



КУРС «Материаловедение»

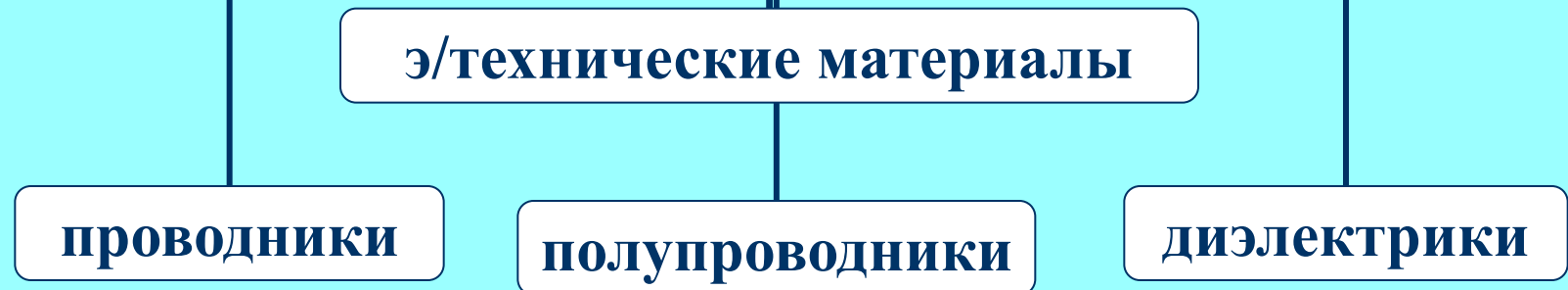
Тема: электротехнические материалы

Казачков Олег Владимирович, доцент, к.т.н.

Институт лесных, инженерных и строительных наук,
кафедра технологических и транспортных машин и оборудования
[kaz @ psu.karelia.ru](mailto:kaz@psu.karelia.ru)

Электротехнические материалы: определение, классификация

- Электротехнические материалы — это материалы, характеризующиеся определенными свойствами по отношению к электромагнитному полю и применяемые в технике с учетом этих свойств.



Проводники: определение, классификация

1. Материалы высокой проводимости, например: Cu, Ag, Al, Ni и т. д.
2. Сверхпроводники 1-го и 2-го рода, например: Cd, Zn, Ta, Pb, сплав Nb_3Sn и др.
3. Материалы, используемые для изготовления термопар и удлиняющих проводов, например: медь — константан, медь — копель, хромель — копель, хромель — алюмель и др.
4. Материалы высокого сопротивления (резистивные), например: константан, манганин, нихром и т. д.
5. Контактные материалы для сильноточной и слаботочной аппаратуры, размыкаемые материалы высоковольтной и низковольтной аппаратуры, скользящих, например: Cu, Ag, Al, W, графит, композиции Cu — W, Ag — W и др.
6. Припои.



Классификация проводников по агрегатному состоянию

1. Твердые вещества — проводники 1-го рода.
2. Жидкие вещества — проводники (электролиты, расплавленные металлы) 2-го рода.
3. Газообразные вещества — проводники (плазма) 3-го рода.



Особенности проводников

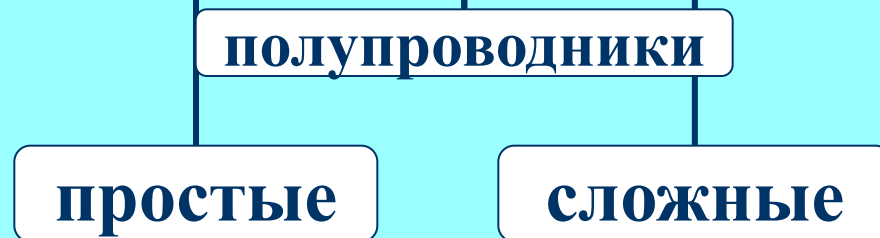
1. Проводниковые материалы обладают электронной проводимостью,
2. Температурный коэффициент электросопротивления (TKR) проводников положителен.
3. Механическая обработка металлов, а также наличие примесей приводят к увеличению удельного электросопротивления. Чтобы вернуть их прежнюю электропроводимость, их подвергают отжигу без доступа кислорода.

