

# Тема 3

Процесс намагничивания ферромагнетиков. Основные магнитные свойства ферромагнетиков. Природа коэрцитивной силы. Влияние некоторых факторов (напряжения и деформации, легирование, температура) на магнитные свойства ферромагнетиков. Классификация и основные принципы создания магнитных материалов.

Подготовил,  
к.т.н.  
Редикульцев

А.А.

Екатеринбург  
2018

# Ферромагнетики в магнитном поле

- Процесс намагничивания ферромагнетика связан с перестройкой его доменной структуры. Величина поля (способность поля) позволяющая двигать границы доменов определяется величиной градиента граничной энергии в объеме ферромагнетика.
- Градиент в свою очередь определяется структурой реальных магнитных материалов (внутренними напряжениями, дисперсными фазами, их магнетизмом, дефектностью и т.п.).
- Преодолевая максимумы градиента граница переходит в новое положение. Новое положение может быть устойчивым и не обратимым.

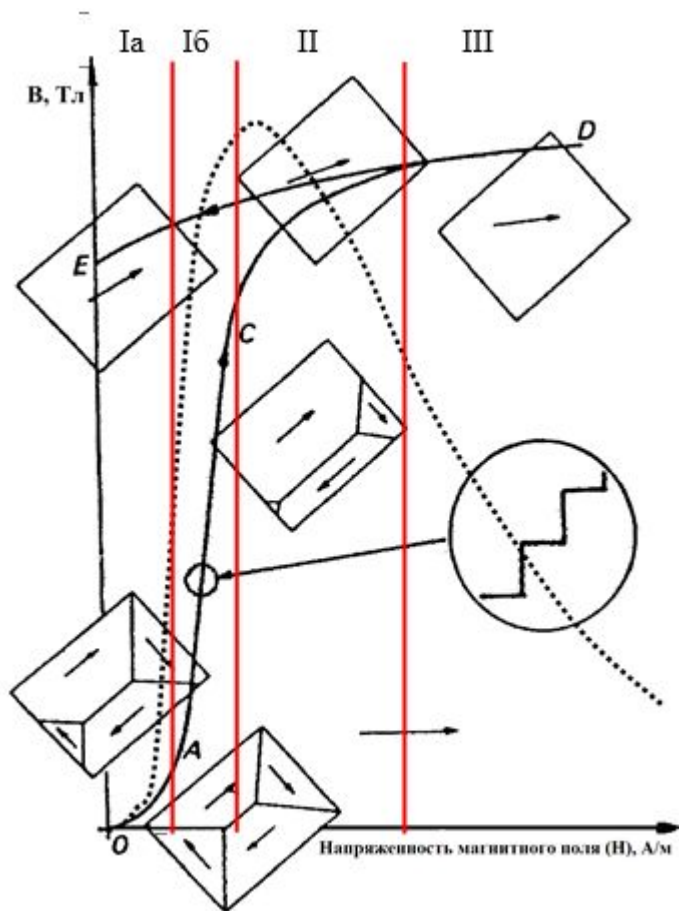
**Коэрцитивная сила** – это напряженность магнитного поля которую нужно приложить к ферромагнетику для его полного размагничивания, если до этого он был намагничен до насыщения.

Довести до нуля необходимо намагниченность  $J$  или индукцию магнитного поля  $B$  внутри. Соответственно рассматривается коэрцитивная сила  $H_c$ , полученную по циклу  $J(H)$  или  $B(H)$ . Обозначается соответственно  $H_c^J$  и  $H_c^B$ .

Коэрцитивная сила  $H_c^J$  всегда больше  $H_c^B$ . Этот факт объясняется тем, что, в правой полуплоскости графика гистерезиса значение  $B$  больше чем  $H$  на величину  $4\pi J$  (СГН):  $B=H+4\pi J$ .

В правой полуплоскости, наоборот,  $B$  меньше, чем  $H$  на величину  $4\pi J$ . Соответственно, в первом случае кривые  $B(H)$  будут располагаться выше кривых  $4\pi J(H)$ , а во втором – ниже. Это делает цикл гистерезиса  $B(H)$  уже цикла  $4\pi J(H)$ .

# Процесс намагничивания ферромагнетиков



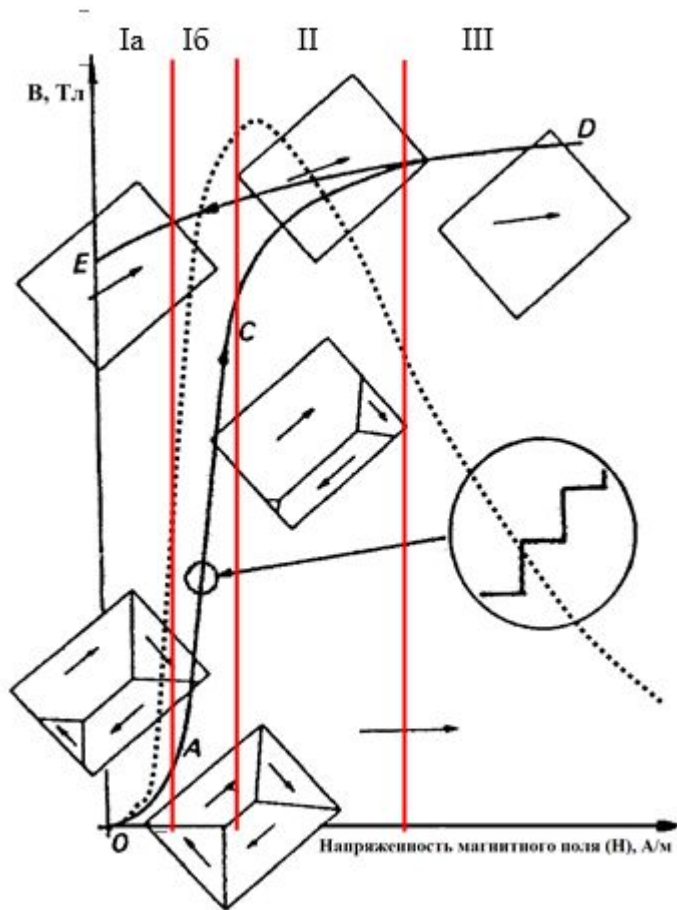
Изменение доменной структуры и магнитной индукции ферромагнетика при его намагничивании и размагничивании

При помещении ферромагнетика во внешнее магнитное поле происходит его намагничивание. Весь процесс состоит из смещения доменных границ и вращения векторов намагниченности.

1. Стадия Ia (0-A) – участок Рэлея (линейная часть). Домены (рис.), ориентация магнитных моментов которых наиболее близка к ориентации вектора напряженности внешнего магнитного поля  $H$ , начинают расти, а домены с другой ориентацией магнитных моментов – уменьшаться. То есть магнитные моменты атомов, составляющих уменьшающиеся домены, постепенно ориентируются параллельно магнитным моментам атомов, составляющих растущие домены (рост одних за счет других). Процесс является обратимым.

2. Стадия Ib (A-C). Участок Боркгаузена (скачки Боркгаузена – границы двигаются скачкообразно). Стадия интенсивного намагничивания. Большая часть доменов (объема) становится в благоприятную ориентировку по отношению к внешнему магнитному полю.

# Процесс намагничивания ферромагнетиков



3. Стадия II. На второй стадии происходит поворот или вращение вектора намагниченности объема в направлении к вектору напряженности внешнего магнитного поля  $H$  и доворот остальных векторов намагниченности в благоприятном направлении. Окончание стадии II считается окончанием процесса технического намагничивания.

4. Парапроцесс. Намагниченность растет слабо. Третья стадия намагничивания ферромагнетика связана с окончательным доворотом вдоль внешнего магнитного поля магнитных моментов оставшихся отдельных атомов, (ранее имеющих другую ориентировку) до этого в магнетизм вклада не вносивших.

Изменение доменной структуры и магнитной индукции ферромагнетика при его намагничивании и размагничивании

# Процесс намагничивания ферромагнетиков

- После завершения третьей стадии намагничивания говорят, что ферромагнетик намагничен до насыщения ( $J_s(B_s)$ - намагниченность (индукция) насыщения), то есть при дальнейшем увеличении напряженности внешнего магнитного поля намагниченность самого ферромагнетика увеличиваться не будет.
- По мере уменьшения напряженности внешнего магнитного поля  $H$  ферромагнетик будет размагничиваться (рис.), а его доменная структура – постепенно возвращаться к исходному состоянию. Парапроцесс является обратимым, все остальное нет.

