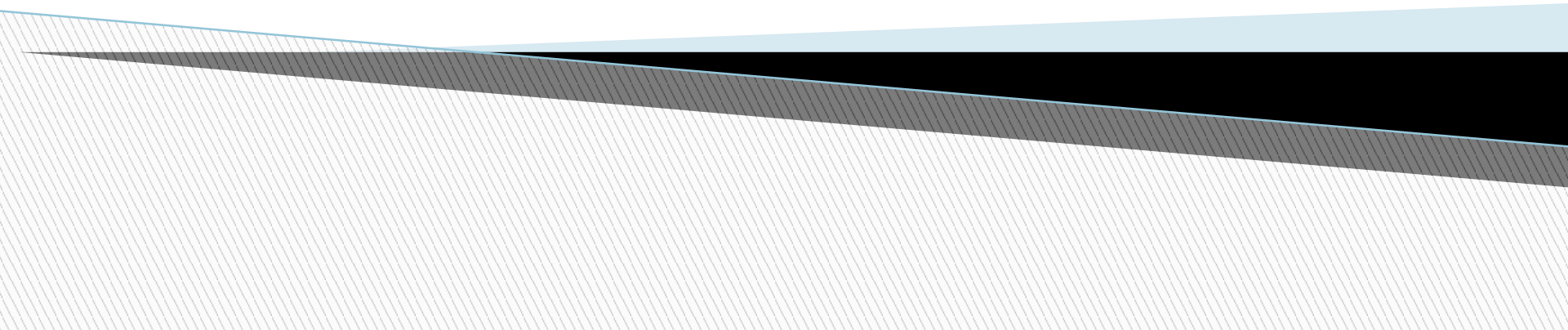


Магнитные материалы

Лекция – презентация по курсам
«Материалы электронной техники» и
«Электротехническое и конструкционное материаловедение»



Основные свойства магнитных материалов

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает магнитный момент. Магнитный момент единицы объема называется намагниченностью J (А/м)

$$J = \chi \cdot H,$$

где H – напряженность магнитного поля (А/м) -векторная величина, характеризующая магнитное поле, созданное движущимися зарядами и токами, и не зависящая от магнитных свойств среды ;

χ – магнитная восприимчивость – способность вещества к намагничиванию, величина безразмерная.

Намагниченное тело создает свое магнитное поле, которое по направлению соответствует или противоположно внешнему полю.

Основные свойства магнитных материалов

Магнитная индукция B (Тл) - основная характеристика магнитного поля. Вектор магнитной индукции B определяется из закона Ампера, выражающего силу, которая действует на элемент длины проводника с током I , помещенного в магнитное поле

$$dF = k I [Bdl],$$

где dF – сила; k – коэффициент пропорциональности; B – вектор магнитной индукции; dl – вектор элемента длины проводника, проведенный в направлении протекания тока.

Связь напряженности H магнитного поля с магнитной индукцией B в любом материале

$$B = \mu_0 (H + J), \text{ или } B = \mu_0 \mu H,$$

где μ_0 – магнитная постоянная в СИ, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (Гн/м),

$\mu = 1 + \chi$ – относительная магнитная проницаемость среды.

Величина μ показывает, во сколько раз магнитная индукция B в данной среде больше магнитной индукции в вакууме B_0 .

Магнитные свойства атома целиком определяются электронами.

Основные свойства магнитных материалов

Удельная энергия магнитного поля

$$W=(B \cdot H)/2$$

Магнитное поле создается током. По закону Био – Савара напряженность магнитного поля H пропорциональна силе тока и равна

$$H=I/(2\pi R)$$

где I – сила тока; R – расстояние (радиус) до проводника с током.

Выражение для напряженности поля в длинном соленоиде, которое специфично именно для магнитного поля, создаваемого током I

$$H = w I B = \mu_0 \mu_r w I,$$

где w – число витков катушки на единицу длины.

Классификация магнитных материалов

По реакции на внешнее магнитное поле и по характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно разделить на пять групп (типов):

- диамагнетики;
- парамагнетики;
- ферромагнетики;
- антиферромагнетики;
- ферримагнетики.

Классификация магнитных материалов

Диамagnetики – вещества с магнитной проницаемостью чуть меньше единицы, отличающиеся тем, что они выталкиваются из области магнитного поля.

Диамagnetизм обусловлен небольшим изменением угловой скорости орбитального вращения электрона при внесении атома в магнитное поле.

Диамagnetный эффект является универсальным, присущим всем веществам. Однако в большинстве случаев он маскируется более сильными магнитными эффектами.

Диамagnetики – все вещества с ковалентной химической связью и вещества в сверхпроводящем состоянии, имеют отрицательную магнитную восприимчивость, не зависящую от внешнего магнитного поля ($\chi = - (10^{-6} - 10^{-7})$, $\mu_r > 0$).

К диамagnetикам относят инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть), ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть и др.), большинство полупроводников и органических соединений.

Внешним проявлением диамagnetизма является выталкивание диамagnetиков из неоднородного магнитного поля.

Классификация магнитных материалов

Парамагнетики – вещества с $\chi > 1$, не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. Значение $\chi = 10^{-3} - 10^{-6}$.

Внешнее магнитное поле вызывает преимущественную ориентацию магнитных моментов атомов в одном направлении.

Парамагнетики, помещенные в магнитное поле, втягиваются в него.

К парамагнетикам относятся кислород, окись азота, щелочные и щелочно-земельные металлы, некоторые переходные металлы, алюминий, натрий, магний, тантал, вольфрам и соли железа, кобальта, никеля, редкоземельных металлов.

