

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ (ЧАСТЬ 2)

сборник учебно-методических материалов

для направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника»

Благовещенск, 2017

ББК 65.304.14я73
Э40

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
энергетического факультета
Амурского государственного
университета*

Составитель: Бодруг Н.С., Соловьев В.В.

Электротехническое и конструкционное материаловедение (часть 2): сборник учебно-методических материалов для направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника». – Благовещенск: Амурский гос. Ун-т, 2017.- 24 с.

©Амурский государственный университет, 2017
© Кафедра энергетики, 2017
© Бодруг Н.С., составитель
© Соловьев В.В. составитель

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Краткое изложение лекционного материала	5
2. Методические рекомендации к лабораторным работам	20
3. Методические указания для самостоятельной работы студентов	21
Список литературы	23

ВВЕДЕНИЕ

Сборник учебно-методических материалов предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовке «Электроэнергетика и электротехника», при освоении дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение (часть 2)».

Целью освоения дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение (часть 2)» является формирование у студентов знаний о электротехнических материалах и процессах, происходящих в них при эксплуатации в электрических полях.

Задачи дисциплины: изучение студентами основных характеристик материалов применяемых в электроэнергетике и изменения свойств электротехнических материалов в процессе эксплуатации; повышение эффективности производства и качества готовой продукции, уменьшение ее материалоемкости и энергоемкости – важнейшие задачи нашего времени. Для решения таких задач инженер-электрик должен знать процессы, протекающие в электротехнических материалах, основные типы и свойства конструкционных и электротехнических материалов, применяемых в электроэнергетике; характеристики материалов, уметь грамотно выбрать материал для той или иной цели. Также инженер-электрик должен иметь навыки расчета параметров и выбора электротехнических материалов для конкретных условий их применения.

Дисциплина «Экономика и управление в электроэнергетике» предусмотрена учебным планом. Включает в себя пять разделов:

Раздел 1. Общие сведения о свойствах материалов в электрическом поле.

Раздел 2. Диэлектрические материалы.

Раздел 3 Полупроводниковые материалы.

Раздел 4 Проводниковые материалы.

Раздел 5 Магнитные материалы.

Сборник учебно-методических материалов состоит из разделов:

1. Краткое изложение лекционного материала

2. Методические рекомендации к лабораторным работам.

3. Методические указания для самостоятельной работы студентов

1. КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ ЛЕКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

В ходе лекционных занятий вести конспектирование учебного материала. Обращать внимание на категории, формулировки, раскрывающие содержание тех или иных явлений и процессов, научные выводы и практические рекомендации, положительный опыт в ораторском искусстве. Желательно оставить в рабочих конспектах поля, на которых делать пометки из рекомендованной литературы, дополняющие материал прослушанной лекции, а также подчеркивающие особую важность тех или иных теоретических положений. Задавать преподавателю уточняющие вопросы с целью уяснения теоретических положений, разрешения спорных ситуаций.

Краткий конспект лекций

Раздел 1. Общие сведения о свойствах материалов в электрическом поле.

Тема 1. Общие сведения о строении вещества. Классификация веществ по электрическим свойствам.

Диэлектрические материалы являются основными видами электротехнических материалов, с которыми придется встретиться на практике будущим инженерам-электрикам. Эти материалы служат в качестве изоляции токоведущих частей энергооборудования. Они включают в себя такие разнообразные типы электрической изоляции как: воздух в линиях электропередач и электроаппаратах; нефтяные и искусственные масла в трансформаторах, кабелях и конденсаторах; твердые диэлектрики в изоляторах воздушных линий (ВЛ), конденсаторах, установочных изделиях и корпусах аппаратов и т.п. При этом физические условия, в которых должна находиться и функционировать изоляция, накладывают определенные требования на физико-химические параметры материала, ограничивая возможные вид, тип используемых электротехнических материалов. Кроме того, при конструировании даже простейших изделий, предназначенных для работы в электрическом поле, необходимо четко представлять, какие процессы происходят в материале, как влияет тот, или иной материал на работу других частей устройства, в том числе за счет перераспределения электрического поля. Здесь необходимо учитывать разноплановые характеристики материала - механические характеристики: плотность и вес материала, прочность на сжатие, разрыв или изгиб; теплофизические характеристики: теплопроводность, теплоемкость, нагревостойкость, теплостойкость и горючесть; электрофизические характеристики: диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность, трекинговая стойкость; физико-химические характеристики: химическая стойкость, влагопроницаемость и т.д. Зачастую всем требованиям невозможно удовлетворить, поэтому необходимо ясное понимание всего комплекса процессов, происходящих при функционировании устройств, чтобы оценить значимость каждого из требований и понять, какие из них, в каждом конкретном случае, являются главными, а какие - второстепенными и ими можно пренебречь.

Целью настоящего курса является изучение основных процессов, происходящих в диэлектрических материалах под действием электрического поля, ознакомление с основными материалами, применяемыми в электроэнергетике, их основными свойствами.

Электротехническое материаловедение – это раздел материаловедения, который занимается материалами для электротехники и энергетики, т.е. материалами, обладающими специфическими свойствами, необходимыми для конструирования, производства и эксплуатации электротехнического оборудования. Ряд материалов традиционны для любого из разделов материаловедения, в первую очередь, это конструкционные материалы. Основные материалы, рассматриваемые здесь специфичны именно для электротехнического раздела материаловедения, это в первую очередь диэлектрические материалы, затем проводниковые материалы, магнитные материалы, материалы для резисторов. В основном эти темы и будут рассматриваться в курсе электротехнического материаловедения. Для успешного освоения курса не требуется особых знаний. Математика в школьном объеме, физика в объеме курса общей физики. Впрочем, несколько лекций для освежения необходимых физических понятий все-таки потребуются.

Тема 2. Основные электрические, тепловые, физико-химические характеристики веществ.

Теплофизические характеристики материалов очень важны для практики. Действительно, материалы в различных энергетических устройствах и установках работают в различных температурных условиях.

Теплостойкость - температура, при которой происходит ухудшение характеристик при кратковременном ее достижении.

Термостойкость - температура, при которой происходят химические изменения материала.

Морозостойкость - способность работать при пониженных температурах (этот параметр важен для резин).

Горючесть - способность к воспламенению, поддержанию огня, самовоспламенению это различные степени горючести.

Точка плавления - температура, при которой происходит переход из твердого состояния в жидкое. Не обладает точкой плавления жидкий гелий, он даже при нуле Кельвина остается жидким. К наиболее тугоплавким можно отнести вольфрам - 3387 С, молибден 2622 С, рений - 3180 С, тантал – 3000 С. Есть тугоплавкие вещества среди керамик: карбид гафния и карбид тантала имеют точки плавления 2880 С., нитрид и карбид титана - более 3000 С.

Точка кипения - температура, при которой происходит переход из жидкого состояния в паробразное.

Есть температуры специфичные для электротехнических материалов. Например, для сегнетоэлектриков вводят т.н. точку Кюри.

Теплоемкость - это способность накапливать тепловую энергию в материале при его нагревании.

Теплопроводность определяет способность передать тепловую энергию через материал.

Изменения размеров и формы тела под действием нагрузок называются деформациями. Их легко проиллюстрировать на примере стержня.

Предел упругости - напряжение, при котором остаточная деформация не превышает 0.05%.

Предел текучести - напряжение, при котором происходит удлинение до 0.2% без увеличения нагрузки.

Предел прочности или временное сопротивление-напряжение, соответствующее максимальной нагрузке.

Пластическая деформация- часть деформации, которая остается после снятия нагрузки.