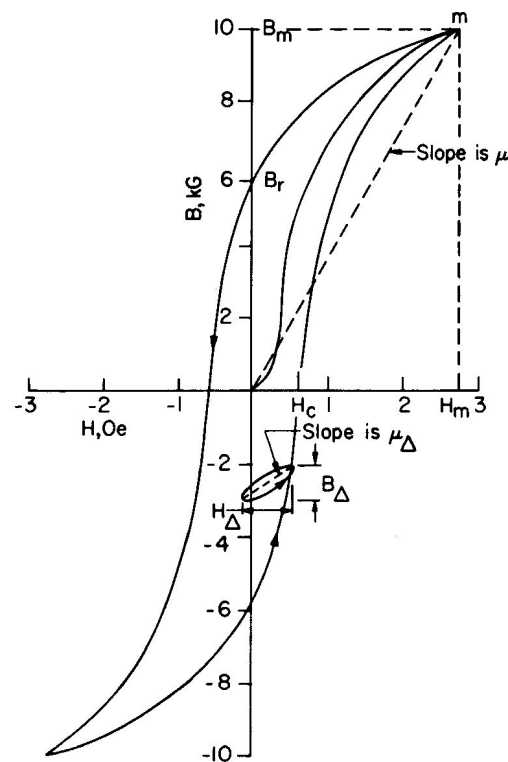


Fig. 3.2. Hysteresis-loop for 3% Si-Fe featuring the remanence,  $B_r$ , coercive force,  $H_c$  and a minor loop (Carr [1959]).

# Процесс намагничивания ферромагнетиков

- При полностью снятом внешнем магнитном поле ферромагнетик не размагничивается полностью, а характеризуется остаточной намагниченностью  $J_r$  ( $B_r$ ), вызванной не полной компенсацией друг друга доменами с противоположной ориентацией векторов намагниченности. Для того, чтобы полностью размагнитить такой ферромагнетик к нему необходимо будет приложить внешнее магнитное поле противоположного знака.
- Значение напряженности внешнего магнитного поля противоположного знака, которое необходимо приложить для того, чтобы полностью размагнитить ферромагнетик, предварительно намагниченный до насыщения, называется коэрцитивной силой  $H_c$ .

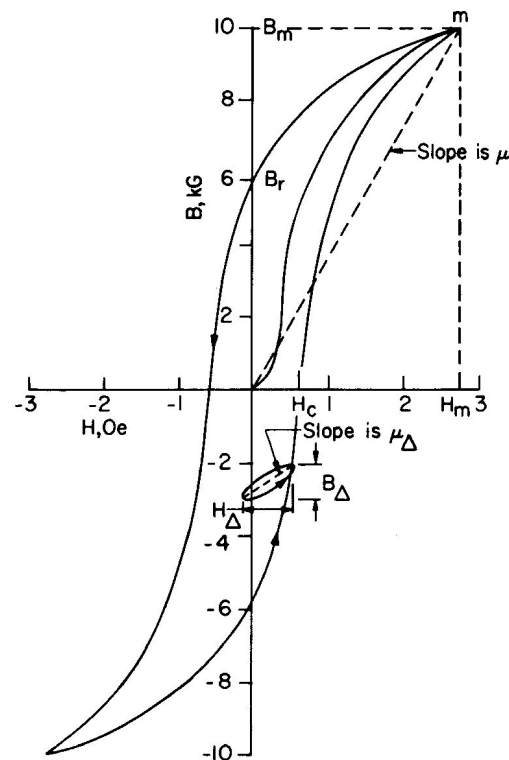
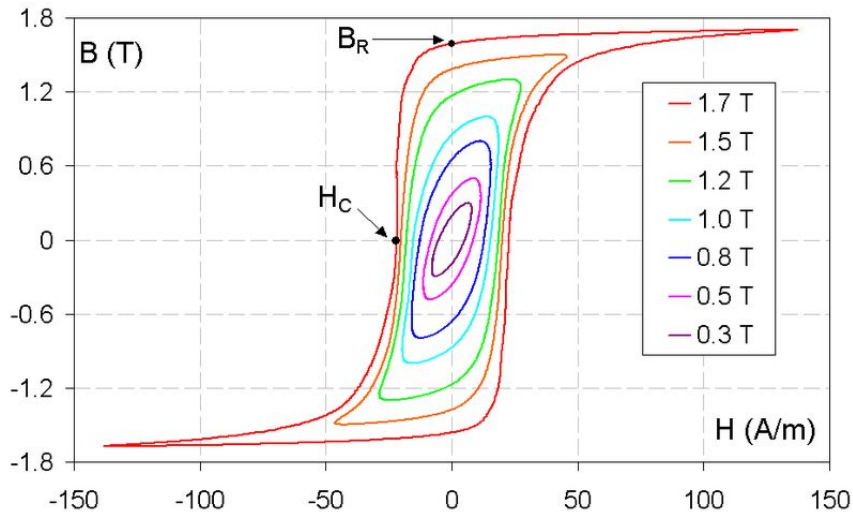


Fig. 3.2. Hysteresis loop for 3% Si-Fe featuring the remanence,  $B_r$ , coercive force,  $H_c$  and a minor loop (Carr [1959]).

# Процесс намагничивания ферромагнетиков

- По мере увеличения напряженности внешнего магнитного поля противоположного знака ферромагнетик будет намагничиваться вдоль этого поля, то есть приобретать намагниченность противоположного знака по отношению к первоначальной. При снятии внешнего магнитного поля противоположного знака ферромагнетик также будет характеризоваться остаточной намагниченностью  $-J_r$  ( $B_s$ ), для снятия которой необходимо будет приложить к нему внешнее магнитное поле первоначального знака.
- После завершения такого цикла намагничивания график намагниченности ферромагнетика замкнется в петлю (рис.), называемую петлей гистерезиса. Все последующие циклы намагничивания и перемангничивания ферромагнетика в переменном магнитном поле будут происходить в соответствии с этой петлей.



Семейство петель гистерезиса в координатах  $H$ - $B$  (Напряженность магнитного поля-Магнитная индукция) для трансформаторной стали при синусоидальном изменении полей со временем с амплитудами от 0.3 Тл до 1.7 Тл.  $B_{Rr}$  обозначена остаточная намагниченность,  $H_C$  – коэрцитивное поле

# Основные магнитные свойства ферромагнетиков

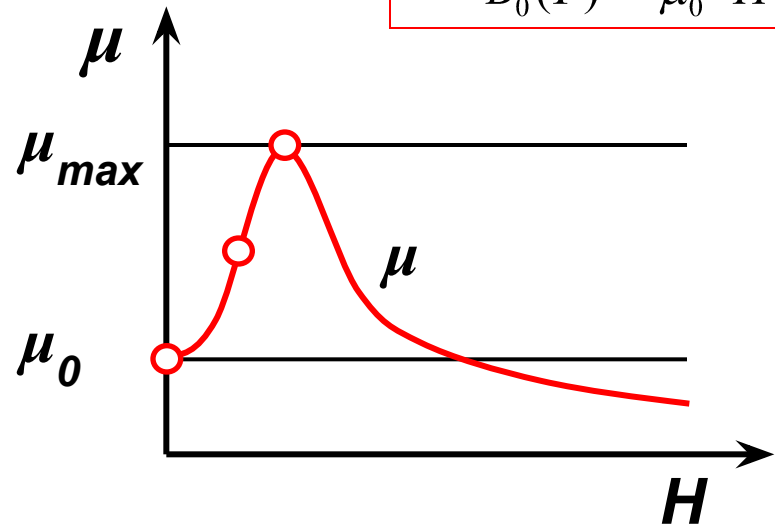
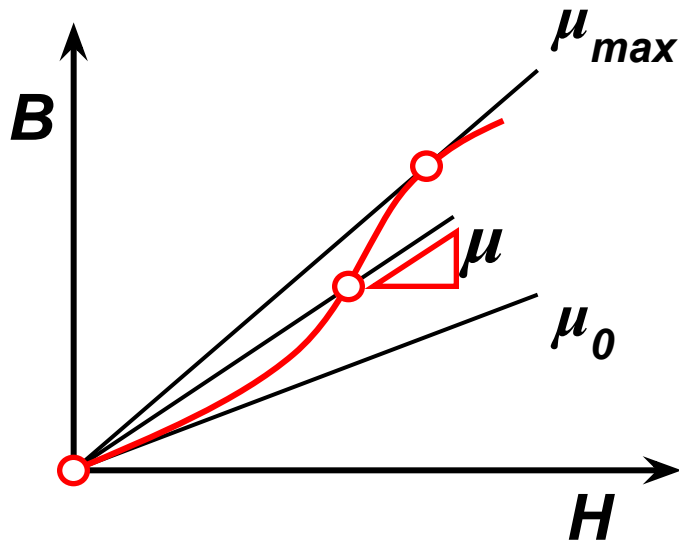
$\chi_0 (\mu_0)$  – начальная восприимчивость.

