

Магнитные материалы

Лекции

Ковалева Татьяна Юрьевна

Электромагнетизм

Лекция №9. Магнитные свойства вещества.

- 1. Магнитные моменты электронов и атомов.
- 2. Атом в магнитном поле.
- 3. Магнитное поле в веществе.
- 4. Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле.
- 5. Ферромагнетики.

1. Магнитные моменты электронов и атомов

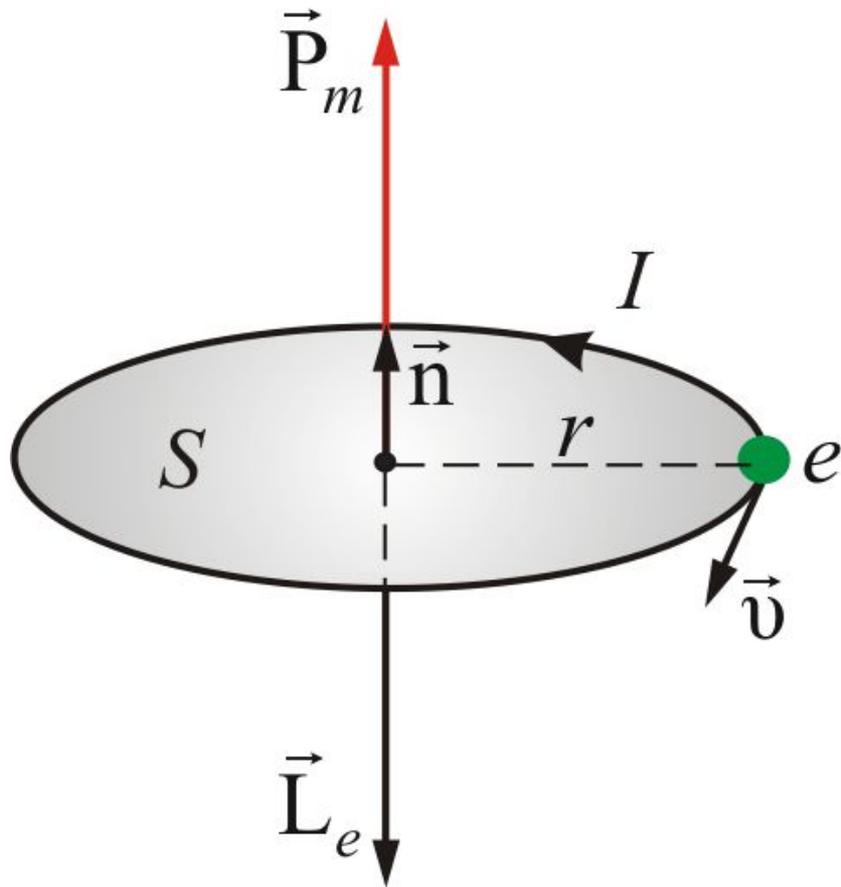
- Различные среды при рассмотрении их магнитных свойств называют *магнетиками*.
- Все вещества в той или иной мере взаимодействуют с магнитным полем. У некоторых материалов магнитные свойства сохраняются и в отсутствие внешнего магнитного поля.
- **Намагничивание материалов происходит за счет токов, циркулирующих внутри атомов – вращения электронов и движения их в атоме. «амперовские токи».**
- **В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов вещества ориентированы обычно беспорядочно, так что создаваемые ими магнитные поля компенсируют друг друга.**

Продолжение лекции

- При наложении внешнего магнитного поля атомы стремятся сориентироваться своими магнитными моментами по направлению внешнего магнитного поля, и тогда компенсация магнитных моментов нарушается, тело приобретает магнитные свойства – *намагничивается*
- ***Все тела*** при внесении их во внешнее магнитное поле *намагничиваются* в той или иной степени, т.е. создают собственное магнитное поле, которое накладывается на внешнее магнитное поле.
- ***Магнитные свойства вещества определяются магнитными свойствами электронов и атомов.***
- ***Магнетики*** состоят из атомов, которые в свою очередь состоят из положительных ядер и, условно говоря, вращающихся вокруг них электронов.

Продолжение лекции

Электрон, движущийся по орбите в атоме эквивалентен замкнутому контуру с **орбитальным током**



$I = ev$, где e –
заряд электрона,
 v – частота его
вращения по орбите.

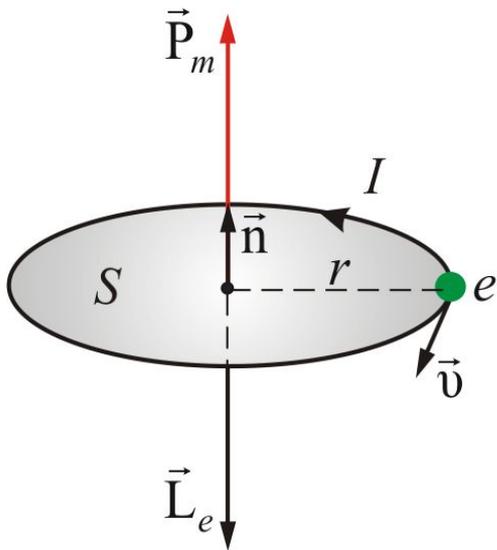
Продолжение лекции

$$\vec{P}_m = IS \vec{n} = \frac{e\vec{v}}{2\pi r},$$

Орбитальному току соответствует **орбитальный магнитный момент электрона**

где S – площадь орбиты

\vec{n} – единичный вектор нормали к S ,
 \vec{v} – скорость электрона.



Электрон, движущийся по орбите имеет **орбитальный момент импульса L_e** , который имеет противоположное направление, по отношению к \vec{P}_m и связан с ним соотношением: $\vec{P}_m = \gamma \vec{L}_e$.