Классификация сверхпроводников

- Металлы и сплавы ниже определенной критической температуры ($T_{кр}$), переходящие в сверхпроводящее состояние, т. е. их сопротивление эл. току становится равным нулю называются **сверхпроводниками**
- Сверхпроводящие материалы с критической температурой, превышающей температуру жидкого азота (77 К), называются **высокотемпературными**.
- **Криопроводниками** называются материалы, которые при охлаждении ниже $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ приобретают высокую электропроводность, но не переходят в сверхпроводящее состояние.

Полупроводники: определение, классификация

- **Полупроводники** – это материалы , обладающие удельным электрическим сопротивлением в пределах $10^{-5} \dots 10^8$ Ом·м. Из простых полупроводников распространены германий и **кремний**.
- Используются для выпрямления и усиления эл. сигналов и превращения различных видов энергии в электрическую



Особенности полупроводников

1. Занимают промежуточное положение между диэлектриками и проводниками по удельному электросопротивлению.
2. Электрические параметры чувствительны к содержанию примесей.
3. Внешние воздействия (тепло, свет, давление, трение) сильно изменяют свойства материалов.
4. Полупроводники имеют отрицательный температурный коэффициент электросопротивления.
5. Полупроводники могут обладать электронной (n-типа) или дырочной (p-типа) проводимостью. Это позволяет создавать электронно-дырочный переход (p—n), обладающий униполярной проводимостью.



Применение полупроводников

- Терморезисторы — сопротивления, величина которых изменяется от температуры. Используются как датчики температуры в различных схемах автоматики.
- Термоэлементы — устройства, с помощью которых можно преобразовывать энергию электрического поля в тепловую энергию, и наоборот — тепловую в электрическую




Применение полупроводников

- **Фотоэлементы** — элементы, служащие для преобразования световой энергии в электрическую. Используются в солнечных батареях, вентильных элементах. В основе фотоэлементов лежит р—n-переход
- **Фоторезисторы** — элементы, сопротивления которых зависят от интенсивности светового потока, действующего на него.

Диэлектрики: определение, применение

- **Диэлектрики** — вещества, обладающие способностью поляризоваться в электрическом поле. Удельное электросопротивление $> 10^8$ Ом м
- **Явление поляризации** заключается в том, что под действием внешнего электрического поля связанные заряды диэлектрика смещаются в направлении действующих на них сил и тем больше, чем выше напряженность поля.
- **Используются** для изоляции токоведущих частей друг от друга и для создания емкостей (конденсаторов) — накопителей заряда, изоляторов.



Классификация диэлектриков по назначению

- 1. Пассивные.
- 1.1 Электроизоляционные.
- 1.1 Конденсаторные.
- 2. Активные.
- 2.1 Сегнетоэлектрики.
- 2.2 Пьезоэлектрики.
- 2.3 Пироэлектрики.
- 2.4 Жидкие кристаллы.



Классификация диэлектриков по химическому составу

- 1. Органические (смолы, пластмассы, лаки, масла, ткани).
- 2. Неорганические (керамика, стекло, слюда, фториды, асбест).
- 3. Элементоорганические (кремний, органические смолы, каучук, компаунд и другие).



Классификация диэлектриков по агрегатному состоянию

- 1. Газообразные (воздух, азот, водород, углекислый газ, элегаз-SF₆, фреон).
- 2. Жидкие (нефтяные масла, клеи, лаки).
- 3. Твердые (керамика, пластмасса, стекло, слюда, смола).

Физические характеристики диэлектриков

1. Поляризация характеризуется **относительной диэлектрической проницаемостью (ϵ)**, определяющей полярность диэлектриков.
2. Электропроводность (γ), характеризуемая удельным, **объемным и поверхностным электросопротивлением**, определяющим токи сквозной проводимости и поверхностные токи утечки.
3. Диэлектрические потери, характеризуемые **тангенсом угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$)**, определяющим активную мощность, рассеиваемую в диэлектриках и вызывающую его потери.
4. Пробой в электрическом поле, характеризуемый **пробивной напряженностью ($E_{пр}$)**, определяющей его электрическую прочность.