$\chi_{\max} (\mu_{\max})$  – максимальная восприимчивость.

В системе СГС магнитная проницаемость – безразмерная величина, в Международной системе единиц (СИ) вводят как размерную (абсолютную), так и безразмерную (относительную) магнитные проницаемости –  $\mu_r = \mu/\mu_0$ .

$$\mu_r = (\mu_0 H + \mu_0 J) / \mu_0 H = B/B_0 = \chi + 1,$$

где  $B$  – индукция в однородном магнетике, целиком заполняющем пространство,  $B_0$  – индукция в вакууме. Абсолютная магнитная проницаемость воздуха приблизительно равна магнитной проницаемости вакуума.



$$\mu = \frac{B(T)}{B_0(T)} = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}$$

# Основные магнитные свойства ферромагнетиков

$J_s (B_s)$  – намагниченность (индукция) насыщения [Тл].

$J_r (B_r)$  – остаточная намагниченность (индукция) [Тл].

$J_s$  – магнитный момент объема в состоянии намагниченности насыщения.

$J_s$  является свойством фазы, практически не зависит от наклепа, величины зерна, кристаллографической анизотропии, т.е.  $J_s$  не является структурно чувствительным свойством.

$H_c$  – коэрцитивная сила.

Довести до нуля необходимо намагниченность  $J$  или индукцию магнитного поля  $B$ . Соответственно рассматривается коэрцитивная сила  $H_c$ , полученная по циклу  $J(H)$  или  $B(H)$ . Обозначается соответственно  $H_{Jc}$  и  $H_{Bc}$ .

Коэрцитивная сила  $H_{Jc}$  всегда больше  $H_{Bc}$ . Этот факт объясняется тем, что, в правой полуплоскости графика гистерезиса значение  $B$  больше чем  $H$  на величину  $4\pi J$  (СГН):  $B = H + 4\pi J$ .

В правой полуплоскости, наоборот,  $B$  меньше, чем  $H$  на величину  $4\pi J$ . Соответственно, в первом случае кривые  $B(H)$  будут располагаться выше кривых  $4\pi J(H)$ , а во втором – ниже. Это делает цикл гистерезиса  $B(H)$  уже цикла  $4\pi J(H)$ .

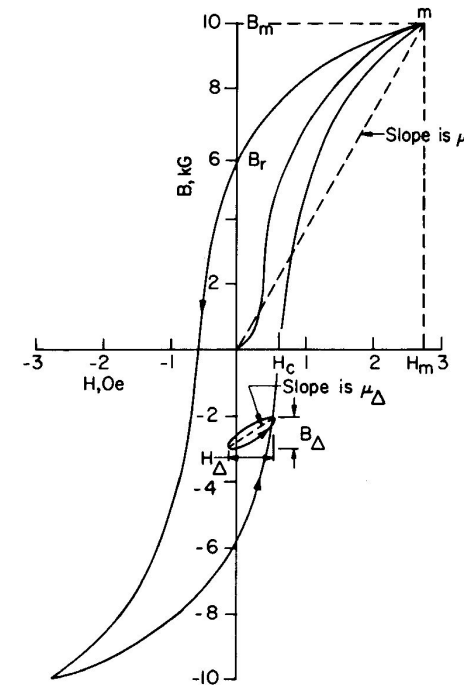


Fig. 3.2. Hysteresis loop for 3% Si-Fe featuring the remanence,  $B_r$ , coercive force,  $H_c$  and a minor loop (Carr [1959]).

# Основные магнитные свойства ферромагнетиков

$Q$  – потери на перемагничивание (площадь петли гистерезиса), [Дж/м<sup>3</sup>].

$P$  – ваттные потери [Вт/кг].

$\lambda_n$  – магнитострикция парапроцесса,  $\lambda_s$  – магнитострикция насыщения. Порядок  $10^{-6}$ .

$K$  – константа анизотропии, разность работы намагничивания в направлениях легкого  $\langle 001 \rangle$  и трудного намагничивания  $\langle 111 \rangle$ .

$K_{Fe} = 4,2 \cdot 10^{-2}$  [Дж/м<sup>3</sup>];  $K_{Co} = 41 \cdot 10^{-2}$  [Дж/м<sup>3</sup>];  $K_{Ni} = -0,6 \cdot 10^{-2}$  [Дж/м<sup>3</sup>].

$\Theta_c$  – температура Кюри.

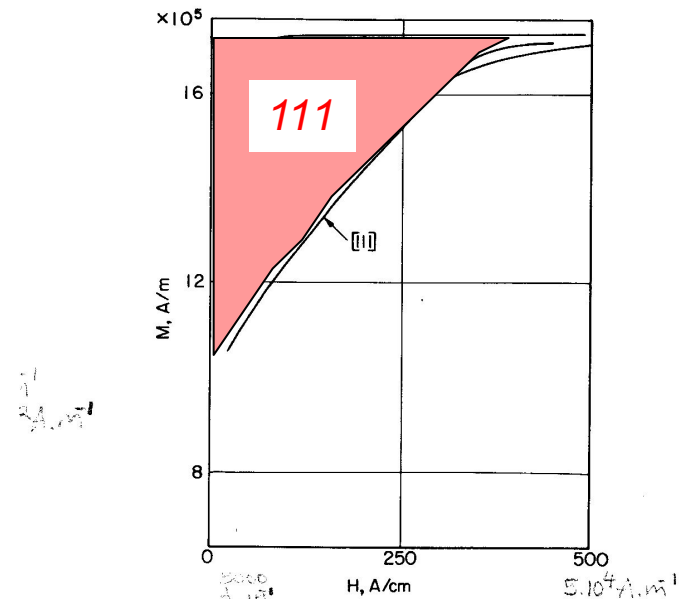
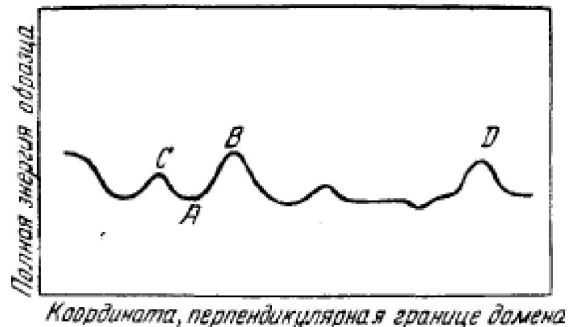


Fig. 3.3. Magnetization curves for single crystals of iron in the [100] easy, [110] intermediate and [111] hard directions, based on experimental results of K. Honda and S. Kaya, Sci. Rep. Tohoku Univ. **15**, 721 (1926).

# Природа коэрцитивной силы

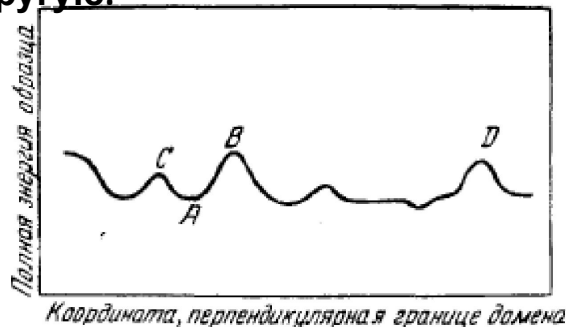
- **Коэрцитивная сила** – самое структурно-чувствительное магнитное свойство.
- Коэрцитивная сила важна с точки зрения понимания гистерезисных потерь при низких частотах, так как площадь петли гистерезиса приблизительно равна произведению индукции насыщения  $B_s$  на коэрцитивную силу  $H_c$ . Это значит, что потери энергии при прохождении гистерезиса есть с точностью до фактора от 2 до 4 величина порядка  $B_s H_c$ .
- Само существование в массивном материале не бесконечной начальной проницаемости и отличной от нуля коэрцитивной силы свидетельствует о несовершенстве и неоднородности образца. В идеальном образце граничный слой, разделяющий два противоположно намагниченных домена, должен легко перемещаться при наложении предельно малого внешнего поля  $H$ .
- $H_c$  может быть понята следующим образом: энергия образца в результате локальных изменений во внутренних напряжениях, примесях, размерах кристаллитов и т.д., может изменяться в зависимости от положения границ доменов; эти изменения указаны схематично на рис.



