



Физико-технические основы электроэнергетики

Лекция 11

Профессор Е.Ю.Клименко



Ферромагнетики

Ферромагнетизм — появление спонтанной намагниченности при температуре ниже температуры Кюри вследствие упорядочения магнитных моментов, при котором большая их часть параллельна друг другу.

Ферромагнетики

Железо (Fe)



Кобальт (Co)



Никель (Ni)



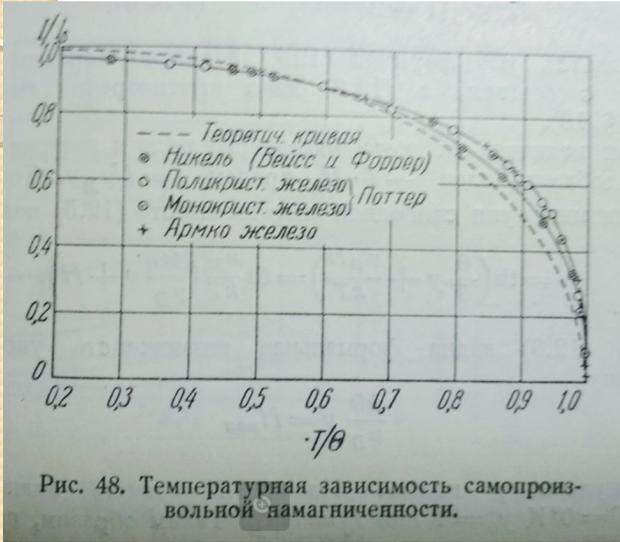
Металлы	T _c , К	J _{s0} , Гс
Fe	1043	1735,2
Co	1403	1445
Ni	631	508,8
Gd	289	1980

Металлы	T _c , К	J _{s0} , Гс
Tb	223	2713
Dy	87	1991,8
Ho	20	3054,6
Er	19,6	1872,6

Соединение	T _c , К	Соединение	T _c , К
Fe ₃ Al	743	TbN	43
Ni ₃ Mn	773	DyN	26
FePd ₃	705	EuO	77
MnPt ₃	350	MnB	578
CrPt ₃	580	ZrZn ₂	35
ZnCMn ₃	353	Au ₄ V	42—43
AlCMn ₃	275	Sc ₃ In	5—6

Температура (точка) Кюри

Закон Кюри — Вейса описывает магнитную восприимчивость ферромагнетика в области температур выше точки Кюри (то есть в парамагнитной области). Закон выражается следующей математической формулой:



Теоретическая зависимость намагниченности ниже T_c описывается уравнением

$$y = th \frac{T_c}{T} y$$

$$y = \frac{r - l}{N}$$

r и l - число спинов (правых и левых)

$$\chi = \frac{C}{T - T_c},$$

где

χ — магнитная восприимчивость,
 C — постоянная Кюри, зависящая от вещества,
 T — абсолютная температура в кельвинах,
 T_c — температура Кюри, К.

Материал	T_c (К)	Материал	T_c (К)
Co	1388	MnOFe ₂ O ₃	573
Fe	1043	Y ₃ Fe ₅ O ₁₂	560
Fe ₂ B	1015	Cu ₂ MnIn	500
FeOFe ₂ O ₃	858	CrO ₂	386
NiOFe ₂ O ₃	858	MnAs	318
CuOFe ₂ O ₃	728	Gd	292
MgOFe ₂ O ₃	713	Au ₂ MnAl	200
MnBi	630	Dy	88
Cu ₂ MnAl	630	EuO	69
Ni	627	CrBr ₃	37
MnSb	587	EuS	16,5
MnB	578	GdCl ₃	2,2

Выше T_c ферромагнетик превращается в парамагнетик

$$C = \mu_0 \cdot n \cdot \frac{\mu^2}{3k_B},$$

где:

- μ_0 — магнитная проницаемость вакуума,
- $n = \frac{N}{V}$ — концентрация частиц,
 - N — число частиц,
 - V — объем,
- μ — атомарный магнитный момент,
- k_B — постоянная Больцмана.

Поле и индукция в ферромагнетике

Магнитная проницаемость ферромагнетиков на порядки больше, чем у диа- и парамагнетиков. Намагниченность ферромагнетика влияет на индукцию и магнитное поле внутри него.

