недостатками сплавов являются особая хрупкость и высокая твердость, поэтому обработка их на металлорежущих станках затруднена. Механической обработке в виде грубой обдирки резанием с применением твердосплавных резцов поддаются сплавы, не содержащие кобальта.

**Бескобальтовые** сплавы являются дешевыми и не содержат дефицитных металлов, но свойства их не очень высоки. **Текстурованные сплавы, содержащие кобальт**, имеют высокие магнитные характеристики, но в несколько раз дороже, чем бескобальтовые; их применяют для изготовления малогабаритных магнитных изделий, требующих высоких магнитных свойств и магнитной анизотропии.

**б) порошковые магнитотвердые материалы** применяют для изготовления миниатюрных постоянных магнитов сложной формы. К ним относят:

**1) Металлокерамические магниты** изготавливают из измельченных тонкодисперсных порошков сплавов ЮНДК, а также сплавов Cu-Ni-Co, Cu-Ni-Fe с применением прессования и дальнейшего спекания при высоких температурах.

Так как металлокерамические магниты содержат воздушные поры, то их магнитные свойства уступают литым материалам, но механические свойства их выше. Как правило, пористость уменьшает остаточную индукцию  $B_r$  и магнитную энергию  $W_{max}$  на 10...20% и не влияет на коэрцитивную силу  $H_c$ .

**2) Металлопластические магниты** изготавливать проще, чем металлокерамические, их получают из порошка сплавов ЮНД или ЮНДК, смешанного с порошком диэлектрика (например, фенолформальдегидной смолой). Процесс изготовления магнитов подобен процессу прессования пластмасс и заключается в прессовании смеси под давлением 500 МПа, нагревании заготовок до температуры 120...180°C для полимеризации диэлектрика.

Механические свойства металлопластических магнитов лучше, чем литых, но магнитные свойства хуже, так как они содержат до 30% объема неферромагнитного связующего диэлектрического материала;  $B_r$  меньше на 35...50%,  $W_{max}$  - на 40...60%.

**в) магнитотвердые ферриты.** Из них наибольшее распространение получили магнитотвердые материалы на основе бариевого и кобальтового феррита.

**Бариевые магниты** не содержат дефицитных материалов и примерно в 10 раз дешевле магнитов из ЮНДК, они обладают высокой стабильностью при воз-

действии магнитных полей, вибрации и ударном воздействии, поэтому их можно использовать в магнитных цепях, работающих в высокочастотных полях. К недостаткам бариевых магнитов относятся низкая остаточная индукция, высокая хрупкость и твердость, а также значительная зависимость магнитных свойств от температуры.

**Кобальтовые ферриты** более температуростабильны.

г) **сплавы на основе редкоземельных элементов** - интерметаллические соединения кобальта с редкоземельными металлами (РЗМ): церием Ce, самарием Sm, празеодимом Pr, лантаном La и иттрием Y. Они обладают очень высокими значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии.

Технология получения магнитов из РЗМ заключается в спекании порошков в присутствии жидкой фазы или литья. Жидкая фаза создается благодаря тому, что РЗМ берется в избытке.

Перспективы использования таких сплавов велики. Основные недостатки сплавов - плохие механические свойства (высокая хрупкость), использование дефицитных материалов и высокая стоимость.

д) **прочие магнитотвердые материалы** к этой группе относят материалы, которые имеют узкоспециальное применение:

1) **Пластически деформируемые сплавы**, обладают хорошими пластическими свойствами; хорошо поддаются всем видам механической обработки (хорошо штампуются, режутся ножницами, обрабатываются на всех металлорежущих станках); имеют высокую стоимость. Различают сплавы:

**Кунифе** – медь-никель-железо (Cu-Ni-Fe) обладают анизотропностью (намагничиваются в направлении прокатки). Применяются в виде проволоки с малым диаметром и штамповок.

**Викаллоу** – кобальт-ванадий (Co-V) получают в виде высокопрочной магнитной ленты и проволоки. Из него изготавливают очень мелкие магниты сложной конфигурации.

2) **Эластичные магниты**, представляют собой магниты на резиновой основе с наполнителем из мелкого порошка магнитотвердого материала (феррита бария). Они позволяют получать изделия любой формы, которую допускает технология изготовления деталей из резины; имеют высокую технологичность (легко режутся ножницами, штампуются, сгибаются, скручиваются) и невысокую стоимость; их применяют в качестве листов магнитной памяти для ЭВМ, для отклоняющих систем в телевидении, корректирующих систем.

3) **Магнитные носители информации** при перемещении создают в устройстве считывания информации переменное магнитное поле, которое изменяется во времени так же, как записываемый сигнал. Материалы для магнитных носителей информации представляют собой металлические ленты и проволоку из магнитотвердых материалов, сплошные металлические, биметалличе-

ские или пластмассовые ленты и магнитные порошки, которые наносятся на ленты, металлические диски и барабаны, магнитную резину. Несмотря на то, что ленты на пластмассовой основе обеспечивают меньший сигнал по сравнению с лентами на металлической основе, они находят наиболее широкое распространение. В качестве основы для таких лент используют ацетилцеллюлозную или лавсановую ленту толщиной 20...50 мкм, которую изготавливают гибкой и гладкой, так как шероховатость может быть причиной шумов при записи и воспроизведении сигнала.

**4) Жидкие магниты** представляют собой жидкость, наполненную мельчайшими частицами магнитотвердого материала. Жидкие магниты на кремнийорганической основе не расслаиваются под действием даже сильных магнитных полей, сохраняют работоспособность в диапазоне температур от -70 до + 150°С.

[НАЗАД](#)

[Обратная связь](#)

[ДАЛЕЕ](#)

### 5.3 Магнитные материалы специального назначения

#### Характеристики, состав и применение магнитных материалов специального назначения

К материалам специального назначения, как правило, относят магнитомягкие материалы, которые разработаны для частного применения в устройствах, когда требуется использование одного или двух параметров с максимальными значениями. К ним относят:

##### а) **Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ).**

Степень прямоугольности петли гистерезиса оценивается *коэффициентом прямоугольности*

$$a = \frac{B_r}{B_{\max}},$$

где  $B_r$  - остаточная магнитная индукция, соответствующая максимальному значению магнитной индукции  $B_{\max}$ . Для петли гистерезиса с идеальной прямоугольностью  $a = 1,0$ ; для применяемых материалов  $a = 0,85 \dots 0,98$ .

Магнитный сердечник с идеальной петлей гистерезиса имеет два устойчивых магнитных состояния, соответствующих положительному  $+ B_r$  и отрицательному  $- B_r$  значениям остаточной магнитной индукции, и представляют собой магнитный элемент для хранения и переработки двоичной информации. Условно принимают состояние намагниченности материала  $+ B_r$  за 1, а состояние  $- B_r$  за 0.

Важной характеристикой материалов с ППГ является зависимость их свойств от температуры. При повышении температуры площадь петли гистерезиса и ее прямоугольность у таких материалов уменьшается, т.е. происходит уменьшение коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточной индукции  $B_r$  и коэффициента прямоугольности  $a$ . При охлаждении происходит обратный процесс. Степень уменьшения этих параметров оценивается температурным коэффициентом остаточной индукции  $TKB_r$  и коэрцитивной силы  $TKH_c$ .

Для характеристики скорости перемагничивания материала используют *коэффициент переключения  $Kg$* , который характеризует минимальную амплитуду импульса магнитного поля, необходимую для полного переключения сердечника, т. е. для его перемагничивания из состояния остаточной индукции в противоположное состояние максимальной индукции.

**Ферриты с ППГ** производят по прецизионной технологии методом оксидов или методом совместного осаждения гидроокисей. Особенностью технологического процесса является высокая температура окончательного отжига (примерно  $1400^\circ\text{C}$ ) и «воздушная закалка», состоящая в резком охлаждении на воздухе от максимальной температуры. Такая закалка фиксирует требуемый фазовый состав феррита, полученный при максимальной температуре.

**Ферриты с ППГ** разделяют на:

- 1) **Ферриты со спонтанной петлей гистерезиса** получают благодаря

составу феррита и условиям отжига, при которых появление спонтанной прямоугольности петли гистерезиса обусловлено преобладанием процесса необратимого смещения доменных стенок.

2) **Ферриты с индуцированной петлей гистерезиса** получают после термомагнитной обработки.

**По химическому составу** различают ферриты с ППГ:

1) **Литиевые** - приобретают необходимые свойства при введении в состав феррита натрия, магния, марганца и др. Они обладают хорошей термостабильностью электромагнитных параметров.

Процесс их получения протекает со строгим соблюдением состава и при определенной концентрации кислорода при спекании.

2) **Марганец-магниевые** благодаря большому разнообразию свойств получили наибольшее распространение. Они обладают простотой в изготовлении, повышенной индукцией  $B$ ; по термостабильности уступают литиевым.

3) **Магнитомягкие** состоят из железоникелевых и железоникелькобальтовых сплавов, легированных молибденом, медью или другими металлами. Выпускают в виде лент проката толщиной 20...500 мкм, лент микронного проката толщиной 3 мкм, сердечников с частотой перемагничивания примерно десятки килогерц и сердечников микронного проката с минимальным коэффициентом переключения  $K_g$ .

**б) Ферриты для сверхвысоких частот (СВЧ-ферриты).** Диапазон сверхвысоких частот соответствует частотам от сотен до десятков тысяч мегагерц, т.е. длинам волн от одного метра до нескольких миллиметров.

Для их изготовления используют метод оксидов, с помощью которого получают пластины, стержни, диски. Процесс сопровождается тщательным контролем параметров исходного сырья и технологических операций.

Ферриты, применяемые в диапазоне СВЧ, представляют собой среду, прозрачную для электромагнитных волн; имеют низкие значения тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}$ ; высокие значения намагниченности насыщения  $M_s$ , позволяющие уменьшить объем ферритовых СВЧ-элементов; высокие плотность и однородность структуры СВЧ-ферритов за счет применения монокристаллического материала; высокое удельное электрическое сопротивление ( $10^6 \dots 10^9$  Ом м); высокую температурную стабильность в рабочем интервале температур. Различают:

1) **Никелевые** СВЧ-ферриты - для изготовления изделий, которые работают в миллиметровом диапазоне длин волн и в коротковолновой части сантиметрового диапазона. Они обладают высокими значениями намагниченности насыщения  $M_s$ , высокой термостабильностью.

2) **Магниевые** СВЧ-ферриты применяют для изготовления изделий, работающих в средней части сантиметрового диапазона. Они имеют значения

намагниченности насыщения меньше, чем у никелевых СВЧ-ферритов.

3) **Магниевые ферроалюминаты, магниевые и никелевые феррохромиты** применяют для изготовления ферромагнитных изделий, работающих в длинноволновой части СВЧ-диапазона. Имеют малые значения намагниченности насыщения, малые магнитные потери, что позволяет применять их в ферритных приборах, работающих в малых подмагничивающих полях; низкие значения температуры Кюри, что ограничивает область их применения.

4) **Иттриевые ферриты-гранаты** применяют для изготовления различных СВЧ-устройств, работающих в низкочастотной части СВЧ диапазона. Они обладают малыми значениями магнитных потерь, относительно высокой намагниченностью, высокой термостабильностью.

**в) Термомагнитные материалы** характеризуются сильной зависимостью намагниченности  $M$  от температуры в полях, близких к полю насыщения материала. Термомагнитные материалы функционируют обычно в режиме насыщения в интервале рабочих температур от  $-60$  до  $+80...100$  °С. Они имеют низкие значения температуры Кюри, близкие к рабочему интервалу температур, так как наибольшая зависимость магнитной индукции от температуры наблюдается в области, близкой к точке Кюри; малые поля, необходимые для насыщения; высокую воспроизводимость характеристик.

К термомагнитным сплавам относят:

1) **компенсаторы** (термомагнитные сплавы системы железо-никель-хром) наиболее широко применяются, т.к. имеют большие значения намагниченности насыщения; полную обратимость магнитных свойств в диапазоне температур от  $-65$  до  $+180$  °С; высокую линейность магнитных характеристик, хорошую механическую обрабатываемость.

2) **кальмаллои** (сплавы системы никель-медь) обладают сравнительно малой магнитной индукцией, поэтому магнитные стержни из этих материалов имеют большие сечения.

3) **термаллои** (сплавы системы никель-железо) имеют необратимое изменение свойств под действием отрицательных температур; плохую воспроизводимость характеристик.

4) **многослойные термомагнитные материалы** получают совместной прокаткой листов или полос из термомагнитных сплавов с различными свойствами. Требуемые характеристики многослойных материалов получают в результате подбора исходных полос с необходимыми свойствами и в зависимости от их толщины. Они имеют слабую зависимость намагниченности насыщения, от напряженности магнитного поля  $H$ , малые параметры полей насыщения, возможность заранее рассчитать требуемые свойства материалов, разнообразие получаемых характеристик, однотипность технологии изготовления.

**Термомагнитные материалы** используют в качестве магнитных шунтов

и добавочных резисторов для компенсации температурной погрешности или обеспечения изменения магнитной индукции в воздушном зазоре по заданному закону; в индукционных печах для поддержки заданной температуры или в реле, момент срабатывания которых зависит от температуры.

г) **Магнестрикционные материалы** характеризуются остаточной индукцией  $B_c$ , коэрцитивной силой  $H_c$ , **магнестрикционной деформацией насыщения - коэффициентом магнестрикции насыщения**

$$\lambda_s = \frac{\Delta l}{l},$$

где  $l$  - длина пластины до воздействия поля;  $\Delta l$  - изменение длины пластины под действием поля.

В качестве магнестрикционных материалов применяют:

1) **никель** применяют в виде пластин, вырубленных из жесткой неотожженной ленты толщиной 0,1 мм и оксидированных при нагревании на воздухе до температуры 800°C в течение 15...25 мин. Из пластин набирают пакеты, которые устойчивы к коррозии в атмосфере и морской воде.

Никель обладает высокими антикоррозионными свойствами, малым температурным коэффициентом модуля упругости, большим абсолютным значением коэффициента магнестрикции насыщения.

2) **пермендюры** (сплавы системы кобальт-железо) относятся к сплавам с высокой индукцией насыщения. Наивысшей индукцией насыщения обладает железо, но для уменьшения массы изделий используют сплавы железа с кобальтом и ванадием.

Наиболее известен железоникелевый сплав, легированный ванадием, введение которого улучшает обрабатываемость сплава в холодном состоянии.

Недостатки: малое удельное электрическое сопротивление; высокая стоимость; дефицитность кобальта и ванадия; неустойчивость к коррозии; плохая механическая обрабатываемость.

Пермендюры применяют для изготовления телефонных мембран и изделий, работающих в постоянных или слабых переменных магнитных полях с сильным подмагничиванием постоянным полем.

3) **Никель-кобальтовые ферриты** обладают лучшими высокочастотными свойствами по сравнению с другими магнестрикционными материалами, конструктивно-технологическими преимуществами, но низкой прочностью и теплопроводностью.

С учетом низкой прочности и теплопроводности магнестрикционные ферриты применяют в прецизионных преобразователях электромеханических и магнестрикционных фильтров, акустических приемниках и излучателях малой и средней мощности.

д) **Аморфные магнитные материалы (АММ)**. Особенностью АММ явля-

ется отсутствие в них дальнего порядка в расположении атомов. Однако, несмотря на отсутствие периодичности в расположении атомов, АММ обладают упорядоченным расположением магнитных моментов. АММ во многом подобны стеклам и металлическим расплавам. Такие материалы получают быстрым охлаждением из расплавленного состояния, кристаллизация при этом не успевает осуществиться.

Аморфные магнитные материалы используются в технике магнитной записи и воспроизведения, различных типах специальных трансформаторов, импульсных источниках питания и преобразователях постоянного напряжения на частотах до нескольких мегагерц, магнитных усилителях, магниторезистивных головках с высокой плотностью записи, электродвигателях с высоким КПД, в качестве конструкционных материалов.

**е) Магнитодиэлектрики.** Эти материалы состоят из конгломерата мелкодисперсных частиц ферро- или ферромагнитного материала, изолированных между собой органическим или неорганическим диэлектриком - связующим элементом. Благодаря тому, что частицы магнитной фазы изолированы, магнитодиэлектрики обладают высоким удельным сопротивлением и малыми потерями на вихревой ток, но имеют пониженное значение магнитной проницаемости. Магнитодиэлектрики характеризуются незначительными потерями на гистерезис и высокой стабильностью проницаемости.

Магнитодиэлектрики предназначаются для работы в слабых магнитных полях, близких по значению к коэрцитивной силе, и используются в высокочастотной проводной связи, радиоэлектронике и других областях.

<a href="#"><u>НАЗАД</u></a>	<a href="#"><u>Вопросы по разделу 5</u></a>	<a href="#"><u>Итоговый тест</u></a>	<a href="#"><u>Обратная связь</u></a>
------------------------------	---	--------------------------------------	---------------------------------------

# ПРАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

## Лабораторная работа №1

### Определение твердости металлов

#### 1 Цель работы:

- изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы;
- провести испытания материалов на твердость по Бринеллю и Роквеллу;
- рассчитать твердость по Бринеллю и сравнить с табличными значениями.

#### 2 Оборудование и материалы:

- твердомеры Бринелля и Роквелла, лупа Бринелля;
- образцы для испытаний.