Изменение энергии образца в зависимости от положения границы домена

# Природа коэрцитивной силы

- В присутствии поля граница не будет в состоянии смещаться до предельного правого положения Д до тех пор, пока энергия не увеличится до величины, дающей возможность границе пройти через точку В, соответствующую максимуму энергии границы. Качественно эта картина коэрцитивного процесса объясняет тот факт, что коэрцитивные силы уменьшаются при уменьшении количества примесей, а также когда внутренние напряжения снимаются отжигом. Отсюда ясно также, почему сплавы, содержащие выпавшую фазу, являются магнито-жесткими.
- Существенная физическая проблема коэрцитивной силы может быть сведена к проблеме определения критического магнитного поля  $H_0$ , необходимого для перемещения переходного слоя, разделяющего противоположно намагниченные домены. Теория должна также указать механизм, в силу которого энергия образца будет более или менее нерегулярно изменяться с изменением положения слоя Блоха. Если энергия изменяется нерегулярно, то найдутся положения с минимальной энергией, и слои, естественно, займут эти положения. Слои могут быть смещены из этих положений в результате наложения магнитного поля, которое оказывает на них давление, стремящееся сместить их таким образом, чтобы увеличить намагниченность в направлении поля. **Коэрцитивная сила указывает силу поля, необходимую для перенесения слоя через наивысший энергетический горб из одной потенциальной ямы в другую.**



Изменение энергии образца в зависимости от положения границы домена

# Природа коэрцитивной силы

Существует три основных теории, объясняющие существование коэрцитивной силы:

**1. Теория напряжений** (Ф. Блох, Кондорский (1937), Керстен (1938)). Неоднородные внутренние напряжения и деформации могут определять сопротивление движению границы.

Суть сводится к тому, что в наибольшей степени движению доменных границ препятствуют напряжения период  $l$  которых сопоставим с шириной границы домена  $l \approx \delta$ . Эти напряжения уравновешены на структурном уровне (результат фазовых превращений, когерентность границ и т.п.).

**2. Теория включений.** Теория, учитывающая влияние агрегатов или включений посторонних атомов, была разработана Керстеном (1943). Включения приклеивают границу к себе. Наличие включений в матрице ферромагнетика вызывает появление клиновидных доменов Нееля, т.е. создает магнитную субструктуру.

$d$  – диаметр включений. В наибольшей степени движению границ доменов препятствуют включения с  $d \approx \delta$ .

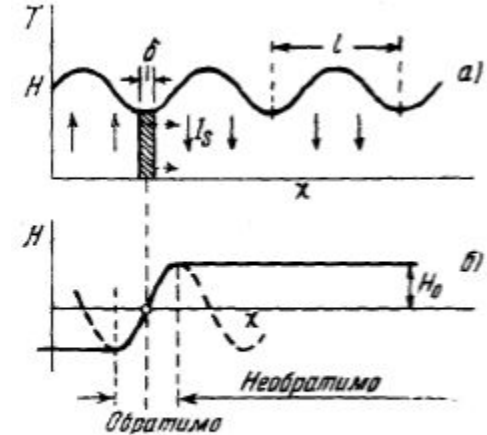
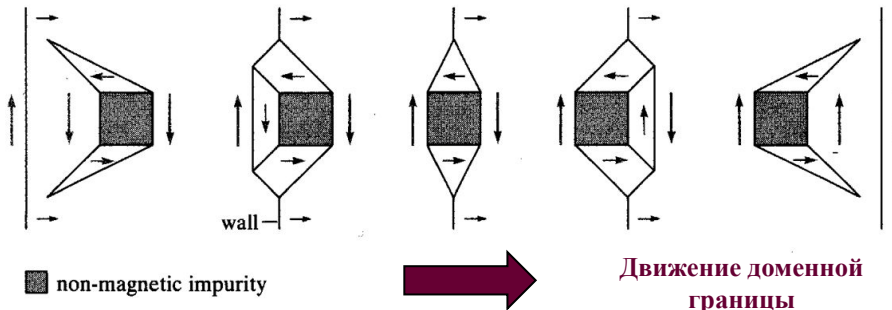


Рис. Смещение слоя при наличии синусоидальных напряжений.

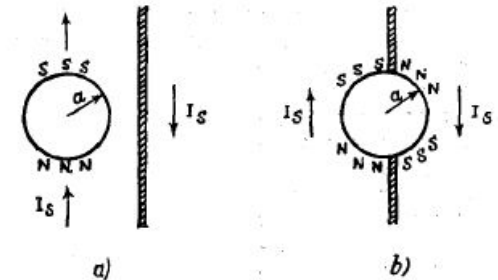


Рис. Рисунок, иллюстрирующий зависимость магнитной энергии включения в зависимости от положения граничного слоя.

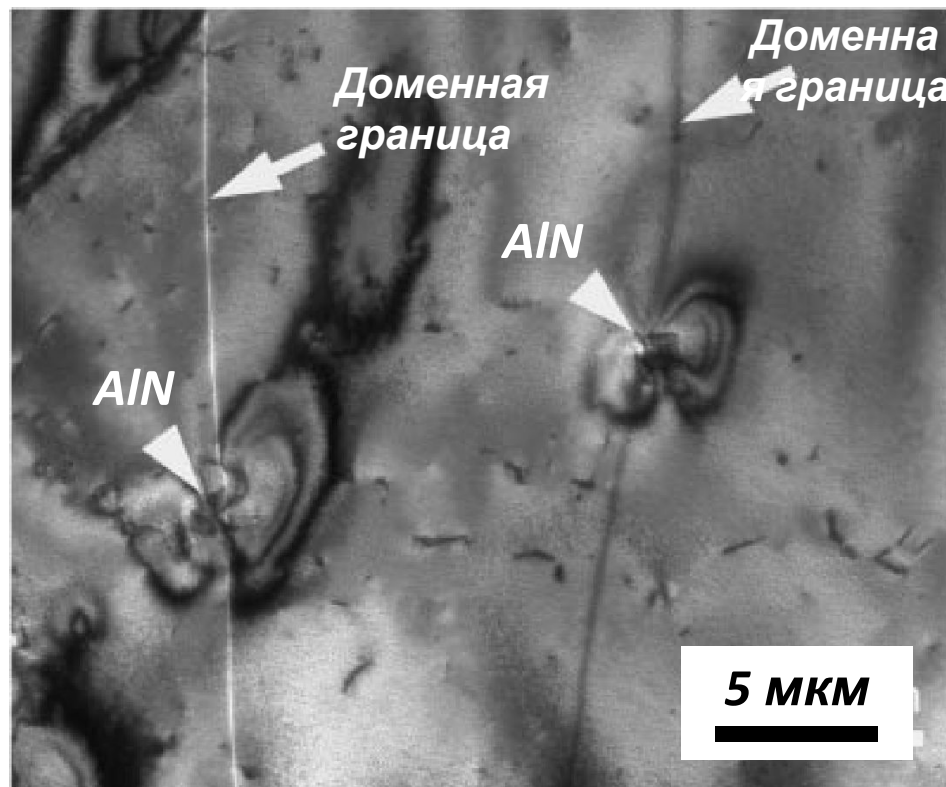
**3. Обобщение двух теорий** (Неэль, 1946). Неэль обобщил две теории, подчеркнул роль размагничивающей энергии, связанной с изменениями намагниченности, вызванными внутренними деформациями и включениями.