Твердость материала. Свойство материала противостоять деформации при локальном контакте называется твердостью. Существует множество шкал твердости.

Тема 3. Поляризация диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость газов, жидкостей и твердых тел.

Поляризацией называется состояние вещества, при котором элементарный объем диэлектрика приобретает электрический момент.

Возникновение (индуцирование) электрического момента в единице объема образца диэлектрического материала или участка электрической изоляции может происходить под действием электрического поля, механических напряжений или спонтанно (самопроизвольно).

Поляризованность P - определяет интенсивность поляризации диэлектрика и является количественной характеристикой диэлектрика.

Средний электрический момент, приходящийся на одну молекулу диэлектрика, дипольный момент молекулы.



а - напряженность электрического поля $E=0$; центры положительных и отрицательных зарядов совпадают.
б - приложено поле , напряженностью E .

Для характеристики способности диэлектрических материалов к поляризации в технике используют безразмерный параметр - относительную диэлектрическую проницаемость ϵ .

Основные виды поляризации в некоторых газообразных, жидких и твердых диэлектриках

материал	диэлектрическая проницаемость	полярность	виды поляризации
ГАЗЫ			
Воздух	1.00058	неполярный	электронная
Элегаз	1.00191	неполярный	электронная
ЖИДКОСТИ			
Кабельное масло МН-4	2.2	неполярный	электронная
Бензол	2.218	Неполярный	электронная
Трихлордифенил	5.9	полярный	электронная, дипольная
ТВЕРДЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ			
Парафин	1.9 - 2.2	неполярный	электронная
Полистирол	2.2 - 2.6	неполярный	электронная
Органическое стекло	4.0	полярное	электронная, дипольно-релаксационная
Фенолоформальдегидная смола	4.5	полярная	электронная, дипольно-релаксационная
Сегнетокерамика ВК-3	20000	полярная	электронная, ионная, спонтанная

Тема 4. Основные понятия об электропроводности диэлектриков.

Электропроводность газов, жидкостей и твердых тел.

Способность любых материалов проводить электрический ток определяется наличием зарядов в нем и возможностью их движения.

Подвижностью носителей заряда называется коэффициент пропорциональности между скоростью носителей заряда V_i и напряженностью поля E . Размерность подвижности - $m^2/(V \cdot c)$. Фактически подвижность численно равна скорости носителей заряда при напряженности поля 1 В/м.

Типы носителей заряда и их подвижность могут быть разными в различных средах. Подвижность носителей также сильно зависит от среды.

Энергия, которую надо сообщить электрону, находящемуся в основном состоянии, для отрыва от "материнского" иона называется энергией ионизации W .

Для металлов зоны перекрываются и электроны могут свободно перемещаться по образцу. Ширина запрещенной зоны равна нулю. Поэтому подвижные электроны всегда существуют в металлах в большом количестве.

В диэлектриках и полупроводниках, зонная структура такова, что существует запрещенная зона определенной ширины.

Жидкости. Современные представления о проводимости диэлектрических жидкостей состоят в следующем. Здесь носителями заряда являются ионы, т.к. электроны легко прилипают к нейтральным молекулам жидкости и не могут существовать в свободном состоянии. Кроме того, в жидкости заряды могут переноситься молионами, частицами и даже пузырьками. Ионизация

облегчена по сравнению с газами за счет большей диэлектрической проницаемости, ибо высота потенциального барьера (энергия ионизации) понижена во много раз. Это можно показать, рассматривая кулоновскую энергию взаимодействия двух зарядов $+e$ и $-e$, разошедшихся на расстояние g . Рекомбинация носителей заряда в жидкости затруднена, поскольку заряды взаимодействуют со средой, а именно, легко окружаются соседними молекулами, ориентированными соответствующими концами постоянных или индуцированных диполей к ионам.

Электропроводность газов, жидкостей и твердых тел.

Способность любых материалов проводить электрический ток определяется наличием зарядов в нем и возможностью их движения.

В соответствии с выведенными ранее выражениями рассмотрим особенности электропроводности при различных агрегатных состояниях.

Твердые диэлектрики. Здесь носителями заряда могут быть электроны и дырки. Рекомбинация носителей заряда в твердых телах не затруднена. Ясно, что по этому механизму проводимость твердых диэлектриков практически отсутствует, т.к. заметное изменение концентрации возможно лишь за времена, сопоставимые с геологическими периодами. Поскольку основную роль в выражениях играет экспоненциальный множитель, то лишь наличие примесей с энергетическими уровнями внутри запрещенной зоны, вблизи от края зоны, дает возможность проводимости твердых тел.

Газы. Рекомбинация носителей не затруднена, т.к. заряды разного знака могут беспрепятственно сближаться на близкое расстояние. На самом деле фактором, определяющим проводимость газов, является космическое излучение.

Жидкости. Современные представления о проводимости диэлектрических жидкостей состоят в следующем. Здесь носителями заряда являются ионы, т.к. электроны легко прилипают к нейтральным молекулам жидкости и не могут существовать в свободном состоянии. Кроме того, в жидкости заряды могут переноситься молионами, макрочастицами и даже пузырьками. Ионизация облегчена по сравнению с газами за счет большей диэлектрической проницаемости. Рекомбинация носителей заряда в жидкости затруднена, поскольку заряды легко окружаются соседними молекулами, ориентированными соответствующими концами постоянных или индуцированных диполей к ионам.

Что касается подвижности, то она определяется движением жидкости. При этом подвижности любых ионов близки друг другу.

Таким образом, в жидкостях обычно проводимость больше, чем в газах и твердых телах за счет облегченной ионизации и затрудненной рекомбинации.

С другой стороны, отсутствие формы жидкости, легкость очистки дают возможность радикального уменьшения электропроводности, что невозможно сделать с твердыми диэлектриками.

Раздел 2. Диэлектрические материалы.

Тема 5. Общие сведения о пробое диэлектриков. Пробой в газах, жидкостях и твердых телах.

Изоляционный промежуток - устройство, или элемент устройства, содержащий электропроводные элементы с диэлектриком между ними.

Электрический пробой - образование под действием высокого напряжения электропроводного плазменного канала в диэлектрике между электродами изоляционного промежутка.

При этом диэлектрик перестает быть диэлектриком и напряжение между электродами уменьшается до нуля за счет разряда заряженной емкости диэлектрика через образовавшийся канал. После отключения изоляционного промежутка с жидким или газообразным диэлектриком от источника напряжения канал разряда в жидкости и в газе исчезает и после прошествия некоторого времени напряжение можно снова подавать на устройство. Электрическая изоляция этих материалов восстанавливается. В твердых диэлектриках канал разряда разрушает сам материал и не про-

исходит самовосстановления. Напряжение на устройстве практически невозможно подать после единичного пробоя.

Напряжение, при котором происходит электрический пробой промежутка называется электрической прочностью промежутка.

Электрической прочностью материала называется напряженность, при которой происходит пробой материала.

Ударная ионизация - это физическое явление увеличения числа электронов и ионов в промежутке за счет столкновения электронов с повышенной энергией с нейтральными молекулами.

Пробой жидкостей.

Молекулы жидкости расположены столь близко друг другу, столь сильно взаимодействуют друг с другом, что электрон не может свободно двигаться и ускоряться в электрическом поле. В жидкости, кроме особо чистых сжиженных благородных газов, свободные электроны не могут существовать. При попадании свободных электронов в жидкость они сначала сольватируются, затем прилипают к нейтральным молекулам, образуя тем самым, отрицательные ионы. Поэтому понятие длины свободного пробега для жидкости невозможно ввести. Грубая оценка принципиальных ограничений электрической прочности может быть сделана из следующих соображений. Считаем, что электрон может ускоряться на протяжении межмолекулярного расстояния.