Определение намагниченности основано на соотношении: $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{I})$
 H – свободно от вихрей там, где нет токов, B – свободна от источников $\operatorname{div}\mathbf{B} = 0$

$\operatorname{div}\mathbf{H} = -\operatorname{div}\mathbf{I}$. На поверхности магнетика поверхностная дивергенция обращается в нуль $B_n + B_{n'} = 0$ (\mathbf{n} и \mathbf{n}' нормали со стороны вакуума и магнетика. Они направлены в разные стороны) На поверхности магнетика намагниченность меняется скачком, поэтому $H_n + H_{n'} = -I_n$.

В отсутствие токов $\mathbf{H} = -\operatorname{grad}\psi$.

Уравнение для скалярного потенциала: $\Delta\psi = \operatorname{div}\mathbf{I}$

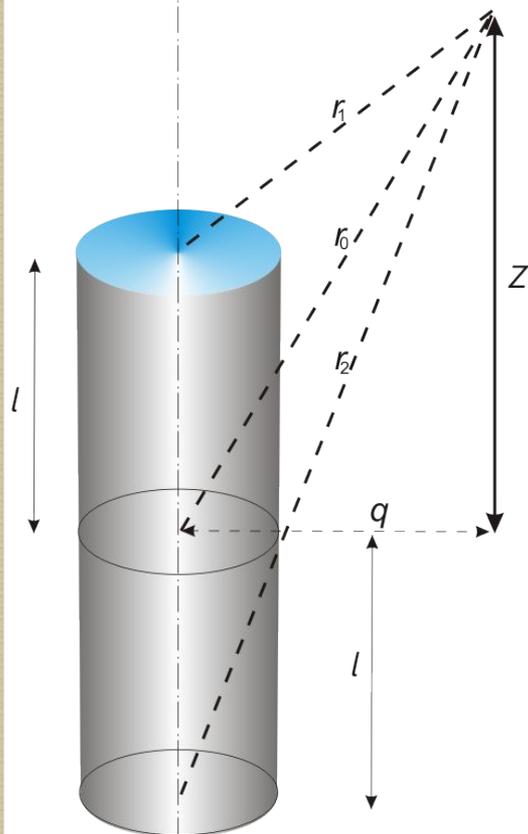
Граничное условие: $\frac{\partial\psi}{\partial n} + \frac{\partial\psi}{\partial n'} = I_n$ на бесконечности $\psi = 0$.

Решение краевой задачи позволило бы определить намагниченность, но если намагниченность задана, можем решить более простую задачу: рассчитать поле по заданному распределению I .

$$4\pi\psi = - \int \frac{\operatorname{div}\mathbf{I}}{r} dV - \int \frac{I_n}{r} ds$$

Магнитное поле ферромагнитного стержня

Пусть стержень с радиусом a намагничен однородно. Тогда можно рассматривать интегралы только по торцам. Заряды S распределены однородно по торцам. Для точек, расположенных далеко от магнита (т.е. $r \gg l \gg a$),



$$4\pi\psi = -IS \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$r_1^2 = (z - l)^2 + q^2 \quad \text{и} \quad r_2^2 = (z + l)^2 + q^2$$

Разлагая $1/r$ в ряд и ограничиваясь вторыми членами получаем:

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r_0} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{2zl - l^2}{r_0^2} \right)$$

$$\frac{1}{r_2} = \frac{1}{r_0} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{2zl + l^2}{r_0^2} \right) \quad \text{здесь } r_0 = \sqrt{z^2 + q^2}$$

Тогда
$$4\pi\psi = -2l \cdot IS \frac{z}{r_0^3} = 2l \cdot IS \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r_0}$$

Таким образом, на расстояниях, много больших l , потенциал стержня совпадает с потенциалом диполя длиной $2l$ и магнитным зарядом IS .

