

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ
ТЕЛ**

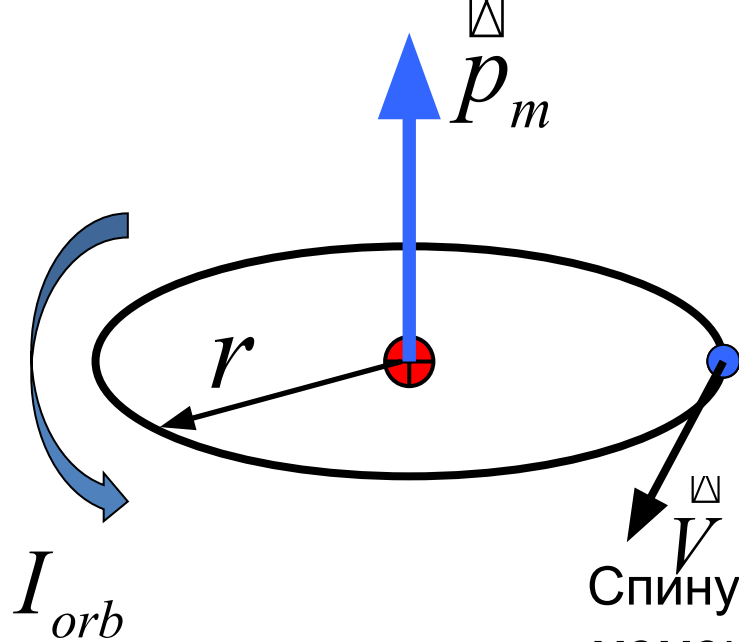
Магнитный момент

В любом веществе, помещенном в электрическое поле, возникает электрический дипольный момент P , в любом веществе, внесенном в магнитное поле, возникает магнитный момент P_m .

Магнитный момент создается не системой точечных зарядов, а электрическими токами, текущими внутри системы. Магнитный момент замкнутого плоского контура с током равен произведению силы тока на площадь витка и направлен вдоль его правой нормали.

В атомных масштабах движение электронов и протонов создает орбитальные микротоки, связанные с движением этих частиц в атомах или атомных ядрах. Наличие у микрочастиц спина обуславливает существование у них спинового магнитного момента. Магнитный момент тела векторно складывается из элементарных магнитных моментов слагающих его частиц. Из магнитных моментов ядра и электронов складывается магнитный момент атома.

Все вещества подвержены влиянию магнитного поля и

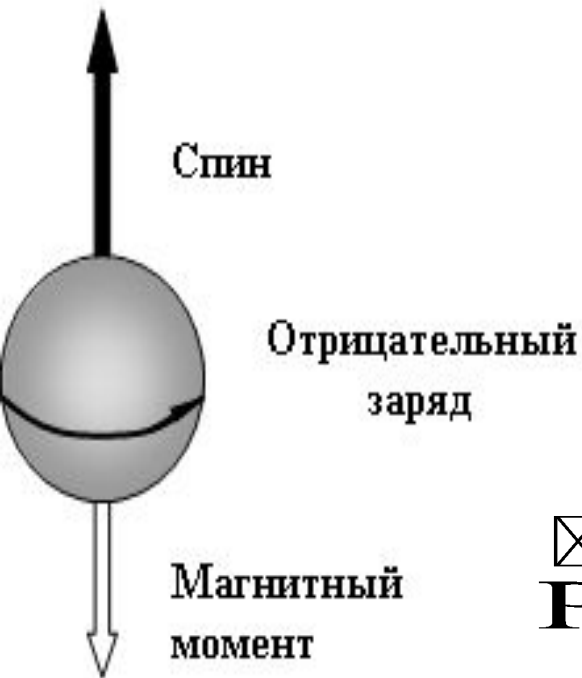


Орбитальному току так же, как и в случае витка и рамки с током, соответствует магнитный момент, называемый орбитальным магнитным моментом электрона

$$p_m = IS = I\pi r^2$$

Спину соответствует *собственный магнитный момент* электрона, также имеющий неизменное значение. Векторы магнитного и спинового моментов антипараллельны, а отношение их оказывается в два раза больше, чем в случае движения электрона по орбите.

Полный магнитный момент атома складывается из геометрической суммы орбитальных и спиновых моментов всех электронов в атоме



$$\vec{P}_m = \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi} + \sum_{i=1}^n \vec{p}_{msi} \cdot$$

Намагниченность и магнитная индукция

Магнитное взаимодействие пространственно разделенных тел осуществляется магнитным полем с напряженностью H .

Намагниченность M – магнитный момент единицы объема вещества: $M = P_m / V$.

Намагниченность возрастает с увеличением напряженности магнитного поля: $M = \chi H$,

где χ – **магнитная восприимчивость**.

Магнитное поле создает магнитную индукцию B . В вакууме магнитная индукция связана с напряженностью магнитного поля через магнитную проницаемость вакуума (**магнитную постоянную**) $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м: $B = \mu_0 H$.

Магнитная индукция, создаваемая в присутствии вещества, складывается из векторов напряженности внешнего магнитного поля и намагниченности вещества: $B = \mu_0 (H + M)$ или $B = \mu_0 H (1 + \chi)$ где μ_0 – магнитная постоянная.

Магнитные проницаемость и восприимчивость

Относительная магнитная проницаемость μ

означает во сколько раз при заданном распределении макроскопических токов магнитная индукция в рассматриваемой точке поля в данном веществе больше, чем в вакууме.

Таким образом, напряженность H характеризует внешнее магнитное поле, а индукция B – внутренне магнитное поле в веществе. Поэтому μ показывает чувствительность (коэффициент усиления) вещества к внешнему магнитному полю.

Если внешнее магнитное поле изменяется, то μ характеризует скорость изменения магнитного поля в веществе $\mu_d = \mu_0^{-1}(dB / dH)$ – дифференциальная магнитная проницаемость.

Из связи между магнитной индукцией B и намагниченностью M следует, что

$$\chi = \mu - 1.$$

Классификация магнетиков

Свойство	Знак χ	$ \chi $	$\chi(H)$	$\chi(25^\circ\text{C})$	Причина магнетизма
Диа-магнетизм	—	$10^{-6} \div 10^{-5}$	Нет	H_2O : $-0,72 \cdot 10^{-6}$; Bi : $-14 \cdot 10^{-6}$	Прецессия спаренных электронов $[\uparrow\downarrow]$
Пара-магнетизм	+	$10^{-5} \div 10^{-2}$	Нет	O_2 : $0,15 \cdot 10^{-6}$; W : $14 \cdot 10^{-6}$	Собственный P_m неспаренного электрона $[\uparrow]$
Ферро-магнетизм	+	$10^2 \div 10^4$	Есть	Fe : < 650 ; $\text{Sm}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Co}_5$: < 8000	Кооперативное $[\uparrow][\uparrow]$ выстраивание спинов неспаренных электронов
Антиферро-магнетизм	+	$10^{-4} \div 10^{-2}$	Есть	MnO : $< 10^{-2}$	Антипараллельное выстраивание спинов неспаренных электронов двух подсистем $[\uparrow][\downarrow]$
Ферри-магнетизм	+	$10^1 \div 10^3$	Есть	BaFeO_4 : < 60	Антипараллельное $[\uparrow][\downarrow]$ выстраивание спинов неспаренных электронов двух <i>разных</i> подсистем

Ферромагнетики

Ферромагнетизм обнаруживают кристаллы только девяти химических элементов: 3d-металлы (**Fe, Ni, Co**) и 4f-металлы (**Gd, Dy, Tb, Ho, Er, Tm**). Однако имеется огромное число ферромагнитных сплавов и химических соединений.