#### 3 Правила поведения и меры безопасности:

- 1) Перед тем, как приступить к выполнению работы, тщательно изучите ее описание.
- 2) Не приступайте к выполнению работы без разрешения преподавателя.
- 3) Не оставляйте рабочее место без разрешения преподавателя.
- 4) Размещайте приборы и образцы на своем рабочем месте таким образом, чтобы исключить их падение или опрокидывание.
- 5) Не держите на рабочем месте предметы, не требующиеся при выполнении работы.
- 6) Не включайте источники электропитания без разрешения преподавателя.
- 7) При проведении опытов будьте внимательны и дисциплинированы, точно выполняйте указания преподавателя.

#### 4 Теоретическая часть

Твердостью называется способность металла сопротивляться внедрению в него более твердого материала.

Способ Бринелля основан на вдавливании в плоскую поверхность образца

под постоянной нагрузкой стального закаленного шарика диаметром 10; 5 или 2,5 мм. Испытания проводят на твердомерах типа ТШ-2.

Числом твердости по Бринеллю называется отношение нагрузки  $F$ , передаваемой через шарик на образец к площади поверхности сферического отпечатка  $A$ .

$$HB = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где  $F$  – нагрузка на шарик, Н;

$A$  – поверхность отпечатка, мм<sup>2</sup>;

$D$  – диаметр вдавливаемого шарика, мм ( $D=2,5$  мм,  $D=5$  мм,  $D=10$  мм);

$d$  – диаметр отпечатка, мм.

Нагрузку выбирают в зависимости материала испытываемого образца

$$F = kD^2, \text{ Н}, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная для данного материала ( $k_{\text{стали и чугуна}}=300$ ).

В расчетах принимаем  $D=10$  мм,  $k=300$ .

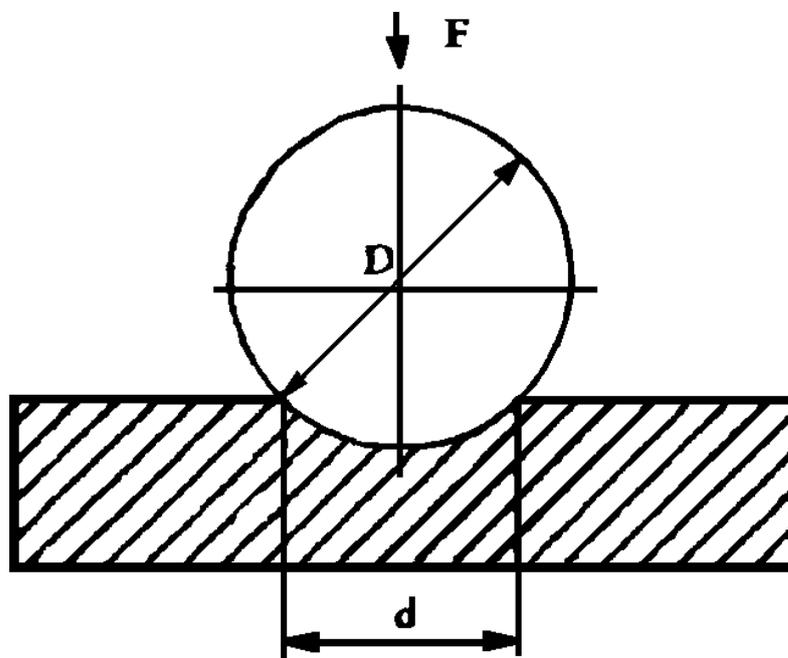
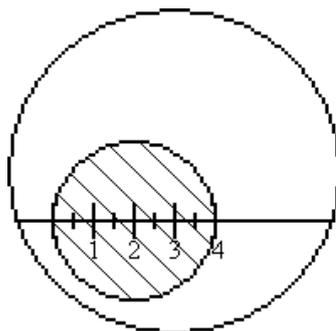


Рисунок 1- Схема испытаний



**Рисунок 2 - Отчет по шкале лупы**

**Таблица 1 - Протокол испытания на твердость по Бринеллю**

№ п/п	Диаметр отпечатка, мм				Твердость НВ
	$d_1$	$d_2$	Среднее значение	Общее значение	
1					
2					
3					

Определение твердости методом Роквелла основано на вдавливании в плоскую поверхность образца алмазного конуса с углом при вершине  $120^\circ$  (при испытаниях твердых материалов) или стального шарика диаметром 1,588 мм (при испытаниях мягких материалов).

Испытания проводятся на твердомерах марки ТК-2. Толщина образца должна быть не менее 1,5 мм. Значение твердости определяется по глубине отпечатка и отсчитывается по шкале прибора.

Прибор Роквелла в зависимости от прилагаемой нагрузки 600, 1000 или 1500Н имеет соответственно шкалы А, В, С. Шкала А применяется для испытаний твердых материалов (сталей после ХТО, твердых сплавов), шкала В - мягких материалов (отожженной стали, чугуна), шкала С – материалов средней твердости (закаленной стали). Твердость соответственно обозначается НРА, НRB, НRC.

Выбор наконечника и нагрузки при испытании на твердость по Роквеллу

$$F = F_0 + F_1 \quad F_0 = 100 \text{ Н}$$

$$F_1 = 900 \text{ Н} \quad F = 1000 \text{ Н}$$

При вдавливании алмазного конуса (шкала С)

$$F_1 = 1400 H \quad F = 1500 H$$

При вдавливании алмазного конуса (шкала А)

$$F_1 = 500 H \quad F = 600 H$$

Твердость по Роквеллу выражается в условных единицах HRA, HRB, HRC.

$$\text{Единица твердости: } e = \frac{(h-h_0)}{0,002}.$$

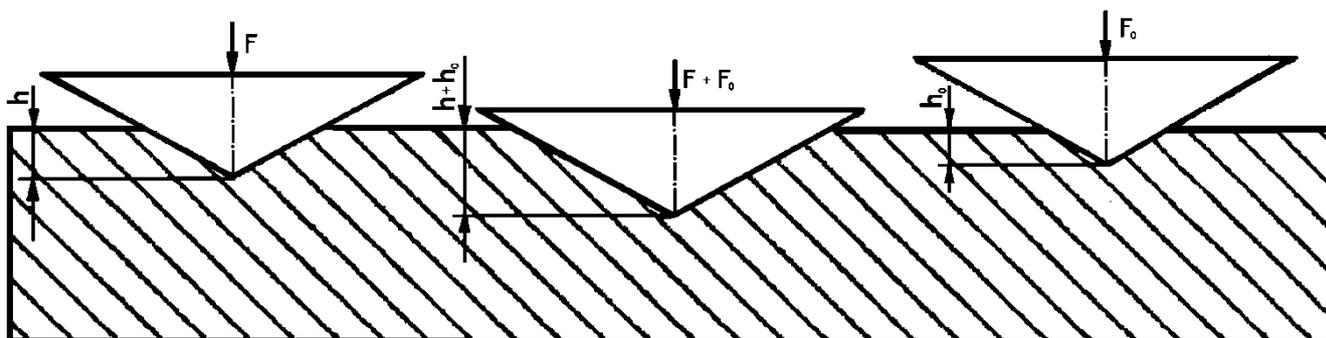


Рисунок 3 - Схема испытания:

Таблица 2 - Протокол испытания на твердость по Роквеллу

Образец	Шкала	Твердость HR					Среднее значение	Твердость по Бринеллю (приложение А)
		1	2	3	4	5		
Отожженная Сталь	B							
Закаленная Сталь	C							
Латунь	B							

## 5 Порядок выполнения работы

5.1 Изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы.

5.2 Ознакомиться с принципом действия рычажного пресса для определения твердости по Бринеллю.

5.3 Произвести испытание на твердость по Бринеллю образца стали и определить твердость.

5.4 Ознакомиться с устройством прибора Роквелла.

5.5 Провести испытание на твердость по Роквеллу стали в отожженном состоянии, стали в закаленном состоянии, и чугуна.

5.6 Составить отчет по работе.

## **6 Содержание отчета**

6.1 Название и цель работы.

6.2 Оборудование и материалы.

6.3. Правила поведения и меры безопасности при выполнении работы.

6.4. Оформленное задание.

6.5. Выводы по работе.

## **7 Контрольные вопросы**

7.1 Дать определение твердости материала.

7.2 Описать способ определения твердости по Бринеллю.

7.3 Охарактеризовать способ определения твердости по Роквеллу.

7.4 Дать определение числа твердости по Бринеллю

7.5 Указать причины, по которым методом Бринелля нельзя определить твердость очень твердых материалов.

7.6 Назвать преимущество метода Роквелла перед методом Бринелля.

7.7 Назвать преимущество метода Бринелля перед методом Роквелла.

**Приложение А**  
(справочное)

**Таблица 1 - Соотношение чисел твердости по Бринеллю и Роквеллу**

Твердость по Бринеллю		Твердость по Роквеллу			Твердость по Бринеллю		Твердость по Роквеллу		
Диаметр отпечатка, мм	НВ	HRC	HRB	HRA	Диаметр отпечатка, мм	НВ	HRC	HRB	HRA
2,20	7800	72	--	84	4,00	2290	20	100	61
2,30	7120	68	--	82	4,10	2117	17	98	60
2,40	6530	64	--	80	4,20	2070	14	95	59
2,50	6010	60	--	78	4,30	1970	12	93	58
2,60	5550	56	--	77	4,40	1870	9	91	57
2,70	5140	52	--	75	4,50	1790	7	90	56
2,80	4770	49	--	74	4,60	1700	4	88	55
2,90	4440	46	--	73	4,70	1630	2	86	53
3,00	4150	43	--	72	4,80	1560	0	84	52
3,10	3880	41	--	71	4,90	1490	--	82	--
3,20	3630	39	--	70	5,00	1430	--	80	--
3,30	3410	36	--	68	5,10	1370	--	78	--
3,40	3210	33	--	67	5,20	1310	--	76	--
3,50	3020	31	--	66	5,30	1260	--	74	--
3,60	2850	29	--	65	5,40	1210	--	72	--
3,70	2690	27	--	64	5,50	1160	--	70	--
3,80	2550	25	--	63	5,60	1110	--	67	--
3,90	2410	23	102	62	5,70	1070	--	65	--

## Лабораторная работа №2

### Анализ структуры и маркировки проводниковых материалов

#### 1 Цель работы:

- изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы;
- провести микроанализ цветных металлов и сплавов;
- сравнить микроструктуры и маркировку проводниковых материалов;
- расшифровать марки проводниковых материалов.

#### 2 Оборудование и материалы:

- металлографический микроскоп,
- набор микрошлифов цветных металлов и сплавов.

#### 3 Правила поведения и меры безопасности:

- 1) Перед тем, как приступить к выполнению работы, тщательно изучите ее описание.
- 2) Не приступайте к выполнению работы без разрешения преподавателя.
- 3) Не оставляйте рабочее место без разрешения преподавателя.
- 4) Размещайте приборы и образцы на своем рабочем месте таким образом, чтобы исключить их падение или опрокидывание.
- 5) Не держите на рабочем месте предметы, не требующиеся при выполнении работы.
- 6) Не включайте источники электропитания без разрешения преподавателя.
- 7) При проведении опытов будьте внимательны и дисциплинированы, точно выполняйте указания преподавателя.

#### 4 Теоретическая часть

ГОСТ 859-2001 распространяется на медь, изготавливаемую в виде:

1) *катодов* следующих марок: М00к, М0к, М1к, М2к.

*Маркировка:* к - катодная медь, цифры отражают содержание меди:

00 (99,99%), 0 (99,97%), 1 (99,95%) и 2 (99,93%)

2) *литых и деформированных полуфабрикатов* следующих марок: М00б, М0б, М1б, М1р, М1ф, М2р, М3р, М1, М2, М3 и др.

**Маркировка:** б - бескислородная, р и ф - раскисленная, цифры (0 до 3) – условный порядковый номер, чем больше цифра, тем больше примесей в меди.

**Примеры:** *Медь марки М00б* – медь бескислородная с порядковым номером 00.

*Медь марки М00к* – медь катодная со средней массовой долей меди 99,99%, остальное примеси.

**ГОСТ 15527 – 2004** распространяется на деформируемые латуни:

**а) Простые (двойные) латуни**

Двойные латуни Л96, Л90, Л85 (84-97% меди) называют *томпаками*. Латунь Л80 называют *полутомпаком*. Широко применяются в технике более дешёвые латуни Л70, Л68, Л63, Л60.

**Маркировка:** Л – латунь, цифра – средняя массовая доля меди в %, остальное цинк.

**Пример:** *Л60* – простая (двойная) латунь со средней массовой долей меди 60%, остальное (40%) - средняя массовая доля цинка.

**б) Специальные (многокомпонентные) латуни** в своём составе кроме меди и цинка содержат легирующие элементы: А – алюминий; Ж – железо; Мц – марганец; Мг – магний; Н – никель; О – олово; С – свинец; К – кремний; Мш – мышьяк; Ц – цинк; Б – бериллий; Ф – фосфор; Кд – кадмий; Су – сурьма; Т – титан.

**Маркировка:** *Первые две цифры* – средняя массовая доля *меди в %*, следующие – средняя массовая доля других элементов в % в том же порядке как и буквы. Остальное – массовая доля цинка.

**Пример:** *ЛАЖ60-1-1* – деформируемая специальная латунь, со средней массовой долей меди 60 %, алюминия 1%, железа 1 %, остальное (38%) - средняя массовая доля цинка.

**ГОСТ 17711 – 93** распространяется на литейные латуни.

**Маркировка:** буквы – то же; **цифры после Ц** – средняя массовая доля **цин**ка в %, последующие – средняя массовая доля других элементов в % в том же порядке, как и буквы. Остальное – средняя массовая доля меди.

**Пример:** ЛЦ16К4 – литейная латунь со средней массовой долей цинка 16%, кремния 4% , остальное (80%) - средняя массовая доля меди.

ГОСТ 18175–78 распространяется на бронзы безоловянные деформируемые.

ГОСТ 5017 – 74 распространяется на бронзы оловянные деформируемые.

**Маркировка деформируемых бронз:** Бр - бронза, далее следуют буквы, показывающие легирующие элементы, а затем цифры, показывающие среднюю массовую долю этих элементов в %, остальное средняя массовая доля меди. Буквы, обозначающие легирующие элементы такие же, как и в маркировке латуней.

**Пример:** БрАЖ9-4 – бронза деформируемая, безоловянная, со средней массовой долей алюминия 9%, железа 4%, остальное (87%) - средняя массовая доля меди.

ГОСТ 493–7 распространяется на бронзы безоловянные литейные.

ГОСТ 613 – 79 распространяется на бронзы оловянные литейные.

**Маркировка для литейных бронз** после букв **Бр** следует буквенное обозначение основного легирующего элемента и цифра, указывающая его среднюю массовую долю в %, а затем следуют буквы и цифры для других легирующих элементов.

**Пример:** БрО10С10 – бронза литейная, оловянная, со средней массовой долей олова 10%, свинца 10%, остальное (80%) - средняя массовая доля меди.

ГОСТ 11069-2001 распространяется на алюминий первичный, выпускаемый в жидком виде, в виде чушек, слитков, ленты и т.д., бывает высокой А999, А995, А99, А98, А97, А95 и технической чистоты А85; А8; А5; А5Е; А7Е; А0 и др.

**Маркировка:** А – алюминий; **цифры после А** – массовая доля алюминия в % (не менее), всегда 99 целых, а цифры указывают значения после запятой; **Е** в конце марки – алюминий применяется в электротехнической промышленности.

**Примеры:** А999 - алюминий первичный с массовой долей алюминия 99,999%, остальное примеси.

**А0** - алюминий первичный с массовой долей алюминия 99,00%, остальное примеси.



**Рисунок 1 – ММ**

Медь мягкая, отожженная. Применяется для изготовления проводов и кабелей.



**Рисунок 2 – Л 63**

Латунь простая: 63% Cu и 37% Zn. Применяется для изготовления листов, лент, труб, проволоки.



**Рисунок 3 – Бр АЖН 10-4-4**

Бронза безоловянная: Al-10%, Fe-4%, Ni-4% остальное Cu. Алюминиевые бронзы легко обрабатываются давлением. Их используют для изготовления проката различного профиля и других изделий

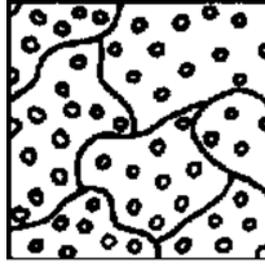


Рисунок 4 - Бр Б 2

Бронза бериллиевая: Be-2%, остальное Cu. Применяется для изготовления лент, прутков, листов пружин.

Хорошо обрабатывается резанием, имеет высокую упругость.

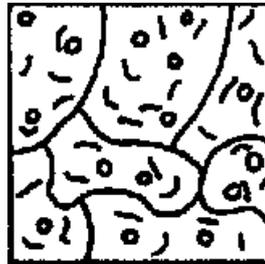


Рисунок 5 –Д 1

Дуралюмин. Состав: 14% Cu, 0,5% Mg, Mn, Si, Fe, остальное Al. Термическая обработка: закалка при  $t=510^{\circ}\text{C}$  и охлаждение в воде. Применяется для изготовления прутков, листов, лент.

## **5 Порядок выполнения работы**

- 5.1 Изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы.
- 5.2 Изучить маркировку проводниковых материалов.
- 5.3 Рассмотреть и схематически изобразить структуру меди, латуни, бронзы, и дуралюмина.
- 5.4 Описать изученные структуры, указав химический состав и применение.
- 5.5 Составить отчет по работе.

## **6 Содержание отчета**

6.1 Название и цель работы.

6.2 Оборудование и материалы.

6.3 Правила поведения и меры безопасности при выполнении работы.

6.4. Оформленное задание.

6.5. Выводы по работе

## **7 Контрольные вопросы**

7.1 Дать классификацию меди по механическим свойствам.