Поле и индукция внутри стержня

Внутри стержня описание с помощью поверхностного заряда остается справедливым. Рассмотрим поле на оси стержня a - радиус основания, ρ - расстояние точки интегрирования от центра основания

$$4\pi\psi = 2\pi I \left(\int_0^a \frac{\rho d\rho}{r_1} - \int_0^a \frac{\rho d\rho}{r_2} \right) \quad r_1^2 = (l - z)^2 + \rho^2 \quad \text{и} \quad r_2^2 = (l + z)^2 + \rho^2$$

Поскольку $0 \leq |z| \leq l$,

$$\psi = \frac{I}{2} \left[\sqrt{(l - z)^2 + a^2} - \sqrt{(l + z)^2 + a^2} + 2z \right]$$

$$H = -\frac{\partial\psi}{\partial z} = \frac{I}{2} \left[\frac{l - z}{\sqrt{(l - z)^2 + a^2}} + \frac{l + z}{\sqrt{(l + z)^2 + a^2}} - 2 \right]$$

$$l \gg a$$

$$\text{при } z = 0 \quad H \approx 0 \quad \frac{\partial H}{\partial z} \approx 0$$

$$\text{при } z = \pm l \quad H = -\frac{I}{2} \frac{\partial H}{\partial z} = \pm \frac{I}{2} \frac{1}{a}$$



Фиг. 15. Распределение поля и намагниченности однородно намагниченного стержня.

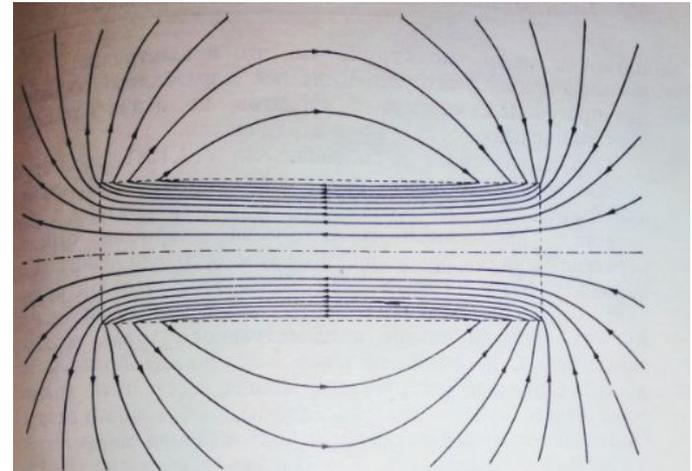
Поверхностные заряды
«размагничивают» стержень

Поле и индукция в ферромагнетике

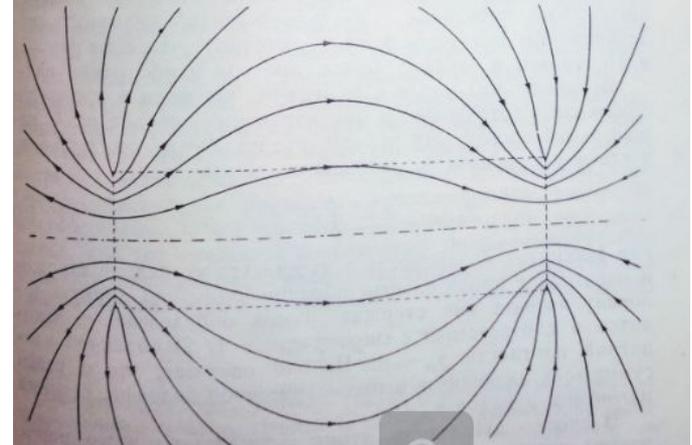
Линии индукции втягиваются
внутри стержня.

Линии магнитного поля
выталкиваются из него.

Вне магнита оба семейства линий
совпадают, поскольку $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$