Классификация магнитных материалов

К ферромагнетикам относят вещества с большой магнитной проницаемостью (до 10^6), сильно зависящей от напряженности внешнего магнитного поля и температуры.

Ферромагнетикам присуща внутренняя магнитная упорядоченность, выражающаяся в существовании макроскопических областей с параллельно ориентированными магнитными моментами атомов. Важнейшая особенность ферромагнетиков заключается в их способности намагничиваться до насыщения в слабых магнитных полях.

$$\chi > 0, \mu_r \gg 1.$$

Основными ферромагнетиками являются железо, никель, кобальт, их соединения и сплавы, некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия.

При низких температурах некоторые редкоземельные элементы – гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, сплавы RCO_5 , где R – редкоземельный элемент (Sm, Ce или Pr), – также проявляют свойства ферромагнетиков.

Классификация магнитных материалов

Антиферромагнетиками являются вещества, в которых ниже некоторой температуры T° спонтанно возникает антипараллельная ориентация магнитных моментов одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки

При нагревании антиферромагнетик переходит в парамагнитное состояние.

$$\chi=10^{-3}-10^{-5}.$$

Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Tm и др.), окислы, галогениды, сульфиды, карбонаты переходных металлов. Всего более 1000 соединений.

Классификация магнитных материалов

- К **ферримагнетикам** относят вещества, магнитные свойства которых обусловлены **нескомпенсированным антиферромагнетизмом**. Магнитная проницаемость у них высока и сильно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.
- Свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но, главным образом – различные оксидные соединения, а главный интерес представляют ферриты.
- Диа-, пара- и антиферромагнетики можно объединить в группу **слабomagнитных** веществ, тогда как ферро- и ферримагнетики представляют собой **сильномагнитные** материалы и представляют наибольший интерес.

Общие свойства магнитных материалов

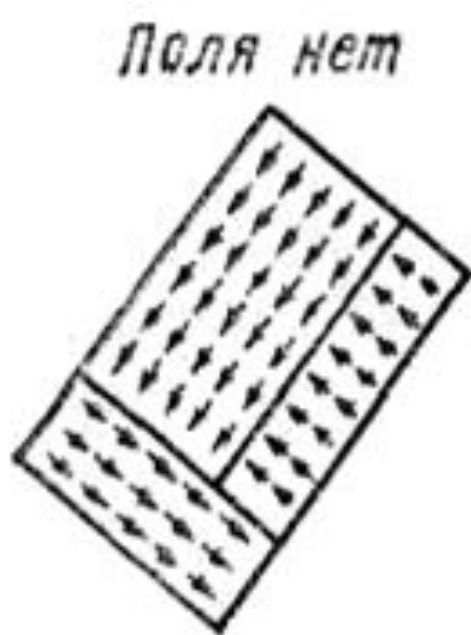
К общим свойствам магнитных материалов относятся:

- ❖ наличие кристаллической структуры. Ферромагнетики в основном кристаллизуются в трех типах решеток:
 - кубической гранецентрированной (никель),
 - кубической объемно-центрированной (железо)
 - гексагональной (кобальт);
- ❖ зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля и температуры;
- ❖ явление магнитного гистерезиса;
- ❖ наличие температуры Кюри, т. е. такого предельного значения температуры, выше которого ферромагнитный материал теряет магнитные свойства и становится парамагнетиком ($\mu_r = 1$);
- ❖ магнитная анизотропия.

Общие свойства магнитных материалов

▣Процесс намагничивания

▣Возникновение магнитных свойств у ферромагнетиков связано с их доменным строением. Каждый реальный магнитный материал разделен по всему объему на множество замкнутых областей – доменов, в каждом из которых самопроизвольная намагниченность однородна и направлена по одной из осей легкой намагниченности.



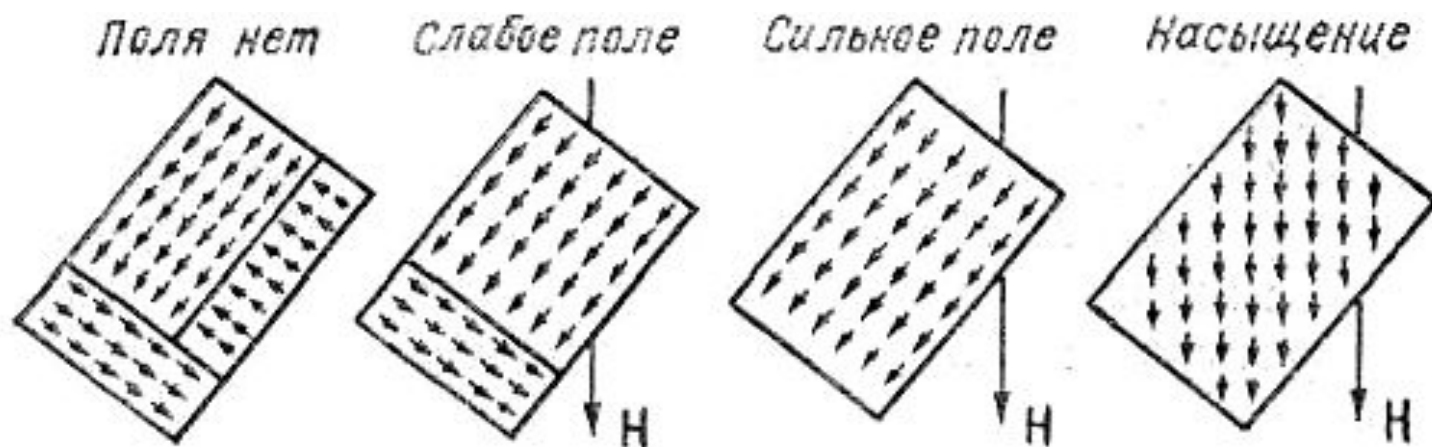
Ниже температуры точки Кюри ферромагнитное тело разбито на домены и внутри каждого домена намагниченность равна намагниченности насыщения. В отсутствие внешнего магнитного поля направления векторов намагниченности различных доменов не совпадают и результирующая намагниченность может быть равна нулю. Такое состояние энергетически выгодно, и кристалл в целом не магнитен, так как магнитные моменты доменов ориентированы в пространстве равновероятно.