Электрический пробой твердых диэлектриков.

Исследования пробоя твердых диэлектриков по своему объему значительно превышают исследования всех других видов диэлектриков, что обусловлено более широким применением твердых диэлектриков. Это, в свою очередь, обусловлено их высокими электрическими характеристиками в сочетании с удовлетворительными механическими и теплофизическими характеристиками. Механизм пробоя значительно отличается для разных диэлектриков и даже для одного и того же диэлектрика при разных условиях.

Тема 6. Методы измерения диэлектрических потерь. Диэлектрические потери в газах, жидкостях и твердых телах.

Термин возник из-за того, что в идеальном диэлектрике энергия может только накапливаться, но не теряться. В реальном диэлектрике часть энергии уходит из электрической цепи, превращаясь в другой вид энергии, а именно в теплоту. Есть два основных канала превращения энергии в тепло: потери за счет проводимости и поляризационные потери. Потери за счет проводимости при постоянном напряжении определим из известных выражений. Из закона Ома можно определить мощность, поглощенную веществом $P = U^2/R_{\text{изол}}$.

Для случая переменного напряжения появляются дополнительные потери, связанные с поляризацией и токами абсорбции.

Следует отметить, что потери зависят от температуры, частоты, влажности, напряженности поля. Частотная зависимость потерь является характеристикой материала и определяется для каждого диэлектрического материала не только свойствами молекул материала, но и наличием и составом примесей. Как правило, потери имеют максимум при одной или нескольких частотах, в зависимости от типа молекул. Положение максимумов характеризуется собственными частотами установления поляризации. Они могут быть связаны с поворотом полярных молекул в жидком диэлектрике или с поворотом домена в сегнетоэлектрике.

Температурная зависимость потерь обычно имеет монотонный характер, потери растут с ростом температуры, хотя у некоторых дипольных диэлектриков наблюдаются локальные максимумы, имеющие ту же природу, что и максимумы в частотной зависимости. С ростом влажности потери также растут, зачастую весьма значительно. Это связано, как с увеличением сквозной проводимости, так и с поляризацией растворенной воды, и эмульгированной воды. Увеличение напряженности поля сопровождается ростом tg , что объясняется ростом электропроводности. Причины этого будут подробно рассматриваться в следующем разделе.

Тема 7. Основные газообразные диэлектрики (воздух, элегаз и т.д.).

Наибольшее применение из газов в энергетике имеет воздух. Это связано с дешевизной, общедоступностью воздуха, простотой создания, обслуживания и ремонта воздушных электроизоляционных систем, возможностью визуального контроля. Объекты, в которых применяется воздух в качестве электрической изоляции - линии электропередач, открытые распределительные устройства, воздушные выключатели и т.п.

Электроотрицательными называются газы, молекулы которых обладают сродством к электрону, это означает, что при захвате электрона и превращении молекулы в отрицательный ион выделяется энергия. Этот процесс приводит к явлению *прилипания электронов*, и уменьшению, тем самым, эффективного коэффициента ударной ионизации на значение *коэффициента прилипания*. Поэтому электроотрицательные газы имеют повышенную электрическую прочность. Из электроотрицательных газов с высокой электрической прочностью наибольшее применение нашел элегаз SF₆. Свое название он получил от сокращения электрический газ. Уникальные свойства элегаза были открыты в России, его применение также началось в России. В 30^х годах известный ученый Б.М. Гохберг исследовал электрические свойства ряда газов и обратил внимание на некоторые свойства шестифтористой серы SF₆. Электрическая прочность при атмосферном давлении и зазоре 1 см составляет E = 89 кВ/см. Молекулярная масса составляет 146, характерным является очень большой коэффициент теплового расширения и высокая плотность. Это важно для энергетических установок, в которых проводится охлаждение каких-либо частей устройства, т.к. при большом коэффициенте теплового расширения легко образуется конвективный поток, уносящий тепло. Из теплофизических свойств: температура плавления = -50С при 2 атм, температура кипения (возгонки) = -63С. Низкие значения последних параметров означают возможность применения элегаза при низких температурах.

Из других полезных свойств отметим следующие: химическая инертность, нетоксичность, негорючесть, термостойкость (до 800С), взрывобезопасность, слабое разложение в разрядах, низкая температура сжижения. В отсутствие примесей элегаз совершенно безвреден для человека. Однако продукты разложения элегаза в результате действия разрядов (например, в разряднике или выключателе) токсичны и химически активны.

Комплекс свойств элегаза обеспечил достаточно широкое использование элегазовой изоляции. В устройствах элегаз обычно используется под давлением в несколько атмосфер для большей компактности энергоустановок, т.к., как вы знаете, электрическая прочность увеличивается с ростом давления. На основе элегазовой изоляции созданы и эксплуатируются ряд электроустройств, из них кабели, конденсаторы, выключатели, компактные ЗРУ (закрытые распределительные устройства). Наиболее широкое применение элегаз нашел за рубежом, в особенности в Японии. Например, использование элегаза позволяет в десятки раз уменьшить размеры распределительных устройств, что очень актуально при высокой стоимости земли для размещения энергохозяйства. Это выгодно даже несмотря на высокую стоимость элегаза - более 10\$ за 1 килограмм.

Тема 8. Основные жидкие диэлектрики (нефтяное масло, кремнийорганические и фторорганические жидкости).

Наиболее распространенный в энергетике жидкий диэлектрик - это трансформаторное масло.

Трансформаторное масло, - очищенная фракция нефти, получаемая при перегонке, кипящая при температуре от 300 С до 400 С. В зависимости от происхождения нефти обладают различными свойствами и эти отличительные свойства исходного сырья отражаются на свойствах масла.

Основные физико-химические свойства масла.

Из основных характеристик масла отметим, что оно горючее, биоразлагаемое, практически не токсичное, не нарушающее озоновый слой. Плотность масла обычно находится в диапазоне (0.84-0.89) · 10³ кг/м³. Вязкость является одним из важнейших свойств масла. С позиций высокой электрической прочности желательно иметь масло более высокой вязкости.

Конденсаторные масла. Под этим термином объединена группа различных диэлектриков, применяемая для пропитки бумажно-масляной и бумажно-пленочной изоляции конденсаторов.

Касторовое масло растительного происхождения, оно получается из семян клещевины. Основная область использования - пропитка бумажных конденсаторов для работы в импульсных условиях.

Кабельные масла предназначены для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей. Основой их также являются нефтяные масла. От трансформаторного масла отличаются повышенной вязкостью, увеличенной температурой вспышки и уменьшенными диэлектрическими потерями. Из марок масел отметим МН-4 (маловязкое, для заполнения кабелей низкого давления), С-220 (высоковязкое для заполнения кабелей высокого давления), КМ-25 (наиболее вязкое).

Второй тип жидких диэлектриков - *трудногорючие и негорючие жидкости*. Жидких диэлектриков с такими свойствами достаточно много. Наибольшее распространение в энергетике и электротехнике получили хлордифенилы. В зарубежной литературе они называются хлорбифенилами. Это вещества, имеющие в своем составе двойное бензольное кольцо, т.н. ди(би)фенильное кольцо и присоединенные к нему один или несколько атомов хлора. Хлордифенилы являются хорошими диэлектриками. Применение этих диэлектриков было обусловлено как этими свойствами, так и, главным образом, их негорючестью. Поэтому в пожароопасных условиях (шахты, химические производства и т.п.) использовали трансформаторы и другие электрические аппараты, заполненные хлордифенильными диэлектриками.