7.2 Указать отличие простой латуни от специальной.

7.3 Указать отличие маркировки деформируемой бронзы от литейной.

7.4 Рассказать принцип маркировки алюминия.

## Лабораторная работа № 3

### Определение электрической прочности твердых диэлектриков

#### 1 Цель работы:

- изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы;
- определить электрическую прочность твердых диэлектриков;
- установить зависимость электрической прочности диэлектриков от ряда факторов.

#### 2 Оборудование и материалы

- установка для определения электрической прочности твердых диэлектриков
- опытные образцы диэлектриков

#### 3 Правила поведения и меры безопасности:

- 1) Перед тем, как приступить к выполнению работы, тщательно изучите ее описание.
- 2) Не приступайте к выполнению работы без разрешения преподавателя.
- 3) Не оставляйте рабочее место без разрешения преподавателя.
- 4) Размещайте приборы и образцы на своем рабочем месте таким образом, чтобы исключить их падение или опрокидывание.
- 5) Не держите на рабочем месте предметы, не требующиеся при выполнении работы.
- 6) Не включайте источники электропитания без разрешения преподавателя.
- 7) При проведении опытов будьте внимательны и дисциплинированы, точно выполняйте указания преподавателя.

#### 4 Теоретическая часть

Явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием элек

трического поля называется электрическим пробоем.

У твердых диэлектриков кроме пробоя по объему возможен пробой по поверхности, называемый поверхностным пробоем (перекрытием).

Наиболее характерной особенностью твердых диэлектриков, отличающей их от жидких и газообразных диэлектриков, является потеря ими после пробоя электроизолирующих свойств. После пробоя твердого диэлектрика в нем остается след в виде пробитого или проплавленного отверстия.

Минимальное приложенное к образцу диэлектрика напряжение, приводящее его к пробоем, называют пробивным напряжением  $U_{пр}$ .

Номинальное напряжение электрической изоляции должно быть меньше пробивного напряжения.

Величину, равную отношению пробивного напряжения к номинальному напряжению, называют коэффициентом запаса электрической прочности

$$K_3 = \frac{U_{пр}}{U_n}. \quad (1)$$

Пробивное напряжение  $U_{пр}$  растет с увеличением толщины  $h$  диэлектрика. Для характеристики способности материала противостоять разрушению в электрическом поле вводят понятие электрической прочности

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \text{ МВ/м или кВ/мм.} \quad (2)$$

Пробой твердых диэлектриков может вызываться как электрическими, так и тепловыми процессами, возникающими под действием электрического поля. Различают три вида пробоя твердых диэлектриков:

- **Электрический пробой** – пробой, обусловленный ударной ионизацией или разрывом связей между частицами диэлектрика непосредственно под действием электрического поля. Он мало зависит от внешних факторов.

- **Тепловой пробой** обусловлен нарушением теплового равновесия диэлектрика вследствие диэлектрических потерь. В результате повышения теплоотделения над теплоотдачей диэлектрик лавинообразно разогревает-

ся, что приводит к его разрушению (плавлению, сгоранию). Тепловой пробой зависит от частоты приложенного напряжения и от температуры диэлектрика.

- *Электрохимический пробой* обусловлен химическими процессами, приведшими к изменениям в диэлектрике под действием электрического поля. Химические изменения (старение) при высоком напряжении возникают вследствие электролиза и наличия озона в воздухе. Электрическое старение особенно при воздействии постоянного напряжения и сказывается в меньшей мере при переменном напряжении.

Электрическая прочность одного и того же материала различна при различных условиях испытания. Она зависит от вида испытательного напряжения – постоянного, переменного, импульсного.

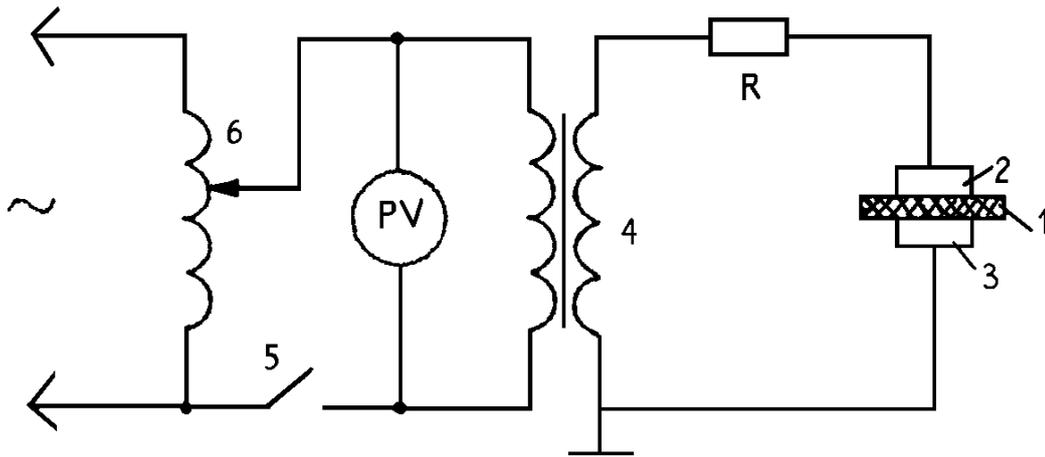
Электрическая прочность при постоянном напряжении выше, чем при переменном. Электрическая прочность одного и того же материала резко уменьшается с увеличением степени неоднородности поля, т.е. она зависит от формы электродов. При увеличении расстояния между электродами степень неоднородности поля, если только электродам не придавать специальную форму, увеличивается, что ведет к уменьшению  $E_{пр}$ .

## **5 Методика проведения испытаний**

Электрическую прочность диэлектриков чаще всего определяют на установках переменного тока промышленной частоты.

Для определения электрической прочности твердых диэлектриков в однородном электрическом поле испытуемый диэлектрик помещают между шаровыми электродами. Поверхность диэлектрика должна быть достаточно большой, чтобы не произошел поверхностный пробой.

Между электродами 2 и 3 помещают диэлектрик 1. С помощью автотрансформатора 6 плавно повышают напряжение, приложенное к диэлектрику до наступления пробоя. Показания вольтметра регистрируются в момент пробоя диэлектрика. В момент пробоя ток достигает максимума, срабатывает автомат максимального тока 5 и цепь размыкается.



**Рисунок 1- Схема установки для испытания твердых диэлектриков на пробой**

**Таблица 1 – Определение пробивного напряжения диэлектрика**

Наименование диэлектрика	Толщина, мм	Измерено					
		$U_1$	$T_1$	$U_2$	$T_2$	$U_3$	$T_3$
		кВ	сек	кВ	сек	кВ	сек
Картон	1						
Резина	1						

## 6 Порядок выполнения работы

6.1 Изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы.

6.2 Ознакомиться со схемой установки для определения электрической прочности твердых диэлектриков.

6.3 Изучить методику определения электрической прочности резины и картона.

6.4 Построить график зависимости пробивного напряжения от времени.

## 7 Содержание отчета

7.1 Название и цель работы.

7.2 Оборудование и материалы.

7.3 Правила поведения и меры безопасности при выполнении работы.

7.4 Оформленное задание.

7.5 Выводы по работе.

## **8 Контрольные вопросы**

8.1 Дать определение пробоя диэлектрика.

8.2 Назвать виды пробоев.

8.3 Охарактеризовать каждый из видов пробоя.

8.4 Перечислить причины увеличения электропроводности твердых диэлектриков.

8.5 Указать особенности твердых диэлектриков.

8.6 Дать понятие коэффициента запаса электрической прочности.

8.7 Указать зависимость пробивного напряжения от толщины диэлектрика.

## Лабораторная работа № 4

### Определение электрической прочности воздуха

#### 1 Цель работы:

- изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы;
- определить опытным путем электрическую прочность воздуха;
- проанализировать зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами и площадью их поверхности.

#### 2 Оборудование и материалы:

- установка для определения электрической прочности воздуха.

#### 3 Правила поведения и меры безопасности:

- 1) Перед тем, как приступить к выполнению работы, тщательно изучите ее описание.
- 2) Не приступайте к выполнению работы без разрешения преподавателя.
- 3) Не оставляйте рабочее место без разрешения преподавателя.
- 4) Размещайте приборы и образцы на своем рабочем месте таким образом, чтобы исключить их падение или опрокидывание.
- 5) Не держите на рабочем месте предметы, не требующиеся при выполнении работы.
- 6) Не включайте источники электропитания без разрешения преподавателя.
- 7) При проведении опытов будьте внимательны и дисциплинированы, точно выполняйте указания преподавателя.

#### 4 Теоретическая часть

Одной из важнейших характеристик диэлектриков является их электрическая прочность. Напряженность однородного электрического поля, при которой про-

исходит пробой, т.е. разрушение диэлектрика с образованием в нем сквозного канала с очень большой проводимостью тока, называют электрической прочностью диэлектрика, которую рассчитывают по формуле

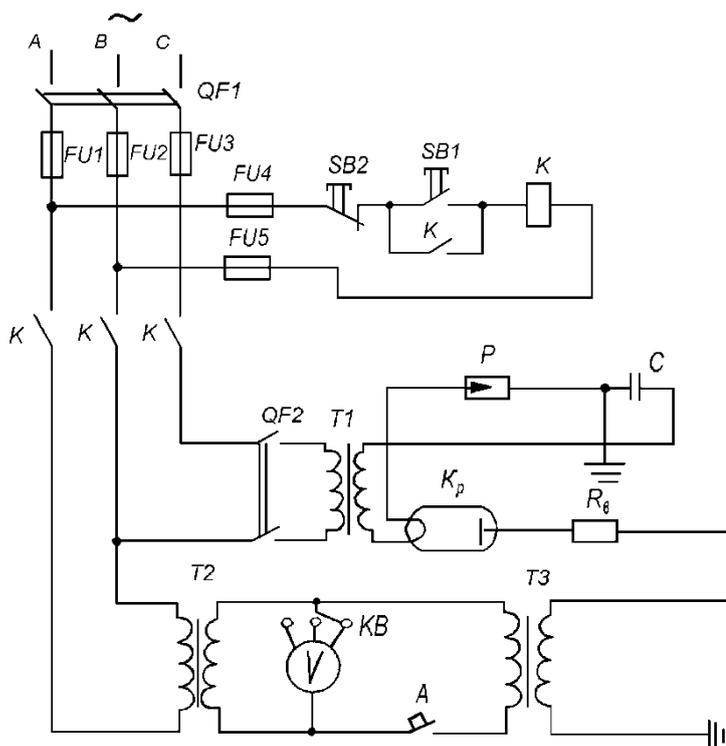
$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \quad \text{МВ/м или кВ/мм}, \quad (1)$$

где  $h$ - расстояние между электродами.

С увеличением плотности воздуха его пробивная прочность увеличивается. Значительное влияние на электрическую прочность воздуха оказывает форма электродов и расстояние между ними.

При различных электродах со скругленными краями степень их скругления оказывает весьма существенное влияние на электрическую прочность воздуха, снижая ее с уменьшением радиуса кривизны. Также влияет состояние поверхности электродов: для получения наиболее высокой прочности электроды должны обладать гладкой поверхностью и перед пробоем очищаются от пыли.

Установка для определения электрической прочности воздуха состоит из включающего устройства с кнопочным дистанционным управлением (магнитный пускатель), вариатора для регулирования напряжения в обмотке низшего.



**Рисунок 1- Схема установки для определения пробивной прочности воздуха**

Обозначения на рисунке 1: QF1 - выключатель; FU1- FU5 – предохранители; SB1 - кнопка “пуск”; SB2 - кнопка “стоп”; К - электромагнитный пускатель; QF2 – выключатель; Р – разрядник; С – конденсатор; Кр – кенотрон; Т1-Т2 – трансформаторы; Т3 - трансформатор силовой; V – вольтметр; КВ - коммутатор вольтметра; А - автомат максимального тока; Rв - вводное сопротивление.

**Таблица 1 – Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами и их формой**

Вид напряжения	Пара электродов	Измерить		Вычислить
		h мм	U <sub>пр</sub> кВ	E <sub>пр</sub> кВ/мм
~				
~				
~				
~				
~				
~				
~				
~				
~				
~				
~				
~				

## 5 Порядок выполнения работы

5.1 Изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы.

5.2 Ознакомиться со схемой установки для определения электрической прочности воздуха.

5.3 Изучить методику определения электрической прочности воздуха.

5.4 Исследовать зависимость электрической прочности воздуха от формы

электродов и расстояния между ними.

5.5 Построить график зависимости пробивного напряжения от расстояния между электродами для каждой пары электродов

## **6 Содержание отчета**

6.1 Название и цель работы.

6.2 Оборудование и материалы.

6.3 Правила поведения и меры безопасности при выполнении работы.

6.4 Оформленное задание.

6.5 Выводы по работе.

## **7 Контрольные вопросы**

7.1 Указать причины увеличения электропроводности газообразных диэлектриков.

7.2 Перечислить факторы, от которых зависит электрическая прочность газов.

7.3 Указать особенности газообразных диэлектриков.

7.4 Назвать основной недостаток газообразной электрической изоляции.

7.5 Дать определение ударной ионизации и указать причины ее возникновения.

7.6 Указать зависимость пробивного напряжения от формы электродов.

7.7 Охарактеризовать зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами.

7.8 Описать изменение тока и напряжения в момент пробоя газа.

## Лабораторная работа № 5

### Определение электрической прочности трансформаторного масла

#### 1 Цель работы:

- изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы;
- определить электрическую прочность трансформаторного масла;
- проанализировать зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от времени.

#### 2 Оборудование и материалы:

- установка для определения электрической прочности
- трансформаторное масло

#### 3 Правила поведения и меры безопасности:

- 1) Перед тем, как приступить к выполнению работы, тщательно изучите ее описание.
- 2) Не приступайте к выполнению работы без разрешения преподавателя.
- 3) Не оставляйте рабочее место без разрешения преподавателя.
- 4) Размещайте приборы и образцы на своем рабочем месте таким образом, чтобы исключить их падение или опрокидывание.
- 5) Не держите на рабочем месте предметы, не требующиеся при выполнении работы.
- 6) Не включайте источники электропитания без разрешения преподавателя.
- 7) При проведении опытов будьте внимательны и дисциплинированы, точно выполняйте указания преподавателя.

#### 4 Теоретическая часть

Электрическая прочность жидких диэлектриков в слабой степени зависит от

их химической природы, но весьма существенно от инородных примесей. Эти примеси в жидкостях могут давать растворы и дисперсные фазы, причем наибольшее влияние на электрическую прочность жидких диэлектриков оказывают дисперсные фазы в виде эмульсии растворов.

Возрастание пробивного напряжения в области температур 60-80°C объясняется влиянием вида распределения воды в масле - вода находится в стадии молекулярного раздробления, переходя в нее из состояния эмульсии.

Снижение пробивного напряжения с дальнейшим увеличением температуры объясняется обычным тепловым эффектом.

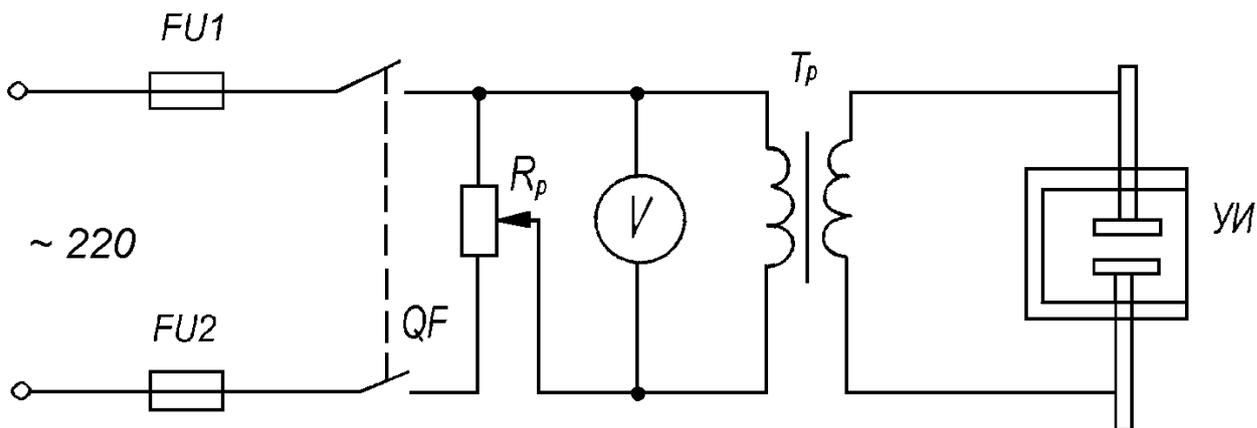
Увеличение пробивного напряжения в области низких температур является следствием вымерзания воды. Снижение пробивного напряжения ниже температуры - 90, - 95°C, т.е. когда масло находится уже в твердом состоянии, объясняется образованием в нем трещин.

Особенно большое влияние на электрическую прочность масла оказывает содержание эмульсионной влаги. Влияние влаги особенно заметно в случае наличия в трансформаторном масле органических волоконцев, которые, впитывая в себя влагу, образуют под действием электрического поля проводящие мостики между электродами, значительно уменьшая пробивное напряжение.

Существенное влияние на электрическую прочность трансформаторного масла оказывает содержание в нем газовых включений. В силу этого включение напряжения после заливки масла в трансформатор следует производить, выждав некоторое время, во избежание пробоя масла.

Длительность приложения напряжения заметно сказывается на электрической прочности трансформаторного масла. При увеличении времени экспозиции трансформаторное масло значительно снижает свое пробивное напряжение.