Общие свойства магнитных материалов

Намагничивание ферромагнитного материала под влиянием внешнего магнитного поля сводится к следующим процессам:

- рост доменов, магнитные моменты которых составляют наименьший угол с направлением поля, и к уменьшению размеров других доменов (процесс смещения границ доменов);
- поворот собственных магнитных моментов доменов в направлении внешнего поля (процесс ориентации).

Магнитное насыщение достигается тогда, когда рост доменов прекратится и магнитные моменты всех спонтанно намагниченных микроструктурных участков окажутся ориентированными в направлении поля.



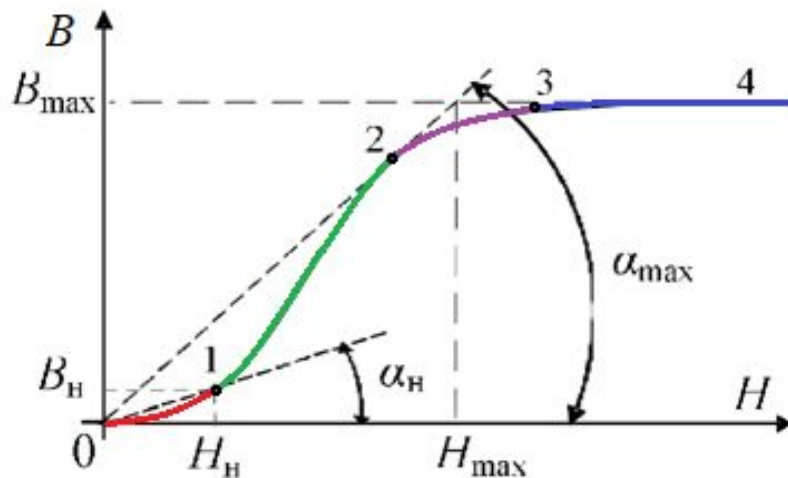
Общие свойства магнитных материалов

Основная кривая намагничивания

Основной характеристикой магнитного материала является кривая намагничивания – зависимость магнитной индукции материала B от напряженности внешнего магнитного поля H .

Ее можно разбить на четыре области, характеризующие процесс намагничивания.

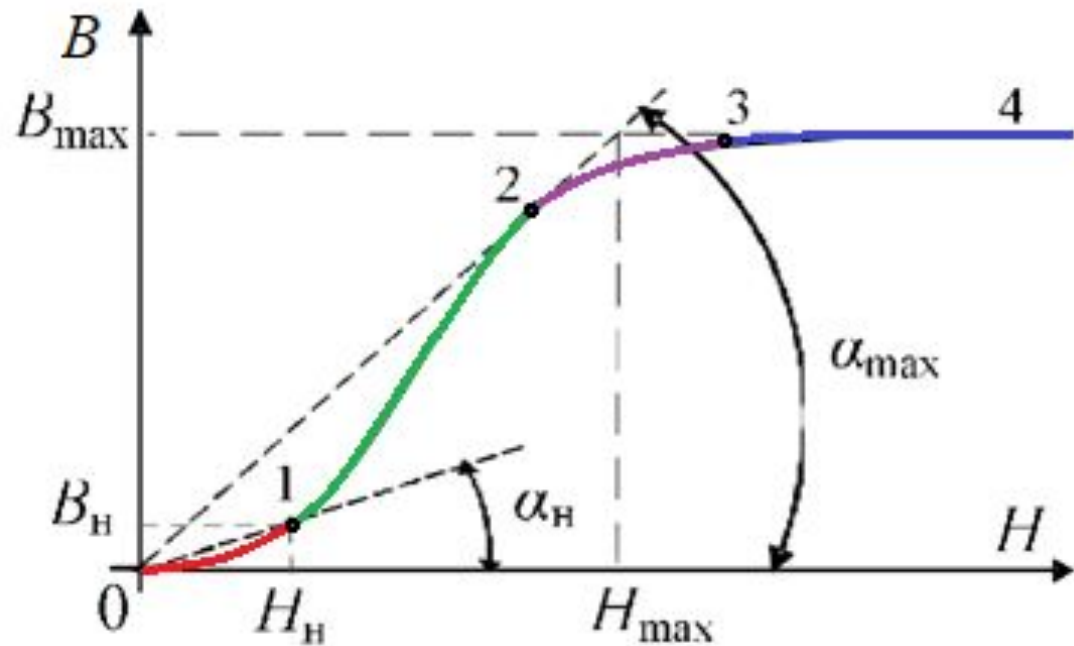
от 0 до 1 – это область слабых магнитных полей, $H < 0,1$ А/м, процессы смещения границ доменов носят обратимый характер. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость не изменяются. Смещение границ доменов носит упругий характер. Магнитная цепь представляет собой линейный магнитный элемент.



от 1 до 2 – процессы необратимого смещения границ доменов. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость изменяются за счет роста напряженности внешнего магнитного поля

Общие свойства магнитных материалов

- от 2 до 3 – процессы вращения. Происходит поворот векторов собственного намагничивания и их ориентация в направлении внешнего магнитного поля. Индукция изменяется за счет процесса вращения
- от 3 до 4 – насыщение. Область, где наблюдается незначительное увеличение магнитной индукции B , которое происходит только за счет роста намагниченности самого домена.



