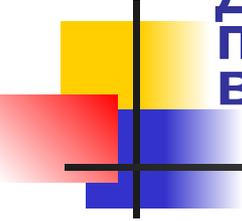


## 7. Намагничивание парамагнетиков и диамагнетиков. Соотношение между проявлением диа- и парамагнитных свойств вещества.

- **Диамагнетиками** называются вещества, магнитные моменты атомов которых в отсутствии внешнего поля равны нулю ( магнитные моменты всех электронов атома взаимно скомпенсированы), и которые намагничиваются навстречу приложенному магнитному полю.
- В пределах малого объема  $\Delta V$  изотропного диамагнетика наведенные магнитные моменты  $\Delta \vec{P}_m$  всех атомов одинаковы и направлены противоположно вектору  $\vec{B}$ .
- Вектор намагниченности диамагнетика:

$$\vec{J} = \frac{N \Delta \vec{P}_m}{\Delta V} = n \Delta \vec{P}_m = -n \frac{e^2 Z \langle S_{\perp} \rangle \vec{B}}{4\pi m} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \chi = H \chi \quad \Rightarrow$$



## 7. Намагничивание парамагнетиков и диамагнетиков. Соотношение между проявлением диа- и парамагнитных свойств вещества.

---

- $\Rightarrow$  для всех диамагнетиков  $\chi < 0$ .
- Таким образом, вектор  $\vec{B}_{\text{внутр}}$  магнитной индукции собственного магнитного поля, создаваемого диамагнетиком при его намагничивании во внешнем поле направлен в сторону, противоположную  $\vec{B}_{\text{внешн}}$  (в отличие от диэлектрика в электрическом поле).
- У диамагнетиков  $|\chi| \sim 10^{-6} \div 10^{-5}$  (слабое намагничивание) и практически не зависит от температуры и  $|\vec{H}| \Rightarrow$  процесс намагничивания диамагнетиков характеризуется линейной зависимостью  $\vec{J} = \vec{J}(\vec{H})$ .

## 7. Намагничивание парамагнетиков и диамагнетиков. Соотношение между проявлением диа- и парамагнитных свойств вещества.

- **Парамагнетиками** называются вещества, намагничивающиеся в направлении вектора  $B_{\text{внеш}}$ , атомы которых имеют в отсутствие внешнего магнитного поля, отличный от нуля магнитный момент  $P_m$ .
- В отсутствие внешнего магнитного поля намагниченность парамагнетика  $J = 0$ , т. к. векторы разных атомов  $P_{mi}$  ориентированы беспорядочно.
- При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле происходит преимущественная ориентация собственных магнитных моментов атомов  $P_{mi}$  по направлению поля (прецессия)  $\Rightarrow$  **парамагнетик намагничивается.**

## 7. Намагничивание парамагнетиков и диамагнетиков. Соотношение между проявлением диа- и парамагнитных свойств вещества.

- Для парамагнетиков  $\chi > 0$  и находится в пределах  $\chi \sim 10^{-6}$  (примерно как и у диамагнетиков).
- **Закон Кюри:** магнитная восприимчивость  $\chi$  парамагнетиков обратно пропорциональна его термодинамической температуре:

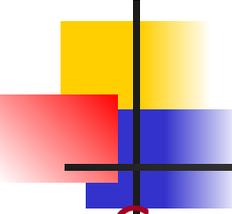
$$\chi = \frac{\mu_0 n P_{mi}^2}{3kT}$$

- Величина  $\chi = \operatorname{tg} \beta$  (касательной к кривой намагничивания парамагнетиков  $J = J(H)$ ).

## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

- К **ферромагнетикам** (*ferrum* – железо) относятся вещества, магнитная восприимчивость которых  $\chi > 0$  и достигает значений  $\chi = 10^4 - 10^5$  (сильно магнитные вещества)
- Намагниченность  $\vec{J} = \chi \vec{H}$  и магнитная индукция  $\vec{B} = (\vec{H} + \vec{J})\mu_0$  ферромагнетиков растут с увеличением напряженности магнитного поля *нелинейно*, и в полях  $H \sim 8 \cdot 10^3$  А/м намагниченность ферромагнетиков достигает предельного значения, а вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  растет линейно с  $H$  :