Продолжение лекции

- $\mathbf{P}_m = \gamma \mathbf{L}_e.$
- Коэффициент пропорциональности называется **гиромагнитным отношением**: $\gamma = \frac{e}{2m}$
- Кроме того, электрон обладает **собственным моментом импульса \mathbf{L}_{eS}** , который называется **спином**, $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{с}}$;
- где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ постоянная Планка:

Продолжение лекции

- Спину электрона L_{eS} соответствует **спиновый магнитный момент** электрона P_{mS} , направленный в противоположную сторону: $\mathbf{P}_{mS} = \gamma_S \mathbf{L}_{eS}$.
- Величину γ_S называют **гиромагнитным отношением спиновых моментов**
- Проекция спинового магнитного момента электрона на направление вектора индукции магнитного поля может принимать только одно из следующих двух значений
$$P_{mSB} = \pm \frac{e\hbar}{2m} = \pm \mu_B$$
- где μ_B – квантовый магнитный момент электрона – **магнетон Бора**.

Продолжение лекции

Орбитальным магнитным моментом P_m атома называется геометрическая сумма орбитальных магнитных моментов всех электронов атома:

$$\vec{P}_m = \sum_{i=1}^Z \vec{P}_{mi};$$

где Z – число всех электронов в атоме – порядковый номер элемента в периодической системе Менделеева.

Орбитальным моментом импульса L атома называется геометрическая сумма моментов импульса всех электронов атома:

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^Z \vec{L}_{ei}.$$

Общий орбитальный момент **атома** равен векторной сумме магнитных моментов (орбитальных и спиновых) всех электронов:

$$\vec{P}_a = \sum \vec{P}_m + \sum \vec{P}_{mS}$$

2. Атом в магнитном поле.

Продолжение лекции

- В магнитное поле с индукцией \mathbf{B} на электрон, движущийся по орбите эквивалентной замкнутому контуру с током, действует момент сил

$$\dot{\mathbf{M}} = [\mathbf{P}_m, \mathbf{B}].$$

- При этом изменяется орбитальный момент импульса электрона:

$$\frac{d\mathbf{L}_e}{dt} = [\mathbf{P}_m, \mathbf{B}] = [-\gamma \mathbf{B}, \mathbf{L}_e].$$

- Аналогично изменяется вектор орбитального магнитного момента электрона

$$\frac{d\mathbf{P}_m}{dt} = [-\gamma \mathbf{B}, \mathbf{P}_m].$$

3. Магнитное поле в веществе

Продолжение лекции

При изучении магнитного поля в веществе различают два типа токов – **макротоки и микротоки**.

Макротоками называются токи проводимости и конвекционные токи, связанные с движением заряженных макроскопических тел.

Микротоками (молекулярными токами) называют токи, обусловленные движением электронов в атомах, молекулах и ионах.

- Магнитное поле в веществе \vec{B} является суперпозицией двух полей: внешнего $\vec{B}_{внеш}$ магнитного поля, создаваемого макро-токами и внутреннего $\vec{B}_{внутр}$ или собственного, магнитного поля, создаваемого микротоками.
- Характеризует магнитное поле в веществе \vec{B} вектор, равный геометрической \vec{B} сумме $\vec{B}_{внеш}$ создаваемого $\vec{B}_{внутр}$ макротоками и создаваемого микротоками:

$$\vec{B} = \vec{B}_{внеш} + \vec{B}_{внутр} \cdot$$

Продолжение лекции

Закон полного тока для магнитного поля в веществе:

$$\oint_L \mathbf{H} d\Gamma = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}})$$

где $I_{\text{микро}}$ и $I_{\text{макро}}$ – алгебраическая сумма макро- и микротоков.

Вектор \mathbf{H} называется **напряженностью магнитного поля**.
$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{J}$$

Намагниченность \mathbf{J} изотропной среды с **напряженностью** \mathbf{H} связаны соотношением
$$\mathbf{J} = \square \mathbf{H}.$$

где \square – **магнитная восприимчивость среды**, коэффициент пропорциональности, характеризующий магнитные свойства вещества

4. Диамagnetики и парамагнетики в магнитном поле. Продолжение лекции

Микроскопические плотности токов в намагниченном веществе чрезвычайно сложны и сильно изменяются даже в пределах одного атома. Но нас интересуют средние магнитные поля, созданные большим числом атомов.

Как было сказано характеристикой намагниченного состояния вещества служит векторная величина – **намагниченность**, равная отношению магнитного момента малого объема вещества к величине этого объема:

$$\mathbf{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \mathbf{P}_{mi}$$

Где \mathbf{P}_{mi} – магнитный момент i -го атома из числа n атомов, содержащихся в объеме ΔV .

Продолжение лекции

Магнетики можно разделить на три основные группы: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.

Если магнитное поле слабо усиливается в веществе, то такое вещество называется парамагнетиком

B_0 (Ce³⁺, Pr³⁺, Ti³⁺, V³⁺, Fe²⁺, Mg²⁺, Li, Na)

$$\mu = \frac{B}{B_0} < 1$$

• **если ослабевает, то это диамагнетик**

• (Bi, Cu, Ag, Au и др.).

• **Вещества, обладающие сильными магнитными свойствами называются ферромагнетиками.**

• B_0 (Fe, Co, Ni и пр.).

• **постоянные магниты.**

Диамagnetики (Продолжение лекции)

Диамagnetизм (от греч. *dia* – расхождение) – свойство веществ намагничиваться навстречу приложенному магнитному полю.

Диамagnetиками называются вещества, магнитные моменты атомов которых в отсутствии внешнего поля равны нулю, т.к. магнитные моменты всех электронов атома взаимно скомпенсированы (например инертные газы, водород, азот, NaCl, Bi, Cu, Ag, Au и др.).

При внесении диамagnetического вещества в магнитное поле его атомы приобретают наведенные магнитные моменты ΔP_m **направленные противоположно вектору** .