На величине пробивного напряжения жидких диэлектриков резко сказывается форма электродов и расстояние между ними аналогично тому, как это наблюдается у газовых диэлектриков.



FU1- FU2- предохранители; QF- автоматический выключатель; V- вольтметр; Rp- потенциометр; Tr- трансформатор силовой; УИ- установка испытательная.

**Рисунок 1 – Схема установки для испытания на пробой жидких диэлектриков**

**Таблица 1- Из правил технической эксплуатации**

Для аппаратов и трансформаторов с рабочим напряжением, Кв	Пробивное напряжение масла, кВ/ 2,5 мм	
	для сухого и чистого масла	для эксплуатационного масла
Выше 35	40	35
6 – 35	30	25
Ниже 6	25	20

**Таблица 2 – Определение электрической прочности трансформаторного масла**

Испытуемое масло и его характеристика	Расстояние между электродами, мм	Измерено					Вычислено	
		U <sub>пр1</sub> кВ	U <sub>пр2</sub> кВ	U <sub>пр3</sub> кВ	U <sub>пр4</sub> кВ	U <sub>пр5</sub> кВ	U <sub>прср</sub> кВ	E <sub>пр</sub> кВ/м
чистое, сухое	2,5							

## 5 Порядок выполнения работы

5.1 Изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы.

5.2 Ознакомиться со схемой установки для определения электрической прочности трансформаторного масла.

5.3 Изучить методику определения электрической прочности трансформаторного масла.

5.4 Определить электрическую прочность трансформаторного масла.

5.5 Построить график зависимости пробивного напряжения от времени

## **6 Содержание отчета**

6.1 Название и цель работы

6.2 Оборудование и материалы

6.3 Правила поведения и меры безопасности при выполнении работы.

6.4 Оформленное задание.

6.5 Выводы по работе

## **7 Контрольные вопросы**

7.1 Указать причины увеличения электропроводности жидких диэлектриков.

7.2 Перечислить причины образования электрического пробоя жидких диэлектриков.

7.3 Установить причины роста пробивного напряжения при уменьшении температуры.

7.4 Объяснить причины роста пробивного напряжения при увеличении температуры.

7.5 Указать влияние примесей на пробивное напряжение жидких диэлектриков.

7.6 Назвать функции трансформаторного масла при использовании в трансформаторе.

7.7 Перечислить основные свойства трансформаторного масла.

## **Лабораторная работа № 6**

### **Анализ микроструктуры и определение плотности дислокаций на поверхности полупроводниковой пластины**

#### **1 Цель работы:**

- изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы;
- провести микроанализ полупроводниковой пластины с помощью металлографического метода исследования;
- определить плотность дислокаций на поверхности полупроводниковой пластины.

#### **2 Оборудование и материалы:**

- микроскоп металлографический;
- образцы полупроводниковых пластин.

#### **3 Правила поведения и меры безопасности:**

- 1) Перед тем, как приступить к выполнению работы, тщательно изучите ее описание.
- 2) Не приступайте к выполнению работы без разрешения преподавателя.
- 3) Не оставляйте рабочее место без разрешения преподавателя.
- 4) Размещайте приборы и образцы на своем рабочем месте таким образом, чтобы исключить их падение или опрокидывание.
- 5) Не держите на рабочем месте предметы, не требующиеся при выполнении работы.
- 6) Не включайте источники электропитания без разрешения преподавателя.
- 7) При проведении опытов будьте внимательны и дисциплинированы, точно выполняйте указания преподавателя.

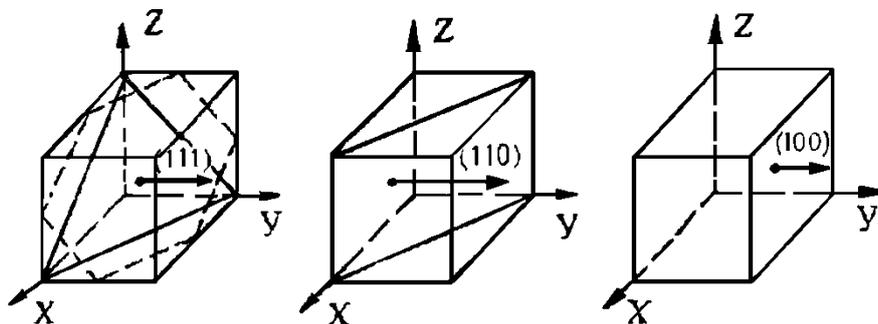
## 4 Теоретическая часть

Свойства полупроводниковых приборов зависят как от чистоты используемых материалов, так и от их кристаллической структуры и дефектности.

Совершенство структуры реальных кристаллов нарушается присутствием различных дефектов: *нуль-мерных* или *точечных дефектов* (вакансии, атомы в междоузлиях; сочетание этих дефектов - двойные вакансии, скопления); *одномерных* или *линейных дефектов* (дислокации); *двумерных* или *поверхностных дефектов* (границы зёрен, границы двойников, дефекты упаковки, поверхность кристалла); *трёхмерных* или *объёмных дефектов* (пустоты, включения второй фазы).

Тип и количество дефектов, присутствующих в данном кристалле, зависят от условий кристаллизации. Дислокационные ямки травления могут располагаться на поверхности шлифа равномерно или, образуя макрофигуры, в виде концентрических колец, звёзд или иных форм. Наличие дефектов структуры в кристаллах может непосредственно отражаться на свойствах *p-n*-переходов вследствие неоднородности распределения и диффузии легирующих примесей в дефектных областях решётки.

Для изучения микроструктуры твёрдых тел в настоящее время широко используется электронная микроскопия, электронография, рентгеноструктурный анализ и металлография.

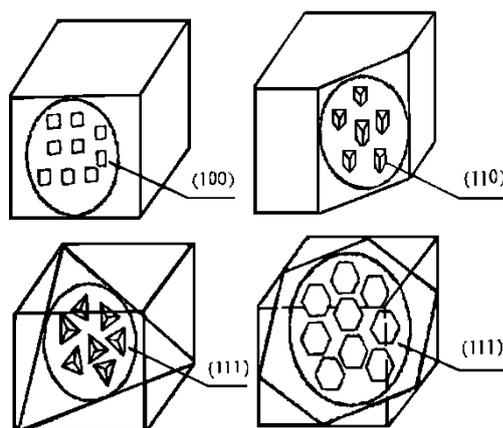


**Рисунок 1 – Наиболее важные кристаллографические плоскости и направления для кубической решетки**

Для проведения микроанализа необходимо приготовить и протравить шлиф.

Приготовление шлифа состоит из следующих операций: вырезание из слитка пластины с определённой кристаллографической ориентацией; механическая шлифовка; химическая полировка; химическое селективное травление. Пластины отрезают от слитка толщиной от 1 до 3 мм с кристаллографической ориентацией поверхности (111). Механическую шлифовку для удаления поверхностных неровностей, царапин и других повреждений, оставшихся после резки, производят при помощи абразивных порошков корунда или карбида бора, начиная с крупнозернистых (от 40 до 50 мкм), и последовательно переходят к тонким порошкам (от 10 до 20 мкм). После шлифовки пластину промывают водой и протирают спиртом.

Деформированный поверхностный слой кристалла толщиной от 10 до 15 мкм удаляют при помощи химической полировки полирующим травителем.



**Рисунок 2 – Фигуры травления для плоскостей (111) , (100), (110)**

Для выявления дислокации и других дефектов на химически полированной поверхности проводят операцию селективного травления. Снижение температуры травления, а так же введение в состав травителей разбавителей (вода, уксусная кислота) и ингибиторов (соли, переходных металлов, органических реагентов) способствуют переходу от режима химического полирования к селективному выявлению дефектов на исследуемой поверхности кристалла.

Микроструктурой называют строение материалов, наблюдаемое при увеличении от 50 до 2000 раз.

Когда травление производится в слабом травителе и продолжительное время, на гранях кристалла образуются правильные фигуры различной внешней формы, которые получили название фигур травления. Они легко наблюдаются под микроскопом.

В кристаллах с кубической элементарной ячейкой, к которым относятся германий и кремний, для основных кристаллографических плоскостей (111), (100), (110) фигуры травления имеют вид, изображенный на рисунке 2, из которого следует что фигура травления по форме в какой-то степени соответствует сечениям, образованным соответствующими кристаллографическими плоскостями с элементарной ячейкой. По геометрии фигур травления можно судить об ориентации кристалла, о присутствии тех или иных элементов симметрии, а также о его монокристалличности. В том случае, если образец не представляет собой монокристалл, в различных местах одной и той же грани фигуры травления будут различными. Точность определения ориентации кристалла методом фигур травления составляет от 2 до 3 градусов.

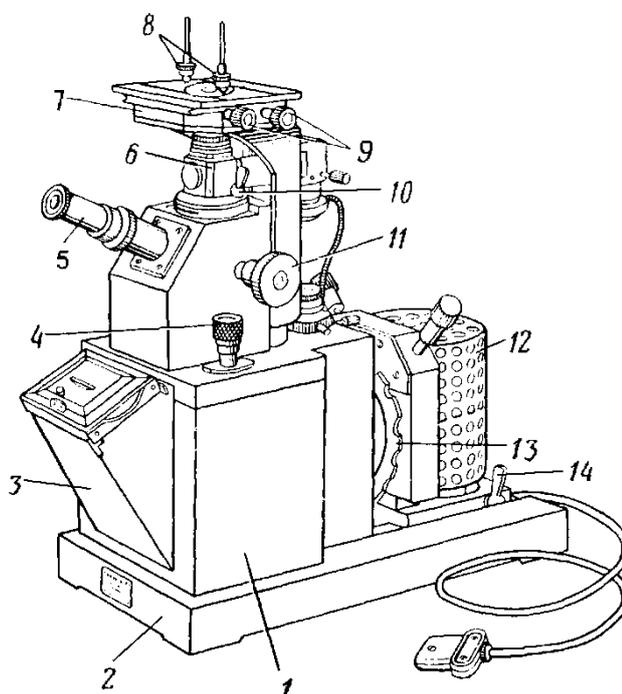
На рисунке 3 показан общий вид микроскопа МИМ-7. Он состоит из следующих основных систем: оптической, осветительной с фотографической аппаратурой и механической.

**Оптическая система** микроскопа включает объектив и окуляр, от которых зависит увеличение микроскопа, и ряд вспомогательных элементов: призмы, зеркала, линзы, диафрагмы. Они смонтированы в корпусе и нужны, чтобы сложный, рассеянный луч белого цвета превратить в прямолинейный и сфокусировать его в одной точке. Объектив, представляющий собой сочетание линз, дает реальное увеличение, но обратное изображение микроструктуры. Окуляр состоит из нескольких линз и предназначен для увеличения изображения, полученного объективом, и преобразования его из обратного в прямое.

В **осветительную систему** микроскопа входят источник света, серия линз, светофильтров и диафрагм. Источником света является электрическая лампа (17В), включаемая в сеть через понижающий трансформатор.

**Механическая система** включает устройства для макро- и микрофокусировки.

Макрофокусировка осуществляется с помощью винта, ручки которого располагаются слева и справа на боковых поверхностях корпуса микроскопа, и стопора с рукояткой (слева). Микрофокусировка производится винтом, расположенным справа, ниже макровинта. Перемещение предметного столика в горизонтальных направлениях для просмотра всей поверхности шлифа проводится двумя винтами, расположенными на его боковой поверхности. Около этих винтов на столике нанесены шкалы отсчета с ценой деления 1 мм.



1- корпус; 2 - основание; 3 - фотокамера; 4 - микрометрический винт;  
 5 - визуальный тубус с окуляром; 6 - иллюминатор; 7 - предметный столик;  
 8 - клеммы; 9 - винты перемещения столика; 10- рукоятка иллюминатора; 11 -  
 микрометрический винт; 12 - осветитель; 13- рукоятка светофильтров; 14 - сто-  
 порное устройство осветителя; 15 - рамка с матовым стеклом

**Рисунок 3 – Общий вид микроскопа МИМ-7**

**Порядок работы на микроскопе:** на предметный столик помещают образец, обращенный исследуемой поверхностью к объективу. Включают микроскоп электросеть, устанавливают с помощью блока питания необходимый накал лампы освещения. Отпустив рукоятку стопора, плавным вращением макровинта опускают столик, проводят фокусировку

ние до появления в окуляре структуры поверхности. Держа правой рукой макровинт, левой стопорят его. Точное фокусирование проводят вращением микровинта. Перемещая предметный столик в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях, с помощью винтов просматривают всю поверхность шлифа, выбирая характерные ее участки.

**Определение плотности дислокаций в кристалле.** При травлении кристаллов селективным травителем в местах выхода дислокаций на поверхность образуются ямки травления, появление которых связано с большей скоростью удаления атомов с локального участка вблизи выхода дислокации на поверхность.

В отличие от фигур травления, ямки травления не покрывают всю поверхность шлифа, а располагаются только в местах выхода дислокаций. Плотность дислокаций рассчитывают по количеству ямок травления. Подсчитав число ямок травления под микроскопом, можно приблизительно определить число дислокаций, приходящихся на один квадратный сантиметр травленной поверхности шлифа. Расчет средней плотности ямок травления  $N_d$  производится по формуле:

$$N_d = n_{cp}/S, \quad (1)$$

где  $n_{cp}$  - среднее количество дислокационных ямок в поле зрения микроскопа;  $S$  - площадь поля зрения,  $\text{см}^2$ .

**Таблица 1.1- Определение плотности дислокаций**

Образец	$n_1$ , шт	$n_2$ , шт.	$n_3$ , шт.	$n_{cp}$ , шт.	$S$ , $\text{см}^2$	$N_d$ , $\text{см}^{-2}$	Справочные данные по $N_d$ , $\text{см}^{-2}$

## 5 Порядок выполнения работы

5.1 Изучить правила поведения и меры безопасного выполнения работы.

5.2 Ознакомиться с устройством и работой микроскопа.

5.3 Наблюдая фигуры травления на поверхности пластины полупроводника, дать заключение о степени монокристалличности пластины.

5.4 По геометрии фигур травления определить вид кристаллографической плоскости, в которой ориентирован монокристалл полупроводника (рисунок 2).

5.5 По количеству ямок травления в каждом из 3 полей зрения найти среднюю плотность дислокаций на  $1 \text{ см}^2$ . Площадь поля зрения микроскопа определить по диаметру светового пятна на предметном столике микроскопа.

## **6 Содержание отчета**

6.1 Цель работы.

6.2 Оборудование и материалы.

6.3 Правила поведения и меры безопасности при выполнении работы.

6.4 Изображение наблюдаемой поверхности исследуемых образцов (выбрать из рисунка 2).

6.5 Вычисление плотности дислокаций в кристалле (расчетная формула 1 и таблица 1).

6.6 Вывод о степени монокристалличности образца, об ориентации поверхности полупроводниковых пластин, о соответствии уровня плотности дислокаций установленным нормам и дефектности исследуемого полупроводника.

## **7 Контрольные вопросы**

7.1 Перечислить методы исследования микроструктуры материалов.

7.2 Охарактеризовать способ подготовки микрошлифа.

7.3 Перечислить материалы, обладающие анизотропными свойствами.

7.4 Перечислить виды дефектов и природу их возникновения.

7.5 Дать определение дислокаций и указать влияние на свойства полупроводниковых материалов.

7.6 Дать определение фигур травления.

7.7 Перечислить особенности полупроводников, о которых можно судить по геометрии фигур травления.

7.8 Указать отличие фигур травления от ямок травления.

7.9 Дать определение плотности дислокаций.

## Практическая работа №1

### Расчет удельного объемного и удельного поверхностного сопротивления диэлектриков

#### 1 Цель работы:

- проанализировать метод измерения удельного электрического объемного и поверхностного сопротивлений диэлектриков;
- рассчитать сопротивления изоляции по известным удельным электрическим объемным и поверхностным сопротивлениям диэлектрика.

#### 2 Теоретическая часть

У диэлектриков различают два вида электропроводности: объемную, которая определяется током объемной утечки  $I_V$ , и поверхностную, обусловленную током поверхностной утечки  $I_S$ .

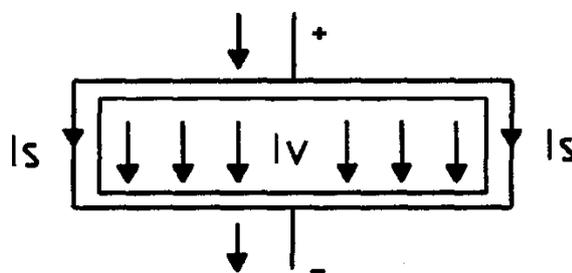


Рисунок 1 – Путь прохождения тока поверхностной утечки и объемной утечки

В связи с этим в диэлектриках различают два вида удельных сопротивлений: *удельное объемное сопротивление*  $\rho_V$  и *удельное поверхностное сопротивление*  $\rho_S$ . Удельное объемное сопротивление  $\rho_V$  количественно определяет способность диэлектрика пропускать электрический ток  $I_V$  через его объем, а удельное поверхностное сопротивление  $\rho_S$  определяет способность пропускать электри-

ский ток  $I_s$  по поверхности диэлектрика.

Удельное объемное сопротивление равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, вырезанного из исследуемого материала, при прохождении тока через противоположные грани. Если для измерения берется не куб, а плоский образец материала, то при однородном поле

$$\rho_V = R_V \frac{S}{h}, \text{ Ом}\cdot\text{м} \quad (1)$$

где  $R_V$  – объёмное сопротивление, Ом (вычисляется);

$$S = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} - \text{площадь электрода, м}^2;$$

$d_1$  - диаметр электрода 1 (см. рисунок 3);

$h$  – толщина диэлектрика, м.