Пробой диэлектриков

- Пробой диэлектрика или нарушение электрической прочности — нарушение электроизоляционных свойств при напряжениях, превышающих критические значения.
- Электрической прочностью ($E_{пр}$) называется минимальная напряженность однородного электрического поля, приводящая к пробое диэлектрика.
- Пробивное напряжение ($U_{пр}$) — минимальное напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика.

Механические свойства диэлектриков

1. **Прочность** — это способность материала сопротивляться действиям внешних сил, не разрушаясь.
2. **Пластичность** — способность материала изменять свои размеры и форму под действием внешних сил, не разрушаясь при этом.
3. **Вязкость** — способность материала оказывать сопротивление динамическим, быстро возрастающим нагрузкам.
4. **Твердость** — способность материала сопротивляться внедрению в него другого, более твердого тела под действием нагрузок.
5. **Упругость** — способность материала восстанавливать свои размеры и форму после превращения действия нагрузки.
6. **Надежность** — способность материала противостоять хрупкому разрушению.
7. **Долговечность** — способность материала сохранять свою работоспособность в течение заданного времени.



Физические свойства диэлектриков

- **Нагревостойкость** — способность диэлектрика выдерживать повышение температуры без недопустимого ухудшения своих свойств. Оценивается минимальной температурой, при которой проявляются изменения электрических или механических характеристик.
- Характеристика нагревостойкости — температурный индекс (ТИ), температура, при которой срок службы материала составляет 20 тыс. час.
- **Теплопроводность** — количество тепла, выделившееся в окружающую среду, прошедшую через единицу площади в единицу времени при градиенте температуры в 1 °С.
- **Холодостойкость** (морозоустойчивость) — способность диэлектриков работать при низких температурах без недопустимого ухудшения эксплуатационных характеристик.



Физические свойства диэлектриков

- Влагопроницаемость — способность материала пропускать сквозь себя пары воды.
- Влагостойкость — способность материала сохранять свои характеристики на допустимом эксплуатационном уровне в атмосфере, влажность которой близка к состоянию насыщения.
- Химическая стойкость — способность материала выдерживать длительное воздействие тех или иных химических реактивов без существенного изменения электрических, механических свойств и других свойств.
- Радиационная стойкость — способность диэлектрика выдерживать воздействия ионизирующего излучения без недопустимого ухудшения св-в
- Гигроскопичность — способность материала впитывать в себя влагу из окружающей среды.



Активные диэлектрики: определение, применение

Сегнетоэлектрики — вещества, обладающие спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью внешнего электрического поля.


Применяются для изготовления

1. малогабаритных низкочастотных конденсаторов с большой удельной емкостью.
2. диэлектриков, усилителей, модуляторов и других управляемых устройств.
3. сегнетоэлектриков в вычислительной технике в качестве ячеек памяти.
4. модуляторов и преобразователей лазерного излучения.
5. пьезоэлектрических, пироэлектрических преобразователей.



Активные диэлектрики : электреты

- Электреты — диэлектрические вещества, длительно сохраняющие поляризацию и создающие в окружающем пространстве электрическое поле.
- Термоэлектреты — способны создавать электрическое поле в течение многих месяцев и лет.
- Фотоэлектреты — способны сохранять электрическое поле в темноте и разряжаться при свете.



Активные диэлектрики: пиро- и пьезоэлектрики

- **Пироэлектрики** — вещества, обладающие спонтанной поляризацией, направление которой может быть изменено с помощью теплового воздействия, т. е. обладающей пироэлектрическим эффектом.
- **Пьезоэлектрики** — вещества, обладающие поляризацией под действием механических напряжений, т. е. обладающих пьезоэлектрическими эффектами.
- **Пьезомодуль (d)** — величина, равная заряду, возникающему на единице поверхности пьезоэлектрика при приложении к нему единицы давления.