Диамагнетики (Продолжение лекции)

- **Вектор намагниченности** диамагнетика равен $\mathbf{J} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \chi = \mathbf{H} \cdot \chi,$

$$\chi < 0$$

- **Для всех диамагнетиков**
- **Вектор магнитной индукции** \mathbf{B} **собственного** магнитного поля, создаваемого диамагнетиком при его намагничивании во внешнем поле $\mathbf{B}_{\text{внеш}}$ **направлен в сторону, противоположную** $\chi \sim 10^{-6}$ (в 10⁶ раз от диэлектрика в электрическом поле).
- **У диамагнетиков** – магнитная восприимчивость среды.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков (Продолжение лекции)

Вещество	$i_{\text{мол}} \cdot 10^{-6}$
He	-2,02
Cu	-5,41
Zn	-11,40
Ag	-21,50
Au	-29,59
Bi	-284,0
CO ₂	-21

Парамагнетики (Продолжение лекции)

- **Парамагнетизм** (от греч. *para* – возле) – свойство веществ во внешнем магнитном поле намагничиваться в направлении этого поля поэтому внутри парамагнетика к действию внешнего поля прибавляется действие наведенного внутреннего поля.
- **Парамагнетиками** называются вещества, атомы которых имеют в отсутствие внешнего магнитного поля, отличный от нуля магнитный момент μ_m .
- Эти вещества намагничиваются в направлении вектора $B_{внеш}$.
- **К парамагнетикам** относятся многие щелочные металлы, кислород O_2 , оксид азота NO , хлорное железо $FeCl_2$, Ce^{3+} , Pr^{3+} , Ti^{3+} , V^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Li , Na и др.

Парамагнетики (Продолжение лекции)

- В отсутствии внешнего магнитного поля **намагниченность парамагнетика $J = 0$** , так как векторы μ_{mi} разных атомов ориентированы беспорядочно.
- **При внесении парамагнетика** во внешнее магнитное поле, происходит преимущественная ориентация собственных магнитных моментов атомов **по направлению поля**, так что парамагнетик намагничивается.
- **Значения χ для парамагнетиков положительны ($\chi > 0$)** и находятся в пределах $\sim 10^{-5} \div 10^{-3}$, то есть, как и у диамагнетиков.

Магнитная восприимчивость парамагнетиков в расчете на один моль (атом)

Вещество	$i_{\text{МОЛ}} \cdot 10^{-6}$	Вещество	$i_{\text{МОЛ}} \cdot 10^{-6}$
Mg	13,25	Sr	91,2
Na	15,1	Ti	161,0
Rb	18,2	U	414,0
Ba	20,4	Pu	627,0
K	21,25	FeS	1074,0
Li	24,6	EuCl ₃	2650,0
Ca	44,0	CoCl ₃	121660,0
W	55,0		

5. Ферромагнетики

- **К ферромагнетикам** (*ferrum* – железо) относятся вещества, магнитная восприимчивость которых положительна и очень велика.
- Намагниченность $\vec{J} = \chi \vec{H}$ и магнитная индукция $\vec{B} = (\mu_0 + \mu_0 \chi) \vec{H}$ ферромагнетиков растут с увеличением напряженности магнитного поля нелинейно, и в полях $\sim 8 \cdot 10^3$ А/м намагниченность ферромагнетиков достигает предельного значения, а вектор магнитной индукции растет линейно с \vec{H} :
- Наличие у ферромагнетиков самопроизвольного магнитного момента в отсутствие внешнего магнитного поля означает, что электронные спины и магнитные моменты атомных носителей магнетизма ориентированы в веществе упорядоченным образом.

Ферромагнетики (продолжение)

- **Ферромагнетики** это вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры.
- У ферромагнетиков магнитная восприимчивость положительна и очень велика $= 10^4 \div 10^5$.
- В ферромагнетиках происходит резкое усиление внешних магнитных полей.
- Для ферромагнетиков сложным образом зависит от величины магнитного поля.
- Типичными ферромагнетиками являются Fe, Co, Ni, Gd,, Dy, Ho, Er, Tm, а также соединения ферромагнитных материалов с неферромагнитными: Fe_3Al , Ni_3Mn , $ZnCMn_3$
- Ферромагнетики, в отличие от слабо магнитных диа- и парамагнетиков, являются **сильно магнитными веществами**: внутреннее магнитное поле в них может в сотни раз превосходить внешнее поле.

Основные отличия магнитных свойств ферромагнетиков.

- **Ферромагнетики** (Fe, Co, Ni и др.) и **парамагнетики** (U, Pu, FeS) втягиваются в область более сильного поля,
- **диамагнетики** (Bi и др.) – выталкиваются из области сильного поля.

1) Нелинейная зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля H (рис.).