Удельное поверхностное сопротивление равно сопротивлению квадрата любых размеров на поверхности диэлектрика, ток через который идет от одной стороны к противоположной. Если для измерения берется не квадрат, а прямоугольник, то

$$\rho_s = R_s \frac{a}{l} \quad (2)$$

где  $R_s$  - поверхностное сопротивление, Ом (вычисляется);

$$a = \frac{\pi(d_2 + d_3)}{4} - \text{длина электрода, м; (длина окружности среднего диаметра между электродами 2 и 3 см. рисунок 3);}$$

$l = \frac{d_2 - d_3}{2}$  - расстояние между электродами (путь прохождения поверхностного тока), м;

$$l = \frac{d_2 - d_3}{2} - \text{расстояние между электродами (путь прохождения поверхностного тока), м;}$$

$d_2, d_3$  – диаметры электродов 2 и 3.

Общее сопротивление изоляции определяется как эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных сопротивлений  $R_V$  и  $R_s$ .

Общее сопротивление изоляции определяется как эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных сопротивлений  $R_V$  и  $R_s$ .

$$R_{\text{изол}} = \frac{R_V R_s}{R_V + R_s} \quad (3)$$

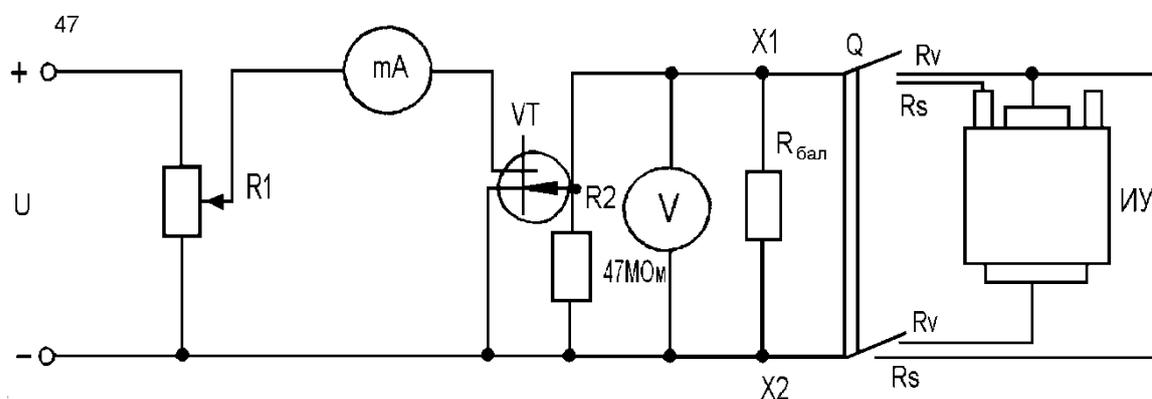
Электропроводность в твердых диэлектриках может носить ионный, электронный и смешанный (ионно-электронный) характер. Чаще всего электропроводность имеет ионный характер, так как ионы часто оказываются слабо закрепленными в узлах решетки. На электропроводность твердых диэлектриков большое влияние оказывают различные примеси, которые обычно легче диссоциируют с образованием свободных ионов, чем основной диэлектрик. Объемная электропроводность при низких температурах обусловлена передвижением слабо закрепленных ионов, в частности ионов примеси.

При повышенных температурах проводимость обусловлена переносом ионов основного вещества диэлектрика, освобожденных из узлов кристаллической решетки.

Поверхностная электропроводность диэлектрика часто зависит от состояния его поверхности, а именно от степени его увлажнения и загрязнения. С повышением влажности электропроводность диэлектрика увеличивается. У диэлектриков, не обладающих влагопроницаемостью (например, керамика), объемная проводимость обычно не зависит от влажности окружающего воздуха.

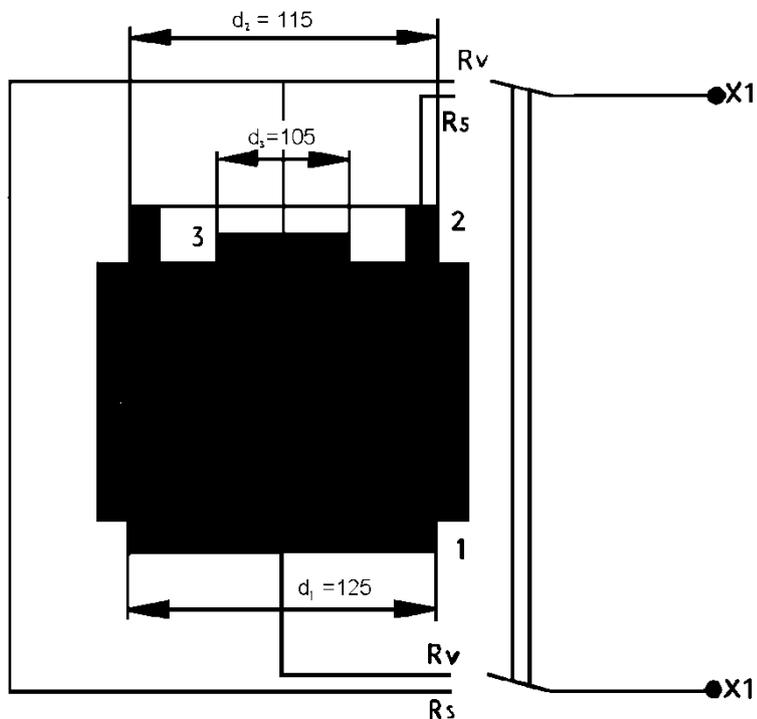
Сопротивление диэлектрика определяют, зажав его между электродами "X<sub>1</sub>" и "X<sub>2</sub>" (см. рисунок 2).

Переключение измерения объемного сопротивления  $R_v$  на поверхностное  $R_s$ , и наоборот, осуществляется по схеме, показанной на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Схема электрическая принципиальная для измерения удельного объемного и удельного поверхностного сопротивления диэлектриков**

Обозначения на рисунке 2: VT- транзистор полевой; R2- резистор (47 МОм) нагрузочный; Rбал – резистор балансировочный; R1 – потенциометр; Q – выключатель; ИУ – испытательная установка; mA – миллиамперметр; V – вольтметр.



**Рисунок 3 - Схема для определения объёмного удельного и объёмного поверхностного сопротивления**

При измерении  $R_v$  используются два круглых электрода (1 - нижний и 3 - верхний). Для расчета  $\rho_v$  берется диаметр верхнего электрода  $d_3$ . При измерении  $R_s$  используются два других электрода (2 - верхний охранный кольцевой и 3 - верхний круглый, находящийся внутри него). Для расчета  $\rho_s$  рассматривают поверхность, ограниченную внутренним диаметром охранный кольцевого электрода  $d_2$  и диаметром верхнего круглого электрода  $d_3$ .

У электроизоляционных материалов  $\rho_v$  равно от  $10^{12}$  до  $10^{22}$  Ом·м,  $\rho_s$  от  $10^9$  до  $10^{18}$  Ом.

### **3 Порядок выполнения работы**

3.1 Изучить метод измерения удельного электрического объемного и по-

верхностного сопротивлений диэлектриков.

3.2 Вычислить сопротивления по формулам 1, 2 и 3, результаты занести в таблицу 1.

**Таблица 1- Результаты вычислений**

Диэлектрик	$h$ , м	$\rho_S$ , Ом	$\rho_V$ , Ом м	$S$ , м <sup>2</sup>	$a$ , м	$R_V$ , Ом	$R_S$ , Ом	$R_{изол.}$ , Ом

#### **4 Содержание отчета**

4.1 Цель работы.

4.2 Оформленное задание.

4.3 Результаты вычислений, сведенные в таблицу.

#### **5 Контрольные вопросы**

5.1 Дать определение удельного объемного сопротивления диэлектрика.

5.2 Дать определение удельного поверхностного сопротивления диэлектрика.

5.3 Перечислить факторы, влияющие на величину удельного объемного и удельного поверхностного сопротивления.

5.4 Указать условия возникновения объемной электропроводности диэлектрика.

5.5 Указать условия возникновения поверхностной электропроводности диэлектрика.

5.6 Указать способ повышения поверхностного сопротивления диэлектрика.

## Практическая работа № 2

### Расчет токов утечки и потерь диэлектриков

#### 1 Цель работы:

- проанализировать векторную диаграмму токов, протекающих через диэлектрик;
- рассчитать ток утечки, мощность потерь и удельные диэлектрические потери.

#### 2 Теоретическая часть

Электроизоляционные материалы, применяемые в технике, не являются идеальными диэлектриками в связи с присущей им небольшой электропроводностью. В технических диэлектриках всегда содержится небольшое количество свободных зарядов, которые под действием электрического поля создают слабые по величине сквозные токи, или так называемые *токи утечки*. Они сопровождаются выделением и нейтрализацией зарядов на электродах, между которыми расположен диэлектрик.

При включении диэлектрика в цепь *постоянного напряжения* происходит резкий скачок тока, а затем уменьшение его до постоянного значения. Это постоянное значение называется током *сквозной проводимости*  $I_{ск}$  (или током утечки). Сквозной ток утечки  $I_{ск}$  вызван перемещением свободных зарядов в диэлектрике в процессе электропроводности и не изменяется со временем (если не происходит электроочистка диэлектрика или его старение) и вызывает диэлектрические потери.

Спадающий во времени ток, обусловленный перераспределением свободных зарядов, принято называть *абсорбционным*  $I_{аб}$ . Он обусловлен смещением связанных зарядов в ходе медленных поляризаций и вызывает рассеяние энергии в диэлектрике.

Ток, сопутствующий электронной и ионной поляризации, называют током *смещения* (емкостным током); его мгновенное значение обозначают  $I_{см}$ . Он спадает в

течение  $10^{-16} \dots 10^{-15}$  с, поэтому не вызывает рассеяние энергии в диэлектрике.

Таким образом, ток, проходящий через диэлектрик, представляет собой сумму токов смещения  $I_{см}$ , абсорбции  $I_{аб}$  и сквозного  $I_{ск}$ :

$$I = I_{см} + I_{аб} + I_{ск} \quad (1)$$

Так как абсорбционный ток быстро затухает, то электропроводность изолирующих материалов при постоянном напряжении определяется по сквозному току:

$$\gamma = \frac{I_{ск}}{U}, \quad (2)$$

где  $I_{ск} = I - I_{см} - I_{аб}$ ;

$I$  – общий ток, проходящий через диэлектрик, А;

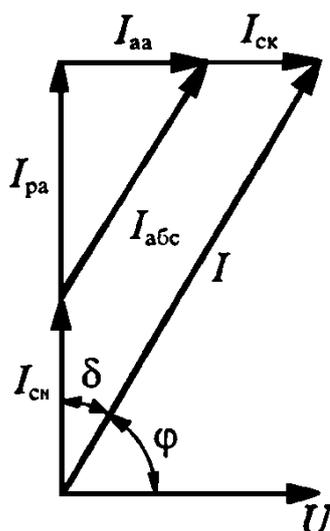
$U$  – приложенное напряжение, В.

При определении электропроводности диэлектрика необходимо измерять ток, когда  $I_{см} + I_{аб} = 0$ .

Следовательно, при постоянном напряжении потери, вызванные током абсорбции, имеют место только в период, когда происходит процесс медленных поляризации, т.е. при включении конденсатора.

При *переменном напряжении*  $I_{абс}$  имеет место, если время релаксации процесса медленных поляризации меньше или соизмеримо с полупериодом приложенного напряжения. В этом случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике под воздействием на него электрического поля, т.е. диэлектрические потери, обуславливаемые токами  $I_{ск}$  и  $I_{абс}$ , наблюдаются в течение всего времени воздействия приложенного напряжения.

На векторной диаграмме токов, протекающих через конденсатор с диэлектриком при переменном напряжении (см. рисунок 1), *емкостной ток*  $I_{см}$  опережает напряжение  $U$  по фазе на угол  $90^\circ$  и поэтому не создает потерь мощности в диэлектрике.



**Рисунок 1 – Векторная диаграмма токов, протекающих через диэлектрик при переменном напряжении**

**Ток абсорбции**  $I_{abc}$  определяется поляризациями, процесс установления которых связан с потерями энергии, поэтому он имеет **реактивную**  $I_{ra}$  и **активную**  $I_{aa}$  составляющие.

**Сквозной ток**  $I_{ck}$  совпадает по фазе с приложенным напряжением.

**Суммарный ток**  $I$  имеет **реактивную**  $I_p = I_{cm} + I_{ra}$  и **активную**  $I_a = I_{aa} + I_{ck}$  составляющие и опережает напряжение на угол  $\varphi < 90^\circ$ . Угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи, называют **углом диэлектрических потерь**. В соответствии с векторной диаграммой токов

$$tg\delta = I_a / I_p, \quad (3)$$

где  $tg\delta$  - **тангенс угла диэлектрических потерь**, который является важным параметром, характеризующим качество диэлектрика при работе на переменном напряжении.

Введение безразмерного параметра  $tg\delta$  удобно потому, что не зависит от формы и размеров участка изоляции, а определяется лишь свойствами диэлектрического материала. Чем больше тангенс угла диэлектрических потерь  $tg\delta$ , тем выше нагрев диэлектрика в электрическом поле заданной частоты и

напряжения, тем больше потери в диэлектрике, тем хуже диэлектрик. Для хороших диэлектриков  $tg\delta \leq 10^{-4}$ .

Поскольку ток абсорбции со временем уменьшается, то сопротивление изоляции возрастает. После завершения переходного процесса в установившемся режиме через диэлектрик протекает только ток сквозной проводимости  $I_{ск} = I_y$ .

Истинное сопротивление диэлектрика определяется сквозным током и называется сопротивлением изоляции

$$R_{изол} = \frac{U}{I_y}, \text{ Ом}, \quad (4)$$

тогда ток утечки  $I_y = \frac{U}{R_{изол}}, \text{ А}.$  (5)

Для твердых диэлектриков ток утечки может протекать через весь объем  $V$ , а также по его поверхности  $S$  от одного электрода к другому электроду. В связи с этим для твердых электроизоляционных материалов различают объемный ток утечки  $I_v$  и поверхностный  $I_s$ , а также удельные объемную и поверхностную электропроводности и соответственно объемное и поверхностное сопротивления.

Удельная объемная электропроводность  $\gamma_v$  обусловлена свойствами самого диэлектриками и равна

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v}, \text{ См/м}, \quad (6)$$

где  $\rho_v$  - удельное объемное сопротивление диэлектрика, Ом·м.

Удельная поверхностная электропроводность  $\gamma_s$  обусловлена наличием на поверхности диэлектрика влаги и различных загрязнений и равна

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}, \text{ См}, \quad (7)$$

где  $\rho_s$  - удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, Ом.

Образовавшийся на поверхности увлажненный и загрязненный слой имеет обычно небольшое сопротивление, поэтому ток утечки может быть достаточно большим. Он может нагреть поверхность диэлектрика до температуры более 100°C.

Это вызывает вскипание воды на поверхности диэлектрика, образование микротрещин и разрушение поверхностного слоя изоляции. Для защиты поверхности изоляционных материалов применяют грязестойкие глазури и кремнийорганические лаки.

Объемное сопротивление образца

$$R_V = \rho_V \frac{h}{S}, \text{ Ом}, \quad (8)$$

где  $\rho_V$  - удельное объемное сопротивление диэлектрика, Ом·м;

$S$  - площадь электрода, м<sup>2</sup>;

$h$  - толщина образца, м.

Поверхностное сопротивление образца

$$R_S = \rho_S \frac{l}{a}, \text{ Ом}, \quad (9)$$

где  $\rho_S$  - удельное поверхностное сопротивление диэлектрика, Ом;

$l$  - расстояние между электродами, м;

$a$  - ширина электрода, м.

Величина сопротивления изоляции определяется как эквивалентное сопротивление двух параллельно включенных сопротивлений  $R_V$  и  $R_S$ .

$$R_{\text{изол}} = \frac{R_V R_S}{R_V + R_S} \quad (10)$$

Мощность потерь в диэлектрике равна

$$P = UI_y, \text{ Вт}. \quad (11)$$

Удельные диэлектрические потери

$$\Delta P = \frac{P}{V}, \text{ Вт/м}^3, \quad (12)$$

где  $V$  - объем диэлектрика, м<sup>3</sup>.

Электропроводность диэлектриков, как и их сопротивление  $R_{изол}$ , не являются постоянными величинами. Они зависят от величины приложенного к образцу напряжения, температуры окружающей среды и влажности.

При увеличении приложенного напряжения, температуры и влажности электропроводность диэлектриков увеличивается, а сопротивление изоляции уменьшается.

При длительной работе под нагрузкой ток утечки через твердые и жидкие диэлектрики с течением времени может уменьшаться или увеличиваться.

Уменьшение тока со временем означает, что электропроводность материала была обусловлена ионами посторонних примесей, и ток уменьшается за счет электрической очистки.

Увеличение тока со временем говорит о протекающем в диэлектрике необратимом процессе старения под действием напряжения, которое способно постепенно привести к разрушению диэлектрика.

### 3 Порядок выполнения работы

3.1 Изучить векторную диаграмму токов, протекающих через диэлектрик.

3.2 Вычислить объемное, поверхностное и полное сопротивления, ток утечки, мощность потерь и удельные диэлектрические потери по формулам 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12 и результаты занести в таблицу 1.