Общие свойства магнитных материалов

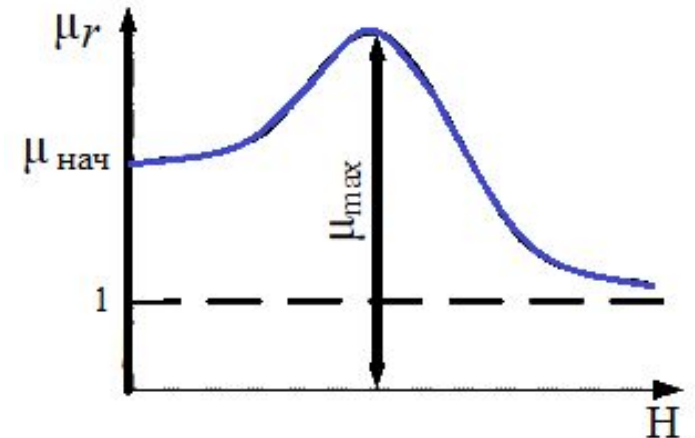
Магнитная проницаемость

▣ *Абсолютная* магнитная проницаемость

$$\mu_a = B/H$$

▣ *Относительная* магнитная проницаемость

$$\mu_r = B/(\mu_0 H)$$



Зависимость $\mu_r = f(H)$

▣ *Начальная* магнитная проницаемость — это магнитная проницаемость при напряженности магнитного поля, равной нулю. На практике ее значение определяется при очень слабых полях, не более 0,1 А/м.

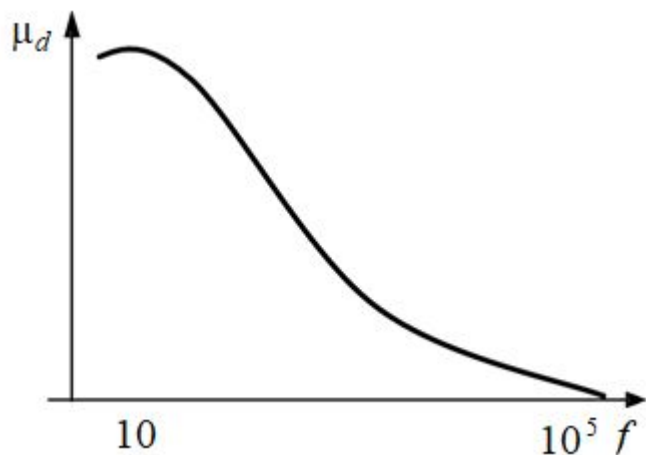
▣ *Максимальная* магнитная проницаемость — это наибольшее значение магнитной проницаемости при изменении магнитного поля.

Общие свойства магнитных материалов

Дифференциальная магнитная проницаемость – это отношение производной индукции по напряженности магнитного поля в данной точке кривой намагничивания к магнитной постоянной

$$\mu_d = dB / (\mu_0 dH).$$

С ↑ частоты переменного магнитного поля дифференциальная проницаемость μ_d ↓ из-за инерционности магнитных процессов



Зависимость дифференциальной магнитной проницаемости от частоты

Динамическая магнитная проницаемость – это отношение наибольшего значения магнитной индукции к наибольшему значению напряжённости магнитного поля при одновременном воздействии постоянного H_0 и переменного H_{\sim} магнитных полей, обычно при условии $H_{\sim} \ll H_0$.

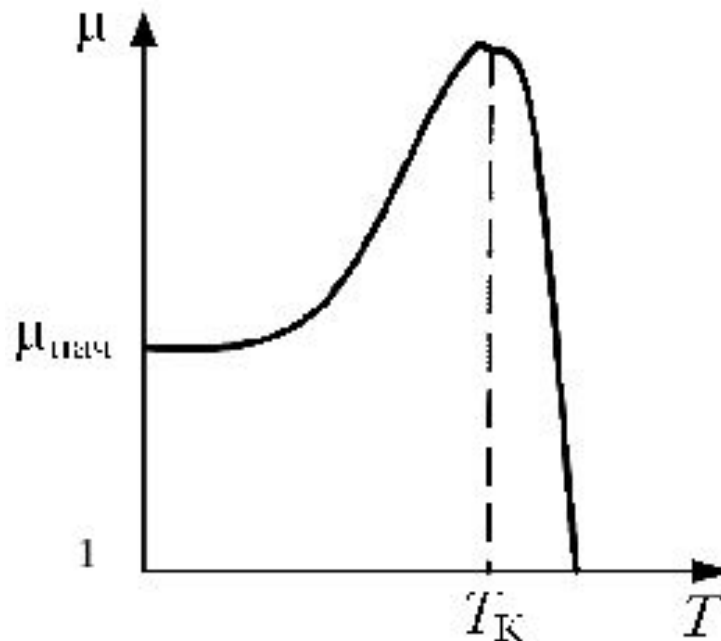
Общие свойства магнитных материалов

Температура Кюри

Магнитная проницаемость магнитных материалов зависит от температуры.

Предельно допустимая температура, выше которой магнитный материал теряет свои магнитные свойства и становится парамагнетиком, называется точкой Кюри.

При температурах выше точки Кюри области спонтанного намагничивания в ферромагнетиках и ферримагнетиках нарушаются тепловым движением и материал перестает быть магнитным, т. е. $\mu_r=1$.