Как видно из (рис.), при $H > H_s$ наблюдается **магнитное насыщение**

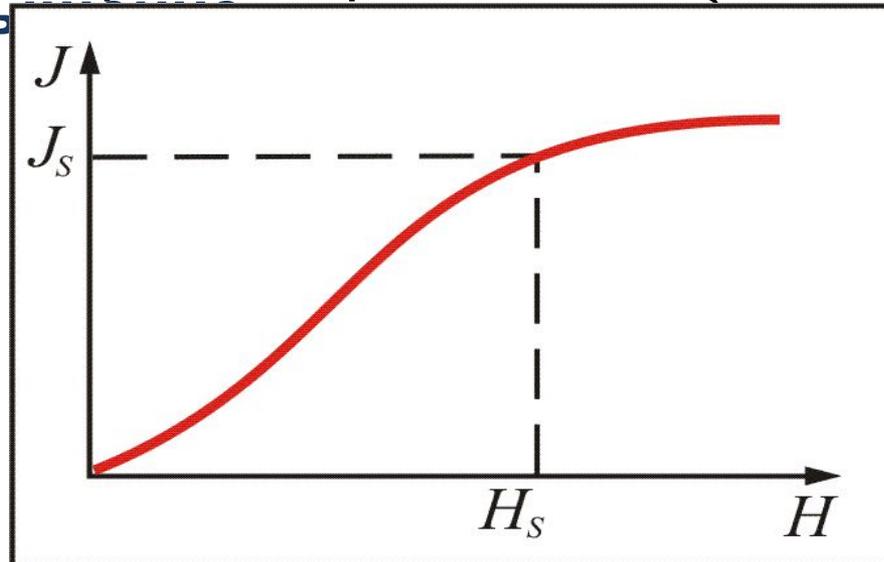
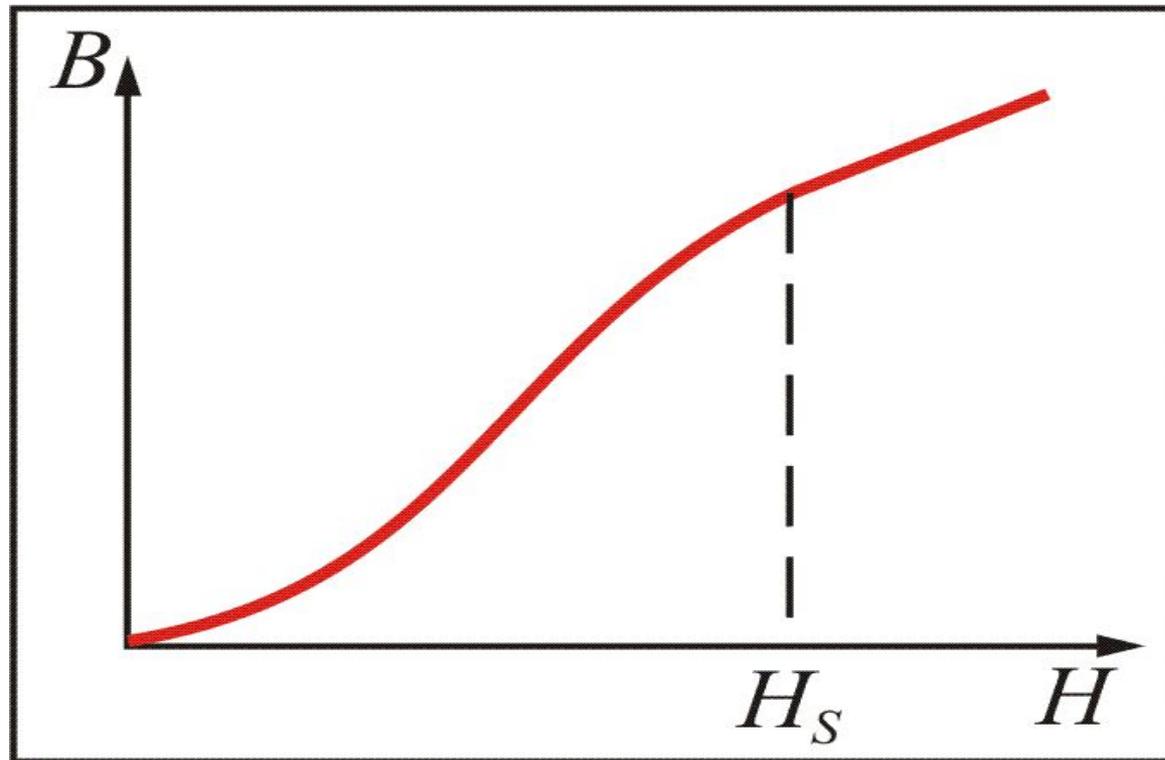


Рис. 1.

Основные отличия магнитных свойств ферромагнетиков.

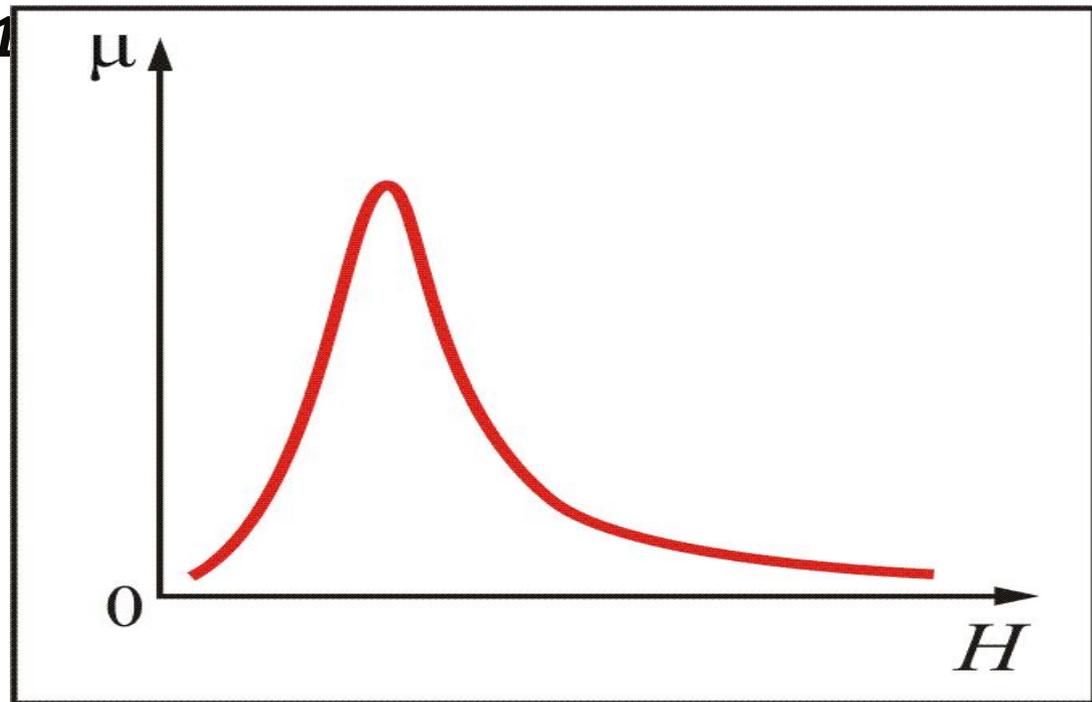
- 2) При $H < H_s$ зависимость магнитной индукции B от H - нелинейная, а при $H > H_s$ - линейна (рис. 2).



- (рис. 2).

Основные отличия магнитных свойств ферромагнетиков.