**Таблица 1- Результаты вычислений**

Диэлектрик	$h$ , м	$\rho_V$ , Ом·м	$\rho_S$ , Ом	$R_V$ , ГОм	$R_S$ , ГОм	$R_{изол}$ , ГОм	$I_y$ , мкА	$P$ , мВт	$\Delta P$ , Вт/м <sup>3</sup>

## **4 Содержание отчета**

4.1 Цель работы.

4.2 Оформленное задание.

4.3 Результаты вычислений, сведенные в таблицу.

## **5 Контрольные вопросы**

5.1 Перечислить факторы, оказывающие влияние на объемную электропроводность диэлектрика.

5.2 Назвать причины поверхностной электропроводности диэлектрика.

5.3 Перечислить способы повышения поверхностного сопротивления диэлектрика.

5.4 Назвать токи, которые протекают в диэлектрике в момент включения источника напряжения.

5.5 Охарактеризовать изменение сопротивления изоляции при увеличении приложенного напряжения, температуры и влажности.

5.6 Назвать процессы, происходящие в диэлектрике при уменьшении токов утечки с течением времени.

5.7 Назвать процессы, происходящие в диэлектрике при увеличении токов утечки с течением времени.

## Практическая работа № 3

### Изучение конструкции и маркировки проводов и кабелей

**1 Цель работы:** научиться самостоятельно определять марку проводов и кабелей, их расшифровку согласно действующему Государственному стандарту.

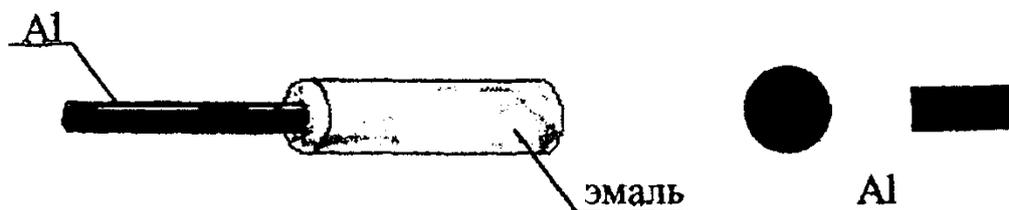
### 2 Теоретическая часть

Для передачи и распределения электрической энергии, соединения различных приборов и их частей, изготовления обмоток электрических машин применяют:

- обмоточные провода;
- монтажные провода;
- установочные провода и шнуры;
- кабели.

**Обмоточные провода.** Их применяют для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов. В качестве проводникового материала в обмоточных проводах применяют медь и алюминий.

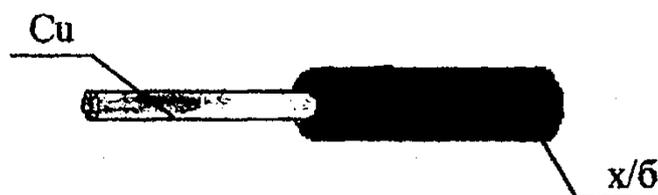
Э м а л и р о в а н н ы е провода являются наиболее перспективными среди обмоточных проводов, так как имеют наименьшую толщину изоляции (0,007 ... 0,065 мм). Применяя такую проволоку, можно увеличить мощность электрической машины за счет большего числа витков в объеме обмотки.



**Рисунок 1 - Провод с эмалевой изоляцией**

Эмалевая изоляция наносится на эмалировочных станках в виде гибкого лакового покрытия. Важнейшими характеристиками эмалированных проводов являются эластичность, нагревостойкость и электрическая прочность.

Обмоточные провода с волокнистой изоляцией имеют большую толщину изоляции (0,05...0,17мм) по сравнению с эмалированными проводами. В качестве волокнистой изоляции применяют пряжу: хлопчатобумажную (х/б), шелковую, из капроновых, асбестовых, лавсановых и стеклянных волокон.



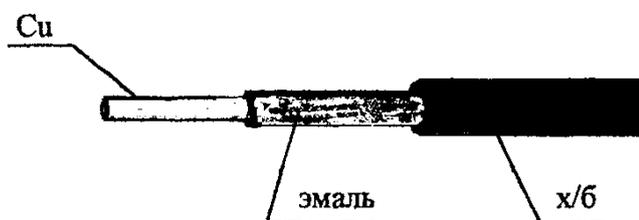
**Рисунок 2 – Провод с волокнистой изоляцией**

В качестве пленочной изоляции для проводов, применяют кабельную и конденсаторную бумагу, хорошо пропитанную минеральным маслом. Проволока с пленочной бумажной изоляцией обеспечивает высокую электрическую прочность обмоткам трансформаторов. Для повышения механической прочности изоляции из бумажной ленты ее покрывают х/б или капроновой пряжей.

Обмоточные провода с волокнистой изоляцией обладают следующими свойствами:

- невысокие электроизоляционные свойства, т.к. все виды волокнистой изоляции гигроскопичны, т.е. поглощают влагу из воздуха
- обмотки из проводов с волокнистой изоляцией требуют тщательной сушки и пропитки изоляционными лаками или компаундами.

У проводов с *эмалево-волокнистой изоляцией* поверх слоя эмали наносят изоляцию из х/б, шелковой, капроновой или стеклянной пряжи.



**Рисунок 3 – Провод с эмалево-волокнистой изоляцией**

Такие обмоточные провода применяют для изготовления тяговых, шахтных электродвигателей, электрических машин и аппаратов, которые эксплуатируются в более тяжелых условиях и требуют защиты эмалевой изоляции.

**Маркировка обмоточных проводов.** Если первая буква - **П** (**провод**), то **токоведущая жила медная**, если первая буква **А**, а затем **П**, то токоведущая жила **алюминиевая**.

Буквы, стоящие за **П** и **АП** - **материал изоляции**: **ЭЛ** - из лакостойкой эмали; **ЭВ** - из высокопрочной эмали; **ЭТ** - из теплостойкой эмали; **Б** - из х/б пряжи (волокна); **Ш** - из натурального шелка; **Л** - из лавсана; **К** - из капрона; **ШК** - из искусственного шелка и капрона; **С** – из стекловолокна.

Если в конце марки стоит буква **О** или цифра **1**, то провод имеет один слой изоляции; если - **Д** или **2** – два слоя изоляции.

**Примеры некоторых марок обмоточных проводов:** **АПБД** – обмоточный алюминиевый провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи; **АПСД** - обмоточный алюминиевый провод, изолированный двумя слоями обмотки из стекловолокна; **АПЛБД** - обмоточный алюминиевый провод, изолированный обмоткой, состоящей из одного слоя лавсанового волокна и одного слоя хлопчатобумажного волокна; **ПЭВБО** – обмоточный медный провод, изолированный высокопрочной эмалью и одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи; **ПЭВБД** - обмоточный медный провод, изолированный высокопрочной эмалью и двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи.

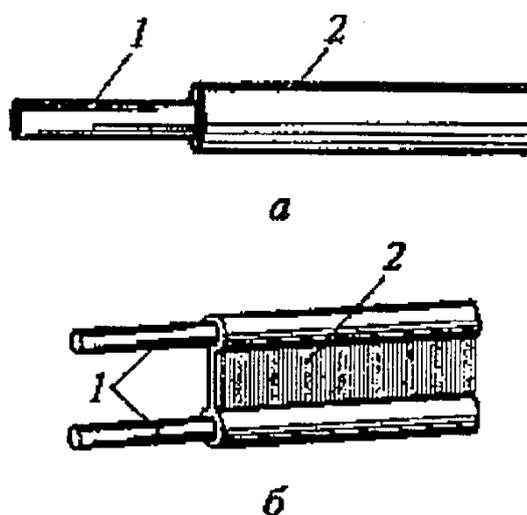
**Монтажные провода.** Эти провода состоят из медных или алюминиевых жил, которые покрывают изоляционной резиной или полихлорвиниловым пластиком, а также х/б, шелковой или капроновой пряжей и синтетической пленкой. Наибольшей гибкостью обладают многопроволочные провода, жила которых состоит из большого числа тонких проволок. Монтажные провода выпускают с лужеными медными жилами, что облегчает пайку проводов.

Для распознавания монтажных проводов их изоляционные оболочки обычно окрашивают в разные цвета. М-монтажный провод, МГ — монтажный с гибкой жилой.



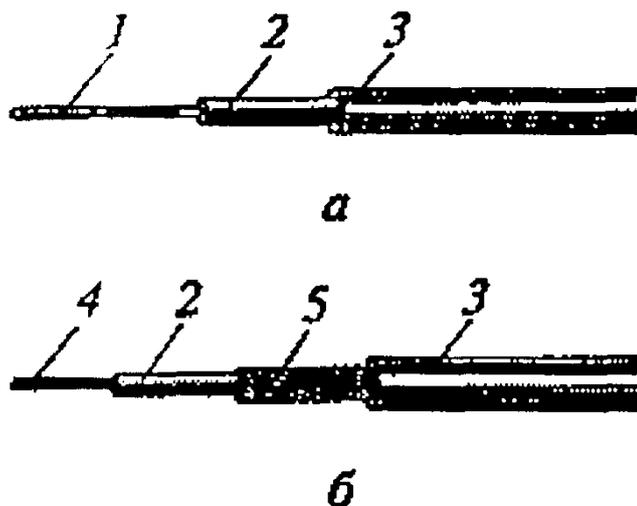
**Рисунок 4 – Монтажный провод с полихлорвиниловой изоляцией**

**Установочные провода и шнуры** служат для распределения электрической энергии, а также для присоединения электродвигателей, светильников и др. потребителей тока к сети. Токопроводящие жилы установочных проводов и шнуров изготавливают из медной и алюминиевой проволоки. Для обеспечения большей гибкости жилы шнуров и некоторых типов проводов являются многопроволочными.



*a* – марки ПВ; *б* марки ППВ( ленточный двухжильный провод); 1 – однопроволочная жила; 2 – изоляция из полихлорвинилового пластика

**Рисунок 5 – Провода установочные с изоляцией из полихлорвинилового пластика**



*a* – марки ПР; *б* марки ПРГ; 1- однопроволочная жила; 2 – изоляция из вулканизированной резины; 3 – оплетка из х/б ткани; 4 – многопроволочная жила; 5 – покрытие (обмотка) из про- резиновой ленты

**Рисунок 6 – Установочные провода с резиновой изоляцией**

Провода и шнуры с полихлорвиниловой изоляцией выпускают без защитных оболочек. Установочные провода выпускают одно-, двух-, трех-, четырех- и многожильными на напряжение 220, 380, 500, 2000 и 3000 В переменного тока. Шнуры выпускают двухжильными, т.е. состоящими из двух изолированных и свитых друг с другом жил. Их изготавливают на напряжение до 220 В переменного тока.

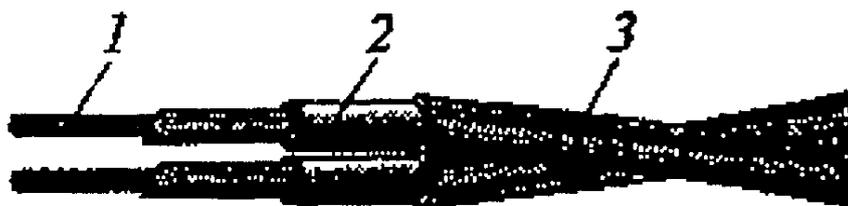
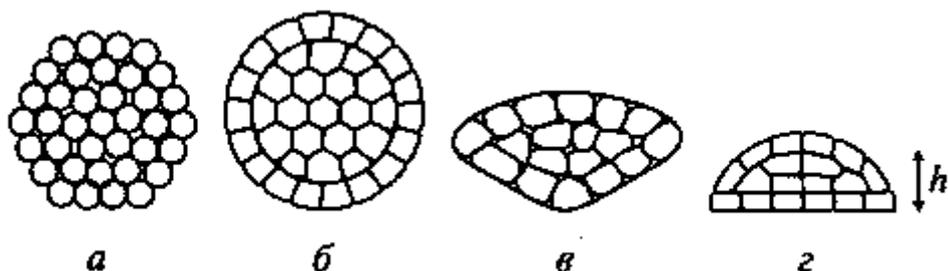


Рисунок 7 – Шнур марки ШР с резиновой изоляцией

*Маркировка установочных проводов и шнуров* складывается из букв и цифр. Первая буква - *материал жилы*: *А* - алюминий. При отсутствии этой буквы жила медная; вторая буква: *П* - провод; *ПП* - провод плоский; третья и последующие буквы - *материал изоляции и защиты*: *Р* - резиновая; *В* – полихлорвиниловая; *П* - полиэтилен; *О* - изолированные жилы в оплетке из х/б пряжи; *Н* - негорючая резиновая оболочка; *Ф* - фальцованная (металлическая) оболочка; *Г* - с гибкой жилой; *Д* - провод двухжильный; *Т* - с несущим тросом. *Цифровая часть* например: 3 x 2,5 , где 3 - количество жил; 2,5 - сечение каждой мм<sup>2</sup>. В маркировке соединительных шнуров должна присутствовать буква *Ш*.

*Примеры некоторых марок установочных проводов*: *ПВ* (рисунок 5,а) – установочный провод с медной жилой, изолированной полихлорвиниловым пластиком; *АПВ* - установочный провод с алюминиевой жилой, изолированной полихлорвиниловым пластиком; *АПП* - установочный провод с алюминиевой жилой с полиэтиленовой изоляцией; *ППВ* (рисунок 5,б) - установочный провод ленточный (плоский) с медными жилами, уложенными параллельно и заключенными в полихлорвиниловую изоляцию; *АППВ* - то же, но с алюминиевыми жилами; *ПР* - установочный провод медный с резиновой изоляцией.

**Кабели.** Силовые кабели применяют для передачи и распределения электрической энергии. Токопроводящие жилы изготавливают из мягкой медной проволоки (марка ММ), а также из алюминиевой мягкой или твердой проволоки (марки АМ и АТ). В одножильных кабелях применяют жилы круглой формы, в двухжильных- круглой и сегментной, а в трех- и четырех- жильных кабелях- секторной.

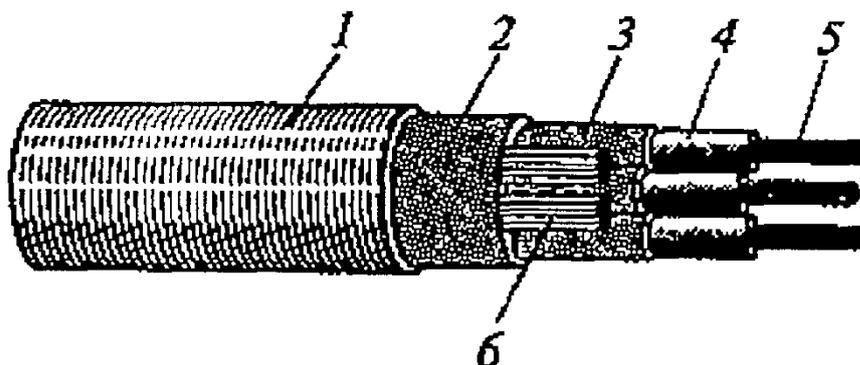


*a*- круглая неуплотненная жила; *б* – круглая уплотненная жила; *в* – секторная уплотненная жила; *г* – сегментная уплотненная жила

**Рисунок 8 – Многопроволочные жилы кабелей**

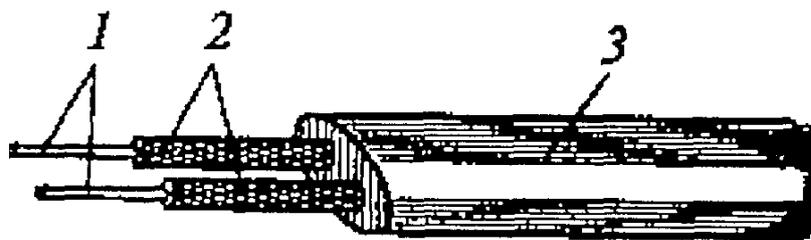
Для передачи и распределения электрической энергии в установках с напряжением до 500, 3000 и 6000 В переменного тока применяют кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией.

На напряжение 1, 3, 6, 20, 35 кВ и выше выпускают силовые кабели с бумажной пропитанной изоляцией.



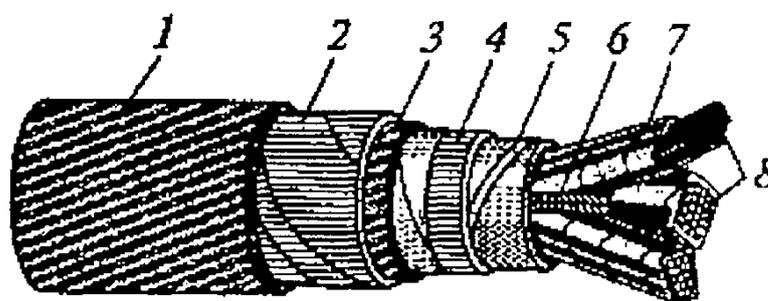
1 – свинцовая; 2 – поясная изоляция; 3 – покрытие (обмотка) из прорезиненной ленты;  
4 – изоляция из вулканизированной резины; 5 – медная многопроволочная жила;  
6 – междуфазное заполнение

**Рисунок 9 – Силовой кабель с резиновой изоляцией в свинцовой оболочке, небронированный (марка СРГ)**



1 - однопроволочные жилы; 2 – изоляция жил из вулканизированной резины;  
3 – оболочка из полихлорвинилового пластиката

**Рисунок 10 – Силовой кабель с резиновой изоляцией жил в оболочке из полихлорвинилового пластиката**



1 – верхний защитный покров из грубой пропитанной пряжи; 2 – броневой покров из стальных лент; 3 – защитный покров; 4 – свинцовая оболочка; 5 – поясная изоляция; 6 – междуфазное заполнение; 7 – бумажная пропитанная изоляция;  
8 – медные многопроволочные жилы

**Рисунок 11 – Силовой кабель с бумажной изоляцией жил в свинцовой оболочке, бронированный (марка СБ)**

### **3 Порядок выполнения работы**

3.1 Изучить справочный материал по расшифровке марок проводниковых изделий.