Магнитные материалы: определение, классификация

- Магнитными материалами называются материалы, основным свойством которых является способность намагничиваться под влиянием внешнего магнитного поля.






Основные магнитные параметры

1. **Остаточная магнитная индукция (B_r)** — индукция в намагниченном материале, при котором напряженность магнитного поля H равна 0.
2. **Коэрцитивная сила (H_c)** — напряженность магнитного поля, которую нужно приложить к образцу, чтобы снять остаточную индукцию.
3. **Индукция насыщения (B_{max} , T_l)** — это максимальная индукция B_{max} , которая достигается при полном насыщении образца.
4. **Удельные потери на гистерезис (P_r , W_t)** за один цикл перемагничивания характеризуются площадью, охватываемой предельной петлей гистерезиса.

Основные магнитные параметры

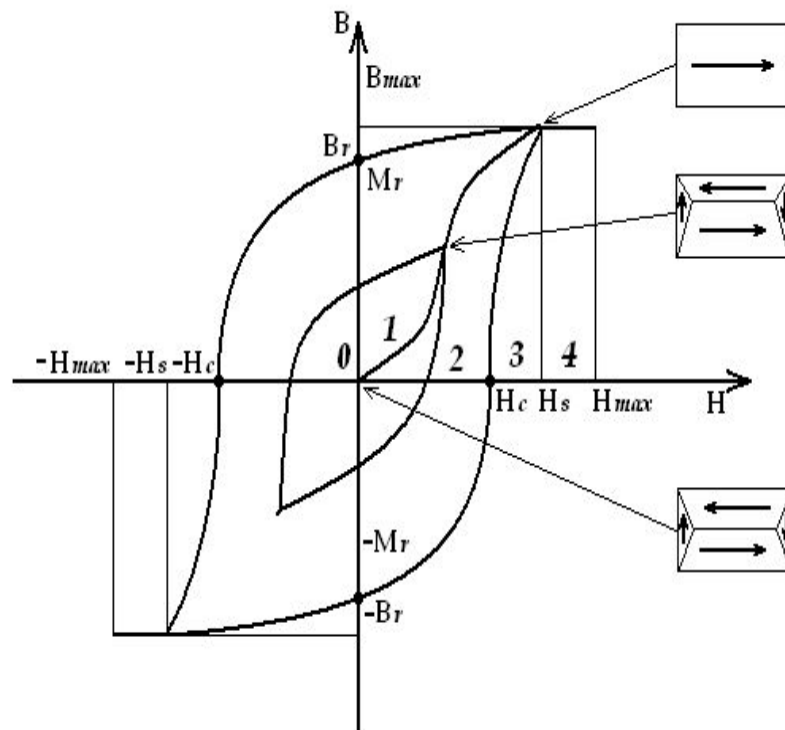
5. Абсолютная магнитная проницаемость (μ_a).
6. Амплитудная магнитная динамическая проницаемость.
7. Температурный коэффициент магнитной проницаемости (TK μ).
8. Потери на вихревые токи — мощность, учитывающая потери на вихревые токи в магнитном материале.
9. Удельные потери в магнитном материале — суммарные потери, возникающие при заданной магнитной индукции и частоте переменного поля, отнесенного к 1 кг материала, при синусоидальной форме переменной магнитной индукции.



Условия существования и проявления ферромагнитных свойств:

1. **Существование элементарных круговых токов в атомах.**
2. **Наличие нескомпенсированных спиновых моментов электронов.**
3. **Соотношение между диаметром электронной орбиты (D) и параметром решетки (a) должно быть: $2,8 > a/D > 1,6$.**
4. **Наличие доменной структуры, параллельно ориентированной.**
5. **Температура материала должна быть ниже точки Кюри.**

Сущность процесса намагничивания



1. Рост доменов, магнитные моменты которых близки по направлению с внешним полем и уменьшением других доменов.
2. Ориентация магнитных моментов всех доменов в направлении внешнего поля.