# Влияние дефектов

**Влияние частиц:**

**Доменные границы задерживаются границами и полями окружающих их напряжений.**

**Пример ЭИС**

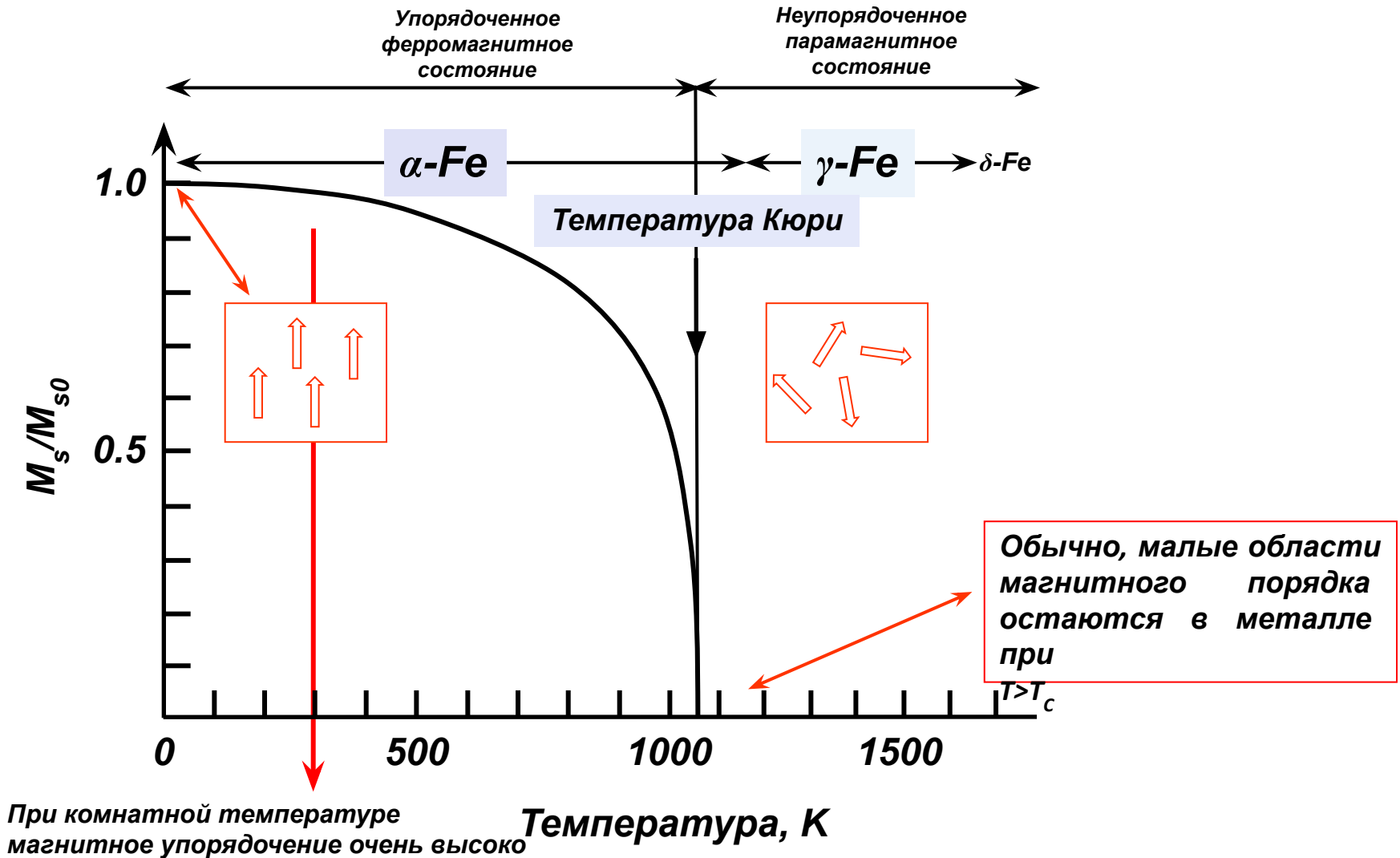


# **Влияние некоторых факторов (напряжения и деформации, легирование, температура) на магнитные свойства ферромагнетиков**

- 1 Температура;
2. Напряжения и деформации;
3. Легирование.

# Влияние температуры

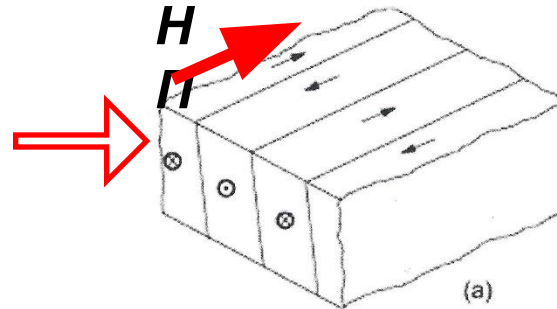
ОЦК  $\alpha$ -Fe:



# Влияние напряжений (ЭАС)

## 1. Идеальный материал

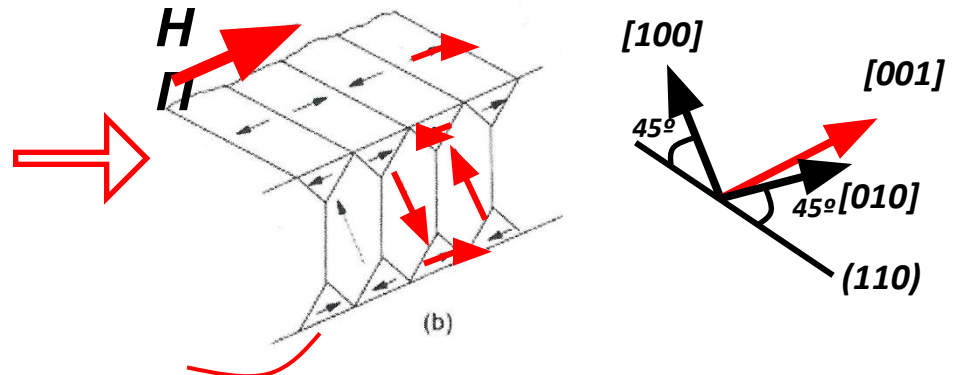
Нет границ, включений, дислокаций  
Домены ориентированы вдоль НП



## 2. Материал с напряжениями сжатия

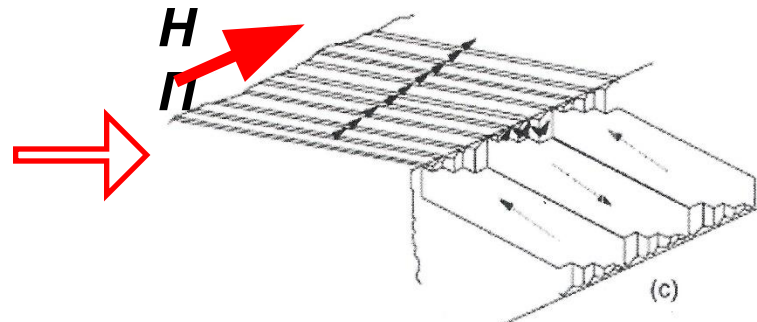
Замыкающие домены формируются на поверхности, и также на границах зерен, включениях, дислокациях  
Из-за напряжений около них, замыкающие домены не ориентированы вдоль НП

Поверхностные домены «закрывают» поток внутри, тем самым обеспечивая низкую магнитостатическую энергию



## 3. Материал с очень высокими напряжениями сжатия

Дополнительная энергия для ориентации доменов в направлении прокатки (гистерезисные потери)



Требуются растягивающие напряжения

# Влияние напряжений (ЭАС)

При появлении напряжений доменная структура изменяется.

Растягивающее напряжение приводит к благоприятным изменениям магнитных свойств

Магнитомеханический эффект:

Напряжения индуцируют анизотропию, которая должна учитываться наряду с магнитокристаллической анизотропией

Напряжения «создают» домены в направлениях легкого намагничивания

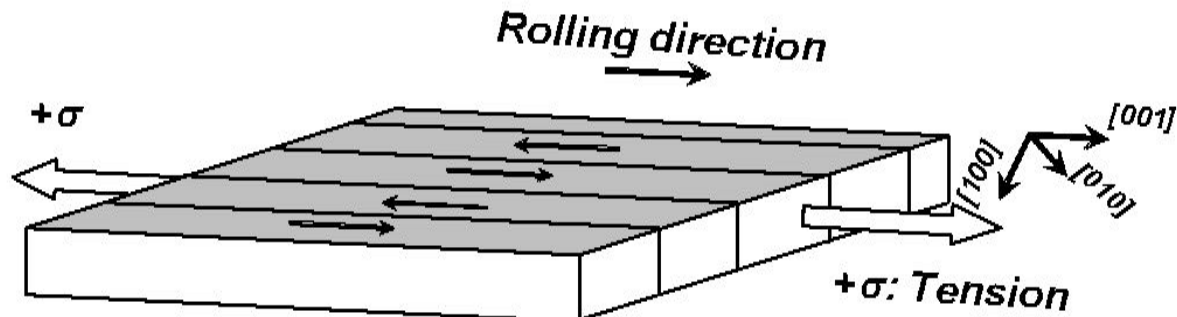
Растягивающее напряжение выравнивает области в направлении намагниченности и уменьшают  $E_T$

*Favorable*

$$E_T = E_K + E_E$$

$$E_T = 0$$

$$E_E = -\sigma / \lambda_s < 0$$



*Harmful*

$$E_E = +\sigma / \lambda_s > 0$$

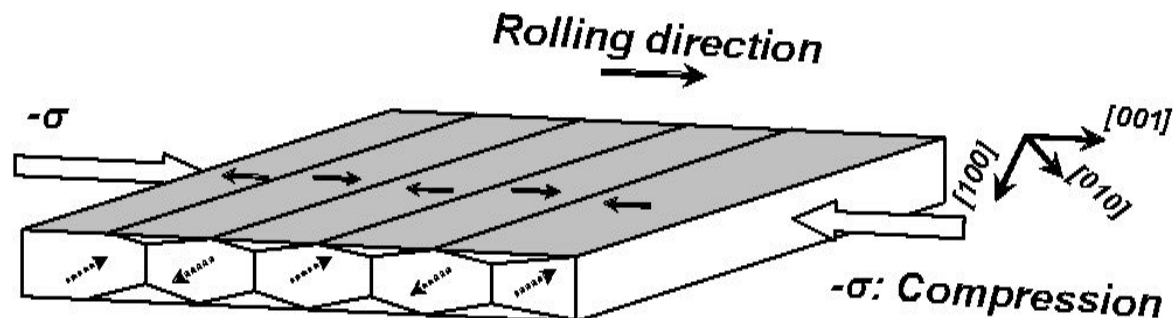


Схема иллюстрирует влияние напряжений на доменную структуру в ЭАС.