3.2 Расшифровать предложенные марки проводов.

### **4 Содержание отчета**

4.1 Название и цель работы.

4.2 Оформленное задание.

## **5 Контрольные вопросы**

- 5.1 Назвать виды изоляции обмоточных проводов.
- 5.2 Указать толщину эмалевой изоляции на обмоточных проводах.
- 5.3 Перечислить изоляцию монтажных и установочных проводов.
- 5.4 Описать конструкцию кабелей с резиновой изоляцией.
- 5.5 Описать конструкцию кабелей с бумажной изоляцией.
- 5.6 Назвать область применения обмоточных проводов.
- 5.7 Назвать область применения монтажных проводов.
- 5.8 Назвать область применения установочных проводов.

## Практическая работа №4

### Определение зависимости сопротивления полупроводников от температуры

#### 1 Цель работы:

- измерить сопротивление полупроводников;
- проанализировать зависимость сопротивления полупроводников от температуры.

#### 2 Теоретическая часть

Значение сопротивления полупроводников определяется концентрацией свободных носителей заряда и их подвижностью.

Подвижность носителей заряда  $\mu$  есть отношение средней установившейся скорости  $v$  направленного движения к напряженности электрического поля  $E$

$$\mu = \frac{v}{E} \quad (1)$$

В полупроводниках следует различать подвижность электронов  $\mu_n$  и подвижность дырок  $\mu_p$ . При наличии двух типов носителей заряда плотность тока

$$J = en_0\mu_n E + ep_0\mu_p E = (n_0\mu_n + p_0\mu_p)eE, \quad (2)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  – заряд электрона, Кл;

$n_0$  и  $p_0$  – равновесная концентрация электронов и дырок в полупроводнике соответственно,  $\text{м}^{-3}$ ;

$\mu_n$  и  $\mu_p$  – подвижность электронов и дырок соответственно,  $\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ .

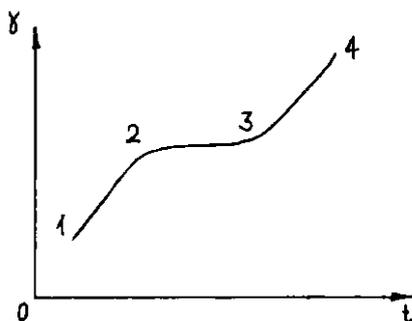
Удельная электрическая проводимость собственного полупроводника:

$$\gamma = en_0\mu_n + ep_0\mu_p = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) \quad (3)$$

В примесных полупроводниках одним из слагаемых в выражении можно пренебречь, т.к. подвижность и концентрация неосновных носителей заряда значительно меньше, чем основных.

Подвижность носителей заряда, определяется, прежде всего, их эффективной массой  $m$ , скоростью  $V$  и частотой столкновений с узлами и дефектами кристаллической решетки, в целом слабо зависит от температуры. Поэтому сопротивление при изменении температуры в основном определяется концентрацией носителей заряда.

При температуре, стремящейся к абсолютному нулю, все электроны связаны с атомами; в зоне проводимости электронов нет, проводимость равна нулю. При повышении температуры, некоторые электроны начнут переходить в зону проводимости. Прежде всего, это электроны атомов примеси, которым для перехода в зону проводимости необходимо намного меньше энергии. Следовательно, с ростом температуры концентрация носителей заряда и проводимость будут возрастать.



**Рисунок 1 – График зависимости проводимости полупроводника от температуры**

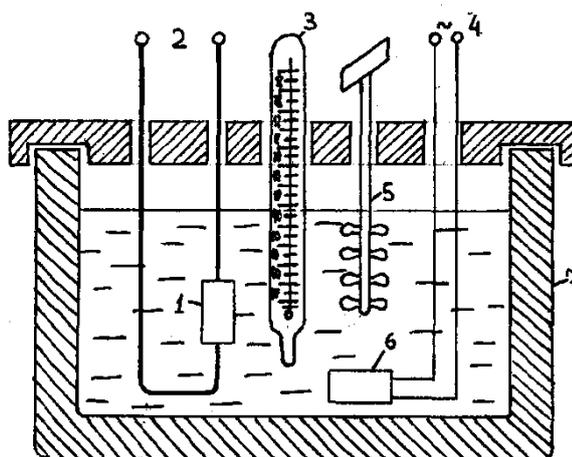
После некоторого повышения температуры произойдет истощение примеси, т.е. все валентные электроны примеси перейдут в зону проводимости, после чего проводимость будет оставаться постоянной до тех пор, пока температура не увеличится настолько, на сколько энергия собственных электронов превысит ширину запрещенной зоны. Тогда концентрация носителей зарядов начнет резко возрастать за счет собственных электронов, переходящих в зону проводимости (см. рисунок 1, участок 3-4).

При высоких температурах полупроводники по величине проводимости приближаются к проводникам.

Эту зависимость используют для создания полупроводниковых первичных преобразователей температур - терморезисторов. Для этой цели используют полупроводники, обладающие высоким значением  $T$  в сочетании с  $T_{Kp}$  (в основном оксиды металлов).

Исследование влияния температуры на свойства полупроводников основано на установлении зависимости сопротивления полупроводника от температуры. В

данной работе можно исследовать зависимость сопротивления терморезисторов от температуры. Терморезистор помещают в термостат жидкостной или суховоздушный. В качестве суховоздушного термостата можно использовать муфельную печь или проволочный резистор на керамическом трубчатом каркасе. Наиболее точные результаты измерений получают в жидкостном термостате, который представляет собой сосуд с жидкостью (трансформаторное масло, глицерин или другая изоляционная жидкость). Жидкость подогревают электрическим нагревательным элементом 6. Жидкость непрерывно перемешивают мешалкой 5 для обеспечения равномерной температуры. Температуру измеряют термометром 3 со шкалой 100...150°C. Величину сопротивления терморезистора измеряют двойным мостом 2 типа P239 (см. рисунок 2).



- 1- терморезистор; 2- контакты для подключения моста P239;  
3 - термометр; 4 - контакты для подключения сети; 5 - мешалка;  
6 - нагревательный элемент; 7 - термостат

**Рисунок 2 – Установка для измерения сопротивления терморезисторов**

### 3 Порядок выполнения работы

3.1 Установить в термостат исследуемый резистор.

3.2 Измерить температуру залитой жидкости, тем самым определив температуру исследуемого терморезистора.

3.3 Включить электрический нагреватель и непрерывно помешивать жидкость мешалкой.

3.4 Измерить сопротивление терморезистора двойным мостом для измерения малых сопротивлений через каждый интервал температур (5... 10°C).

3.5 Данные измерений занести в таблицу 1.

3.6 Построить график зависимости (см. рисунок 3), откладывая по оси абсцисс значения температуры от комнатной до конечной, а по оси ординат сопротивление терморезистора.

3.7 По данным графика определить значение  $R_0$  следующим образом: продлить полученную кривую до пересечения с осью  $R$ . Точка пересечения дает значение  $R_0$ .

3.8 Вычислить значение  $TK_p$  для различных участков ( $R_0-1$ ; 1-2; 2-3) кривой зависимости  $R$  от температуры по формуле

$$TK_p = \frac{R_t - R_{t0}}{R_{t0} \cdot \Delta t} \quad (4)$$

Если участки кривых линейны, то для участков:

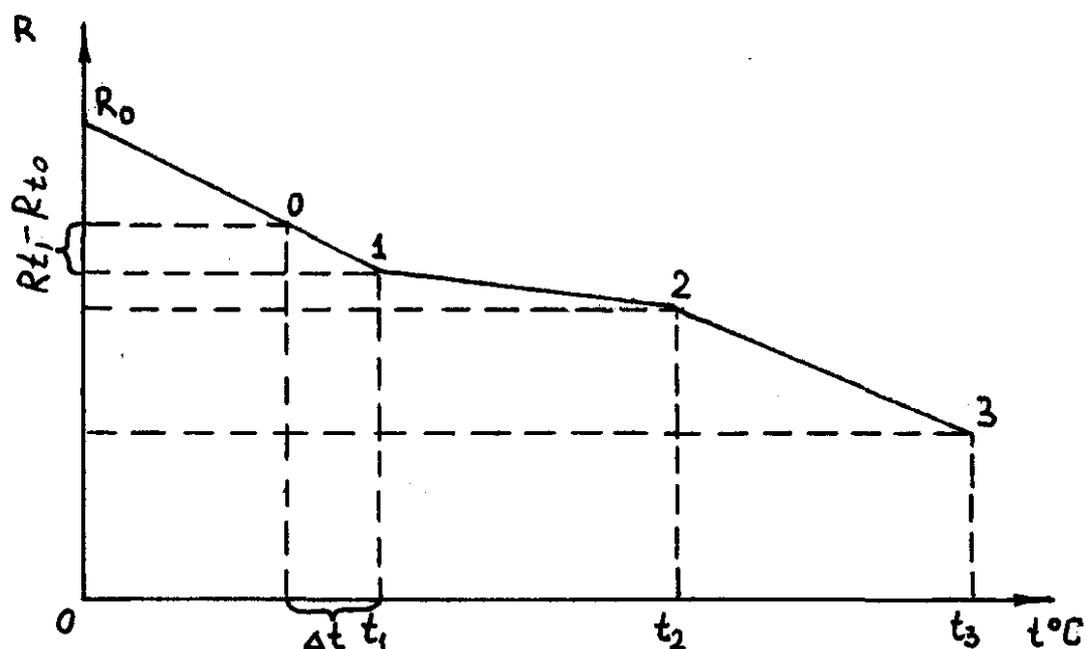
$$R_0-1: \quad TK_p = \frac{R_{t1} - R_0}{R_0 \cdot t_1}$$

$$1-2: \quad TK_p = \frac{R_{t2} - R_{t1}}{R_{t1} \cdot (t_2 - t_1)}$$

$$2-3: \quad TK_p = \frac{R_{t3} - R_{t2}}{R_{t2} \cdot (t_3 - t_2)}$$

**Таблица 1- Результаты вычислений**

Наименование испытуемого	Измеряются		Вычисляются	
	$t^{\circ}\text{C}$	$R_t, \text{Ом}$	$R_0, \text{Ом}$	$\text{TK}_p, \text{Ом}/^{\circ}\text{C}$
Si-диод				-



**Рисунок 3 – График зависимости сопротивления полупроводника от температуры**

#### 4 Содержание отчета

4.1 Цель работы.

4.2 Схема установки для снятия зависимости сопротивления полупроводников от температуры и ее описание.

4.3 График зависимости  $R_t = f(t)$  терморезистора.

4.4 Результаты вычислений, сведенные в таблицу.

## **5 Контрольные вопросы**

5.1 Назвать устройство для определения сопротивления полупроводников.

5.2 Дать определение подвижности носителей заряда.

5.3 Назвать устройство для определения подвижности носителей заряда.

5.4 Рассказать, почему в примесных полупроводниках можно пренебречь подвижностью дырок или электронов.

5.5 Описать изменение удельной электрической проводимости полупроводника с ростом температуры.

5.6 Охарактеризовать влияние температуры на подвижность зарядов в полупроводниках.

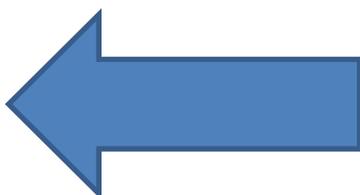
## Литература

- 1 Технология конструкционных материалов / В.Н.Ковалевский [и др.]. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998. – 270 с.
- 2 Филиков В. А. Электротехнические и конструкционные материалы / В. А. Филиков. - М.: Мастерство, 2000. – 276 с.
- 3 Лабораторные работы по металловедению и термической обработке металлов / А.И. Самохоцкий, М.Н. Кунявский. – М.: Машиностроение, 1981.- 160 с.
- 4 Бороздин И.В. Электроснабжение предприятий, практикум / И.В. Бороздин. - Мн.: Дизайн ПРО, 2000. – 230 с.
- 5 Серебряков А.С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2005. – 240 с.

## Самоконтроль знаний

### Вопросы для самоконтроля по теме: «Содержание дисциплины, цели ее изучения. Меры безопасности при работе в лаборатории»

- 1 Дайте понятие материаловедение.
- 2 Дайте определение понятия «свойство».
- 3 Перечислите разделы учебной дисциплины «Электротехнические материалы».
- 4 Дайте определение понятия «структура».
- 5 Назовите цель изучения учебной дисциплины «Электротехнические материалы».



## Контрольные вопросы к разделу: «Основы металловедения»

- 1 Изложите классификацию сплавов.
- 2 Определите, чем отличаются стали от чугунов.
- 3 Опишите структуру сплава.
- 4 Дайте определение металлического сплава.
- 5 Перечислите основные механические свойства конструкционных материалов.
- 6 Назовите марки сталей.
- 7 Дайте понятие термической обработки материалов.
- 8 Перечислите виды термической обработки материалов и укажите их назначение.
- 9 Дайте понятие химико-термической обработки сплавов.
- 10 Перечислите виды химико-термической обработки материалов и укажите их назначение.



## Задание для самопроверки

*Из предложенных вариантов ответов выберите правильный*

1. Материал, обладающий следующими свойствами: высокой тепло- и электропроводностью,  $\rho=0,017 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ , пластичностью и коррозионной стойкостью, отличной обрабатываемостью давлением в холодном и горячем состоянии, хорошей способностью к пайке и сварке, температура плавления  $1083^\circ \text{C}$ .

- 1 Алюминий
- 2 Медь
- 3 Серебро
- 4 Золото

2. Основной недостаток этого материала в том, что он активно окисляется, покрываясь тонкой пленкой окиси с большим электрическим сопротивлением. Такая пленка предохраняет его от коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта проводов.

- 1 Золото
- 2 Серебро
- 3 Медь
- 4 Алюминий

3. Сплав на основе меди, основным легирующим элементом в котором является цинк (до 45%) называется:

- 1 Бронза
- 2 Латунь
- 3 Алюминий ковочный сплав
- 4 Дуралюмин

4. Данный материал при комнатной температуре имеет самую высокую электропроводность среди всех известных металлов (удельное электрическое сопротивление  $0,016 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ ):

- 1 Серебро
- 2 Золото
- 3 Медь
- 4 Алюминий

5. Сплав меди с оловом, алюминием, бериллием, кремнием и другими элементами называется:

- 1 Дуралюмин
- 2 Латунь
- 3 Бронза
- 4 Высокопрочный сплав

6. Этот материал применяют для непосредственного нанесения на диэлектрики, в качестве электродов, в производстве керамических и слюдяных конденсаторов:

- 1 Золото
- 2 Никель

3 Серебро

4 Медь

7. Данные материалы для контактов используются в радиоаппаратуре, приборах автоматики авиационного и морского оборудования:

1 Серебро, кадмий

2 Платина, никель

3 Броза, латунь

4 Медь, золото

***ИЗ перечисленных марок материалов высокой проводимости выпишите:***

**1 вариант** – марки меди катодной;

**2 вариант** – марки алюминия и его сплавов;

**3 вариант** – марки деформируемой бронзы;

**4 вариант** – марки деформируемой латуни;

**5 вариант** – марки литейной бронзы;

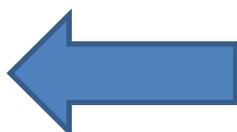
**6 вариант** – марки литейной латуни.

М00к, ЛАН59-3-2, БрКМц3-1, АК8, ЛО70-1, БрО5С25, ЛЦ16К4, М1к, БрАЖ9-4, ЛЦ30А3, БрАМц9, ЛАЖ60-1-1, БрА11Ж6Н6, М0к, ЛЦ40С, БрАМц9-2, А995, АМГ10.



## **Контрольные вопросы к разделу: «Проводниковые материалы»**

- 1     Перечислите механические свойства, которыми обладают проводниковые материалы.
- 2     Объясните, как связаны между собой удельное электрическое сопротивление и удельная электрическая проводимость.
- 3     Назовите материалы с высокой проводимостью и области их применения.
- 4     Раскройте понятие «сверхпроводник».
- 5     Опишите область применения сверхпроводников.
- 6     Назовите отличие сверхпроводников от криопроводников.
- 7     Назовите область применения криопроводников.
- 8     Перечислите хладагенты, используемые в сверхпроводниках и криопроводниках.
- 9     Назовите проводниковые материалы с большим удельным электрическим сопротивлением и области их применения.
- 10    Перечислите электроугольные материалы и изделия, назовите область их применения.



## Закрепление учебного материала

Выберите правильный вариант ответа

### **1 Назовите основной компонент резины**

- 1 Натуральный или синтетический каучук.
- 2 Сера.
- 3 Пластификатор.
- 4 Наполнитель.

### **2 Перечислите основные недостатки каучука**

- 1 Растворяется в воде, бензине и нефтяных маслах.
- 2 Высокая гигроскопичность, горючесть, растворяется в бензине и нефтяных маслах.
- 3 Горючесть и тугоплавкость.
- 4 Высокая гигроскопичность, низкая светостойкость.

### **3 Процесс добавления в разогретый каучук вулканизирующих веществ называется**

- 1 Стабилизация.
- 2 Вулканизация.
- 3 Улучшение.
- 4 Нормализация.

### **4 Резина с содержанием серы 1-4% называется**

- 1 Твердая.
- 2 Мягкая.
- 3 Пористая.
- 4 Жесткая.