Зависимость относительной магнитной проницаемости от температуры

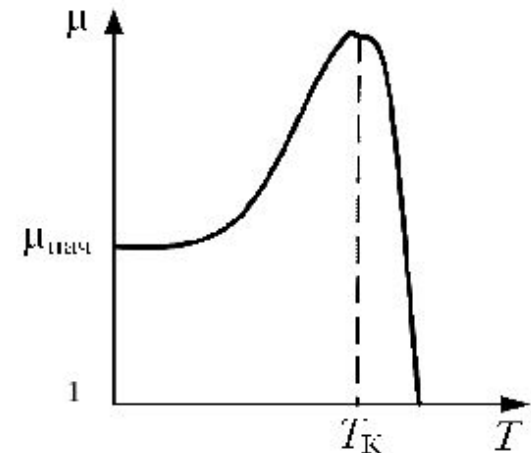
Общие свойства магнитных материалов

При температурах несколько ниже T_K наблюдается четко выраженный максимум, сглаживающийся при увеличении напряженности поля.

↑ μ_r объясняется тем, что при нагревании облегчается смещение доменных границ и поворот векторов намагниченности доменов, главным образом из-за уменьшения констант магнитострикции и магнитной анизотропии. Дальнейшее ↓ μ_r при $T > T_K$ вызвано резким ↓ спонтанной намагниченности доменов.

Для характеристики изменения магнитной проницаемости при изменении температуры обычно пользуются температурным коэффициентом магнитной проницаемости $T_K\mu$, K^{-1}

$$T_K\mu = \alpha\mu = (1/\mu)(d\mu/dt)$$



Общие свойства магнитных материалов

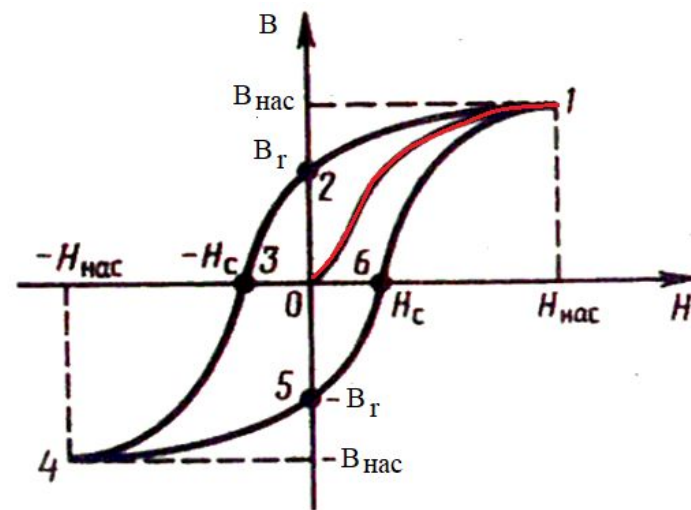
Магнитный гистерезис

Если медленно производить намагничивание магнитного материала, а затем его размагничивание, то изменение индукции будет отставать от изменения напряженности. Это явление получило название магнитного гистерезиса.

Магнитный гистерезис – это явление отставания изменения индукции магнитного материала от напряженности внешнего магнитного поля при его квазистатическом изменении. Магнитный гистерезис вызывается необратимыми процессами намагничивания.

К основным параметрам петли гистерезиса относятся:

- Индукция насыщения B_s ($B_{нас}$);
- Напряжённость поля насыщения H_s ($H_{нас}$);
- Остаточная индукция B_r ;
- Коэрцитивная сила H_c .



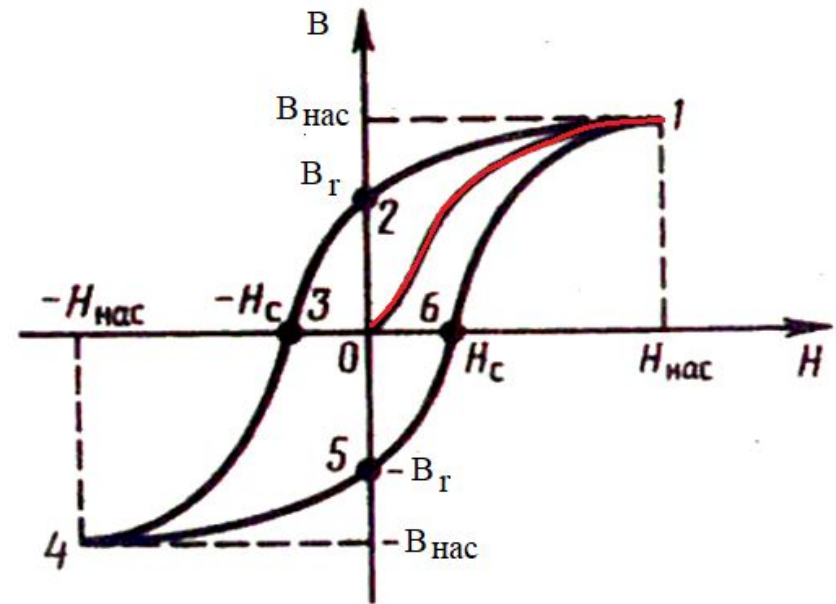
Общие свойства магнитных материалов

Индукция насыщения

Индукция $B_{\text{нас}}$, характерная для всех магнитных материалов, называется индукцией насыщения. Чем больше $B_{\text{нас}}$ при заданной H , тем лучше магнитный материал.

Если образец магнитного материала намагничивать, непрерывно \uparrow напряженность магнитного поля H , магнитная индукция B тоже будет непрерывно \uparrow по кривой начального намагничивания (0-1). Эта кривая заканчивается в точке 1, соответствующей индукции насыщения $B_{\text{нас}}$.