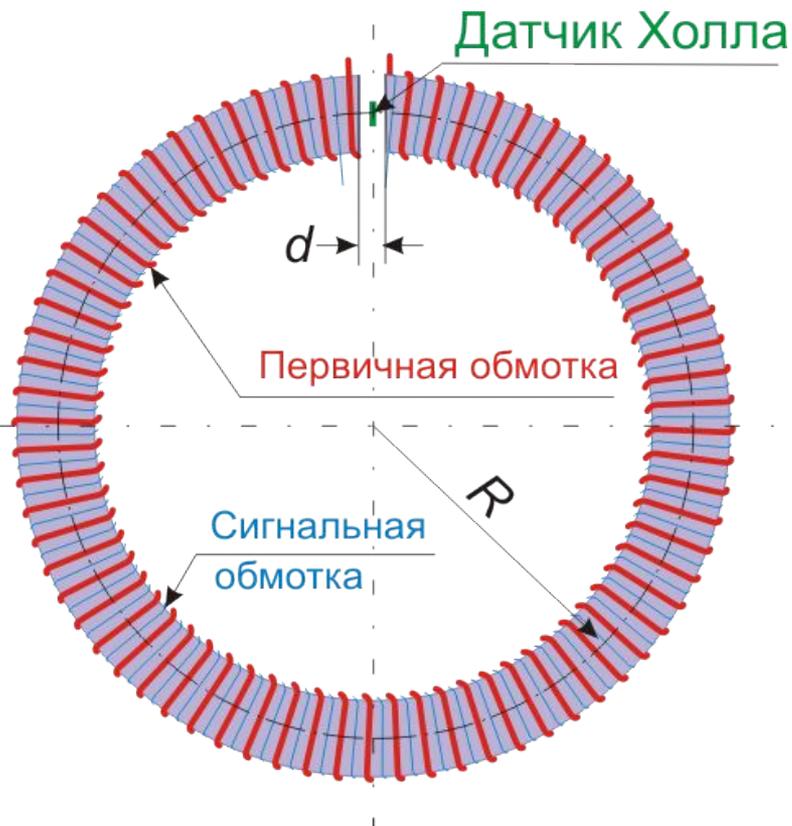


Фиг. 17. Линии индукции однородно намагниченного стержневого магнита; линии индукции втягиваются внутрь.



Фиг. 18. Линии магнитного поля однородно намагниченного стержневого магнита; силовые линии выталкиваются из магнита.

Измерение характеристик ферромагнетика



В силу симметрии можем считать намагниченность однородной

$$(2\pi R - d)H_f = -dH_d$$

Если зазор узкий

$$B_f = B_d = \mu_0 H_d$$

С помощью вторичной обмотки можно измерить магнитный поток в железе и без щели. Магнитное поле можно рассчитать по характеристикам первичной обмотки.

Зная H и B , можем построить петли гистерезиса.

Природа ферромагнетизма

Кристаллографические структуры определяются вариантами симметрии функции распределения зарядов $\rho(x, y, z)$.

В зависимости от пространственной симметрии, все кристаллические решётки подразделяются на **семь** кристаллических систем. По форме элементарной ячейки они могут быть разбиты на **шесть** сингоний. Все возможные сочетания имеющихся в кристаллической решётке поворотных осей симметрии и зеркальных плоскостей симметрии приводят к делению кристаллов на **32** класса симметрии, а с учётом винтовых осей симметрии и скользящих плоскостей симметрии на **230** пространственных групп.

Магнитные структуры определяются вариантами симметрии функции распределения токов $\mathbf{j}(x, y, z)$ или моментов $\mathbf{M}(x, y, z) = \mathbf{r} \times \mathbf{j}(x, y, z)$. (если $\mathbf{j}(x, y, z) = 0$, кристалл не обладает магнитной структурой)

Изменение направления всех токов является дополнительным элементом симметрии (R). Количество магнитных пространственных групп (517) определяется комбинаций преобразований, имеющихся в обычных пространственных группах, с преобразованием R.

Возникновение магнитной структуры связано со сравнительно слабыми взаимодействиями - обменным взаимодействием *d*- и *f*-электронов атомов переходных групп системы Менделеева и обменными взаимодействиями орбитальных и свободных электронов.

В анизотропных структурах существуют направления или плоскости легкого намагничения.

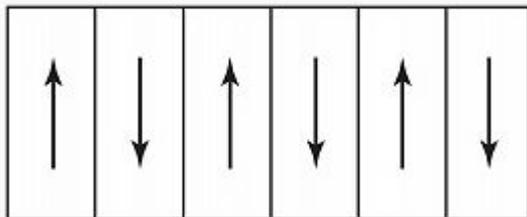
Доменная структура (области Вейсса)

Знак ферромагнитной восприимчивости и ее температурная зависимость указывают, что она обусловлена ориентацией элементарных магнитов в магнитном поле. По порядку величины она сильно отличается от парамагнитного случая, что свидетельствует, что она обусловлена не изолированными элементарными диполями, а целыми группами таких одинаково ориентированных диполей. Различные группы имеют различные направления, но каждая из них насыщена сама по себе и в отсутствие внешнего поля.