Очень интересен класс *фторорганических жидкостей*. В зарубежной литературе они называются перфторуглероды. По сути, это эквивалент обычным органическим жидкостям, только вместо атома водорода везде находится атом фтора. Например есть аналоги органическим соединениям, таким как пентан C_5H_{12} - перфторпентан C_5F_{12} , гексан C_6H_{14} - перфторгексан C_6F_{14} , триэтил(пропил,бутил)амин - перфтортриэтил(пропил,бутил)амин и т.п. Существует даже перфтортрансформаторное масло. (В отличие от настоящего трансформаторного масла перфтортрансформаторное масло при нормальных условиях является твердым веществом и используется в качестве морозостойкой смазки).

Тема 9. Смолы, растительные масла, битумы.

Смолы – это полимеры, растворимые в спирте, эфире и некоторых маслах, но нерастворимые в воде. Природные растительные смолы получают упариванием растительных соков, которые вытекают из растений естественным путем или при надрезании стеблей и стволов. К растительным смолам относится, например, сосновая канифоль, а также смола, получаемая из клубней скаммонии (вьюнка смолоносного *Convolvulus scammony*), и ископаемые окаменелые смолы янтарь и копал. Имеется множество сортов синтетических смол, используемых для получения пластмасс. Наибольшее значение в электрической изоляции имеют синтетические смолы – полимеризационные и конденсационные.

Растительные масла – вязкие жидкости, получаемые из семян различных растений. Важен особый вид масел высыхающие масла, которые после соприкосновения с кислородом или под воздействием других факторов приобретают способность к переходу в твердое состояние. В таком состоянии образовавшаяся пленка представляет собой электроизоляционную пленку. Наибольшее распространение получили льняное, тунговое и касторовое масла.

Битумы (от лат. bitumen — смола). Первоначально к Б. относили только природные образования, в основном нефть и её естественные производные (чаще всего асфальт). Затем Б. стали называть также искусственные асфальтоподобные продукты, получаемые переработкой природных Б., остатков от перегонки нефти, каменноугольной и сланцевой смол (технические Б.). Кроме того, название Б. распространили на экстракты, извлекаемые органическими растворителями из торфа, бурого угля и др. (Б. твёрдых топлив). Экстракты, извлекаемые из осадков и осадочных пород, называются битумоидами.

Природные Б. подразделяются на нафтиды и нафтоиды. Нафтиды весьма широко распространены в природе - это нефть и её естественные производные: мальты, асфальты, асфальтиты, кериты, озокериты и т.д. Мальты представляют собой вязкие сгустившиеся нефти, подвергшиеся выветриванию. Они состоят из масел (40-65%) и асфальтово-смолистых компонентов (не менее 35%). Дальнейшее изменение мальт под влиянием того же фактора приводит к образованию: твёрдых, но легкоплавких асфальтов, содержащих 60-75% асфальтово-смолистых веществ; асфальти-

тов — твёрдых высокоплавких и полностью растворяющихся в хлороформе и сероуглероде продуктов, содержащих более 75% асфальто-смолистых веществ; керитов, к которым относят также вещества, характеризующиеся лишь частичной, иногда очень слабой растворимостью в органических растворителях. К Б. иногда относят также все углеводородные в своей основе природные газы (газообразные нафтиды). Нафтоиды - нафтидоподобные продукты естественной возгонки органического вещества под влиянием магматического тепла. Они встречаются значительно реже нафтидов, ещё очень слабо изучены и не имеют промышленного значения.

Технические Б. — продукты, обладающие обычно твёрдой или вязкой консистенцией и получаемые главным образом из тяжёлых нефтяных остатков, богатых асфальто-смолистыми веществами, следующими методами: глубокой вакуумной перегонкой тяжёлых нефтяных остатков — мазутов, гудронов и др. — при 300—350°C (остаточные Б.); окислением кислородом воздуха тяжёлых остатков от перегонки нефти (гудронов и др.) при 260—280°C (окисленные Б.); смешением окисленных Б. с неокисленными нефтепродуктами (компаундированные Б.).

Основные компоненты нефтяных Б. - асфальтены, смолы и нефтяные масла. Первые обуславливают твёрдость Б., вторые — цементацию и эластичность, третьи служат разжижающей средой для смол и асфальтенов. Наиболее важные технические показатели Б.: дуктильность, т. е. способность при растягивании давать нить определённой длины (определяется по толщине нити, которая образуется в результате растяжения стандартного образца Б. до разрыва), пенетрация, характеризующая вязкость Б. [определяется по глубине проникновения в слой Б. за 5 сек стальной иглы под нагрузкой 1 н (0,1 кгс)]. Кроме того, для характеристики Б. обычно определяют температуру размягчения, температуру вспышки и плотность. Жидкие Б. характеризуются (в зависимости от сорта) следующими данными: пенетрация остатка (после отбора фракций до 360°C) 10—30 мм (25°C); вязкость при истечении через отверстие диаметром 5 мм 5—200 сек (60°C); температура вспышки 65-120°C; до 225°C должно перегоняться не более 10%, до 360°C — не более 50%. Твёрдые нефтяные Б. применяют для получения рулонных кровельных материалов (руберойдов) и битумных мастик; полутвёрдые — в производстве гидроизоляционных материалов (гидроизол, борулин, битуминированные ткани и др.) и обмазок, строительных асфальтовых растворов, асфальтов, битумных пластиков и др.; жидкие — для дорожного строительства.

Заменителями нефтяных Б. могут быть продукты термической переработки твёрдых топлив: высококипящие фракции смол, получаемых при коксовании и полукоксовании каменных углей, каменноугольные пеки, продукты сухой перегонки каменных углей, горючих сланцев и др.

Из общего количества Б., потребляемых в различных отраслях промышленности, свыше 90% падает на долю искусственных Б., получаемых из нефти; их мировое производство составляет десятки млн. т.

Б. твёрдых топлив — продукты, извлекаемые из торфа и бурых углей органическими растворителями. Главные составные части Б. твёрдых топлив — воски и смолы. Наиболее ценны из экстрагируемых продуктов воски; их характерные свойства — высокие температуры плавления, низкая электропроводность, высокая влагостойкость и способность при небольших добавках к другим веществам повышать температуру плавления. Содержание Б. в битуминозных торфах составляет: при извлечении бензолом 10—15%, бензином 6—9%. В битуминозных бурых углях (александрийские угли УССР) содержание продуктов, извлекаемых бензолом, достигает 14—16%. Выход Б. твёрдых топлив в производственных условиях обычно составляет 80—85% от их аналитического содержания в топливе. Минимальное содержание Б. в твёрдом топливе, необходимое для рентабельности процесса, 8—10%.

Получение Б. твёрдых топлив состоит из следующих этапов: подготовка топлива к экстрагированию; экстракция органическими растворителями; отгонка от экстракта основной массы растворителя; освобождение Б. от остатков растворителя и воды; сплавление и разливание Б. в форму. Б. из твёрдого топлива извлекают преимущественно в периодически действующих экстракторах, объединённых в батареи.

Б. твёрдого топлива применяют в различных отраслях народного хозяйства: в литейном деле — как один из компонентов модельных составов при прецизионном литье (литьё по выплав-

ленным моделям), в электротехнической промышленности как электроизоляционный материал, а также для отделки различных изделий из кожи, дерева, бумаги и др.

Тема 10. Электроизоляционные лаки и компаунды.

Электроизоляционные лаки представляют собой коллоидные растворы лаковой основы, образующие после удаления растворителя пленку, обладающую электроизоляционными свойствами.