При $\downarrow H$ индукция B тоже будет \downarrow , но начиная с величины B_m значения B не будут совпадать с начальной кривой намагничивания.



Петля гистерезиса магнитного материала

Общие свойства магнитных материалов

Остаточная магнитная индукция

- Остаточная магнитная индукция B_r наблюдается в ферромагнитном материале, когда $H=0$. Для размагничивания образца надо, чтобы напряженность магнитного поля изменила свое направление на противоположное $-H$. Напряженность поля, при которой индукция становится равной нулю, называется коэрцитивной силой H_c . Чем больше H_c , тем в меньшей степени материал способен размагничиваться.
- Если после размагничивания материала намагничивать его в противоположном направлении, образуется замкнутая петля, которую называют *предельной петлей гистерезиса* – петля, снятая при плавном изменении напряженности магнитного поля от $+H$ до $-H$, когда магнитная индукция становится равной индукции насыщения B_s .

Общие свойства магнитных материалов

Потери в магнитных материалах

При каждом цикле перемагничивания часть магнитной энергии, запасаемой в материале, теряется, т. е. переходит в тепло. Эти потери называются потерями на перемагничивание. Потери на перемагничивание пропорциональны площади кривой гистерезиса. Для материалов, используемых в энергетике, в особенности для трансформаторов, потери энергии желательно уменьшить, т. е. уменьшить площадь кривой. Это может быть достигнуто, если коэрцитивная сила будет как можно меньше.

В переменных полях площадь петли гистерезиса \uparrow за счет:

- потерь на гистерезис P_H ,
- потерь на вихревые токи $P_{вт}$,
- дополнительных потерь P_d .

Такая петля называется *динамической*, а сумма этих потерь называется полными или суммарными потерями.

Общие свойства магнитных материалов

Мощность потерь на гистерезис

Это потери P_{Γ} , затрачиваемые на перемагничивание единицы массы материала за один цикл [Вт/кг]. Их величина зависит от частоты перемагничивания и значения максимальной индукции. Они определяются (за один цикл) площадью петли гистерезиса.

$$P_{\Gamma} = \eta (B_m)^n f V$$

Потери энергии на вихревые токи

Потери энергии на вихревые токи $P_{\text{вп}}$ зависят от удельного электрического сопротивления материала ρ . Чем больше ρ , тем меньше потери. $P_{\text{вп}}$ также зависят от плотности материала и его толщины. Они пропорциональны квадрату амплитуды магнитной индукции B_m и частоты f переменного поля.

$$P_{\Gamma} = \zeta (B_m)^2 f^2 V$$

где η , ζ – коэффициенты, зависящие от материала; B_m – максимальная индукция за цикл перемагничивания; n – показатель, изменяющийся в диапазоне от 1,6 до 2; f – частота; V – объем тела.

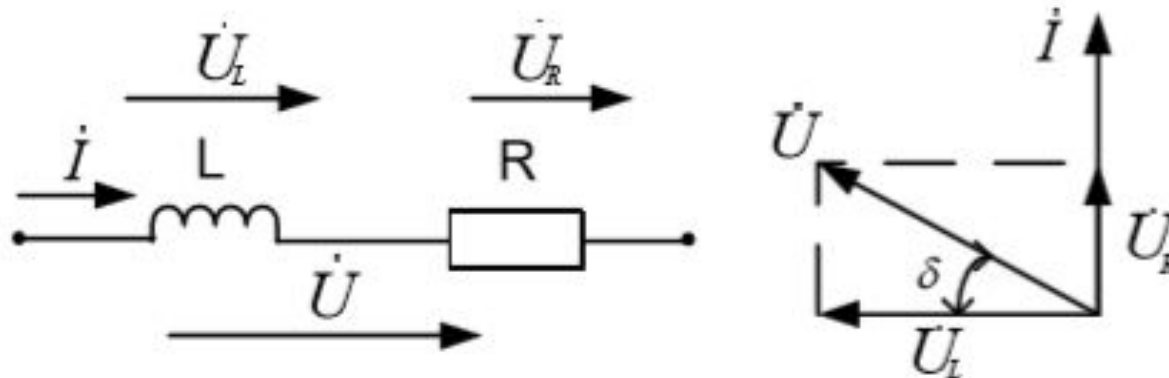
Общие свойства магнитных материалов

На высоких частотах важны, в первую очередь, потери на вихревые токи, так как они пропорциональны второй степени частоты.

В переменных полях для характеристики магнитных потерь применяется параметр «тангенс угла магнитных потерь», который можно определить по эквивалентной схеме замещения

$$\operatorname{tg}\delta_m = R/(\omega L).$$

Величина, обратная $\operatorname{tg}\delta_m$, называется добротностью сердечника (для различных материалов приводится в справочниках).



Общие свойства магнитных материалов

Суммарные активные потери

$$P_a = I^2 \omega L \operatorname{tg} \delta m$$

где I – сила тока;

L – эквивалентная индуктивность;

ω – круговая частота;

δm – угол магнитных потерь.

Удельные магнитные потери

$$P_{уд} = \mu_0 \mu_r H^2 \omega^2 \operatorname{tg} \delta m$$

Дополнительные потери или потери на магнитную вязкость (магнитное последствие) находят как разность между полными потерями и суммой потерь на гистерезис и вихревые токи

$$P_d = P_a - (P_H + P_{вт})$$

Характеристики ферромагнитных материалов

Коэффициент прямоугольности петли гистерезиса

Для оценки формы гистерезисной петли пользуются коэффициентом прямоугольности петли гистерезиса

$$K_{\Pi} = B_r / B_m$$

Чем больше K_{Π} , тем прямоугольнее петля.