Общий признак для всех ферромагнетиков – недостроенные d- и f-электронные подуровни атомов. Такие атомы имеют нескомпенсированный магнитный момент.

Наличие спонтанной намагниченности свидетельствует о том, что магнитные моменты атомов ориентированы упорядоченно (параллельно) друг другу. Ферромагнетизм связан с упорядочением спиновых магнитных моментов.

В ферромагнетиках магнитное упорядочение имеет место в интервале от **0 K** до некоторой критической T_c – температуры Кюри. При температуре Кюри происходит фазовый переход 2-го рода: превращение ферромагнетик $\leftrightarrow$ парамагнетик.

При $T > T_c$ магнитная восприимчивость описывается законом

Кюри–Вейсса $\chi = C / (T - \theta)$, где поправка Вейсса θ

Ферромагнетизм

Ферромагнетизм – особое свойство системы электростатически взаимодействующих электронов. При сильном электростатическом взаимодействии энергетически выгодным оказывается состояние с параллельной ориентацией спинов, т. е. намагниченное состояние. При перевороте спина в соответствии с принципом Паули электрон вынужден занять уровень с большей энергией.

В электростатическое взаимодействие наряду с классической кулоновской энергией дает вклад так называемая **энергия обменного взаимодействия**, зависящая от взаимной ориентации спиновых моментов электронов. В простейшем случае двух электронов обменную энергию $E_{\text{обм}}$ можно

$$\text{представить в виде } E_{\text{обм}} = -A(\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2),$$

где A – обменный интеграл; $\mathbf{S}_1$ и $\mathbf{S}_2$ – единичные векторы спинов.

Если $A > 0$, то минимуму энергии соответствует $(\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2) = 1$ – **параллельная ориентация спинов**. При $A < 0$ минимум

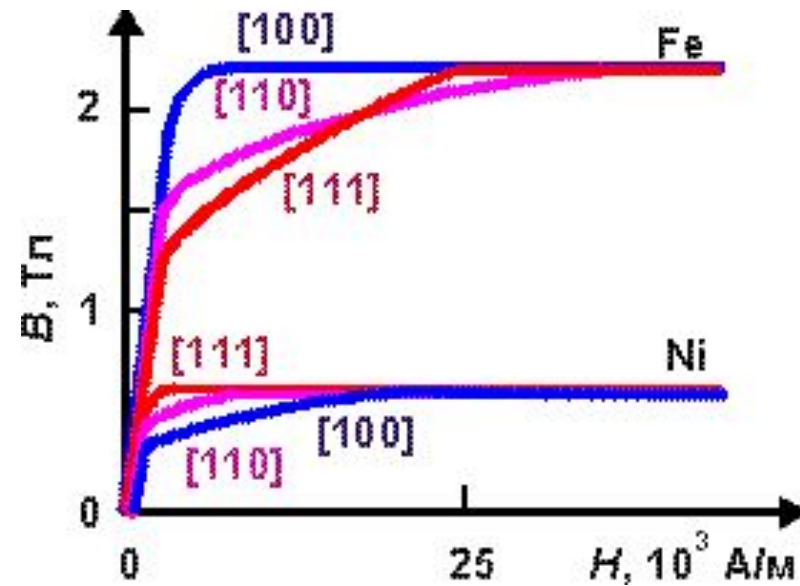
энергии наблюдается при $(\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2) = -1$ – **антипараллельная**

Анизотропия магнитных свойств в Fe и Ni

Для железа при 20°C коэффициент анизотропии $K = 4,2 \cdot 10^4$ Дж/м³.

В поликристаллических материалах эффекты анизотропии усредняются, поэтому магнитная анизотропия не обнаруживается.

Кристаллографическую анизотропию, которая облегчает намагничивание, можно создать прокаткой.



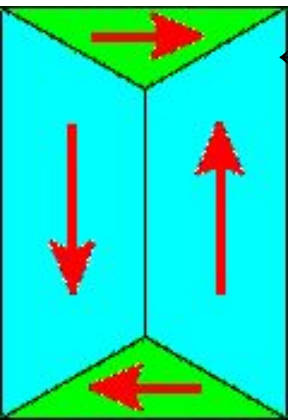
- Если зерна трансформаторной стали ориентированы так, что их направления $\langle 100 \rangle$ примерно совпадают с направлениями намагниченности сердечника трансформатора, то это позволяет усилить магнитную индукцию, не повышая напряженности поля и не увеличивая потерь энергии от **индуцированных токов**.

Ферромагнитные домены

- В ферромагнетике при температурах ниже температуры Кюри T_c спиновые моменты атомов с недостроенными d- или f-оболочками (электронными подуровнями) ориентируются параллельно друг другу. В результате этого M макроскопического образца должна быть близка к намагниченности насыщения M_s .
- Однако такое состояние энергетически невыгодно, и кристалл при отсутствии магнитного поля уменьшает свою энергию за счет разбиения своего объема на магнитные области — **домены** — размером $10^{-4} \div 10^{-6}$ м, где магнитные моменты атомов ориентированы параллельно определенному кристаллографическому направлению.
- Каждый домен спонтанно намагничен до насыщения, но равновероятное пространственное расположение векторов магнитных моментов приводит к образованию замкнутых магнитных цепей внутри образца, и результирующий магнитный момент равен нулю.

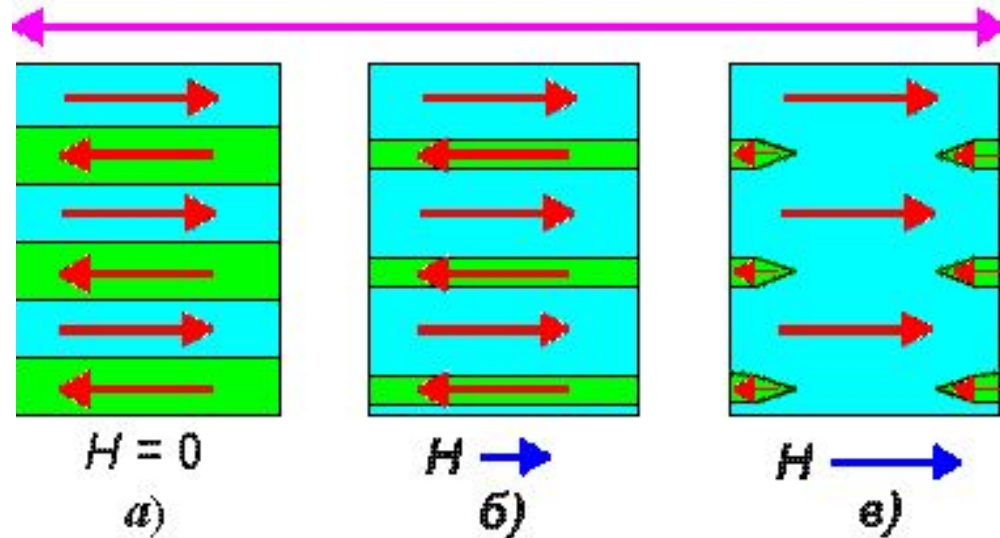
Доменная структура

Ось легкого намагничивания



Доменная структура магнито-двухосного кристалла.