В практике растягивающие напряжения создаются через электроизоляционное покрытие

# Влияние напряжений (ЭАС)

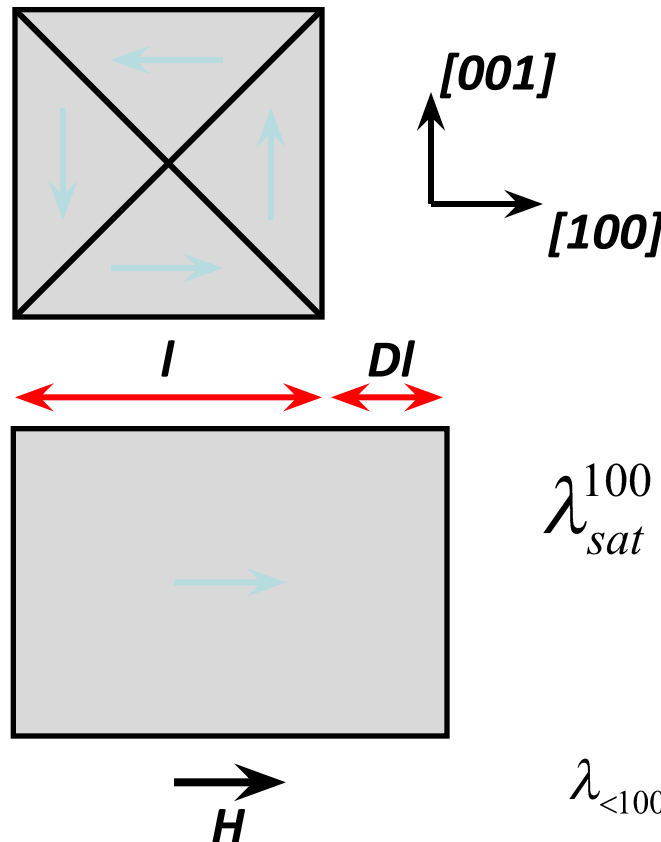
Магнитомеханический эффект:

Напряжения индуцируют анизотропию, которая должна учитываться наряду с магнитокристаллической анизотропией

Напряжения растяжения приводят к одноосной анизотропии с соответствующей магнитоупругой энергией  $E_E$

Эта магнитоупругая энергия тесно связана с магнитострикцией

**Магнитострикция:** изменение длины (деформация) монокристаллов  $\alpha$ -Fe, вызванное намагничиванием



$$\lambda_{sat}^{100} = \frac{\Delta l}{l}$$

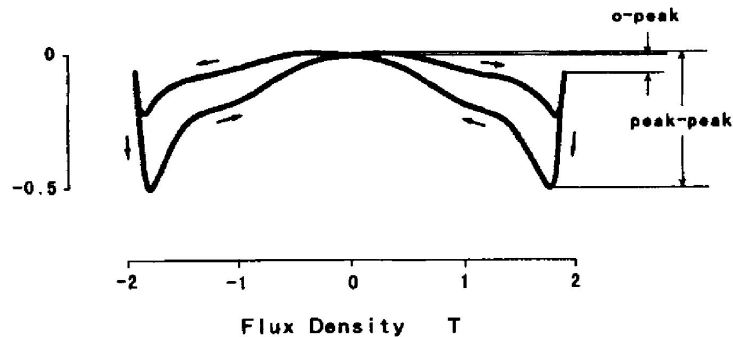
$$\lambda_{\langle 100 \rangle} = 20.7 \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda_{\langle 111 \rangle} = -21.7 \cdot 10^{-6}$$

**Магнитострикция в  $\alpha$ -Fe**

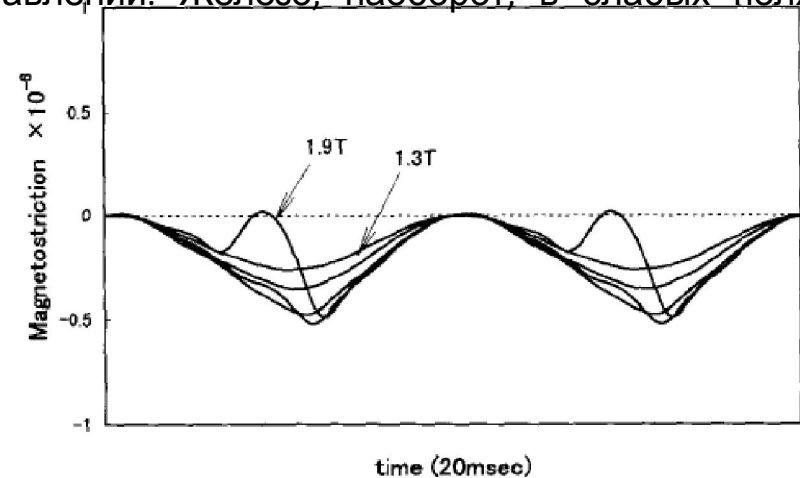
# Магнитострикция

- **Магнитострикция:** изменение длины (деформация) монокристаллов  $\alpha$ -Fe, вызванное намагничиванием.
- Никель при намагничивании до насыщения сжимается вдоль направления намагничивания и увеличивается в размерах в поперечном направлении. Железо, наоборот, в слабых полях удлиняется в направлении намагничивания.

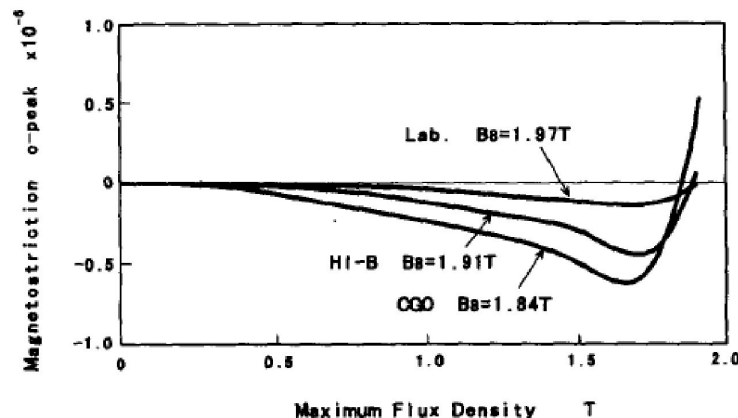


Характерный вид кривой магнитострикции и определение  $\lambda_o$

и  $\lambda_{\text{peak-peak}}$



Кривая магнитострикции (0.30 мм, Hi-B)