Удельная объемная энергия

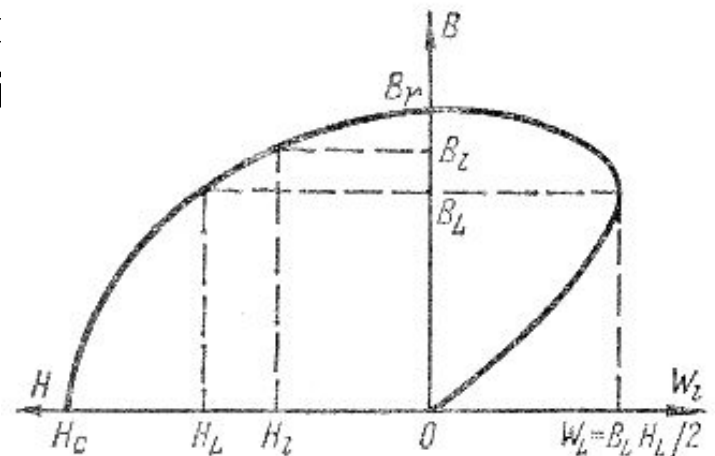
Это характеристика, применяемая для оценки свойств магнитно-твердых материалов, выражается формулой:

$$W_m = 1/2(B_d \cdot H_d),$$

где B_d и H_d соответственно индукция и напряженность магнитного поля, соответствующие максимальному значению удельной объемной энергии.

Чем больше объемная энергия, тем л постоянный магнит, из него изготовленный

Кривые
размагничивания
(II квадрант) и
магнитной энергии
(I квадрант)



Классификация магнитных материалов

По поведению в магнитном поле все магнитные материалы делятся на две основные группы

- магнитно-мягкие (МММ)
- магнитно-твердые (МТМ).

Классификация магнитных материалов

МММ удовлетворяют требованиям, согласно которым материал должен:

- ❖ без потерь, легко намагничиваться и размагничиваться,
- ❖ обладать узкой петлей гистерезиса, т.е. малой H_c и большими $\mu_{нач}$ и $\mu_{тах}$;
- ❖ иметь высокую индукцию насыщения $B_{нас}$, т.е. обеспечивать прохождение максимального магнитного потока через единичное сечение магнитопровода, что уменьшает его габариты и вес;
- ❖ обеспечивать малые потери при работе в переменных полях, что снижает температуру нагрева изделия, габариты и вес, повышает КПД и рабочую индукцию;
- ❖ удовлетворять дополнительным требованиям, связанным с механическими свойствами, стабильностью во времени и при разных температурах, низкой стоимостью.

МММ благодаря своим свойствам применяются в основном в качестве магнитопроводов дросселей, трансформаторов, электромагнитов, электрических машин и т. д.

Классификация магнитных материалов

МТМ - материалы, обладающие следующими общими свойствами:

- высокие значения коэрцитивной силы H_c (выше 4 кА/м);
- большая удельная энергия W_{\max} (кДж/м²). Удельная энергия тем больше, чем больше остаточная индукция и коэрцитивная сила материала;
- широкая петля гистерезиса;
- невысокие значения магнитной проницаемости μ_r (чем «тверже» магнитный материал, тем ниже значение μ_r);
- трудно намагничиваются, но длительное время сохраняют намагниченность.

Используются **МТМ** для изготовления постоянных магнитов и устройств хранения информации (звуковой, цифровой, видео).

Классификация магнитных материалов

По составу все магнитные материалы делятся на

□металлические

□неметаллические

□магнитодиэлектрики.

□**Металлические магнитные материалы** это чистые металлы (железо, кобальт, никель) и магнитные сплавы некоторых металлов.

□**Неметаллические магнитные материалы** – ферриты, получаемые из порошкообразной смеси окислов железа и окислов других металлов. Опрессованные ферритовые изделия подвергаются отжигу, в результате чего они превращаются в твердые монолитные детали.

□**Магнитодиэлектрики** представляют собой композиционные материалы, состоящие из 60-80% порошкообразного магнитного материала и 40-20% диэлектрика.

Классификация магнитных материалов

□ Ферриты и магнитодиэлектрики отличаются от металлических магнитных материалов большими ρ (10^2 - 10^8 Ом·м), от чего потери на вихревые токи малы. Это позволяет использовать их в высокочастотной технике. Кроме того, ферриты обладают большой стабильностью магнитных параметров в широком диапазоне частот (включая СВЧ).

Классификация магнитных материалов

Металлические магнитомягкие материалы

Электротехническая сталь ($\mu_{кр} = 200\text{--}600$, $H_c = 10\text{--}65$ А/м, удельное электрическое сопротивление находится в пределах от 0,25 до 0,6 мкОм·м). Ее получают холодной прокаткой листов электротехнической стали и отжигом в интервале температур от 900 до 1000 °С. Это приводит к сильной магнитной анизотропии ввиду текстурированности материала. Толщина листов составляет 0,05–1 мм. Она может иметь электроизоляционное покрытие. Применяется для ленточных сердечников трансформаторов, понижая их массу на 20–40 %.

Карбонильное железо представляет собой тонкодисперсный порошок, состоящий из частиц сферической формы диаметром 1–8 мкм. В порошке карбонильного железа отсутствуют Si, P, S, но есть углерод. ($\mu_n = 2500\text{--}3000$; $\mu_{\square} = 20000\text{--}21000$; $H_c = 4.5\text{--}6.2$ А/м). Его применяют при изготовлении высокочастотных магнитодиэлектрических сердечников.