Доменная структура магнито-одноосного кристалла. →

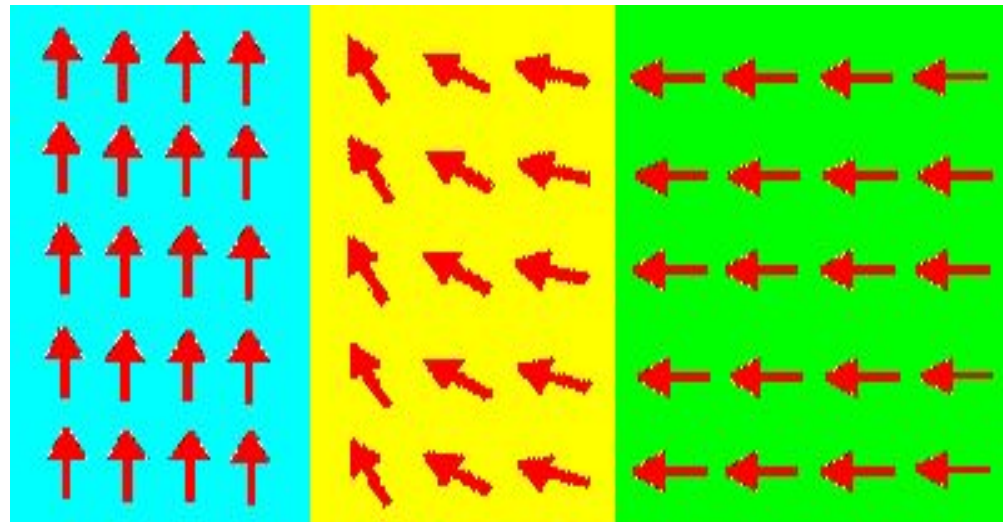


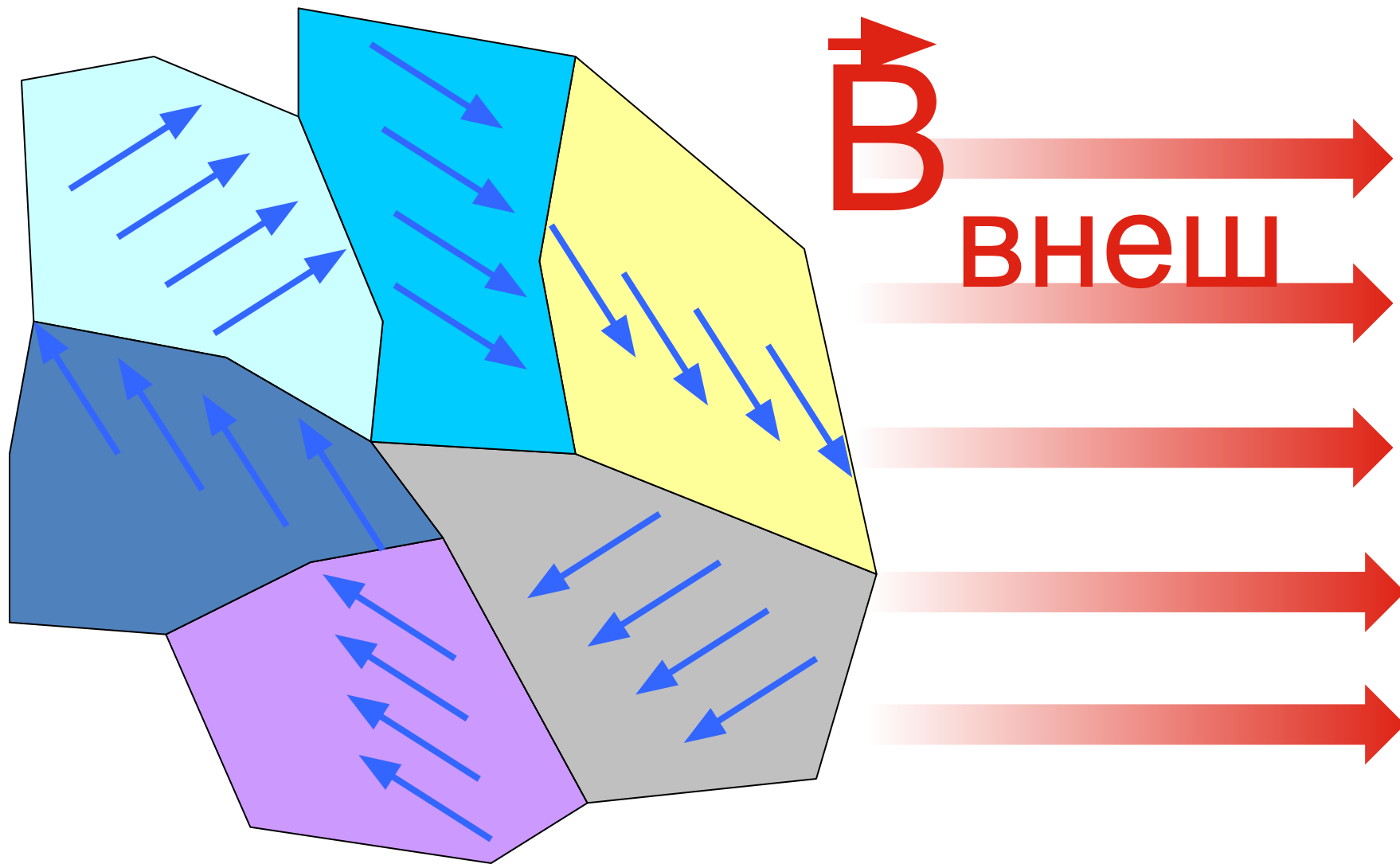
- При включении поля, направленного по оси легкого намагничивания происходит смещение **доменных границ**, увеличение объема доменов, имеющих $\mathbf{M}_s \parallel \mathbf{H}$. Появляется суммарная намагниченность $\mathbf{M} \neq 0$.
- Ферромагнитные домены широко применяются в магнитных носителях для хранения и обработки информации. Это связано с возможностью использования единичного магнитного домена в качестве элементарного носителя информации.

Доменная стенка

- **Доменная стенка** (граница магнитных доменов) представляет собой переходный слой шириной $10 \div 100$ нм от одного домена к другому, внутри которого спиновые магнитные моменты постепенно поворачиваются.
- Толщина доменной стенки δ_w определяется конкуренцией неоднородного обменного взаимодействия (стремящегося увеличить δ_w) и магнитной анизотропии (уменьшающей δ_w):
 $\delta_w \sim (A / K)^{1/2}$, где A – обменный интеграл; K – константа энергии анизотропии.