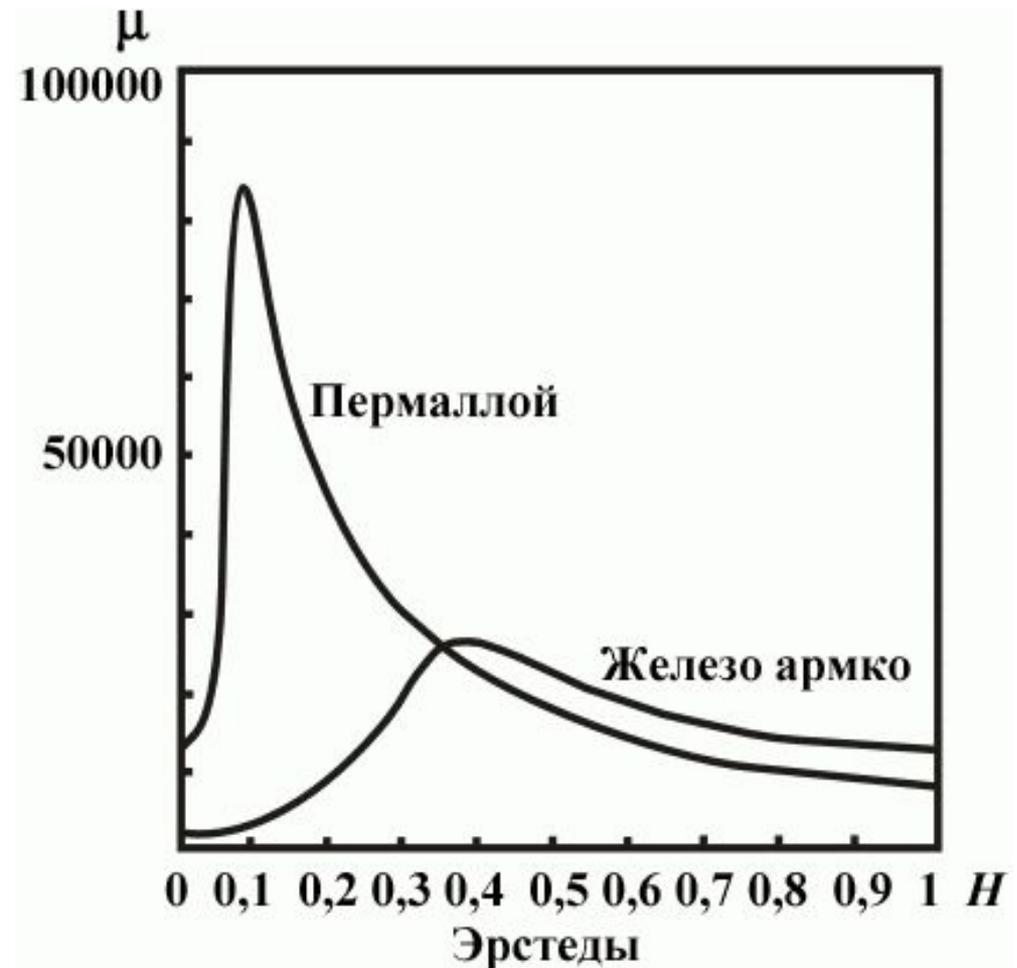
- 3) Зависимость относительной магнитной проницаемости μ от H имеет сложный характер (рис. 3), причем максимальные значения μ очень велики ($10^3 \div 10^6$)



- (рис. 3)

Основные отличия магнитных свойств ферромагнетиков. (продолжение)

- Впервые систематические исследования μ от H были проведены в 1872 г. **А. Г. Столетовым** (1839–1896) – выдающимся русским физиком.
- На рис. 4 изображена зависимость магнитной проницаемости ферромагнетиков от напряженности магнитного поля – **кривая Столетова**.



Магнитная анизотропия

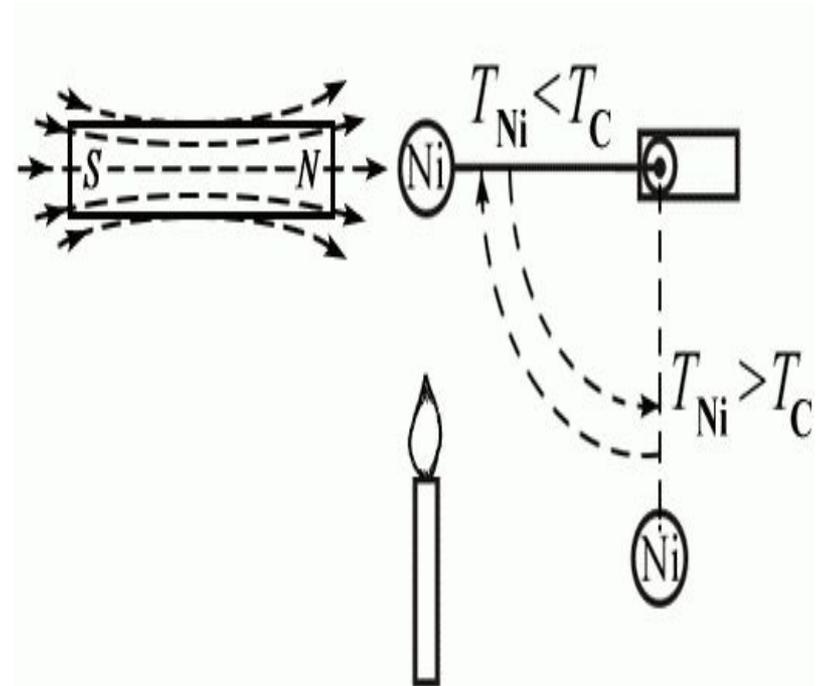
- Магнитная анизотропия – разница в свойствах вдоль разных осей различная степень намагниченности
- Для Fe наиболее сильное намагничивание -вдоль ребра куба, через объем.
- В тех случаях, когда анизотропия в поликристаллических ферромагнетиках выражена наиболее ярко, говорят, что он обладает магнитной текстурой (текстурой доменов). Явление анизотропии используется для создания в определенном направлении повышенных магнитных характеристик.
- - намагничивание в переменном поле. Процесс намагничивания сводится, во-первых, (в более слабых полях), к увеличению тех доменов, угол магнитных моментов которых составляет минимальное значение с направлением магнитного поля (процесс смещения границ доменов).
- Во-вторых в более сильных полях к повороту магнитных моментов в направлении внешнего поля в направлении внешнего поля (процесс ориентации).
- В сильном поле увеличение магнитной индукции не происходит, т.к. все моменты уже ориентированы по полю. Величина B соответствует значению H при котором наблюдается полная ориентация моментов носит название индукции насыщения. Дальнейший небольшой рост индукции происходит за счет парамагнетизма. Если затем уменьшать H , то при $H=0$, $B > 0$, т.е. в образце остается преимущественно ориентация части магнитных моментов. Явление отставания кривой намагниченности при многократном перемагничивании называется петлей гистерезиса.