Классификация магнитных материалов

Пермаллои - пластичные Fe–Ni-сплавы с содержанием никеля 45–80%, легко прокатываются в тонкие листы и ленты, толщиной до 1 мкм.

При содержании никеля 45–50% называются низконикелевыми, 60–80% - высоконикелевыми.

Бывают двух видов, отличающиеся по свойствам:

□ $\mu_{кр} = 1500–4000$, $H_c = 5–32$ А/м, $\rho = 0,45 - 0,9$ мкОм·м;

□ $\mu_{кр} = 7000–100\ 000$, $H_c = 0,65–5$ А/м, $\rho = 0,2 - 0,8$ мкОм·м.

Для улучшения магнитных характеристик в пермаллои вводят молибден, хром, кремний или медь, отжигают в водороде или вакууме, при помощи турбомолекулярных насосов.

Легированные пермаллои применяют для деталей аппаратуры, работающих на частотах 1–5 МГц. В магнитных усилителях применяют пермаллои с прямоугольной петлей гистерезиса.

Классификация магнитных материалов

Альсиферы представляют собой нековкие, хрупкие сплавы, состоящие из 5,5–13% алюминия, 9–10% кремния, остальное – железо.

$$\square \mu_{\text{H}} = 6000 - 7000$$

$$\square \mu_{\text{M}} = 30000 - 35000$$

$$\square H_{\text{c}} = 2.2 \text{ А/м}$$

$$\square \rho = 0.8 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$$

Альсиферы получают путем литья.

Из него изготавливают литые сердечники, работающие в диапазоне до 50 кГц. Они применяются для изготовления магнитных экранов, корпусов приборов и аппаратов, фасонных деталей магнитопроводов и других изделий, работающих в постоянных магнитных полях. Тонкие порошки альсифера применяются в качестве ферромагнитной составляющей магнитодиэлектриков.

Классификация магнитных материалов

К высокочастотным магнитомягким материалам относят **ферриты**. Их удельное электрическое сопротивление в 10^3 – 10^{13} раз больше, чем у Fe. Получают ферриты в виде керамики и монокристаллов.

Ферриты являются твердыми и хрупкими материалами, допускают только шлифовку и полировку (исключена обработка резанием).

Наиболее распространены твердые растворы замещения:

Ni–Zn, Mn–Zn – ферриты;

NiFe₂O₄, MnFe₂O₄ – ферримагнетики;

ZnFe₂O₄ – немагнитен.

К общим свойствам ферритов можно отнести:

- ▣ высокое значение удельного сопротивления;
- ▣ малое значение индукции насыщения;
- ▣ сложная температурная зависимость и наличие точки температурного насыщения, при которой магнитная индукция меняет свой знак на противоположный (B становится меньше 0);
- ▣ резко выраженный частотный диапазон, наличие граничной частоты, при которой начинается быстрый рост тангенса магнитных потерь.

Классификация магнитных материалов

Металлические магнитотвердые материалы

По составу, состоянию и способу получения магнитно-твердые материалы подразделяются на:

- легированные стали, закаливаемые на мартенсит;
- литые магнитно-твердые сплавы;
- магниты из порошков;
- магнитно-твердые ферриты;
- пластически деформируемые сплавы и магнитные ленты.

Характеристиками материалов для постоянных магнитов служат коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная энергия, отдаваемая магнитом во внешнее пространство. Магнитная проницаемость материалов для постоянных магнитов ниже, чем МММ, причем чем выше коэрцитивная сила, тем меньше магнитная проницаемость.

Классификация магнитных материалов

Литые магнитно-твердые сплавы

Большую магнитную энергию имеют тройные сплавы Al-Ni-Fe, которые раньше называли сплавами *альни*. При добавлении кобальта или кремния в эти сплавы их магнитные свойства повышаются.

Недостатком этих сплавов является трудность изготовления из них изделий точных размеров вследствие хрупкости и твердости их, допускающих обработку только путем шлифовки.

Классификация магнитных материалов

Магниты из порошков

Необходимость получения особенно мелких изделий со строго выдержанными размерами обусловила привлечение методов порошковой металлургии для получения постоянных магнитов. При этом различают металлокерамические магниты и магниты из зерен порошка, скрепленных тем или иным связующим (металлопластические магниты).

Классификация магнитных материалов

Магнитодиэлектрики

Это композиционные материалы, состоящие из мелкодисперсных частиц магнитно-мягкого материала, соединенных каким-либо органическим или неорганическим диэлектриком. В качестве мелкодисперсных МММ применяют карбонильное железо, альсиферы и некоторые сорта пермаллоев. В качестве диэлектрика – эпоксидные или бакелитовые смолы, полистирол, жидкое стекло и др.

Назначение диэлектриков не только в том, чтобы соединять частицы магнитного материала, но и создать между ними электроизоляционные прослойки и тем самым повысить электрическое сопротивление магнитодиэлектрика. Это резко снижает потери на вихревые токи и дает возможность работать на частотах 10–100 МГц (в зависимости от состава).

Список литературы

- 1) **Никитина Е. П.** Материаловедение: конспект лекций/ Е.П.Никитина, Е.П.Санникова. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2009. – 128 с.
- 2) **Марков В.Ф.** Материалы современной электроники : [учеб. пособие] / В. Ф. Марков, Х. Н. Мухамедзянов, Л. Н. Маскаева ; [под общ. ред. В. Ф. Маркова] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 272 с.
- 3) **Петрова Л.Г., Потапов М.А., Чудина О.В.** Электротехнические материалы: Учебное пособие / МАДИ (ГТУ). – М., 2008. - 198 с.

Спасибо за внимание!