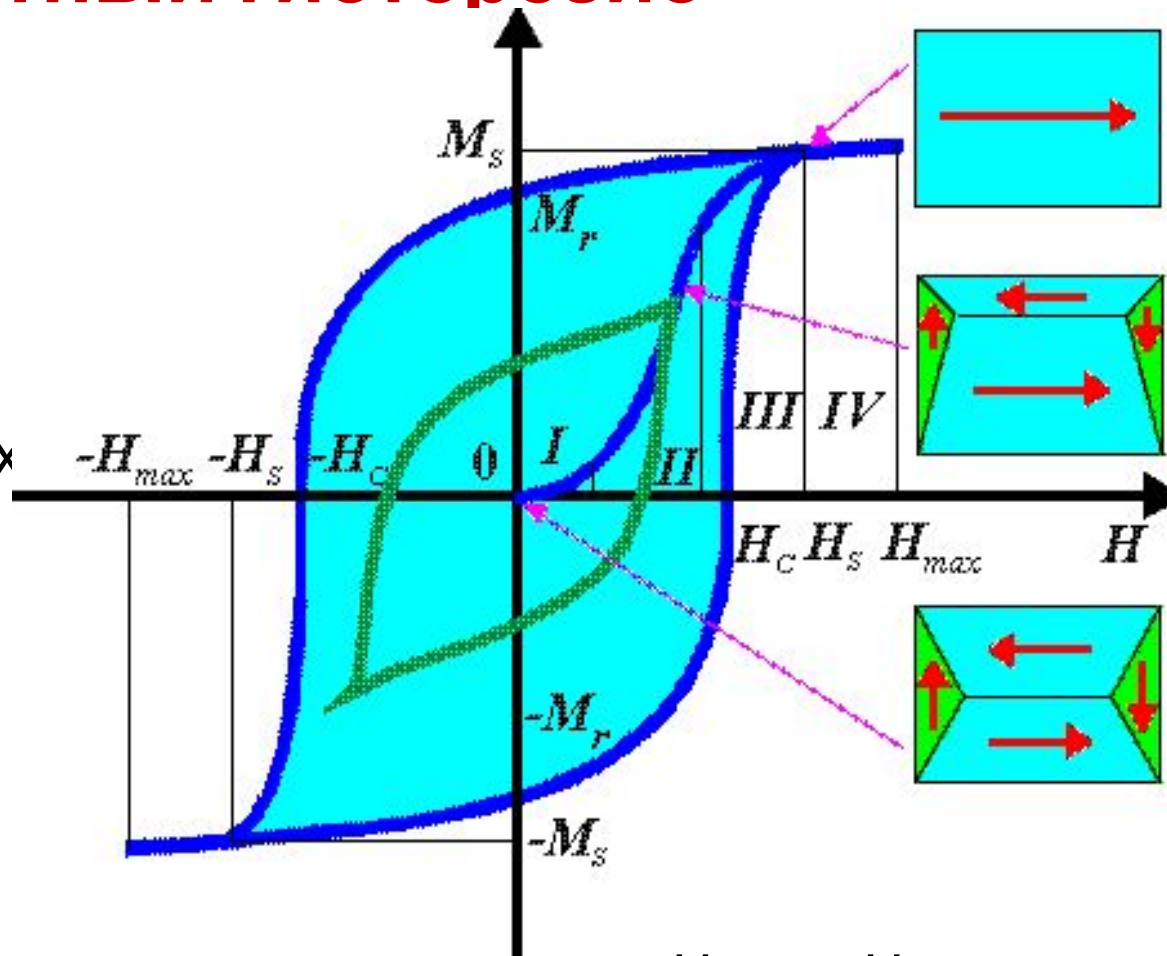
Число доменных стенок в ферромагнитном образце зависит от доменной структуры кристалла в основном состоянии и, в конечном счете, от числа эквивалентных осей легкого намагничивания.





Магнитный гистерезис

- I – упругое (обратимое) намагничивание.
- II – необратимый (взаимодействие с дефектами, магнитная анизотропия) рост выгодно расположенных доменов.
- III – техническое насыщение.
- IV – парапроцесс (достигается параллельная ориентация магнитных моментов).



Полный цикл перемагничивания при изменении поля от $-H_{max}$ до H_{max} описывается **петлей гистерезиса** (ПГ). Петля гистерезиса наглядно показывает, что процесс размагничивания отстает от уменьшения поля. Это означает, что энергия, полученная ферромагнетиком при намагничивании, не полностью отдается в процессе размагничивания. Часть энергии теряется и определяется площадью ПГ w_r .