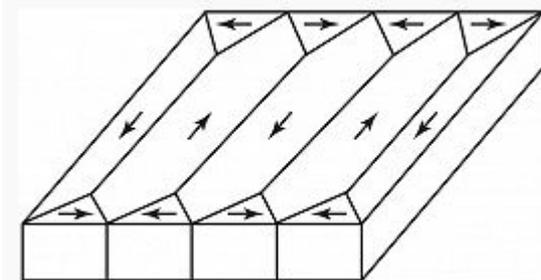
На вид магнитной доменной структуры оказывают влияние особенности магнитной анизотропии (число осей лёгкого намагничивания), ориентация ограничивающих кристалл поверхностей относительно кристаллографических осей, форма и размеры образца, а также различные дефекты (магнитные и немагнитные включения, дефекты упаковки, дислокации и др.).

Размеры доменов от 10^{-5} до 10^{-2} см. Они содержат 10^9 и более атомов. Индукция в каждом домене приближается к индукции насыщения.

Доменная структура (примеры)



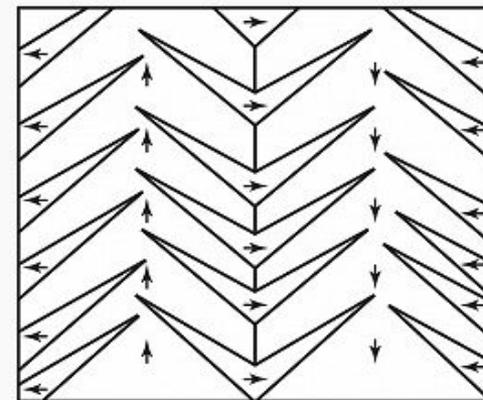
Простейшая магнитная доменная структура в тонкой плёнке с одной осью лёгкого намагничивания; векторы намагнитченности доменов (стрелки) параллельны оси лёгкого намагничивания.



Магнитная доменная структура с полностью замкнутым магнитным потоком в пластине с тремя взаимно перпендикулярными осями лёгкого намагничивания, параллельными граням пластины.



Лабиринтная магнитная доменная структура на поверхности пластины, перпендикулярной оси лёгкого намагничивания.



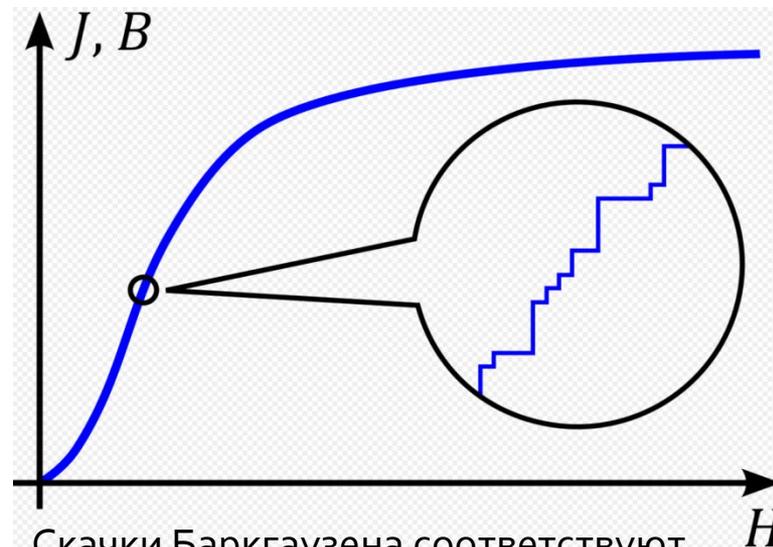
Магнитная доменная структура в виде «ёлочек» на поверхности пластины кремнистого железа, наклонённой под малым углом к поверхности (100).

Характер намагничивания (Гистерезис)

Предельная петля гистерезиса позволяет определить основные характеристики материала



B_s – индукция насыщения
 H_s – поле насыщения
 B_r – остаточная индукция
 H_c – коэрцитивная сила



Скачки Баркгаузена соответствуют скачкообразному перемагничиванию доменов

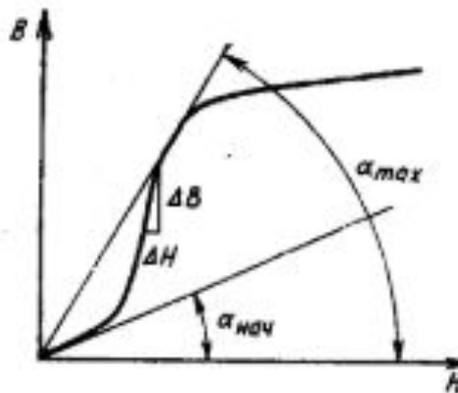


Рис. 3.5. Кривая намагниченности и углы α , характеризующие различные типы магнитной проницаемости