Процесс намагничивания

- Процесс намагничивания в переменном поле сводится:
- В более слабых полях приводит к увеличению тех доменов, угол магнитных моментов которых составляет минимальное значение с направлением магнитного поля (процесс смещения границ доменов).
- В более сильных полях - к повороту магнитных моментов в направлении внешнего поля в направлении внешнего поля (процесс ориентации).
- В сильном поле увеличение магнитной индукции не происходит, т.к. все моменты уже ориентированы по полю. Величина B_r (J_s) соответствует значению H при котором наблюдается полная ориентация моментов носит название индукции насыщения. Дальнейший небольшой рост индукции происходит за счет парамагнетизма. Если затем уменьшать H , то при $H=0$, $B > 0$, т.е. в образце остается преимущественно ориентация части магнитных моментов. Явление отставания кривой намагниченности при многократном перемагничивании называется петлей гистерезиса.

Основные отличия магнитных свойств ферромагнетиков. (продолжение)

- 4) У каждого ферромагнетика имеется такая температура называемая точкой Кюри (T_K), выше которой это вещество теряет свои особые магнитные свойства.
- Наличие температуры Кюри связано с разрушением при $T > T_K$ упорядоченного состояния в магнитной подсистеме кристалла – параллельной ориентации магнитных моментов.



Основные отличия магнитных свойств ферромагнетиков. (продолжение)

- Для никеля температура Кюри равна 360 °С.
- Если подвесить образец никеля вблизи пламени горелки так, чтобы он находился в поле сильного постоянного магнита, то не нагретый образец может располагаться горизонтально, сильно притягиваясь к магниту.
- По мере нагрева образца и достижения температуры $T > T_K$ ферромагнитные свойства у никеля исчезают и образец никеля падает. Остыв до температуры ниже точки Кюри, образец вновь притянется к магниту. Нагревшись, вновь падает и т. д. Эти периодические колебания будут продолжаться все время, пока горит свеча или горелка .

Температура Кюри T_C ферромагнетиков

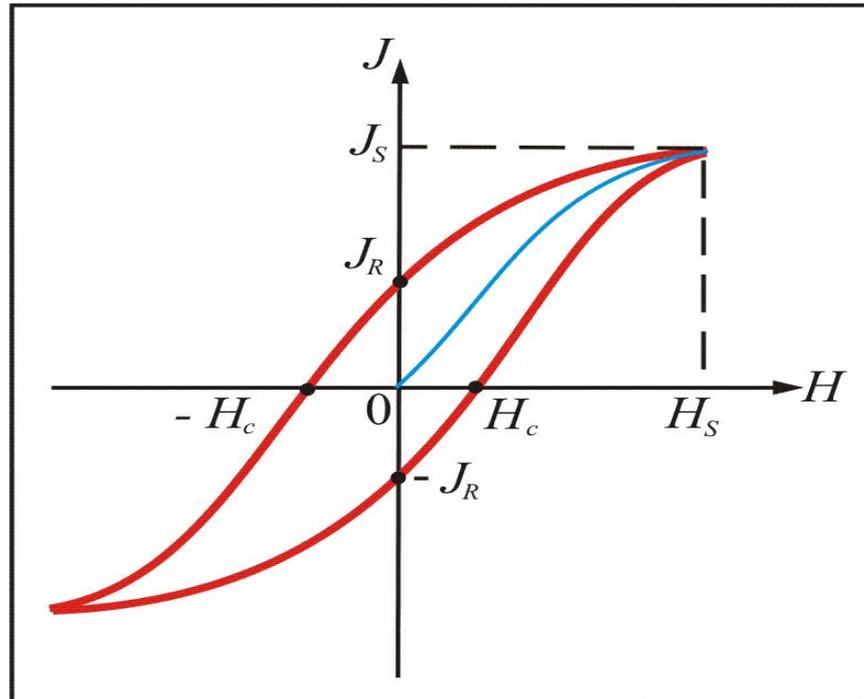
Материал	Fe	Co	Ni	Gd	Dy	Ho	Tm	Er
Температура Кюри, К	1043	1403	631	289	87	20	25	19,6

Свойства ферромагнетиков

5) *Существование магнитного гистерезиса.*

На (рис. 5) показана *петля гистерезиса* – график зависимости намагниченности вещества от напряженности магнитного поля H .

- J_S – намагниченность насыщения
- J_R – остаточная намагниченность
- H_c – коэрцитивная сила.