Влияние различных факторов на магнитные свойства

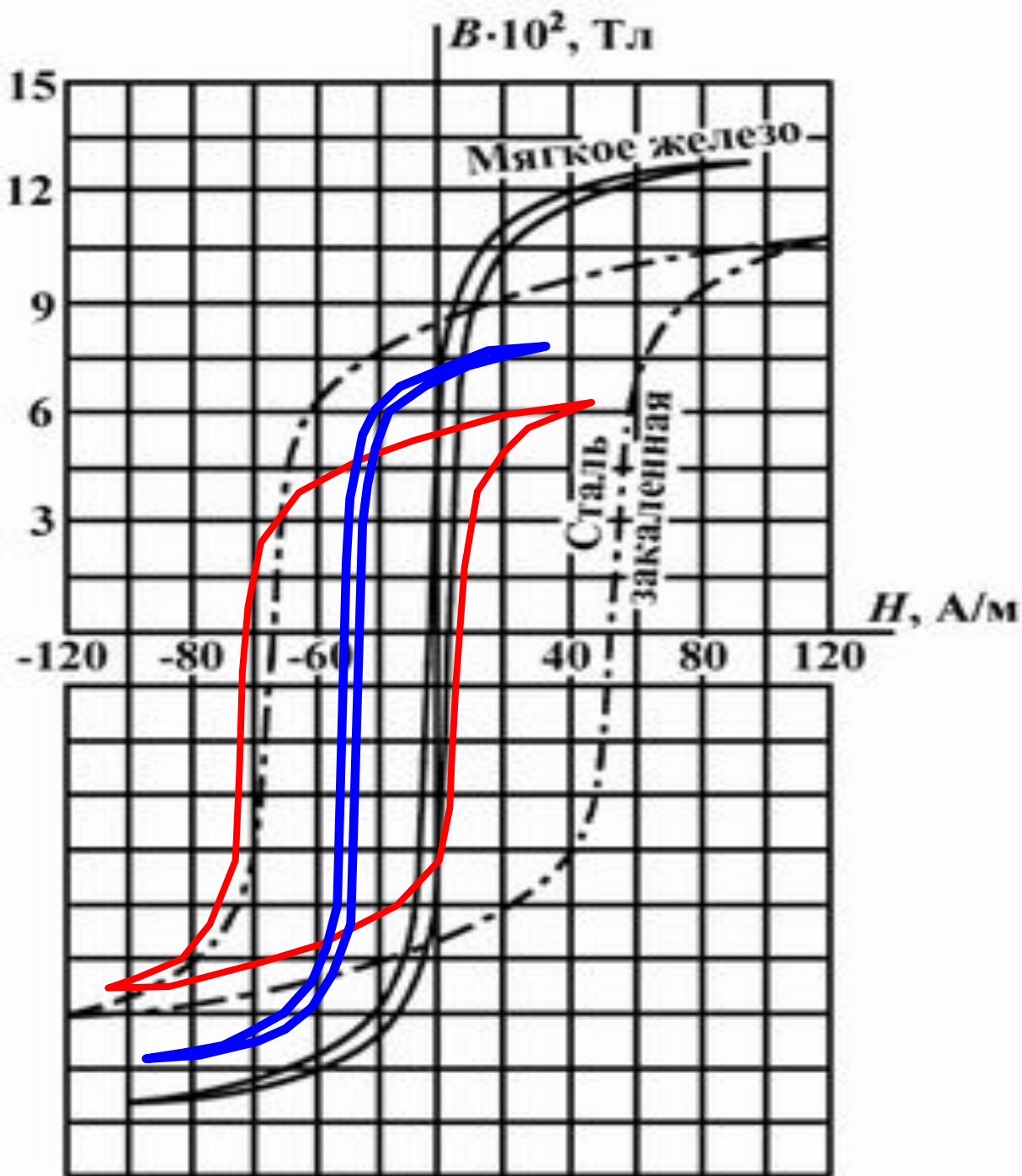
Фактор	$\mu_{\text{нач}}$	μ_{max}	M_s	B_r	H_c	w_r	$\text{tg}\delta$
Изменение основного химического состава	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$
Примеси	$\downarrow$	$\downarrow$	Нет	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	Нет
Упругое растяжение	$\downarrow$	$\uparrow$	Нет	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	Нет
Упругое сжатие	$\downarrow$	$\downarrow$	Нет	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	Нет
Пластическое растяжение	$\downarrow$	$\downarrow$	Нет	$\downarrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	Нет
Пластическое сжатие	$\downarrow$	$\uparrow$	Нет	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	Нет
Рост температуры	$\uparrow\downarrow$	$\uparrow\downarrow$	Нет	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	Нет
Предварительное намагничивание	$\downarrow$	$\downarrow$	Нет	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	Нет
Повышение частоты	$\downarrow$	$\downarrow$	Нет	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$	$\uparrow$
Отжиг (рост размера зерна)	$\uparrow$	$\uparrow$	Нет	$\uparrow$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\uparrow$

Магнитомягкие и магнитотвердые материалы

- Величины w_r (потери при перемагничивании), H_c , B_r (M_r) и др. существенно зависят от химического состава, структурного состояния, распределения дефектов, технологии получения и обработки материала деталей.
- Варьирование режимами обработки позволяет широко изменять свойства магнитного материала. На движение стенок доменов влияют дефекты кристаллической решетки. Например, металл после холодной механической обработки (деформации) обладает большей магнитной стабильностью (H_c , B_r) чем металл, подвергнутый отжигу.

По виду петли гистерезиса все ферромагнетики делятся на две большие группы:

магнитомягкие, имеющие $H_c < 800$ А/м, и **магнитотвердые** с $H_c > 4$ кА/м.



Большой
коэрцитивной силой
(широкой петлей
гистерезиса)
обладают
**магнитотвердые
материалы**,
используемые для
изготовления
постоянных магнитов

Малую
коэрцитивную силу
имеют
**магнитомягкие
материалы**
(используются для
изготовления
трансформаторов)

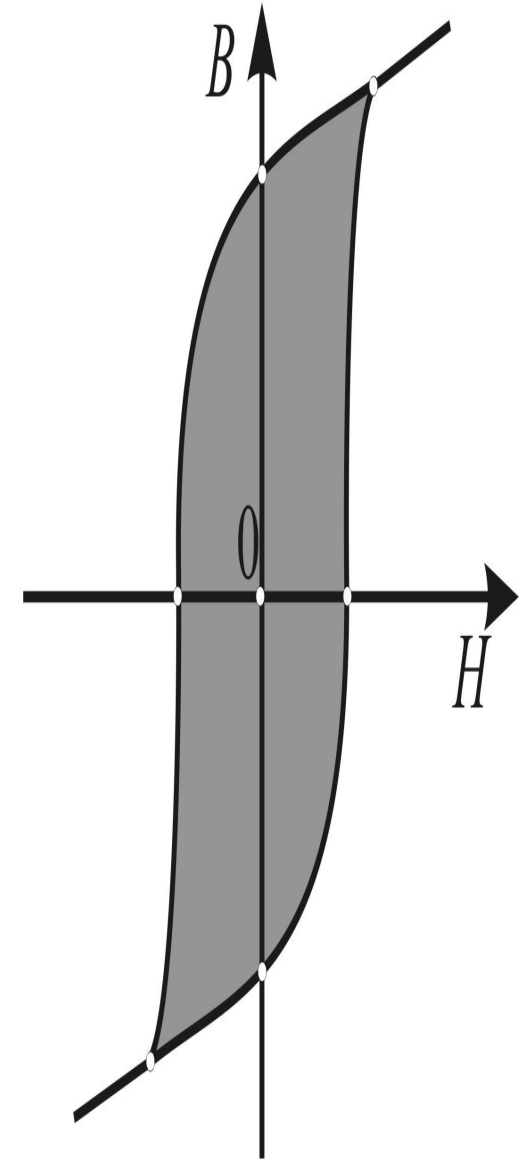
Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы

- Магнитомягкие материалы имеют высокое значение $\mu_{\text{нач}}$, способны намагничиваться до насыщения даже в слабых полях, т. е. обладают малой величиной H_c и имеют малые потери p при перемагничивании вдоль направления магнитопроводов.
- Магнитомягкие материалы используются в основном для изготовления магнитопроводов переменного магнитного поля. Применяются в электроэнергетике, электромашино- и моторостроении, в электро- и радиотехнической промышленности, измерительной и вычислительной технике, системах автоматики и телемеханики.
- Магнитомягкие материалы: **металлические** – ферромагнитное чистое железо, низкоуглеродистые электротехнические стали, магнитомягкие сплавы на железной и железоникелевой основе, в том числе аморфные металлические сплавы; магнитомягкие **ферриты** – комплексные оксиды переходных металлов, содержащие группу Fe_2O_3 ; **магнитодиэлектрики** – композиты на основе порошка магнитомягкого ферро- или ферримангнетика в диэлектрической матрице.

Материалы для работы в широком диапазоне изменения магнитной индукции

- Назначение: машины постоянного и переменного тока; силовые трансформаторы; силовая коммутирующая аппаратура.
- Виды материалов: технически чистое железо, электротехнические стали, магнитомягкие сплавы.



Высокие значения свойств: B_s , ρ , $\mu_{\max}$.