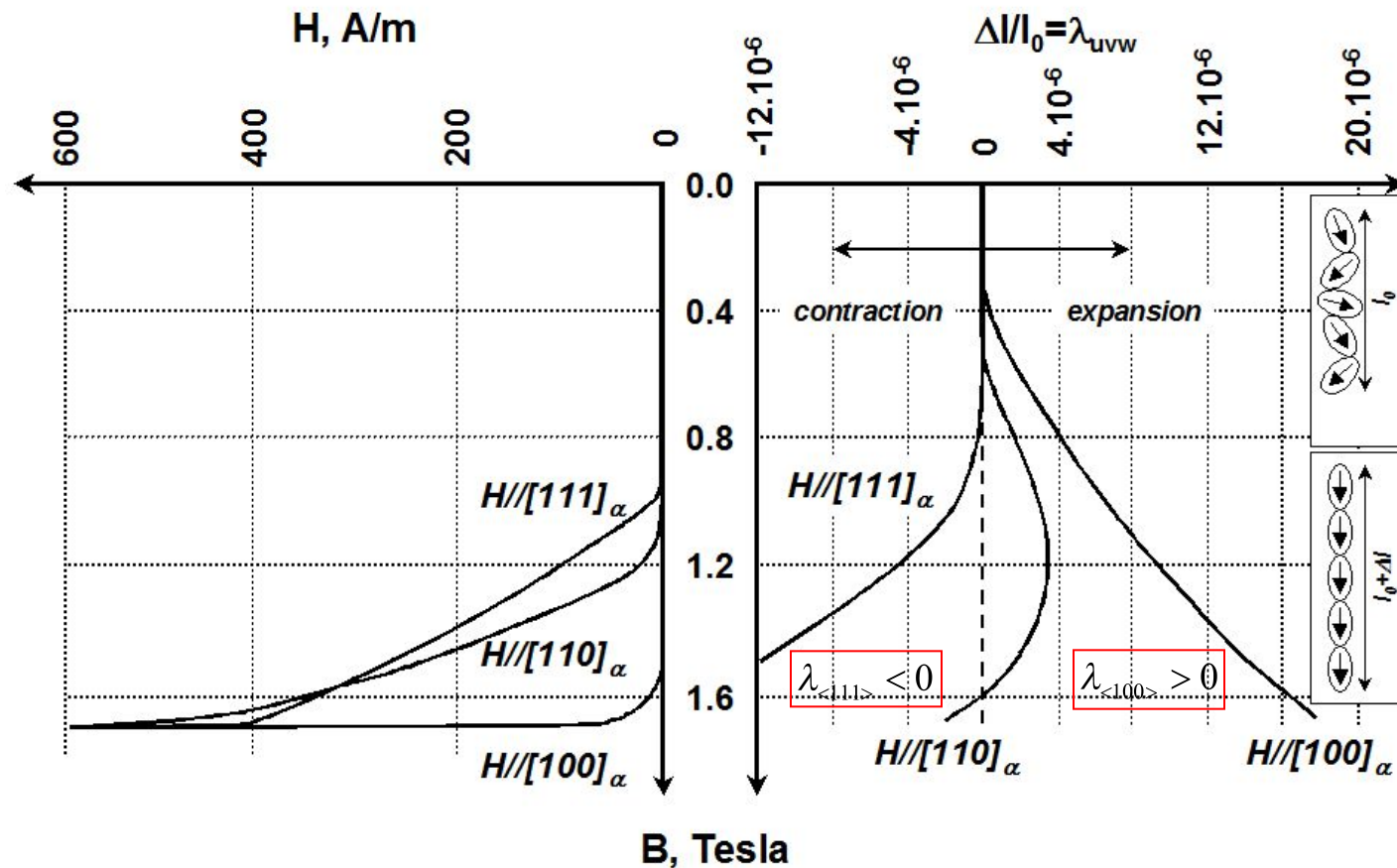


Зависимость магнитострикции от электромагнитной индукции

$B_{800}$

# Влияние напряжений (ЭАС)

**Магнитострикция:** изменение длины (деформация) кристаллов  $\alpha$ -Fe, вызванное намагничиванием



**Магнитострикция насыщения поликристалла  $\alpha$ -Fe (не текстурированного) индуцируемая намагничиванием:**

$$\lambda_s = \frac{2}{5} \lambda_{<100>} + \frac{3}{5} \lambda_{<111>} = \frac{2}{5} 20.7 \cdot 10^{-6} - \frac{3}{5} 21.7 \cdot 10^{-6} = 4.4 \cdot 10^{-6}$$

# Влияние напряжений (ЭАС)

$E_T$  полная магнитная энергия определяется выражением  $E_T = E_E + E_K$

$E_E$  магнитоупругая энергия: энергия, создаваемая в кристалле из-за механического напряжения

$\sigma$ : приложенное напряжение

$\lambda_{\langle 100 \rangle}$  и  $\lambda_{\langle 111 \rangle}$ : магнитострикция насыщения вдоль направлений  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$

$l, m, n$ : направляющие косинусы для намагниченности

$l_1, m_1, n_1$ : направляющие косинусы для приложенного напряжения

$$E_E = -\frac{3}{2} \lambda_{\langle 100 \rangle} \sigma (l^2 l_1^2 + m^2 m_1^2 + n^2 n_1^2 - \frac{1}{3}) - 3 \lambda_{\langle 111 \rangle} \sigma (l m l_1 m_1 + m n m_1 n_1 + l n l_1 n_1)$$

$$E_E = -\frac{2}{3} \lambda_s \sigma \sin^2 \theta$$

$\theta$  – угол между напряжением и направлением намагничивания

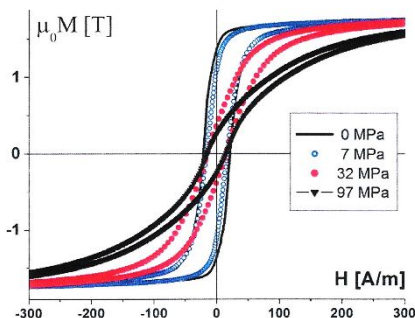
Растяжение  $\sigma > 0 \rightarrow E_E < 0$

Сжатие  $\sigma < 0 \rightarrow E_E > 0$ .

$E_K$  энергия магнитокристаллической анизотропии. Магнитные моменты располагаются вдоль осей легкого намагничивания во время спонтанной намагниченности. Материал является анизотропным, а энергия, связанная с этим явлением, называется энергией магнитокристаллической анизотропии.

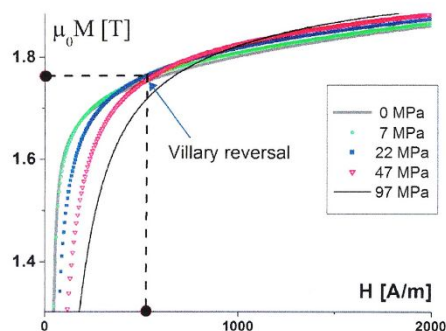
# Влияние напряжений (ЭАС)

***B-H***

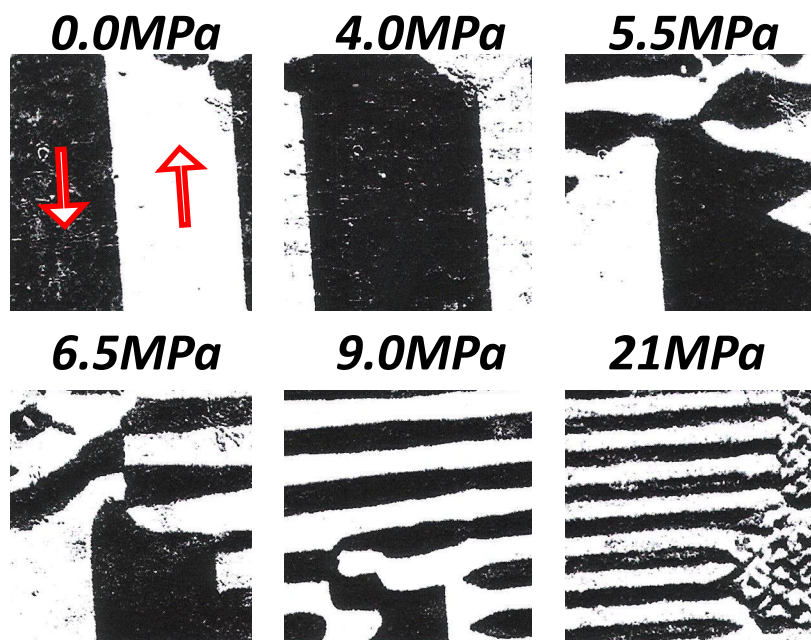
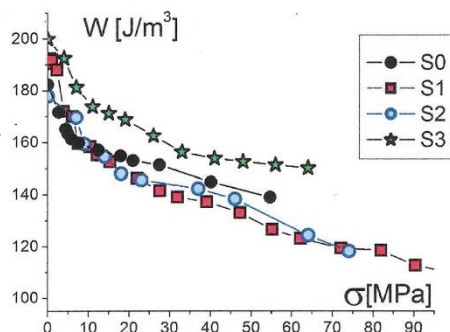


Магнитострикционный эффект является обратимым. Это означает, что если размеры ферромагнитного образца изменяются при намагничивании, то при изменении размеров под действием упругих напряжений изменяется его намагниченность.