Растворители - летучие жидкости, применяемые для растворения лаковых основ, улетучивающиеся в процессе образования пленки. Растворителями могут служить ароматические углеводороды, спирты, сложные и простые эфиры, скипидар и др. В состав лака, кроме того, могут входить следующие дополнительные вещества. Сиккативы - вещества, ускоряющие процесс высыхания растительных масел и лаков. Пластификаторы - вещества, придающие эластичность и ударную прочность лаковой пленке. Отвердители - соединения, способствующие отверждению пленки лака. Инициаторы и ускорители - вещества, ускоряющие процесс образования полимеров.

Электроизоляционные эмали представляют собой лаки, в составе которых имеются пигменты - высокодисперсные неорганические вещества, повышающие твердость и механическую прочность лаковой пленки, теплопроводность, дугостойкость.

В качестве пигментов часто применяют двуокись титана, железный сурик и др. По способу сушки электроизоляционные лаки делятся на три основные группы: масляные, смоляные, эфироцеллюлозные. По назначению и выполняемым функциям электроизоляционные лаки принято подразделять на три основные группы: пропиточные, покровные и клеящие.

Электроизоляционные компаунды - в основном состоят из тех же веществ, которые входят в состав лаковой основы электроизоляционных лаков, но, в отличие от лаков, не содержат растворителей. В момент применения при нормальной и повышенной температуре компаунды находятся в жидком состоянии и твердеют после охлаждения или в результате происходящих в них химических процессов. Кроме того, в состав компаундов могут входить активные разбавители, понижающие вязкость компаунда, пластификаторы, отвердители, инициаторы и ингибиторы назначения которых то же, что и в лаках.

В состав компаунда могут также входить наполнители - неорганические и органические порошкообразные или волокнистые материалы, применяемые для уменьшения усадки, улучшения теплопроводности, уменьшения температурного коэффициента расширения и снижения стоимости. В качестве наполнителей применяют пылевидный кварц, тальк, слюдяную пыль, асбестовое и стеклянное волокно и ряд других. По химическому составу электроизоляционные компаунды делятся на компаунды, изготавливаемые на основе нефтяных битумов, растительных масел и канифоли, и компаунды на основе синтетических смол. Компаунды на основе синтетических смол изготавливаются на основе полиэфирных, эпоксидных, эпоксидно-полиэфирных, кремнийорганических и прочих смол и композиций. По отношению к нагреву электроизоляционные компаунды делятся на термопластичные и терморезистивные.

Тема 11. Волокнистые материалы, пластмассы, стекла.

Стеклообразное состояние является основной разновидностью аморфного состояния вещества. Стеклами называют аморфные тела, получаемые путем переохлаждения расплава независимо от их химического состава и температурной области затвердевания. По химическому составу имеющие практическое значение стекла делятся на три основных типа: оксидные - на основе оксидов (SiO_2 , B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3); галогенидные - на основе галогенидов, главным образом BeF_2 (фторберилатные стекла) и халькогенидные - на основе сульфидов, селенидов и теллуридов.

Наиболее широко применяются оксидные стекла, которые в зависимости от состава делятся на ряд классов и групп:

1. по виду окисла стеклообразователя - силикатные, боратные, фосфатные, германатные, алюмосиликатные и др.;
2. по содержанию щелочных окислов - бесщелочные (могут содержать щелочноземельные оксиды MgO , CaO , BaO и др.) малощелочные; многощелочные.

В переменном электрическом поле электрическая прочность стекол составляет 17 - 80 МВ/м.

Пластмассы находят применение в электротехнике как в качестве электроизоляционных, так и в качестве конструкционных материалов. По составу в большинстве случаев пластмассы представляют собой композиции из связующего и наполнителя. Кроме связующих и наполнителя применяют пластификаторы для улучшения технологических и эксплуатационных свойств пластмасс. В некоторые пластмассы вводятся стабилизаторы - химические соединения, способствующие длительному сохранению свойств пластмасс и повышению стойкости пластмасс к воздействию тепла, света, кислорода воздуха. По способности к формованию полимерные материалы подразделяются на две группы - термопласты (термопластичные) и реактопласты (термореактивные).

Широкое применение в электрических машинах, аппаратах, трансформаторах, приборах получили слоистые пластики, преимущественно электроизоляционного назначения. К слоистым пластикам относятся гетинакс и текстолит с разными наполнителями и древеснослоистые пластики.

Гетинакс получается путем горячего прессования бумаги, пропитанной термореактивной смолой. Гетинакс выпускается нескольких марок. Отметим гетинакс марки Х, который имеет повышенную штампуемость и гетинакс марки ЛГ, изготавливаемый на основе лавсановой бумаги и эпоксидной смолы. Для изготовления печатных схем радиоэлектронной аппаратуры выпускается около 10 различных марок фольгированного с одной и с двух сторон гетинакса.

Текстолит аналогичен гетинаксу, но изготавливается из пропитанной ткани. Текстолит, изготовленный на основе ткани, пропитанной фенолформальдегидной смолой может работать в интервале температур от -60 до +105°C.

Применение стеклопластиков в качестве электроизоляционного и конструкционного материала в электромашиностроении позволяет создавать электрические машины разных классов нагревостойкости, повышать их надежность в эксплуатации и решать ряд новых технических задач.

Раздел 3 Полупроводниковые материалы

Тема 12. Классификация и основные свойства полупроводниковых материалов. Электропроводность полупроводников.

Полупроводники при комнатной температуре занимают по удельному сопротивлению, имеющему значения 10^{-6} - 10^9 Ом·м, промежуточное положение между металлами и диэлектриками. По ширине запрещенной зоны к полупроводникам относят вещества, ширина запрещенной зоны которых лежит в диапазоне 0.1 - 3.0 эВ.

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

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

- простые вещества: германий, кремний; селен, теллур, бор, углерод, фосфор, сера, сурьма, мышьяк и др.;

- окислы и сульфиды многих металлов: NiO, Cu₂O, CuO, CdO, PbS и др.;

- тройные соединения: CuSbSr, CuFeSe₂, PbBiSe₃ и др.;

- твердые растворы GeSi, GaAs_{1-x}P_x и др.;

- органические красители и другие материалы: антрацен, фталоцианин, нафталин и другие.

Полупроводники могут быть жидкими или твердыми, кристаллическими или аморфными.

Из электрофизических параметров важнейшими являются: удельная электрическая проводимость (или величина обратная ей - удельное электрическое сопротивление), концентрация электронов и дырок, температурные коэффициенты удельного сопротивления, ширина запрещенной зоны, энергия активации примесей, работы выхода, коэффициента диффузии носителей заряда и

другие. Для некоторых применений важны коэффициент термо-ЭДС и коэффициент термоэлектрического эффекта, коэффициент Холла и т.п.

Тема 13. Полупроводниковые соединения и материалы на их основе.

Свободными носителями заряда в полупроводниках как правило, являются электроны, возникающие в результате ионизации атомов самого полупроводника (собственная проводимость) или атома примеси (примесная проводимость). В некоторых полупроводниках носителями заряда могут быть ионы. На рисунке показана атомная модель кремния и энергетическая диаграмма собственного полупроводника, в котором происходит процесс генерации носителей заряда. При абсолютном нуле зона проводимости пустая, как у диэлектриков, а уровни валентной зоны полностью заполнены. Под действием избыточной энергии ΔW_0 , появляющейся за счет температуры, облучения, сильных электрических полей и т.д., некоторая часть электронов валентной зоны переходит в зону проводимости. Энергия ΔW_0 в случае беспримесного полупроводника, равна ширине запрещенной зоны и называется энергией активации. В валентной зоне остается свободное энергетическое состояние, называемое дыркой, имеющей единичный положительный заряд.