- Низкие значения свойств: H_c , ρ .

Требования к материалам

Требования к материалам: хорошая магнитная связь между элементами устройств;
значительный магнитный поток при минимальном использовании магнитного материала;
минимальные потери на перемагничивание.

Приведенные выше требования выполняются:

выбором рабочей точки, соответствующей максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\max}$;
использованием материалов с большой индукцией насыщения B_s , основным компонентом которых является железо;
выбором материалов с соответствующим комплексом значений различных магнитных свойств.

Чистое железо

Технически чистым называют железо, в котором суммарное содержание примесей – до $0,8 \div 0,1$ %, в том числе углерода – до 0,05 %. Имеет малое удельное электрическое сопротивление, обладает повышенными потерями на вихревые токи, в связи с чем применение его ограничено: в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока (полюсные наконечники, магнитопроводы реле). Технически чистое железо – главный компонент большинства магнитных материалов.

В зависимости от способа получения **особо чистое железо** называется **карбонильным** или **электролитическим**.

Карбонильное железо получают при термическом разложении пентакарбонила железа $\text{Fe}(\text{CO})_5$ и рафинируют в токе водорода. Электролитическое железо изготавливают электролитическим рафинированием в расплавленных солях и поставляют в виде порошка (ПЖЭ-1 и ПЖЭ-2) или кусков (ЖЭ-МП). Чистое железо марок 005ЖР и 008ЖР получают из продуктов прямого восстановления руд.

Сталь электротехническая нелегированная

Электротехническая нелегированная сталь с нормированными свойствами в постоянных полях используется для изготовления магнитопроводов всех видов и самых сложных форм: детали реле, сердечники, полюсные наконечники электромагнитов, элементы магнитоэлектрических, индукционных и электромагнитных приборов, экраны, телефонные мембраны, магнитопроводы двигателей переменного и постоянного тока малой и средней мощности и т. д.

Основной вид термической обработки – высокотемпературный отжиг ($> 950^{\circ}\text{C}$).

Электротехническая нелегированная сталь подразделяется на **сортовую** и **тонколистовую**. У тонколистовой стали магнитные характеристики несколько выше.

Маркировка электротехнической нелегированной стали

Электротехническая нелегированная сталь

маркируется цифрами: *первая* – класс по виду обработки давлением (1 – горячекатаная и кованая, 2 – холоднокатаная и калиброванная); *вторая* – тип по содержанию кремния (0 – нелегированная, с содержанием Si до 0,3%; 1 – то же, но с заданным коэффициентом старения); *третья* – группа основной нормируемости (например, 8 – коэрцитивная сила);

четвертая и пятая – значение нормируемой характеристики (например, коэрцитивной силы, в А/м). Марки: например, 10864, 20864, 11880, 10895, 20848, 21832.

Электротехническая кремнистая сталь

- Растворение кремния в α -Fe вызывает уменьшение обменного взаимодействия, следовательно, T_C и M_s уменьшаются.
- **Легирование кремнием вызывает:**
 - уменьшение магнитной анизотропии и магнитострикции, увеличение размеров зерна и, следовательно, уменьшение H_c ;
 - увеличение ρ и снижение потерь на вихревые токи;
 - некоторое снижение B_s ;
 - возрастание B в слабых и средних магнитных полях вследствие большой магнитной мягкости материала.
- Применение: магнито-проводы электрических машин всех типов, дросселей и трансформаторов, механизмов и приборов, работающих на постоянном и на переменном токе различной частоты. Требования, предъявляемые к электротехническим сталям, удовлетворяются изменением их химического состава, толщины листов или ленты и применением специальных технологических процессов изготовления и термической обработки

Маркировка электротехнической кремнистой стали

Электротехническая кремнистая сталь маркируется

цифрами: **первая** – по структурному состоянию (1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой);

вторая – по содержанию кремния ($0 - \text{Si} \leq 0,4 \%$; $1 - 0,4 \% < \text{Si} \leq 0,8 \%$; $2 - 0,8 \% < \text{Si} \leq 1,8 \%$; $3 - 1,8 \% < \text{Si} \leq 2,8 \%$; $4 - 2,8 \% < \text{Si} \leq 3,8 \%$; $5 - 3,8 \% < \text{Si} \leq 4,8 \%$);

третья – по основной нормируемой характеристике (0 – удельные потери при магнитной индукции, равной 1,7 Тл и частоте 50 Гц; 1 – то же при 1,5 Тл; 2 – то же при 1 Тл и 400 Гц; 4 – удельные потери при 0,5 Тл и 3000 Гц; 6 – магнитная индукция в слабых полях при напряженности магнитного поля 0,4 А/м; 7 – то же при напряженности 10 А/м);

четвертая – порядковый номер типа стали (первые три цифры). Примеры марок: **горячекатаная изотропная** – 1211, 1311, 1411, 1511 и др., **холоднокатаная изотропная** – 2011, 2111, 1211, 2311, 2411 и др.

Магнитомягкие сплавы

- Сплавы Fe с Ni, с Co и с Ni и Co обладают при определенных составах исключительно высокими магнитными свойствами, недостижимыми в других сплавах. Эти свойства еще больше повышаются при дополнительном легировании такими элементами, как Mo, Cr, Si, Cu, V и Ti. Высокие магнитные свойства этих сплавов обусловлены тем, что при определенных химических составах достигаются минимальные значения константы магнитной анизотропии K и константы магнито-стрикции λ_s и, следовательно, **максимальное значение μ** .
- **По магнитным свойствам сплавы делятся на три класса:** I – с нормальными магнитными свойствами, II – с повышенными, III – с высокими.
- Необходимо учитывать, что стоимость магнитомягких сплавов выше, чем электротехнических сталей.

Маркировка магнитомягких сплавов

- **Марки сплавов** состоят из двузначного числа, обозначающего (в %) среднее содержание элемента, входящего в основу сплава (Ni, Co, Cr, кроме Fe), и буквенных обозначений элементов (табл. для черных металлов). Буква П в конце означает, что в результате особой технологии и режима окончательной термической обработки сплав обладает прямоугольной петлей гистерезиса. Буква А означает суженные пределы химического состава (более точный состав); другие обозначения относятся к нормированию процесса выплавки: ВИ – вакуумно-индукционный; ЭЛ – электронно-лучевой; П – плазменный; Ш – электрошлаковый; ВД – вакуумно-дуговой.