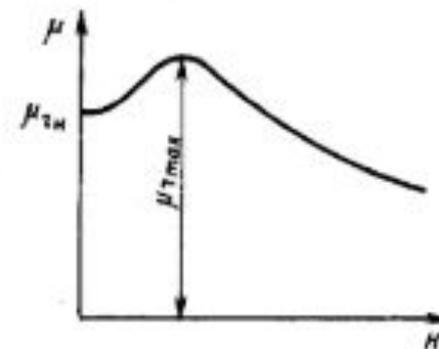


Рис. 3.6. Зависимость магнитной проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля

Магнитомягкие материалы

Пермаллои

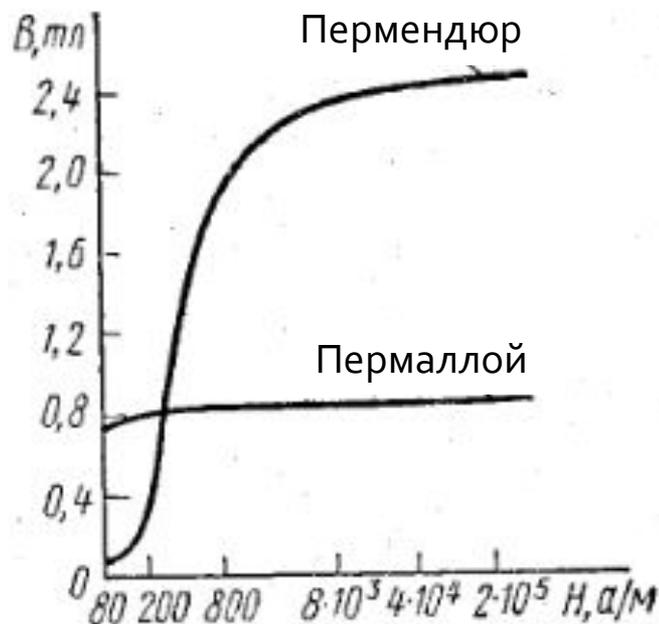
(железо-никелевые сплавы)

<i>Вид пермаллоев</i>	$\mu_{нач}$	$\mu_{макс}$	$H_c, A/м$	$B_{нас}, Тл$
Низконикелевые	2000	20000	8 – 24	1
Высоконикелевые	40000	200000	1 – 8	0,75
Супермаллой (Ni, Fe, Mo, Mn)	100000	1000000	0,3	0,79
Альсифер (Fe, Si, Al)	35000	100000	1,8	-
Пермендюр (Fe, Co, V)	300	1000	-	2

Применение: для изготовления малогабаритных трансформаторов, реле

Магнитомягкие материалы (Пермендюр)

Пермендюр — сплав железа с кобальтом и ванадием (50% Co; 1,8% V; остальное — железо). Характеризуется высокой индукцией насыщения и повышенной стабильностью во времени, обратимой магнитной проницаемостью. Применяют для изготовления приборов при необходимости сконцентрировать в небольшом пространстве мощный поток силовых линий.



Обратимые кривые намагничения пермендюра и пермаллоя

Максимальная магнитная проницаемость зависит от технологии

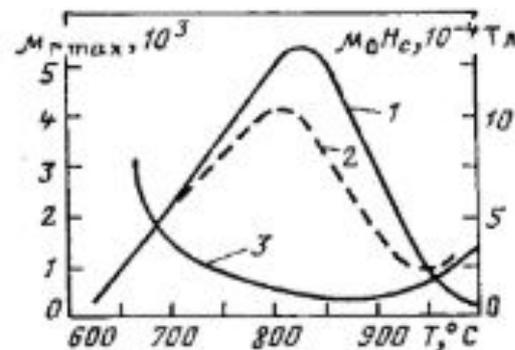


Рис. 27.71. Зависимости максимальной относительной магнитной проницаемости и коэрцитивной силы пермендюра (массовый состав: 49% Fe, 49% Co, 2% V) от температуры отжига:

1 — $\mu_{r \max}$ после быстрого охлаждения; 2 — $\mu_{r \max}$ после медленного охлаждения; 3 — H_c после быстрого охлаждения [3]

Магнитожесткие ферромагнетики

Магнитотвердые материалы (магнитожесткие материалы) — магнитные материалы, характеризующиеся высокими значениями коэрцитивной силы H_c . Качество магнитотвердых материалов характеризуют также значения остаточной магнитной индукции B_r , максимальной магнитной энергии, отдаваемой материалом в пространство $W_m = (B \cdot H)_{\max} / 2$ и коэффициента выпуклости $(B \cdot H)_{\max} / (B_r H_c)$. Материалы также должны иметь высокую временную и температурную стабильность перечисленных параметров и удовлетворительные прочность и пластичность.