Электропроводность, возникающая под действием электрического поля за счет движения электронов и в противоположном направлении такого же количества дырок, называется собственной. В удельную проводимость полупроводника дают вклад носители двух типов - электроны и дырки.

Раздел 4. Проводниковые материалы

Тема 14. Классификация и основные свойства проводниковых материалов. Материалы высокой проводимости.

Основная характеристика проводника - это его электропроводность.

Как известно, и мы рассматривали этот вопрос на 2 лекции, в любом теле при приложении напряжения должен протекать ток в соответствии с выражением, определяющим плотность тока

$$J = \sum n_i \cdot q_i \cdot v_i$$

Здесь n_i - концентрация носителей заряда i -ого сорта, q_i - значение заряда, v_i - скорость заряда. Для металлов носителями заряда являются электроны. Примерное количество электронов в металле составляет около 10^{22} шт/см³. Если оценить концентрацию атомов типичного металла, то она составит примерно те же значения. Это означает, что все атомы ионизованы и электроны не принадлежат каждому атому, а обобществлены во всем кристалле. Классическая теория металлов рассматривала электроны как идеальный газ, частицы которого сталкиваются с дефектами решетки, колебаниями атомов, за счет чего их скорость остается ограниченной в электрическом поле.

Ясно также, что чем больше ток, тем больше мощность, причем зависимость линейная. Однако с ростом тока потери энергии растут квадратично, т.е. гораздо сильнее, чем рост передаваемой мощности. Увеличение площади сечения провода ослабляет проблему, но, с другой стороны, происходит увеличение стоимости строительства линии электропередач, т.к. стоимость цветного металла проводов значительна. Кроме того, увеличение веса проводов влечет увеличение массы опор, усложнение монтажа и т.п. В результате компромисса между увеличением потерь и увеличением строительства договорились рассчитывать провода линии на определенную компромиссную плотность тока, т.н. экономическую плотность тока. Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ), для меди она составляет 2,5 А/мм² в случае открытых проводов при эксплуатации 1000-3000 часов в год, и снижается до 1,8 А/мм² при эксплуатации свыше 5000 в год. Для алюминия все цифры примерно в два раза ниже. Для кабелей все определяется условиями теплоотвода через изоляцию и оболочку кабелей, в ПУЭ допустимая плотность тока нормируется для каждого вида кабелей отдельно, как правило допустимая плотность тока еще ниже.

Из проводниковых материалов с высокой тепло- и электро- проводностью самым замечательным материалом для проводов было бы серебро. Его удельное сопротивление при комнатной температуре составляет примерно $1,4 \cdot 10^{-8}$ Ом*м, теплопроводность 418 Вт/(м*К). Однако этот материал слишком дорог и редок, поэтому серебро используют только для ответственных контактов, т.к. оно не только идеальный проводник, но и не окисляется в процессе работы, значит не

ухудшаются свойства контакта со временем. Отметим, что другие, более привычные проводники, такие как медь или алюминий окисляются кислородом воздуха, превращаясь в непроводящие окислы, ухудшая или даже предотвращая омический контакт. Для проводов именно их и используют, потому что по электропроводности их можно поставить на 2-е и 3-е место после серебра.

Тема 15. Сверхпроводники и криопродовники.

Протекание тока в проводниках всегда связано с потерями энергии, т.е. с переходом энергии из электрического вида в тепловой вид. Этот переход необратим, обратный переход связан только с совершением работы, как об этом говорит термодинамика. Существует, правда возможность перевода тепловой энергии в электрическую и с использованием т.н. термоэлектрического эффекта, когда используют два контакта двух проводников, причем один нагревают, а другой охлаждают.

Сверхпроводимость, как и сверхтекучесть, были обнаружены в экспериментах при сверхнизких температурах, вблизи абсолютного нуля температур. По мере приближения к абсолютному нулю колебания решетки замирают. Сопротивление протеканию тока уменьшается даже согласно классической теории, но до нуля при некоторой критической температуре T_c , оно уменьшается только согласно квантовым законам.

Сверхпроводимость обнаружили по двум явлениям: во-первых, по факту исчезновения электрического сопротивления, во-вторых по диамагнетизму. Первое явление понятно - если пропускать определенный ток I через проводник, то по падению напряжения U на проводнике можно определить сопротивление $R = U/I$. Исчезновение напряжения означает исчезновение сопротивления как такового.

Второе явление требует более подробного рассмотрения. Если рассуждать логически, то отсутствие сопротивления тождественно абсолютной диамагнитности материала. Действительно, представим себе небольшой опыт. Будем вводить сверхпроводящий материал в область магнитного поля. Согласно закону Джоуля-Ленца, в проводнике должен возникать ток, полностью компенсирующий изменение магнитного потока, т.е. магнитный поток через сверхпроводник как был нулевым, так и остается нулевым. В обычном проводнике этот ток затухает, т.к. у проводника есть сопротивление. Только после этого в проводник проникает магнитное поле. В сверхпроводнике он не затухает. Это означает, что протекающий ток приводит к полной компенсации магнитного поля внутри себя, т.е. поле в него не проникает. С формальных позиций нулевое поле означает, что магнитная проницаемость материала равна нулю, $\mu = 0$ т.е. тело проявляет себя абсолютным диамагнетиком.

В тройных системах $BaO-La_2O_3-CuO$ в 1986 г была обнаружена сверхпроводимость при температуре 30-35 К. За эту работу Беднорц и Мюллер получили Нобелевскую премию в следующем, (!!) 1987 г. Интенсивные исследования родственных составов в течение года привели к обнаружению сверхпроводимости в системе $BaO-Y_2O_3-CuO$ при температуре 90 К. На самом деле сверхпроводимость получена в еще более сложной системе, формулу которой можно представить, как $YBa_2Cu_3O_7$. Значение для самого высокотемпературного сверхпроводящего материала составляет 0.2. Это означает не только определенное процентное соотношение между исходными окислами, но и уменьшенное содержание кислорода. Действительно, если посчитать по валентностям, то у иттрия - 3, у бария - два, у меди 1 или 2. Тогда у металлов полная валентность составит 10 или 13, а у кислорода - чуть меньше 14. Керамику получают по обычной керамической технологии. Как из хрупкого вещества делать провода? Один из способов, делают суспензию из порошка в подходящем растворителе, затем раствор продавливают через фильеру, подсушивают и сматывают на барабан. Окончательное удаление связки проводят выжиганием, провод готов. Свойства таких волокон: критические температуры 90-82 К, при 100 К $=12$ мОм*см, (примерно, как у графита), критическая плотность тока 4000 А/м².

Тема 16. Сплавы, припой, неметаллические проводники.

Серебро - один из наиболее дефицитных материалов, достаточно широко применяемый в электротехнике и электронике для высокочастотных кабелей, защиты медных проводников от

окисления, для электродов некоторых типов керамических и слюдяных конденсаторов в электрических контактах, где оно используется в сплавах с медью, никелем или кадмием, в припоях ПСр-10, ПСр-25 и др. Серебро марки Ср999-999.9 должно иметь примесей не более 0.1%.

Медь - наиболее широко применяется в качестве проводникового материала: в производстве обмоточных и монтажных проводов и кабелей (мягкая отожженная медь марки ММ) в производстве волноводов и т.д.; при изготовлении контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин (медь твердая марки МТ - имеет меньшую проводимость и относительное удлинение перед разрывом, но большую механическую прочность, чем отожженная медь марки ММ).