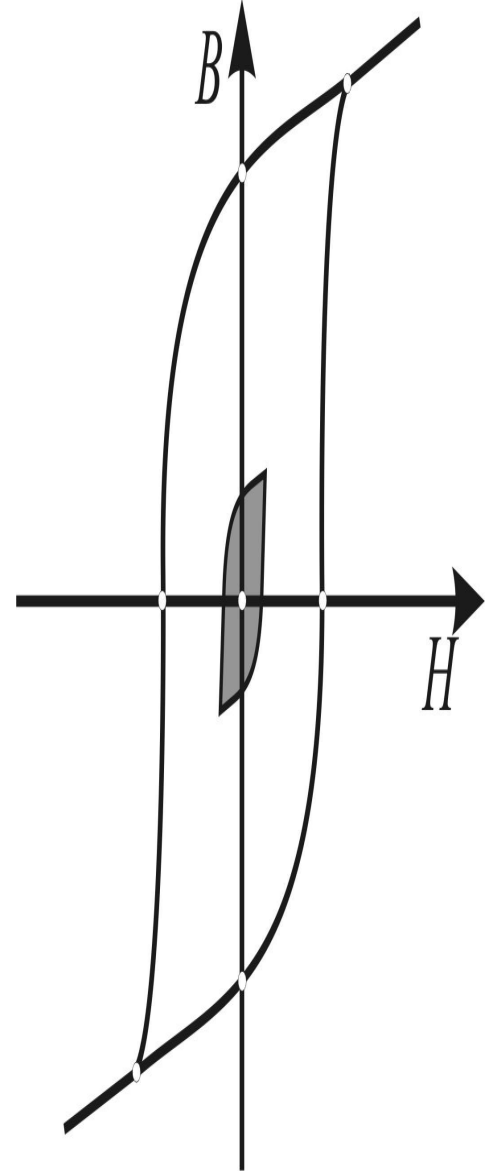
Материалы для работы в слабых полях

Назначение: аппаратура приема-передачи информации; малогабаритные трансформаторы и дроссели, дефектоскопы, магнитные экраны.

Виды материалов:
электротехнические стали,
магнитомягкие сплавы,
ферриты, магнитодиэлектрики.

Высокие значения свойств: ρ , $\mu_{\text{нач}}$.

Низкие значения свойств: H_c , ρ .



- Требования к материалам:
 - малые потери на гистерезис и вихревые токи.
- Приведенные выше требования выполняются:
 - наличием узкой петли гистерезиса;
 - большой крутизной зависимости $B(H)$ в слабых магнитных полях;
 - высоким значением $\mu_{\text{нач}}$;
 - минимальными константами магнитострикции и анизотропии.

Электротехнические стали и пермаллои

Электротехнические стали: горячекатаные стали марок 1561, 1562, работающие в звуковом диапазоне частот с амплитудой индукции $10^{-4} \div 10^{-3}$ Тл.

Высоконикелевые пермаллои – железоникелевые сплавы, характеризующиеся высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой и низкими потерями при перемагничивании (72НМДХ, 76НХД, 77НВ, 77НМД, 80НМ, 79НМ, 80НХС, 81НМА, 83НФ).

Магнитомягкие сплавы на основе Fe, Ni и Co с низкой остаточной индукцией и постоянной магнитной проницаемостью после термической обработки в поперечном магнитном поле имеют **линейный участок кривой намагничивания** в широком интервале магнитной индукции ($\mu_{\max} / \mu_{\text{нач}} = 1,15 \div 1,20$) и применяются для изготовления аппаратуры связи, измерительных трансформаторов.

Ферриты

- Материалы, работающие при сверх высоких частотах, должны обладать большим ρ (для уменьшения потерь на вихревые токи) и максимальной скоростью установления намагниченности. Таким требованиям отвечают **ферримангнетики - ферриты**.
- Их $\rho = 10^{-5} \div 10^8$ Ом·м и сильно зависит от состава и структуры.
- **Магнитомягкие ферриты** представляют собой в основном поликристаллические материалы. Наибольшее распространение получили **марганцево-цинковые ферриты** (твердые растворы MnFe_2O_4 и ZnFe_2O_4) и **никель-цинковые ферриты** (твердые растворы NiFe_2O_4 и ZnFe_2O_4). Разнообразие свойств этих ферритов определяется главным образом соотношением основных компонентов, легирующими добавками (Co, Li, Ti, Ca) и режимами синтеза.
- Каждая марка магнитомягких ферритов обладает **критической частотой** – верхней частотной границей применения, начиная с которой резко возрастают потери и снижается μ ввиду инерционности процессов намагничивания.

Маркировка ферритов

По своим электрическим свойствам ферриты являются полупроводниками. Их проводимость увеличивается с ростом температуры, эффективная проводимость растет с частотой.

По механическим свойствам поликристаллические ферриты подобны керамике и обладают высокой твердостью и хрупкостью. Общий недостаток ферритов – сильная зависимость магнитной **проницаемости** μ от температуры.

Маркировка: в марке феррита **число означает среднее значение** $\mu_{нач}$; следующая **за ним буква соответствует назначению ферритов** (Н – низкочастотный или общего применения; В (ВЧ) – высокочастотный);

вторая буква соответствует: Н – никель-цинковым ферритам; М – марганцево-цинковым ферритам.

- Примеры: 2000НН, 400НН, 100НН, 100ВЧ, 6000НМ, 3000НМ, 1500НМ, 1000НМ, 700НМ

Магнитодиэлектрики

- **Магнитодиэлектрики** – материалы, состоящие из ферро- или ферромагнитных частиц размерами от 1 до 100 мкм, разделенных изолирующим веществом (жидкое стекло, синтетические смолы). Из-за внутреннего размагничивания частиц уменьшаются потери на вихревые токи, слабо изменяется проницаемость в магнитных полях до 2000 А/м, обеспечиваются высокая стойкость к подмагничивающим полям, хорошая стабильность во времени. Электромагнитные свойства магнитодиэлектриков сохраняются при механических нагрузках до полного их разрушения.
- Выпускаются магнитодиэлектрики, в которых наполнителями являются: карбонильное железо (Р-10, Р-20, Р-100, З-100Ф, Пс), **альсифер** – тройной сплав Al, Si, Fe (ТЧ-90, ТЧ-60, ТЧК-55, ВЧ-32, ВЧ-22, ВЧК-22), пермаллои (П-250, П-160, П-140, П-100, П-60, П-20, ПК-20), ферритовые порошки (НМ-5, ВН-20, ВН-60, ВН-220).
- Недостаток магнитодиэлектриков – поглощение влаги, что приводит к изменению их электромагнитных параметров. При эксплуатации в условиях повышенной влажности их необходимо герметизировать.

Магнитомягкие сплавы на основе Fe, Ni, Co

Пермаллои (50НП, 47НМП, 82НМП-ВИ, 79НМ) с кристаллографической кубической текстурой, образующейся в результате особой технологии прокатки при последующей термической обработке. Такая текстура обеспечивает высокие магнитные свойства в двух направлениях в плоскости листа или ленты (вдоль и поперек направления прокатки).

Сплавы (65НП, 68НМП, 37НКДП, 34НКМП, 40НКМПЛ) – магнито-текстурованные, с $\alpha_n = 0,85 \div 0,98$. При термической обработке в продольном магнитном поле в этих сплавах возникает индуцированная одноосная анизотропия, которая создает при намагничивании прямоугольную петлю гистерезиса. Эти сплавы обладают повышенной температурной стабильностью к воздействию радиации.

Исключительно высокие магнитные свойства сплавов после отжига очень чувствительны к воздействию механических напряжений и деформаций. Поэтому для защиты от случайных и конструктивно неизбежных механических воздействий необходимо применение защитных каркасов и амортизаторов.