$$\vec{B} = \vec{J}_m \mu_0 + \vec{H} \mu_0.$$



## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

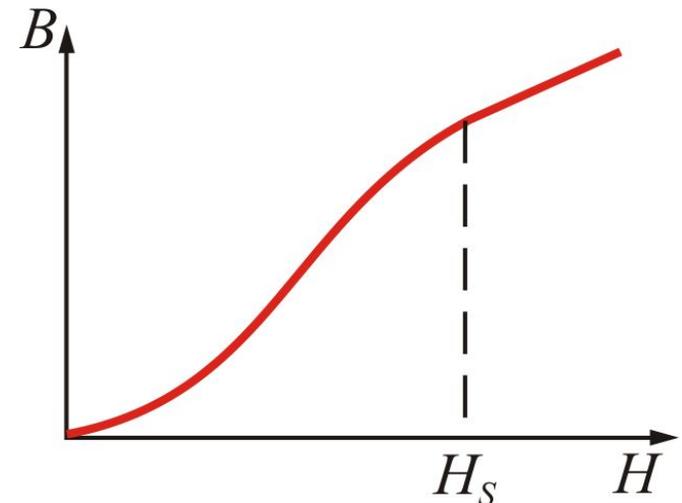
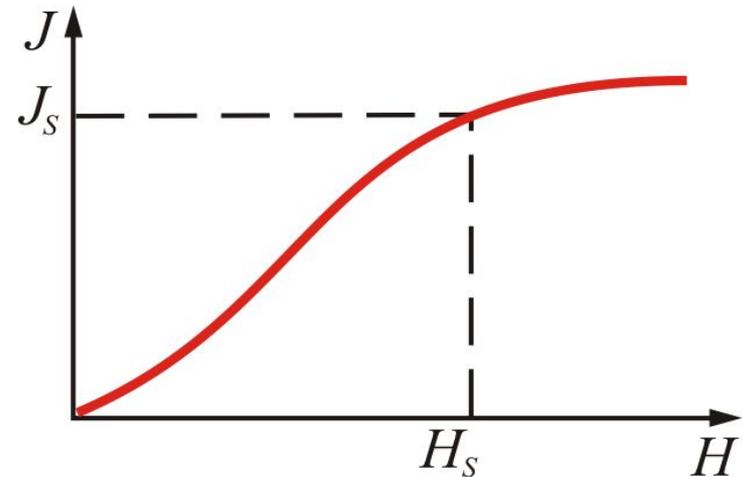
---

- Существенным отличием ферромагнетиков от диа- и парамагнетиков является наличие у ферромагнетиков *самопроизвольной (спонтанной) намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля*, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры.
- Наличие у ферромагнетиков самопроизвольного магнитного момента в отсутствие внешнего магнитного поля означает, что *электронные спины* и элементарные носители магнетизма в них (*спиновые магнитные моменты электронов*) ориентированы в веществе упорядоченным образом.

## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

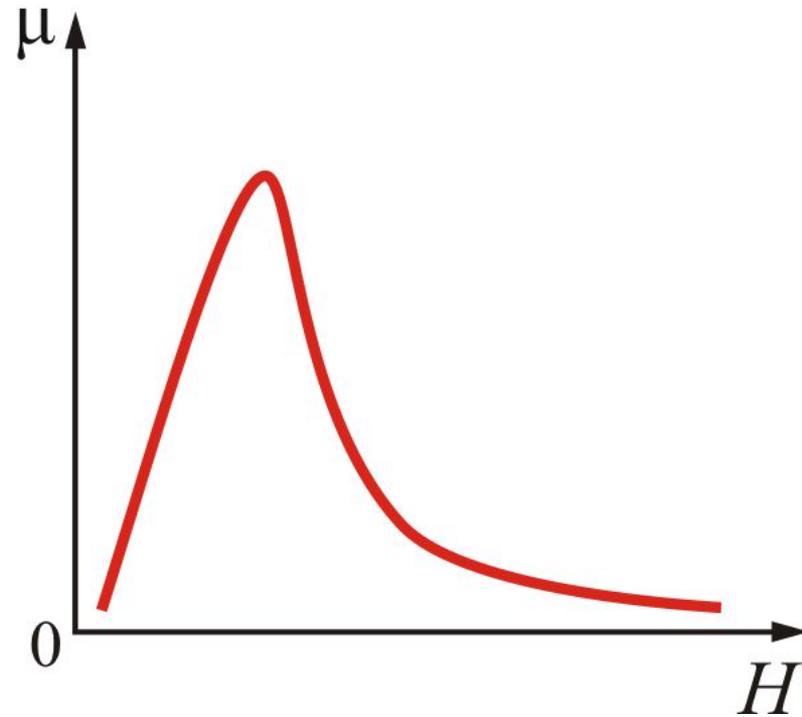
### Основные отличия магнитных свойств ферромагнетиков.

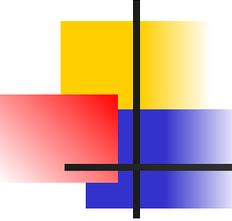
- 1) Нелинейная зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля  $H$  (рис.).
- Как видно из рисунка при  $H > H_s$  наблюдается магнитное насыщение.
- 2) При  $H < H_s$  зависимость магнитной индукции  $B$  от  $H$  нелинейная, а при  $H > H_s$  — линейная.



## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

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





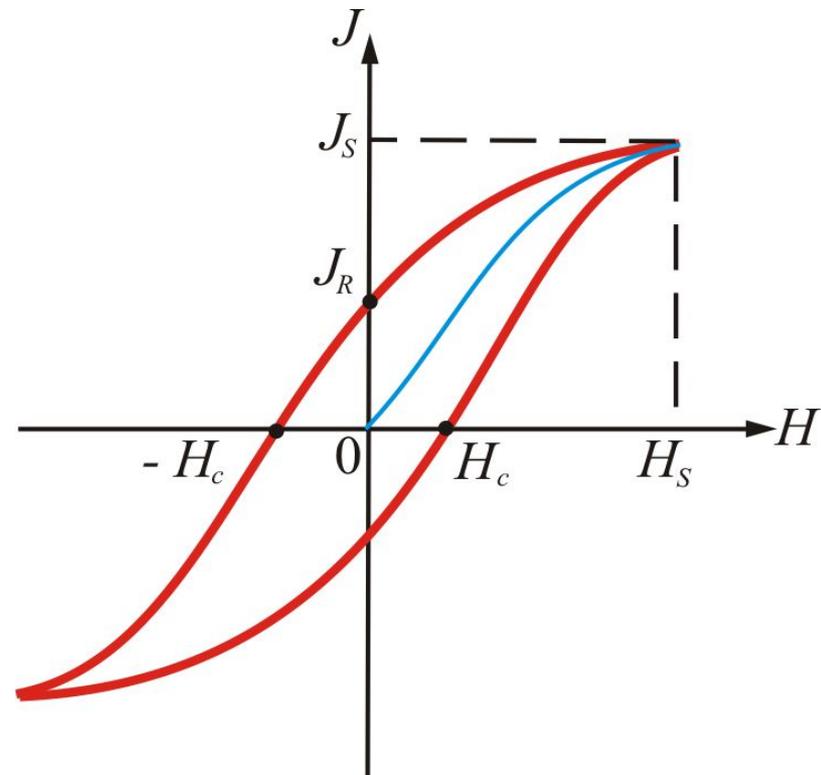
## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

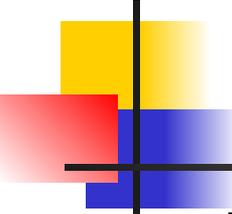
---

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

## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

- 5) Существование *магнитного гистерезиса*.
- На рисунке показана *петля гистерезиса* – график зависимости намагниченности вещества от напряженности магнитного поля  $H$ .

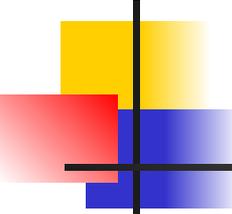




## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

---

- Намагниченность  $J_S$  при  $H = H_S$  называется *намагниченностью насыщения*.
- Намагниченность  $\pm J_R$  при  $H = 0$  называется *остаточной намагниченностью* (что необходимо для создания постоянных магнитов).
- Напряженность  $\pm H_c$  магнитного поля, полностью размагниченного ферромагнетика, называется *коэрцитивной силой*. Она характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние. Большой коэрцитивной силой (широкой петлей гистерезиса) обладают *магнитотвердые материалы*. Малую коэрцитивную силу имеют *магнитомягкие материалы* ( $H_c < 4$  кА/м).