Наиболее нежелательными примесями в меди являются висмут и свинец, сера, кислород. Наиболее чистые сорта проводниковой меди марок МООК (катодная) и МООБ (бескислородная), содержат примесей не более 0.001%. В производстве проводниковых изделий применяют марки меди с содержанием примесей не более 0.05 - 0.1%, для проводов очень малого диаметра (0.01 мм) и проводов, работающих при температурах выше 300°C применяют проволоку из бескислородной меди. Основные характеристики меди марок ММ и МТ приведены в таблице.

Бронзы - сплавы меди с оловом (оловянные), алюминием (алюминиевые), бериллием (бериллиевые) и др. легирующими элементами. По электропроводности уступают меди, но превосходят ее по механической прочности, упругости, сопротивлению истиранию и коррозионной стойкости. Применяются для изготовления пружинящих контактов электрических приборов, контактов токоведущих пружин, проводов линий электрического транспорта, пластин коллекторов электрических машин.

Алюминий - в 3.3 раза легче меди, имеет сравнительно большую проводимость (для АМ $\rho = 0.028 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$) и стойкость к атмосферной коррозии за счет защитной пленки оксида Al_2O_3 . Алюминий мягкий имеет прочность на разрыв 80, твердый 160 - 170 МПа. Из алюминия, содержащего примесей не более 0.3 - 0.5% (марки А7Е и А5Е), изготавливают проволоку и шины. Для жил кабелей может использоваться алюминий с уменьшенным содержанием примесей - марки А75К, А8К, А8КУ. Алюминиевые провода можно соединять друг с другом холодной или горячей сваркой, а также пайкой с применением специальных флюсов и припоев.

Сталь (железо с содержанием углерода 0.1 - 0.15%) как проводниковый материал используется в виде шин, рельсов трамваев, электрических железных дорог и пр. Удельная проводимость стали в 6 - 7 раз меньше, чем у меди, $\sigma_p = 700 - 750 \text{ МПа}$, относительное удлинение перед разрывом 5 - 8%. На переменном токе в стали проявляется поверхностный эффект и появляются потери мощности на гистерезис. Такая сталь может использоваться для проводов воздушных линий электропередач, если передаются небольшие мощности и основную роль играет не удельное сопротивление провода, а его механическая прочность.

Раздел 5. Магнитные материалы

Тема 17. Общие сведения о магнитных свойствах материалов. Классификация веществ по магнитным свойствам.

Магнитомягкие материалы способны намагничиваться до насыщения в слабых полях, обладают высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на перемагничивание. Условно к магнитомягким относят материалы с $H_c > 800 \text{ А/м}$. Применяются в основном в качестве магнитопроводов дросселей, трансформаторов, электромагнитов, электрических машин и т.д.

Магнитотвердые материалы отличаются большой удельной энергией, которые тем больше, чем больше остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c материала. К магнитотвердым относят материалы с $H_c > 4 \text{ кА/м}$. Используются главным образом для постоянных магнитов. Намагничивание магнитомягких материалов происходит в основном за счет смещения междоменных границ, а в магнитотвердых - за счет вращения вектора намагниченности (в магнитотвердых материалах на основе редкоземельных элементов преобладают процессы смещения).

Магнитотвердые материалы. Основные параметры.

Для характеристики магнитотвердых материалов обычно используют ту часть кривой гистерезиса, которая лежит во втором квадранте, а в первом изображают изменение удельной магнитной энергии от индукции, как показано на рисунке. Магнитная энергия в воздушном зазоре постоянного магнита будет максимальна при некоторых значениях H_d и B_d . Условие

$$W=(B_d \cdot H_d)/2=W_{\max}, \text{ Дж/м}^3$$

определяет наилучшее использование магнита и является важнейшим параметром, характеризующим качество материала. Множитель 1/2 иногда опускается. Коэффициент выпуклости

$$\eta=(B \cdot H)_{\max}/(B_r \cdot H_c)$$

характеризует форму кривой размагничивания - степень прямоугольности. Для магнитотвердых материалов, используемых в различных областях современной техники $H_c=5 \cdot 10^3-5 \cdot 10^6$ А/м, $(BH/2)_{\max}=0.5-200 \text{ кДж/м}^3$, $(BH/2)_{\max}=1-400 \text{ кДж/м}^3$.

Магнитомягкие материалы. Технически чистое железо

Технически чистое железо (низкоуглеродистая электротехническая сталь) содержит менее 0.05% углерода и минимальное количество примесей других элементов. Получается прямым восстановлением чистых руд, а также с применением электролитического или карбонильного процессов.

Низкоуглеродистая электротехническая сталь (другое название "армко-железо") обладает высокими значениями магнитной проницаемости и индукции насыщения, низкой коэрцитивной силой. Однако из-за малого удельного электрического сопротивления имеет повышенные потери на вихревые токи и применяется поэтому только в устройствах постоянного тока - полюсных наконечниках электромагнитов, магнитопроводах реле, экранирующих корпусах и др.; является основным компонентом при изготовлении многих магнитных материалов. Промышленностью выпускается также в виде электролитического и карбонильного железа; последнее получается в виде листов и готовых изделий из порошка путем конденсации газообразного пентакарбонила железа $FeCo_5$. В таблице отражены основные магнитные характеристики железа.

Тема 18. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы.

Пермаллои - железоникелевые сплавы с высокой проницаемостью в слабых полях. По составу выделяют низконикелевые (40-50% Ni) и высоконикелевые (72-80 %Ni)). Такое подразделение обусловлено смещением магнитных и электрических характеристик в зависимости от процентного содержания никеля. Из диаграммы видно, что $\mu_{\text{нач}}$ имеет два максимума: относительный (1) и абсолютный (2): 1 - область с содержанием никеля 40-50% соответствует низконикелевому пермаллою; 2 - область с содержанием 72-80% - высоконикелевому, обладающими и наибольшими значениями $\mu_{\text{макс}}$.

Обе группы пермаллоев для улучшения электромагнитных свойств легируются различными элементами, например, молибденом, хромом, медью и некоторыми другими элементами. Плавка осуществляется в вакууме или нейтральных газах. Тонкие листы и ленты выпускаются или штампуются холоднокатанными с последующим высокотемпературным отжигом для получения высоких магнитных свойств. Поверхность ленты для навивки (при изготовлении тороидальных сердечников) и последующего отжига покрывается тонким слоем окислов кремния, магния или алюминия способом катафореза или осаждением из суспензии, жидкой фазой которой является легко испаряющаяся жидкость, например, ацетон. В процессе сборки и эксплуатации сердечников из пермаллоя не допустимы механические напряжения (удары, рихтование, сдавливание обмоткой и другие) из-за ухудшения магнитных характеристик.

Высокие магнитные свойства пермаллоев, их способность легко намагничиваться объясняют близостью к нулю констант кристаллографической анизотропии и намагниченности насыщения, но это же приводит и к большей чувствительности магнитных свойств от внешних напряжений. По основным магнитным свойствам выделяются несколько групп пермаллоев. Посмотрите свойства нелегированного высоконикелевого и низконикелевого пермаллоев.

Магнитомягкие ферриты - химические соединения окисла железа Fe_2O_3 с окислами других металлов. Наиболее широко применяются ферриты со структурой шпинели, отвечающими формуле $MeFe_2O_4$, где Me - какой-либо двухвалентный катион.

Самопроизвольная намагниченность ферритов обусловлена спиновыми магнитными моментами трехвалентных ионов железа и двухвалентных ионов металла, между которыми существует косвенное обменное взаимодействие через ионы кислорода. Синтез ферритов производится по керамической технологии и может быть осуществлен по трем различным технологическим схемам: 1 - из механической смеси оксидов или карбонатов; 2 - термическим разложением твердой смеси солей, полученной выпариванием из водного раствора; 3 - из совместно сочетаемых гидроксидов, карбонатов, оксилатов.