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердыми материалами называются магнитные материалы с коэрцитивной силой H_c по индукции не менее 4 кА/м, используемые для изготовления постоянных магнитов.

Магнитотвердые материалы после намагничивания должны создавать внешние постоянные магнитные поля, нечувствительные по возможности к различным возмущающим факторам.

Основное требование к магнитотвердым материалам – высокое значение удельной магнитной энергии (BH), позволяющее при прочих равных условиях значительно уменьшить объем и массу конструктивных элементов различных устройств.

Выполнение этого требования достигается высокими значениями остаточной индукции B_r , коэрцитивной силы H_c , **коэффициента выпуклости** $\beta = (BH)_{\max} / B_r H_c$ и малым значением проницаемости возврата $\mu_{\text{возв}}$.

В существующих технических магнитотвердых материалах $\beta = 0,25 \div 0,75$.

Классификация магнитотвердых материалов

В основе классификации магнитотвердых материалов лежат различия в химическом составе, природе высококоэрцитивного состояния и технологии изготовления

Магнитотвердые материалы:

стали — закаливаемые на мартенсит углеродистые стали, легированные хромом, вольфрамом, кобальтом;

дисперсионно-твердеющие сплавы;

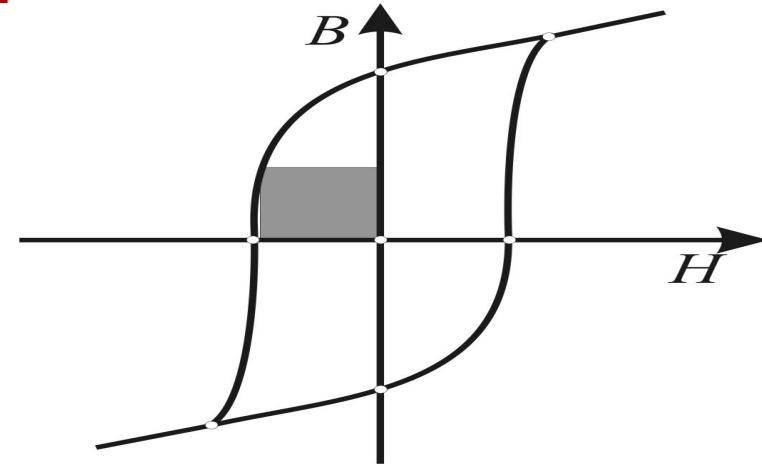
диффузионно-твердеющие сплавы на основе системы железо—никель—алюминий с добавками кобальта, меди, титана;

сплавы с участием благородных металлов типа Pt—Co, Pt—Fe, Ag—Mn—Al;

сплавы кобальта с редкоземельными металлами (РЗМ);

магнитотвердые ферриты бария, стронция, кобальта;

композиционные.



Мартенситные стали

Магнитотвердые материалы с умеренными значениями коэрцитивной силы и магнитной энергии могут быть получены легированием углеродистой стали (с содержанием углерода около 1 %) хромом (EX3), вольфрамом (EB6), хромом и кобальтом (EX5K5), хромом, кобальтом и молибденом (EX9K15M2).

Магнитные свойства этих материалов в значительной степени определяются термической обработкой. Эта зависимость объясняется тем, что высококоэрцитивное состояние этих материалов обусловлено магнитоупругим взаимодействием. Например, для кобальтовых сталей при увеличении содержания кобальта одновременно возрастают магнитострикция и коэрцитивная сила.

Высококоэрцитивное состояние в мартенситных сталях обеспечивается неоднородной двухфазной структурой после закалки на мартенсит (в виде мелкодисперсных пластинок цементита, равномерно распределенных в феррите) и обусловлено сочетанием магнитокристаллической и магнитострикционной анизотропий.

Постоянные магниты из мартенситных сталей имеют меньшую температурную и временную стабильность по сравнению с магнитами других групп. Несмотря на относительно низкие магнитные свойства, **мартенситные стали обладают преимуществами:** они дешевы и допускают обработку на металлорежущих станках. Применяют их в тех случаях, когда к магнитным системам не предъявляются требования по габаритам и массе, а также в качестве «полутвердых» магнитных материалов для изготовления элементов магнитных систем, в которых магнитная индукция в рабочем зазоре должна переключаться, т.е. менять направление при подаче управляющего сигнала не слишком большой мощности.

$$B_r = 0,8 \div 1,0 \text{ Тл};$$

$$H_c = 4,8 \div 11,9 \text{ кА/м}$$

Дисперсионно-твердеющие сплавы

К дисперсионно-твердеющим сплавам относятся сплавы на основе систем Fe-Co-V – викалой, Fe-Cr-Co и др., подвергающиеся холодной и горячей механической обработке давлением. Их оптимальные магнитные свойства возникают в результате создания мелкодисперсной неравновесной структуры, образующейся при выделении избыточной фазы, которая отличается от матрицы намагниченностью насыщения.

Высококоэрцитивное состояние обеспечивает задержка смещения доменных границ в сочетании с магнитокристаллической и магнитострикционной анизотропии.

Сплавы викалой приобретают магнитотвердые свойства после холодной деформации на 70÷90 % (прокатка, волочение) и последующего отпуска. Из них, ввиду их высокой стоимости, изготавливают очень мелкие магниты сложной или ажурной конфигурации, сердечники активной части гистерезисных двигателей и высокопрочные ленты и проволоки.

В этом преимущество сплавов викалой, так как из других магнитотвердых материалов изготовить изделия такой сложной формы очень сложно или невозможно из-за низких пластичности и прочности. ($B_r = 0,9 \div 1,1$ Тл; $H_c = 12 \div 24$ кА/м)

Диффузионно-твердеющие сплавы

Сплавы системы Fe-Ni-Al-Co, получившие название **ЮНДК**, имеют наилучшие магнитные свойства, а также – самые стабильные среди магнитотвердых материалов и способны работать при высокой температуре (испытания в течение года при температуре 500 °С показали отсутствие структурных изменений.)

Механизм магнитного твердения сплавов ЮНДК имеет принципиальное отличие: **в этих сплавах основную роль играет анизотропия формы выделений сильномагнитной фазы, когерентно связанных со слабомагнитной, почти немагнитной матрицей.** После ТО эти сплавы представляют собой фактически совокупность однодоменных анизотропных по форме частиц, разделенных немагнитными прослойками, что и определяет механизм перемагничивания.

В зависимости от режима термической обработки коэрцитивная сила этих сплавов может меняться в сотни раз.

Применение и недостатки

- Магниты из сплавов ЮНДК применяются в электродвигателях, электроизмерительных, радиотехнических и других приборах.
- **Недостатки** сплавов ЮНДК – их **высокая твердость и хрупкость**, поэтому они могут обрабатываться только шлифованием. Магниты из этих сплавов изготавливают либо методом литья, либо методами порошковой металлургии. Прочность металлокерамических сплавов в 3÷6 раз больше, чем у литых.
- ($B_r = 0,5 \div 1,4$ Тл; $H_c = 40 \div 96$ кА/м)