1. **Легированные стали, закаленные на мартенсит** (высокоуглеродистые стали, легированные W, Mo, Cr или Co.),
2. **Литые высококоэрцитивные стали** (сплавы систем Fe—Ni—Al и Fe—Ni—Co—Al, модифицированные различными добавками . H_c 30-110 кА/м, W_m 3-30 кДж/м³),
3. **Порошковые магнитотвердые материалы** (В зависимости от особенностей производства и природы высококоэрцитивного состояния материалы этой группы подразделяются на металлокерамические магниты и металлопласты, в том числе металлопластические магниты)
4. **Магнитотвердые ферриты** (феррит бария $BaO \cdot 6Fe_2O_3$, феррит кобальта $CoO \cdot 6Fe_2O_3$ и феррит стронция $SrO \cdot 6Fe_2O_3$. H_c — 120-240 кА/м, W_m — 3-18 кДж/м³),
5. **Пластически деформируемые сплавы** (Fe — Co — Mo — (72%Fe, 12%Co, 16%Mo — комол); Fe — Co — V — (37%Fe, 52%Co, 11%V — викалло); Fe — Ni — Cu — (20%Fe, 20%Ni, 60%Cu — кунифе); Co — Ni — Cu — (45%Co, 25%Ni, 30%Cu — кунико. H_c (12-55) кА/м, W_m (3-19)кДж/м³),
6. **Сплавы на основе редкоземельных элементов** (RCo_5 и R_2Co_{17} , где R — редкоземельный металл (самарий, празеодим, ниодим, церий. H_c = (560-800) кА/м, W_m = (56-80) кДж/м³),
7. **Сплавы для магнитных носителей информации**

Магнитожесткие ферромагнетики (постоянные магниты)

Параметр	Марка и система			
	Феррит бария	Самарий -кобальт	Неодим- железо- бор	ЮМДК 35Т5ВА
Магнитная индукция, Вт, Тл	0,36	0,8-0,9	0,8-1,2	0,9- 1,4
Коэрцитивная сила по индукции в Нс кА/м	120-220	500-600	400- 1300	36-145
Коэрцитивная сила по намагниченности Нс, кА/м	150-240	600-2000		120-125
Магнитная энергия (ВН) мах, кДж/м ³	22-28	100-400	200-400	80-90
Температурный коэффициент, % / °С	0,2	0,04	0,15	0,025
Плотность, г/см	5,0	8,0	7,4	7,35
Цена за 1 кг, дол. США	1-2	300	90	0 ?

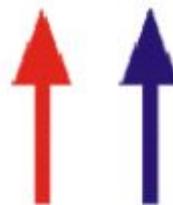
Постоянные магниты
SmCo, NdFeB, ЮМДК, NdFeB и др.



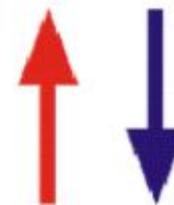
г. Саратов, тел. +79271269284, ICQ 449047049
E-mail: magnit4@gmail.com, Александр

Основные типы магнитного упорядочения

- a) ферромагнетик,
- b) антиферромагнетик,
- c) скошенный антиферромагнетик
- d) ферримагнетик



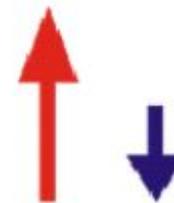
a)



b)



c)



d)

Ферримагнетики

Ферримагнетики — материалы, у которых магнитные моменты атомов различных подрешёток ориентируются антипараллельно, как и в антиферромагнетиках, но моменты различных подрешёток не равны, и потому результирующий момент не равен нулю.

Ферримагнетики характеризуются спонтанной намагниченностью.