Магнитомягкие ферриты применяются:

- для магнитопроводов, работающих в слабых, сильных магнитных полях до 100 МГц и в импульсном режиме;

- для изготовления магнитных усилителей, сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, статоров и роторов высокочастотных двигателей, термомагнитных компенсаторов и так далее.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

На лабораторных занятиях закрепляются теоретические знания студентов, полученные на лекциях. Предлагается список лабораторных работ. Преподаватель составляет график выполнения работ для каждой бригады (3 человека).

1. Измерение электрической прочности газов при различных условиях.
2. Измерение электрической прочности жидких диэлектриков.
3. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков.
4. Измерение электрического сопротивления изоляционного материала.
5. Изучение проводников и полупроводников

Цель лабораторных работ, применяемое оборудование, краткие теоретические сведения, правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ, порядок проведения работы, обработка и анализ эксперимента, план составления отчета, контрольные вопросы приведены в учебном пособии:

Электротехническое и конструкционное материаловедение [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие / В. В. Соловьев, А. Г. Ротачева ; АмГУ, Эн.ф. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2011. - 299 с. Режим доступа: http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/3655.pdf

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Самостоятельная работа студентов - вид деятельности, при котором в условиях систематического уменьшения прямого контакта с преподавателем студентами выполняются учебные задания. К таким заданиям относятся рефераты, доклады и т.д. При этом специфика самостоятельной работы студентов заключается в том, чтобы студенты самостоятельно получали новые знания. Из этого можно сделать следующий вывод. Самостоятельная работа студентов – это практическое занятие (семинар, практикум) с использованием различных методов обучения с использованием индивидуальных или групповых заданий, на котором студенты могут добывать новые знания, или обобщать ранее полученные знания.

Самостоятельная работа студентов по дисциплине предусматривается в форме подготовки к выполнению лабораторных работ и отчетов по ним, а также подготовка к зачету.

Подготовка к лабораторным работам прописана учебном пособии:

Электротехническое и конструкционное материаловедение [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие / В. В. Соловьев, А. Г. Ротачева ; АмГУ, Эн.ф. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2011. - 299 с. Режим доступа: http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/3655.pdf

Вопросы для подготовки к зачету отражены в рабочей программе дисциплины.

Самостоятельная работа обучающихся осуществляется в помещениях, оснащенных компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду университета.

Указания при групповой консультации.

Разъяснение является основным содержанием данной формы занятий, наиболее сложных вопросов изучаемого программного материала. Цель – максимальное приближение обучения к практическим интересам с учетом имеющейся информации и является результативным материалом закрепления знаний.

Групповая консультация проводится в следующих случаях:

когда необходимо подробно рассмотреть практические вопросы, которые были недостаточно освещены или совсем не освещены в процессе лекции;

с целью оказания помощи в самостоятельной работе.

Указания студентам по изучению рекомендованной литературы.

Эти методические рекомендации раскрывают рекомендуемый режим и характер различных видов учебной работы (в том числе самостоятельной работы над рекомендованной литературой).

Изучение дисциплины следует начинать с проработки рабочей программы, особое внимание, уделяя целям и задачам, структуре и содержанию курса.

Студентам рекомендуется воспользоваться ЭБС через свой личный кабинет или получить в научной библиотеке университета учебную литературу по дисциплине, необходимую для эффективной работы на всех видах аудиторных занятий, а также для самостоятельной работы по изучению дисциплины.

Успешное освоение курса предполагает активное, творческое участие студента путем планомерной, повседневной работы.

Рекомендуемое учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины прописано в рабочей программе дисциплины «Электротехническое и конструкционное материаловедение (часть 2)».

Указания студентам при подготовке к зачету.

При подготовке к зачету необходимо пользоваться списком контрольных вопросов, имеющих в рабочей программе дисциплины. Ответы на большую часть вопросов можно найти в конспекте лекций. Для успешной сдачи зачета необходимым условием является выполнение лабораторных работ, поскольку материалы зачетных вопросов содержат схожие с данными работами задания.

Формы (вид) самостоятельной работы.

Самостоятельная работа студентов по дисциплине предусматривается в форме:

- выполнения заданий по темам практических занятий;
- проработка лекционного материала;
- подготовка к лабораторным работам;
- подготовка к зачету.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Привалов Е.Е. Электроматериаловедение [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Привалов Е.Е.— Электрон. текстовые данные.— Ставрополь: Ставропольский государственный аграрный университет, АГРУС, 2012.— 196 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47398>. — ЭБС «IPRbooks»
2. Федотов А.К. Физическое материаловедение. Часть 3. Материалы энергетики и энергосбережения [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Федотов А.К., Анищик В.М., Тиванов М.С.— Электрон. текстовые данные.— Минск: Вышэйшая школа, 2015.— 464 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/48022>. — ЭБС «IPRbooks»
3. Музылева И.В. Электротехническое и конструкционное материаловедение. Полупроводниковые материалы и их применение [Электронный ресурс]: учебное пособие/ И.В. Музылева— Электрон. текстовые данные.— Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2014.— 79 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55610.html>. — ЭБС «IPRbooks»
4. Электротехническое и конструкционное материаловедение [Электронный ресурс]: учебное пособие по курсу «Электротехническое и конструкционное материаловедение» для студентов дневной формы обучения направления подготовки 140400.62 - Электроэнергетика и электротехника/ — Электрон. текстовые данные.— Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, ЭБС АСВ, 2011.— 123 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28422>. — ЭБС «IPRbooks»
5. Материаловедение и технология конструкционных материалов[Текст] : учеб.: доп. Мин. обр. РФ / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 2008. - 536 с.
6. Целебровский Ю.В. Материаловедение для электриков в вопросах и ответах [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Ю.В. Целебровский— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013.— 64 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/47695.html>. — ЭБС «IPRbooks»
7. Кириллова И.К. Engineering materials. Their properties and application. Конструкционные материалы. Их свойства и применение [Электронный ресурс]: учебное пособие/ И.К. Кириллова, А.Я. Мельникова, В.В. Райский— Электрон. текстовые данные.— М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2016.— 163 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/58228.html>. — ЭБС «IPRbooks»
8. Буслаева Е.М. Материаловедение [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Буслаева Е.М.— Электрон. текстовые данные.— Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2012.— 148 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/735>. — ЭБС «IPRbooks»
9. Музылева И.В. Электротехническое и конструкционное материаловедение. Диэлектрические материалы и их применение [Электронный ресурс]: учебное пособие/ И.В. Музылева, Т.В. Синюкова— Электрон. текстовые данные.— Липецк: Липецкий государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2014.— 64 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55670.html>. — ЭБС «IPRbooks»
10. Серебрянников С.В., Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. В двух книгах. Кн. 2 [Электронный ресурс] : монография / Серебрянников С.В.,

Огоньков В.Г., Сяков В.Г.. — Электрон. дан. — Москва : Издательский дом МЭИ, 2012. — 304 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/72335>. — Загл. с экрана.

11. Электротехническое и конструкционное материаловедение [Электронный ресурс]: учеб.-метод. пособие / В. В. Соловьев, А. Г. Ротачева ; АмГУ, Эн.ф. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2011. - 299 с. Режим доступа: http://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/3655.pdf

Наталья Сергеевна Бодруг,
старший преподаватель кафедры энергетики ФГБОУ ВО «АмГУ»
Соловьев Владислав Викторович,
доцент кафедры СиТЭК ФГБОУ ВО «АмГУ»

Электротехническое и конструкционное материаловедение (часть 2)

Сборник учебно-методических материалов

Из-тво АмГУ. Формат 60x84/16.