- Рис.5

Свойства ферромагнетиков

продолжение

- Намагниченность J_S при $H = H_S$ называется **намагниченностью насыщения**.
- Намагниченность J_R при $H = 0$ называется **остаточной намагниченностью** (что служит для создания постоянных магнитов)
- **Напряженность H_C магнитного поля, полностью размагниченного ферромагнетика, называется коэрцитивной силой**. Она характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние.
- **Большой коэрцитивной силой** (широкой петлей гистерезиса) обладают **магнитотвердые материалы**, используемые для изготовления постоянных магнитов
- **Малую коэрцитивную силу** имеют **магнитомягкие материалы** (используются для изготовления трансформаторов)

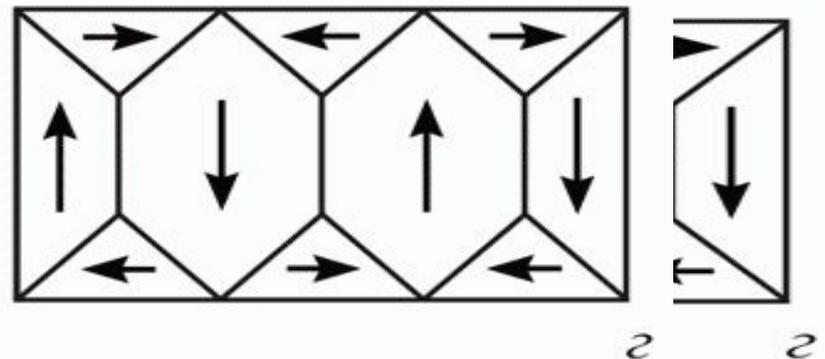
Свойства ферромагнетиков

продолжение

- Элементарными носителями магнетизма в ферромагнетиках являются спиновые магнитные моменты электронов.

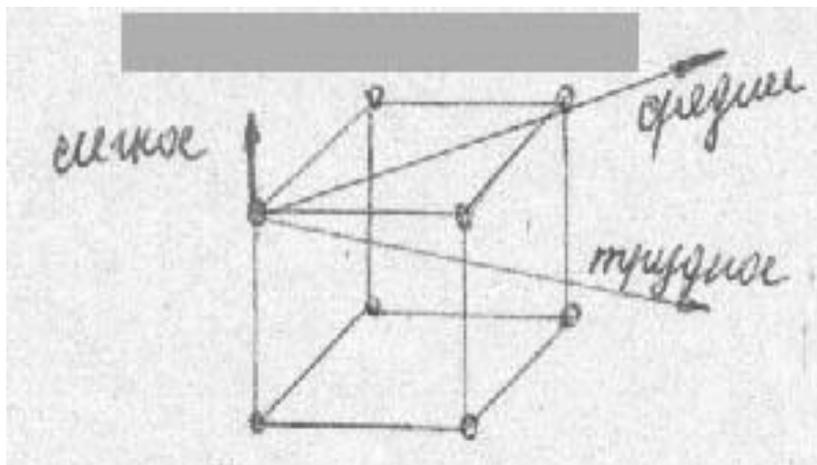
Самопроизвольно намагничиваются макроскопические **области монокристаллов** ферромагнитных материалов - **домены**, например никеля или железа, размером $10^{-3} \div 10^{-5}$ м.

- Векторы намагниченности доменов в отсутствие внешнего магнитного поля ориентированы таким образом, что **полный магнитный момент ферромагнитного материала равен нулю**



Свойства магнитных материалов и их параметры

- магнитная анизотропия – разница в свойствах вдоль разных осей
различная степень намагниченности.



Для Fe наиболее вдоль ребра куба, через объем.

В тех случаях, когда анизотропия в поликристаллических ферромагнетиках выражена наиболее ярко, говорят, что он обладает магнитной текстурой (текстурой доменов).

Явление анизотропии используется для создания в определенном направлении повышенных магнитных характеристик.

Намагничивание в переменном поле.

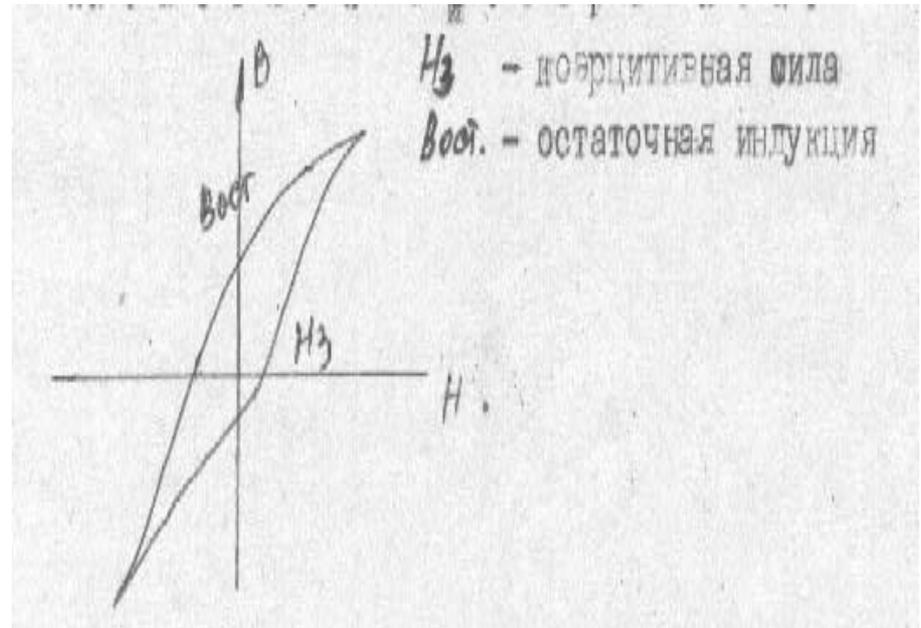
Процесс намагничивания сводится, во-первых, (в более слабых полях), к увеличению тех доменов, угол магнитных моментов которых составляет минимальное значение с направлением магнитного поля (процесс смещения границ доменов).

Свойства магнитных материалов и их параметры

- Во-вторых в более сильных полях процесс намагничивания сводится к повороту магнитных моментов в направлении внешнего поля (процесс ориентации).
- В сильном поле увеличение магнитной индукции не происходит, т.к. все моменты уже ориентированы по полю. Величина B соответствует значению H при котором наблюдается полная ориентация моментов носит название индукции насыщения. Дальнейший небольшой рост индукции происходит за счет парамагнетизма.
- Если затем уменьшать H , то при $H=0$, $B \neq 0$, т.е. в образце остается преимущественно ориентация части магнитных моментов. Явление отставания кривой намагниченности при многократном перемагничивании называется петлей гистерезиса.