1. Ферриты (оксиды)
2. Гексагональные фториды (RbNiF_3 , CsNiF_3 , TlNiF_3 , CsFeF_3),
3. Сплавы и интерметаллиды (RMe_5 , например, GdCo_5)

Магнитная восприимчивость $\chi \sim$ до 10^7

Магнитная проницаемость μ до 10^7

Ферриты $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MeO}$

где **Me** – Mg, Fe, Zn, Co, Cu, Cd, Mn и др.

Ферримагнетики применяют в качестве сердечников высокочастотных контуров в радиотехнике, невзаимных элементов в СВЧ-технике, элементов памяти в ЭВМ и для создания постоянных магнитов.

Антиферромагнетики

Антиферромагнетики – это вещества, в которых магнитные моменты атомов в двух подрешетках взаимодействуют так, что стремятся выстроиться антипараллельно друг другу. поэтому имеет место их взаимная компенсация. Магнитная восприимчивость χ антиферромагнетиков мала и составляет $10^{-5} - 10^{-3}$. В слабых полях χ (и m) практически не зависит от напряженности внешнего магнитного поля, в сильных является сложной функцией напряженности поля. В некоторой степени свойства антиферромагнетиков схожи со свойствами парамагнетиков. Пара- и антиферромагнитные вещества объединяют положительная магнитная восприимчивость и компенсация магнитных моментов атомов. Различие заключается в том, что спиновые моменты парамагнетиков ориентированы хаотически, а антиферромагнетиков – параллельно друг другу. По мере повышения температуры от 0 К χ растёт, достигая максимума при температуре, называемой точкой Нееля, и далее начинает уменьшаться, подчиняясь на этом участке закону Кюри–Вейсса. К антиферромагнетикам относятся редкоземельные металлы – *Ce, Pr, Nd, Sm* и *Eu*, а также *Cr* и *Mn*; многие окислы, хлориды, сульфиды, карбонаты переходных элементов, например на основе марганца: *MnO, MnCl₂, MnF₂, MnS₂* и др., аналогично на основе *Fe, Co, Ni, Cr* и др.

С использованием атомов антиферромагнетика при низких температурах возможно (IBM) создание ячеек памяти, содержащих всего 12 атомов (для сравнения, в современных жестких дисках для хранения 1 бита информации необходимо около 1 млн. атомов)

Аморфные ферромагнетики

Класс магнитных материалов, сочетающих определ. магнитную структуру, напр. ферромагнитную, с аморфной атомной структурой в ограниченном интервале темп-р. Полученные А. м. по магн. свойствам не уступают или близки к лучшим кристаллич. магн. материалам, но технология их изготовления существенно проще.

Перспективность техн. использования А. м. из металлических стекол связана с относительной простотой их получения, высокой магнитной проницаемостью ($\sim 10^6$), малыми магн. потерями (50,5 Вт/кг), высокой антикоррозийной стойкостью, относительно большим электрич. сопротивлением, возможностью получения магнитно-жёстких материалов с большой магн. энергией. Недостатки А. м. обусловлены принципиальной нестабильностью аморфного состояния.

Для получения аморфных порошков вещество распыляют элек-трич. полем, взрывной волной и т. п. Массивные А. м. формируют из порошков методом прессования или взрыва. Используют также метод ионно-плазменного напыления. В тонкоплёночном виде А. м. получают методами конденсации паров на охлаждённую подложку, электро- и хим. осаждения, ионно-плазменного напыления, ионной имплантации и др.



Сравнение магнитных свойств некоторых кристаллических и аморфных сплавов (300К)

Сплавы	Состав	$4\pi M$, Тл	T_k , °C	H_C , А/м	$\lambda_S \cdot 10^6$
Кристаллические	Ni(80%) Fe (16%) Mo (4%)	0,78	460	2	~0
	Ni (80%) Fe(20%)	0,82	400	0,4	~0
	Ni (50%)Fe(50%)	1,60	480	8	40
	Fe(96,8%)Si (3,3%)	2,03	730	40	4
	Аморфные	$Fe_{72}Co_{16}P_6B_6A1_3$	0,63	260	1,2
$Fe_{80}P_{14}B_6$		1,36	344	8	26
$Fe_{80}P_{16}C_3B_1$		1,49	292	4	30
$Fe_{30}B_{20}$		1,60	374	3,2	30

Примечание: $4\pi M$ - магнитная индукция; T_k - темп-ра Кюри, H_C - коэрцитивная сила, λ_S - магнотрикция насыщения.



Спасибо за внимание