### **5 Укажите резину, которая используется для изготовления изоляторов в распределительных щитах, вилках, розетках, телефонах и аккумуляторах**

- 1 Мягкая.
- 2 Твердая.
- 3 Жесткая.
- 4 Термостойкая.

### **6 Укажите синтетические каучуки, применяемые в электротехнике**

- 1 Бутадиеновый, бутадиенстирольный, бутилкаучук.
- 2 Хлорированный, изопреновый, бутилкаучук.
- 3 Изобутиленовый, бутадиеновый.
- 4 Полихлоропреновый, хлорированный.

### **7 В качестве наполнителей для резин используют**

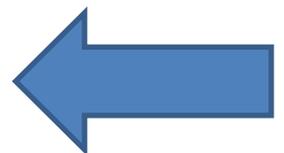
- 1 Сажа, мел, тальк.
- 2 Ткани, волокна.
- 3 Бумага, древесная мука.
- 4 Песок, картон.

### **8 В качестве мягчителей или пластификаторов в резину добавляют**

- 1 Синтетический каучук.
- 2 Смолу и воск.
- 3 Вазелин, стеарин, канифоль.
- 4 Воск и вазелин.

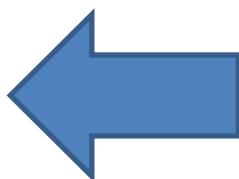
### **9 Эбонит, эскапон, асбодин, хлоркаучук, изомеризованный каучук являются**

- 1 Пластмассами на основе каучука.
- 2 Мягкими резинами.
- 3 Пластификаторами.
- 4 Стабилизаторами.



## Контрольные вопросы к разделу: «Диэлектрики»

- 1 Раскройте сущность процесса поляризации. Назовите виды поляризации.
- 2 Какие факторы влияют на величину объемного и поверхностного сопротивления?
- 3 Дайте определение электрической прочности диэлектрика.
- 4 Опишите механизм развития электрического пробоя
- 5 Раскройте понятие диэлектрических потерь.
- 6 Перечислите основные свойства диэлектриков. Назовите классы диэлектриков по термостойкости.
- 7 Охарактеризуйте основные газовые и жидкие диэлектрики.
- 8 Изложите основные свойства и способы получения полимеров.
- 9 Поясните, какие материалы называют термопластичными и термореактивными.
- 10 Охарактеризуйте пленочные материалы и назовите область их применения. Перечислите разновидности пленок.
- 11 Опишите лаки, эмали, компаунды, область их применения.
- 12 Изложите способ получения и область применения волокнистых материалов.
- 13 Назовите основные составляющие пластмасс. Поясните, что называют пластмассами, и приведите классификацию пластмасс.
- 14 Перечислите основные разновидности слоистых пластиков. Назовите область их применения.
- 15 Перечислите основные материалы на основе каучуков. Охарактеризуйте их, назовите область применения.
- 16 Назовите отличительные свойства твердых диэлектриков.
- 17 Перечислите разновидности миканитов, назовите область их применения.
- 18 Опишите процесс получения материалов на основе слюды. Дайте определение слюдопластам.
- 19 Опишите процесс получения керамических материалов. Перечислите основные керамические материалы и назовите область их применения.
- 20 Изложите разновидности стекол. Охарактеризуйте изоляционные материалы на основе стекла, назовите область их применения.



## Вопросы по теме: «Физические процессы в полупроводниках»

**1 Укажите, какими носителями электрического заряда создается ток в полупроводниках?**

Верный ответ: Электронами и дырками.

**2 Назовите тип проводимости полупроводников с акцепторной примесью.**

Верный ответ: В основном дырочной.

**3 Назовите типы проводимости, которыми обладают чистые полупроводники.**

Верный ответ: Электронная и дырочная.

**4 Назовите тип проводимости полупроводников с донорной примесью.**

Верный ответ: В основном электронной.

**5 Укажите, элемент какой группы следует ввести в полупроводник, относящийся к IV группе, чтобы получить в нем проводимость n-типа?**

Верный ответ: V.

**6 Укажите, элемент какой группы следует ввести в полупроводник, относящийся к IV группе, чтобы получить проводимость p-типа?**

Верный ответ: III.

**7 Добавление элемента V группы привело к возникновению проводимости n-типа. Укажите, к какой группе относится полупроводник?**

Верный ответ: IV.

**8 Назовите носители заряда, которые являются основными в полупроводниках p-типа?**

Верный ответ: Дырки.

**9 В полупроводнике ток, переносимый электронами -  $I_{э}$ , и ток, переносимый дырками -  $I_{д}$ . Если полупроводник обладает собственной проводимостью, то какое соотношение токов будет верным?**

Верный ответ:  $I_{э} = I_{д}$

**10 Если полупроводник обладает проводимостью p-типа, то какое соотношение токов будет верным?**

Верный ответ:  $I_{э} < I_{д}$

**11 Назовите простые полупроводниковые материалы.**

Верный ответ: германий, кремний, селен, теллур, бор, углерод, фосфор, сера, сурьма, мышьяк, серое олово, йод.

**12 Укажите, какая энергия определяется шириной запретной зоны n/p.**

Верный ответ: энергия активации.

**13 Назовите процесс перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости.**

Верный ответ: генерация.

**14 Назовите процесс перехода электронов и дырок из зоны проводимости в валентную зону.**

Верный ответ: регенерация.

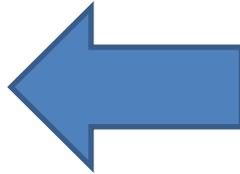
**15 Укажите, как изменится проводимость полупроводника при повышении температуры.**

Верный ответ: увеличится.



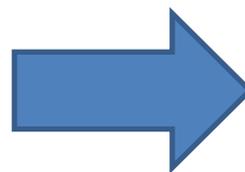
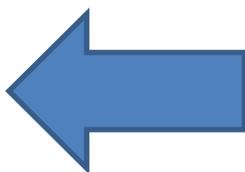
## Контрольные вопросы к разделу: «Полупроводники»

- 1 Определите материалы, относящиеся к полупроводниковым.
- 2 Опишите, каким образом изменяется удельная проводимость полупроводников с увеличением их температуры.
- 3 Раскройте понятие «дырка» в полупроводнике.
- 4 Назовите основное свойство *p-n*-перехода.
- 5 Перечислите основные полупроводниковые материалы, применяемые



## Контрольные вопросы к разделу: «Магнитные материалы»

- 1 Опишите, как создается магнитное поле.
- 2 Перечислите основные величины (параметры), характеризующие магнитное поле
- 3 Опишите намагничивание веществ.
- 4 Назовите основные свойства магнитных материалов.
- 5 Изложите классификацию магнитных материалов.
- 6 Назовите магнитомягкие материалы и область их применения.
- 7 Назовите магнитотвердые материалы и область их применения.
- 8 Дайте определение ферритам, назовите их виды.



## Итоговый тест по учебной дисциплине: «Электротехнические материалы»

1 Укажите материалы высокой проводимости.

- 1) константан 2) миканит 3) серебро 4) золото

2 Укажите марку алюминия, которая обладает лучшей электропроводностью

- 1) А999 2) А99 3) А95 4) А995

3 Выберите деформируемые латуни.

- 1) Л63 2) ЛЦ30А1 3) ЛС59-1 4) МЛ5

4 Выберите материалы высокого электрического сопротивления.

- 1) манганин 2) нихром 3) антрацит 4) фехраль

5 Укажите процесс, предшествующий пробойю газа.

- 1) поляризация 2) ударная ионизация 3) инжекция 4) рекомбинация

6 Укажите соединения, являющиеся основой пластических масс.

- 1) полимеры 2) мономеры 3) изотропы 4) аллотропы

7 Укажите резину, получаемую при добавлении в каучук 30-35% серы.

- 1) твердую 2) мягкую 3) морозостойкую 4) теплостойкую

8 Назовите основное отличие лаков от компаундов.

- 1) наличие растворителя 2) отсутствие растворителя  
3) наличие примесей 4) отсутствие примесей

9 Выберите волокнистые изоляционные материалы.

- 1) дерево 2) резина 3) фибра 4) микрофолий

10 Укажите полупроводниковые материалы.

- 1) кремний 2) алюминий 3) свинец 4) германий

11 Укажите название сплава железа с углеродом с содержанием углерода до 2,14%.

- 1) сталь 2) чугун 3) латунь 4) нихром

12 Выберите синтетические жидкости.

- 1) конденсаторное масло 2) совтол 3) совол 4) автол

13 Укажите, каким процессом является пробой твердых диэлектриков.

- 1) электрохимический процесс 2) механический процесс  
3) электрический процесс 4) тепловой процесс

14 Укажите структуру термопластичных пластмасс.

- 1) *линейная* 2) *разветвленная* 3) *пространственная* 4) *сетчатая*

15 Укажите маркировки проводов с медной токоведущей жилой.

- 1) *ПР* 2) *АППВ* 3) *ППВ* 4) *АПБД*

16 Выберите марку меди, имеющей меньшую проводимость, но большую механическую прочность.

- 1) *ММ* 2) *МТ* 3) *М00* 4) *М0*

17 Выберите марку литейной бронзы.

- 1) *МЛ8* 2) *БрА9Мц2* 3) *БрАМц10-2* 4) *В96*

18 Укажите, с какой целью вводится канифоль в кабельное масло.

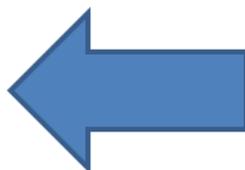
- 1) *с целью уменьшения вязкости* 2) *с целью повышения вязкости*  
3) *с целью улучшения изоляции* 4) *с целью снижения изоляции*

19 Укажите сырьё для получения натурального каучука.

- 1) *резина* 2) *сок тропических растений* 3) *полимеры* 4) *мономеры*

20 Укажите минеральные диэлектрики.

- 1) *манганин* 2) *миканит* 3) *нихром* 4) *флогопит*



## Вопросы обязательной контрольной работы №1

- 1 Дайте определение стали. Приведите классификацию по назначению и химическому составу. Изложите принцип маркировки сталей.
- 2 Опишите состав, структуру, свойства, технологию получения и область применения серого, высокопрочного и ковкого чугуна.
- 3 Дайте определение отжига стали, опишите технологию проведения, цель. Дайте определение видов отжига 1-го рода, раскройте особенность их проведения, цель.
- 4 Дайте определение отжига стали, опишите технологию проведения, цель. Дайте определение видов отжига 2-го рода, раскройте особенность их проведения, цель.
- 5 Дайте определение нормализации, опишите технологию проведения, цель.
- 6 Дайте определение закалки стали, раскройте технологию проведения, цель. Перечислите виды объемной закалки, укажите особенности их проведения.
- 7 Дайте определение закалки стали, раскройте технологию проведения, цель. Перечислите виды поверхностной закалки. Опишите технологию проведения, цель.
- 8 Дайте определение отпуска стали. Перечислите виды отпуска, раскройте назначение.
- 9 Дайте определение цементации стали, раскройте назначение, перечислите виды.
- 10 Дайте определение азотирования стали, раскройте сущность, назначение.
- 11 Дайте определение цианирования стали, раскройте сущность, назначение, перечислите виды и технологию проведения.
- 12 Дайте определение нитроцементации стали, раскройте сущность, назначение, перечислите виды и опишите технологию проведения.
- 13 Дайте понятие меди и алюминия. Укажите назначения и принцип маркировки.
- 14 Перечислите сплавы на основе меди. Дайте понятие латуни, укажите ее состав, классификацию, принцип маркировки, применение.
- 15 Перечислите сплавы на основе меди. Дайте понятие бронзы, укажите ее состав, классификацию, принцип маркировки, применение.
- 16 Опишите основные свойства, характеристики и применение проводниковых материалов с высоким сопротивлением.
- 17 Опишите основные свойства, характеристики и применение сверхпроводниковых материалов.
- 18 Перечислите неметаллические проводниковые материалы и опишите их состав и применение.



## Вопросы обязательной контрольной работы № 2

1 Раскройте сущность пробоя газообразных диэлектриков. Дайте понятие вольт-амперной характеристики газов, указав ее изображение и описав все ее области. Укажите зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами и площадью поверхности электродов.

2 Раскройте сущность пробоя жидких диэлектриков. Укажите влияние степени чистоты жидкости на ее электрическую прочность.

3 Раскройте сущность пробоя твердых диэлектриков. Охарактеризуйте виды пробоя.

4 Дайте классификацию жидких диэлектриков. Укажите основные свойства нефтяных масел, их разновидности и применение.

5 Дайте классификацию жидких диэлектриков. Укажите основные свойства синтетических жидкостей, их разновидности и применение.

6 Дайте понятие полимеров и пластмасс. Виды полимеров. Термопластичные и термореактивные пластмассы. Укажите их состав, свойства, применение.

7 Дайте понятие каучука. Укажите виды каучука, его получение. Раскройте сущность процесса вулканизации. Дайте понятие резины, укажите ее состав, основные свойства, применение.

8 Дайте понятие стекла. Укажите его состав, основные свойства, классификацию по применению.

9 Дайте понятие слюды и материалов на ее основе. Перечислите их разновидности, укажите применение.

10 Назовите маркировку обмоточных проводов, укажите их применение.

11 Назовите маркировку монтажных проводов, укажите их применение.

12 Назовите маркировку установочных проводов, укажите их применение.



**Перечень учебных изданий и информационно-аналитических материалов, рекомендуемых для изучения учебной дисциплины  
«Электротехнические материалы»**

- 1 Феликов В. А. Электротехнические и конструкционные материалы, – М.: Мастерство, 2000.
- 2 Журавлева Л. В. Электроматериаловедение, - М.: ИРПО, 2000.
- 3 Комаров О. С. Технология конструкционных материалов, - Мн.: Дизайн ПРО, 2005.
- 4 Шишков М.М. Марочник сталей и сплавов ведущих промышленных стран мира: Справочник, 2005.
- 5 Материаловедение / Под. общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
- 6 Калачев Б.А., Ливанов Б.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. – М.: МИСИС, 2005.
- 7 Материаловедение и технология материалов: Учебное пособие / Под ред. А.И. Батышева, А.А. Смолькина.- М.: ИНФРА-М, 2011. — 288 с.
- 8 Богодухов С.И. Синюхин А.В. Козик Е.С. Курс материаловедения в вопросах и ответах: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2010. – 352 с.
- 9 1. Агамиров Л.В., Алимов М.А., Бабичев Л.П., Бакиров М.Б. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. Том II-1. Под ред. Мамаевой Е.И. – М.: Машиностроение, 2010. – 852 с.
- 10 Основы инновационного материаловедения: Монография / О.С. Сироткин. — М.: ИНФРА-М, 2011. — 158 с
- 11 Материаловедение: Учебное пособие / В.А. Стуканов. — М.: ИД ФОРУМ: НИЦ Инфра-М, 2012. — 368 с.



## Перечень рекомендуемых электронных образовательных ресурсов, сетевых ресурсов

- 1 <http://electricalschool.info/spravochnik/material/>
- 2 Edu.ru: материаловедение
- 3 <http://www.samara-vgavt.ru/>
- 4 <http://cifra.studentmiv.ru/ekm-prezentatsiya-1/>
- 5 [http://labstand.ru/catalog/elektrotehnika\\_elektronika\\_energetika/prezentatsii-i-plakaty-elektrotekhnicheskie-materialy](http://labstand.ru/catalog/elektrotehnika_elektronika_energetika/prezentatsii-i-plakaty-elektrotekhnicheskie-materialy)
- 6 [http://supermetalloved.narod.ru/lectures\\_materialoved.htm](http://supermetalloved.narod.ru/lectures_materialoved.htm)
- 7 <http://mtvpo.vstu.by/mved.html>



**Анкета по учебной дисциплине  
«Электротехнические материалы»**

**По теме «Содержание дисциплины, цели ее изучения. Меры безопасности при работе в лаборатории»**

1. Данная тема была мне

- а) интересна;*
- б) не интересна.*

2. Материал лекции при изучении данной темы мне был

- а) понятен;*
- б) не понятен.*

3. В полном ли объеме материал лекции мной был усвоен?

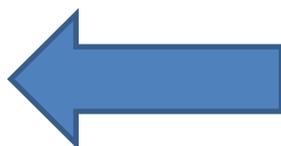
- а) весь;*
- б) частично (мне не понятно было);*  
*-содержание и сущность учебной дисциплины;*  
*-цели учебной дисциплины*  
*-задачи учебной дисциплины;*
- в) ничего не понятно.*

4. Считаю, что умения, полученные при изучении данной темы понадобятся мне

- а) в курсовом/дипломном проекте;*
- б) в трудовой деятельности;*
- в) для общего развития;*
- г) эти знания мне никогда не пригодятся;*
- д) другое (укажите).*

5. При изучении учебного материала темы мое настроение стало

- а) хуже;*
- б) лучше.*



## Анкета по учебной дисциплине «Электротехнические материалы»

1. Данная тема была мне
  - а) интересна;*
  - б) не интересна.*
  
2. Материал лекции при изучении данной темы мне был
  - а) понятен;*
  - б) не понятен.*
  
3. В полном ли объеме материал лекции мной был усвоен?
  - а) весь;*
  - б) частично;*
  - в) ничего не понятно.*
  
4. Считаю, что умения, полученные при изучении данной темы, понадобятся мне
  - а) в курсовом/дипломном проекте;*
  - б) в трудовой деятельности;*
  - в) для общего развития;*
  - г) эти знания мне никогда не пригодятся;*
  - д) другое (укажите).*
  
5. При изучении учебного материала темы мое настроение стало
  - а) хуже;*
  - б) лучше.*