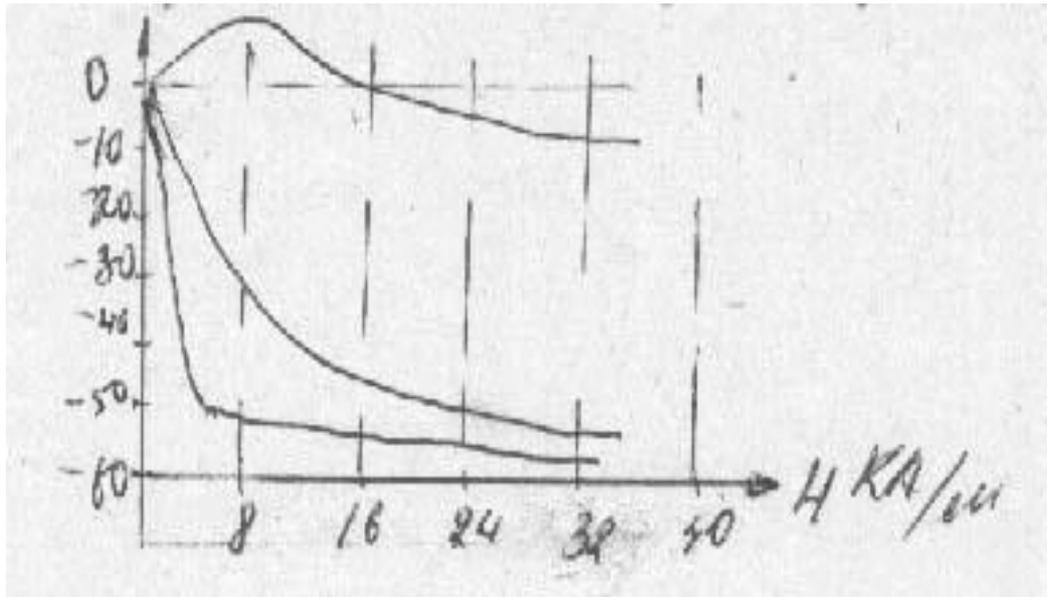
Свойства магнитных материалов и их параметры

- При перемагничивании возникают потери:
- на гистерезис (в постоянных полях)
 - на вихревые точки (в переменных полях)
 - на последействие
 - Кривые гистерезиса могут быть различны для различных материалов.



Магнитострикция

Магнитострикция – явление изменения размеров монокристаллов при намагничивании. Явление магнитострикции зависит от напряженности поля и для разных материалов может иметь различные знаки. При этом возникают внутренние напряжения. Сплав Fe – Ni используется для создания высокой, а магнитострикционный момент равен нулю.



Влияние на магнитные материалы структуры и ее дефекты

- Магнитные свойства зависят от величины зерна.
- У мелкозернистой структуры магнитные свойства ниже, т.к. меньше магнитная поверхность на единицу объема зерен.
- Для получения крупнозернистой структуры проводят рекристаллизацию металла и добавляют некоторые присадки. Искажение решетки связано с существованием некоторых примесей.
- Введение в Fe углерода, вольфрама, хрома, кобальта увеличивает коэрцитивную силу.
- Отрицательное влияние оказывает растворенный в железе азот, кислород и водород. Искажения возникают также при термической обработке и внутренних напряжениях.
- Механическая обработка (вальцовка, штамповка, протяжка) оказывает влияние на магнитные свойства. При удлинении образца технически чистого железа на 3%, его магнитная проницаемость составляет всего 25% от первоначального, а коэрцитивная сила возрастает в 2 раза.
- Для устранения напряжений металл отжигают.

Магнитомягкие материалы

- Для НЧ ММ обладают низкой коэрцитивной силой, малыми потерями на гистерезис, высокой магнитной проницаемостью. Используются они в тех случаях, когда необходимо при наименьшей затрате энергии достигнуть наибольшей индукции. Изготавливают из сердечников трансформаторов, электромагнитов, измерительных приборов. Среди материалов можно встретить:
 - низкоуглеродистую электротехническую сталь
 - альсифер
 - пермаллой
 - пермендюр
 - перминвар
 - и др.
- 1 Технически чистое железо – содержит небольшие примеси углерода ($<0,1\%$), серы, марганца, кремния и др., ухудшающие свойства.
- $\mu = 4000$; $H_c = 8$ А/м; $B_{25} = 1,65$ Тл.

Магнитомягкие материалы

- Благодаря низкому удельному сопротивлению ($\rho = 10^{-5}$ Ом*см) используется редко, только для магнитопроводов, работающих при постоянном токе. Разновидностью ТЧЖ является низкоуглеродистая электротехническая листовая сталь. Содержит 0,04% углерода и не выше 0,6% других примесей. $\mu = 3500 - 4500$; $H_c = 96 - 64$ А/м.
- Для получения железа с содержанием примесей применяют сложные способы:
- электролитическое
- карбонильное – $Fe(CO_4)_5 = Fe + 5Co$
- По мере удаления примесей возрастает μ . Особенно это зависит от уменьшения кислорода и водорода. Так монокристалл чистейшего железа имеет $\mu_m = 143000$; $H_c = 0,8$ А/м
- 2 Электротехническая сталь – сплав Fe с Si (0,5 – 5%)
- Горячекатаные (листы толщиной 0,35 – 1 мм) для $f=50$ и 400 Гц и 0,1 - 0,2 для повышенных частот..
- Удельные потери возрастают с ростом индукции и частоты.

Магнитомягкие материалы

- Введение примесей:
- повышает удельное сопротивление ($\rho = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}$), что снижает потери на вихревые токи
- способствует выделению углерода в виде графита, что увеличивает μ , уменьшает H_c и снижает потери на гистерезис.
- Снижается магнитострикция и анизотропия, строение приобретает крупнозернистую структуру. С ростом содержания кремния снижается индукция B_5 , повышается хрупкость и твердость.