Домен - это область кристалла (10^{-3} м), в которых магнитные моменты ориентированы параллельно определенному кристаллическому направлению.

Петля гистерезиса ферромагнитного материала

Магнитно-мягкие материалы

- **Магнитно-мягкие** — материалы с малым значением коэрцитивной силы (H_c) до 100 А/м, большой величиной магнитной проницаемости и малыми потерями на гистерезис. Используются в качестве магнитопроводов электрических машин, трансформаторов, измерительных приборов, катушек индуктивности и т. д.
- **Требования к структуре:**
гомогенная структура, не имеющая внутренних напряжений после рекристаллизации, например, чистые металлы, твердые растворы.



Магнитно-мягкие материалы

1. **Технически чистое железо (железо армко)** C ~ 0,05%, примесей до 0,1%.
2. **Электротехническая сталь** (Fe — Si) (0,05,...0,005% C; 0,8,...4,5% Si):
 - динамная Si < 2%,
 - трансформаторная Si > 2%.
3. **Сплавы:**
 - железо-никелевые 45...78% Ni (пермаллои), 79НМ, 81НМА, 83НФ;
 - литейные сплавы — альсиферы (Fe — Si — Al);
 - металлокерамические — ферриты, оксиферы;
 - магнитодиэлектрики.



Пермаллои: определение, маркировка

- **Пермаллои** — железо-никелевые сплавы с содержанием никеля от 36 до 80%, с добавлением легирующих элементов, таких как кобальт, хром, молибден и др. Они обладают легкой намагничиваемостью в слабых полях, имеют повышенное удельное сопротивление, применяются при $f =$ до 200...500 кГц, пластичны, прокатываются в листы, ленты толщиной до 0,0015 мм, чувствительны к деформации.
Примеры маркировки: 79НМ, 80НХС, 50НХС, 45Н, 50Н, 50НП, 65НП.



Маркировка электротехнической стали

- Цифровое обозначение стали:
- 1 — цифра указывает класс по структурному состоянию;
- 2 — цифра указывает содержание кремния;
- 3 — цифра указывает группу по основной нормируемой характеристике;
- 4 — цифра указывает порядковый номер типа стали.
- Пример обозначения стали:
- 1511 — электротехническая сталь, тонколистовая, горячекатаная, изотропная, с содержанием кремния от 3,8 до 4,8%, удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и $f = 50$ Гц;



Магнитно-твердые материалы

- **Магнитно-твердые** —это материалы, имеющие большую коэрцитивную силу ($H_c > 100 \text{ A/m}$). Применяются для изготовления постоянных магнитов электрических машин, электроизмерительных приборов, в которых используется магнитная энергия в воздушном зазоре между полюсами магнита.
- **Требования к структуре:**
дисперсная неоднородная структура, имеющая внутренние напряжения; например, мартенсит с высокой плотностью дефектов строения.



Магнитно- твердые материалы

— Для маломощных магнитов:

1. В/у стали (С ~1,0%).
2. В/у хромистые стали: ЕХ, ЕХЗ, ЕХ7В6, ЕХ5К5, ЕХ9К15М.

— Для малогабаритных мощных магнитов:

1. Литейные сплавы: ални (АН); алнико (АНК); магнико (МНК).
2. Деформируемые сплавы: хромко (30ХК23); викаллой (52КВФ); кунико; кунифе.
3. Порошковые материалы: дисперсионно-твердеющие сплавы (Fe — Al — Ni — Co); ММК—1 (ЮН); ММК—2 (ЮНД—4)...ММК—11 (ЮНД К38Т7).
4. Сплавы на основе благородных и редкоземельных металлов: Ag — Mn — Al, Pt — Fe, Pt — Co, Pt — Pd — Co; например, платинакс ПлК—78; КС37; КС37А (самарий — 37%); КСП37 (самарий с празеодимом).



Список литературы:

- Электротехнические материалы
Методическое пособие для студентов.
Составитель Казачков О. В., ПетрГУ,
Петрозаводск, 2006