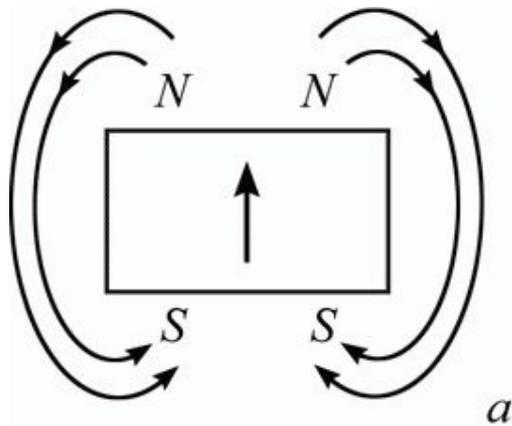


## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

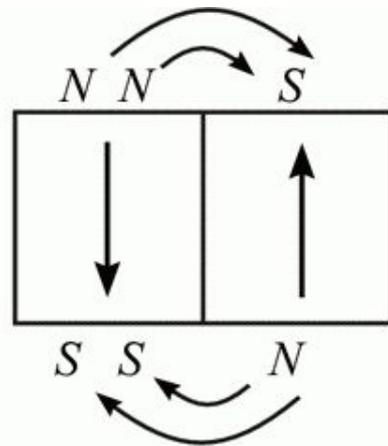
---

- При  $T < T_K$  ферромагнетик разбит на множество очень маленьких ( $10^{-2} \div 10^{-3}$  см) *полностью намагниченных областей* – **доменов**.
- *Векторы намагниченности доменов* в отсутствие внешнего магнитного поля ориентированы таким образом, что полный магнитный момент ферромагнетика равен нулю.
- Если бы в отсутствие поля кристалл железа был бы *единым доменом*, то это привело бы к возникновению значительного внешнего магнитного поля, содержащего значительную энергию (рис. а).
- Разбиваясь на домены, ферромагнитный кристалл уменьшает энергию магнитного поля.

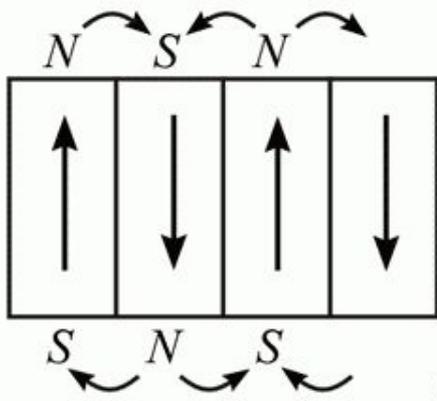
## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.



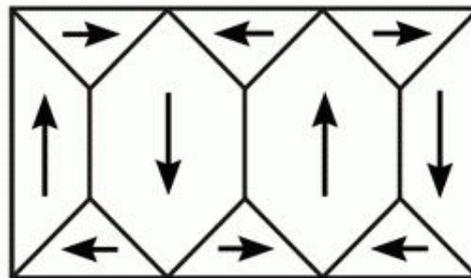
*a*



*б*

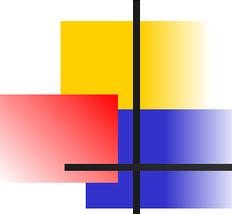


*в*



*г*

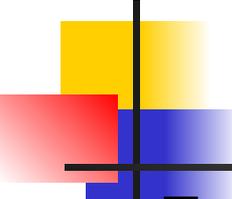
При разбиении на *косоугольные области* (рис. г), можно получить состояние ферромагнитного кристалла, из которого магнитное поле вообще не выходит.



## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

---

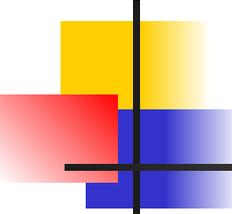
- В целом в монокристалле реализуется такое разбиение на доменные структуры, которое соответствует *минимуму свободной энергии ферромагнетика*.
- Если поместить ферромагнетик, разбитый на домены, во внешнее магнитное поле, то в нем начинается *движение доменных стенок*. Они перемещаются таким образом, чтобы областей с ориентацией вектора намагниченности по полю стало больше, чем областей с противоположной ориентацией (рис. б, в, г).
- Такое движение доменных стенок понижает энергию ферромагнетика во внешнем магнитном поле.



## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

---

- По мере нарастания магнитного поля весь кристалл превращается в *один большой домен с магнитным моментом, ориентированным по полю.*
- В *реальном куске железа* содержится огромное число мелких кристалликов с различной ориентацией, в каждом из которых имеется несколько доменов.
- Ферромагнитные материалы играют огромную роль в самых различных областях современной техники: *магнитомягкие материалы* используются в электротехнике при изготовлении трансформаторов, электромоторов, генераторов, в слаботочной технике связи и радиотехнике; *магнитожесткие материалы*



## 8. Намагничивание ферромагнетиков. Магнитный гистерезис.

---

- Магнитные материалы широко используются в традиционной технологии записи информации в винчестере..
- Магнитное вещество нанесено тонким слоем на основу твердого диска.
- Каждый бит информации представлен группой магнитных доменов (в идеальном случае – одним доменом).
- Для перемагничивания домена (изменения направления вектора его намагниченности) используется поле записывающей головки.
- Энергия, необходимая для записи, зависит от объема домена и наличия дополнительных стабилизирующих слоев, препятствующих самопроизвольной потере информации.
- При этом используется запись на вертикально ориентированные домены и достигается необходимая плотность записи.

## 9. Закон полного тока для магнитного поля в веществе.

- Магнитное поле в веществе является суперпозицией двух полей: внешнего магнитного поля, создаваемого макротоками, и внутреннего или собственного, магнитного поля, создаваемого микротоками.



$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{внеш}} + \vec{B}_{\text{внутр}}.$$

- ?** Количественной характеристикой намагниченного состояния вещества служит векторная величина –  **$H$ ..... $B$**  , равная отношению ..... **?** .....