***Высокие H***



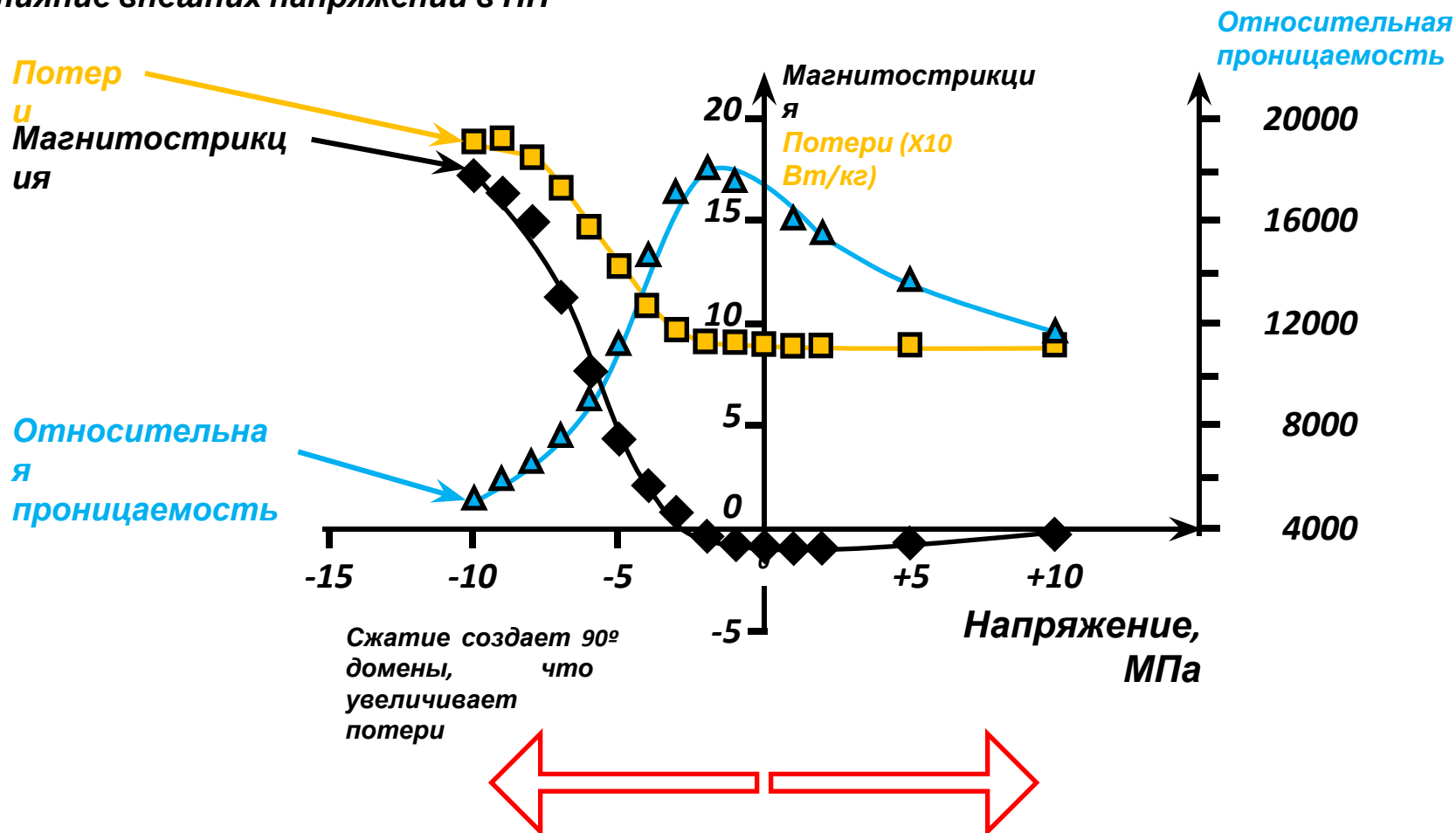
***Гистерезисные потери***



***Fe-3%Si (110)[001]***

# Влияние напряжений (ЭАС)

Влияние внешних напряжений в НП

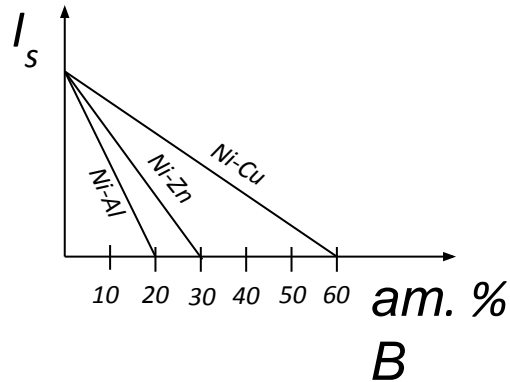


Сжатие: оптимум появляется при малых сжимающих напряжениях

Растяжение: полезно, поскольку уменьшает потери и магнитострикцию

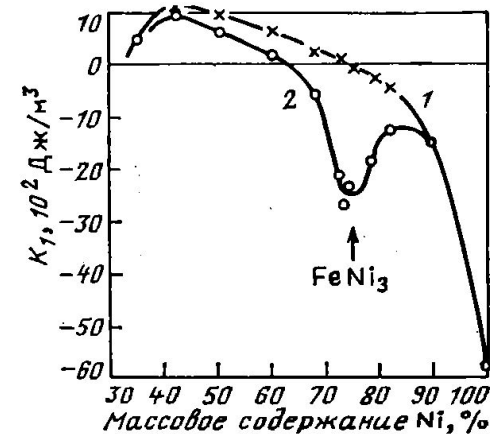
# Легирование

Изменение состава ферромагнетика меняет все свойства в общем случае в сторону второго компонента.



Изменение свойств при легировании Ni

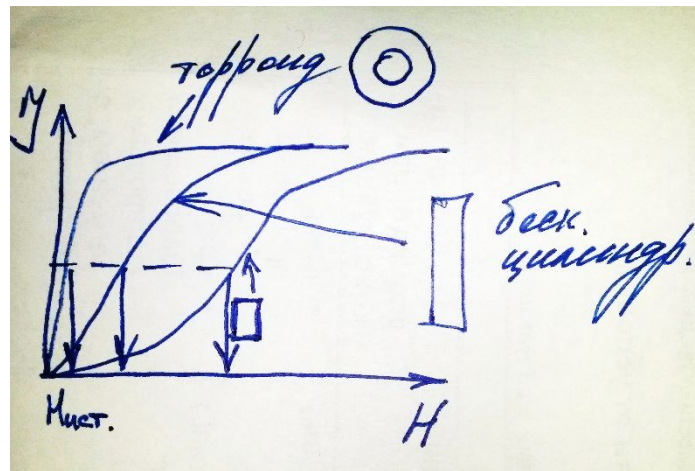
Легирование меняет  $K$  и  $\lambda_s$  (пермаллой). Точка Кюри меняется в сторону второго компонента. В сплаве столько точек Кюри сколько ферромагнитных фаз.



Константа магнитной анизотропии  $K_1$  для сплавов Fe—Ni при  $T=20^\circ\text{C}$ :

1 — закаленные, неупорядоченные сплавы; 2 — медленно охлажденные, упорядоченные сплавы [38]

Кривая намагничивания и петля гистерезиса зависят от формы образцов



Истинная кривая намагничивания

Петля первоначального намагничивания и петля гистерезиса зависят от формы образцов.

$$H_{\text{ист}} = H_{\text{изм}} - H'$$

$H'$  – размагничивающее влияние, определяется размером образца.  $H' = \mu_0 J N$ , где  $N$  – размерный фактор (0,1; 0,2...). С помощью различных методов (срез Рэлея) можно скорректировать петлю – перейти к истинной.

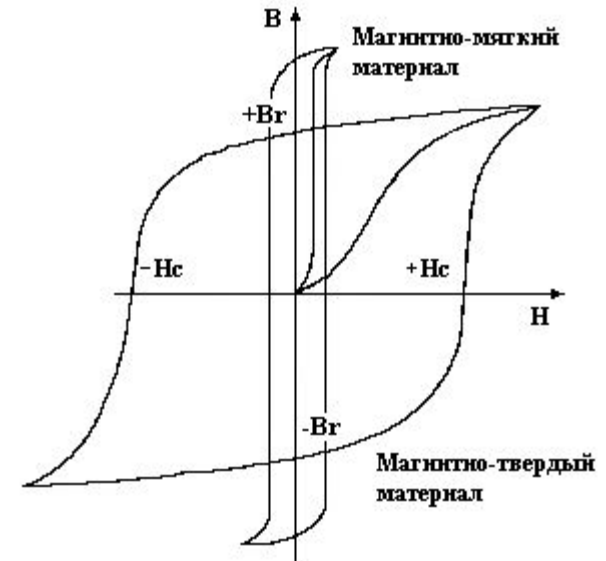
$$H_{\text{с ист}} = H_{\text{с изм}}$$

Свойство не зависит от формы образца.

# Классификация. Магнитомягкие и магнитотвердые материалы

Значение напряженности внешнего магнитного поля противоположного знака, которое необходимо приложить для того, чтобы полностью размагнитить ферромагнетик, предварительно намагниченный до насыщения, называется коэрцитивной силой  $H_c$  (рис.).

- По способности к более легкому или более трудному намагничиванию и размагничиванию ферромагнетики делятся на: **магнитомягкие и магнитотвердые материалы**.
- Магнитомягкие материалы должны легко и сильно намагничиваться и перемагничиваться даже в слабых полях (при небольших значениях напряженности внешнего поля  $H$ ), поэтому их коэрцитивная сила  $H_c$  должна быть минимально возможной ( $H_c < 800$  А/м), а намагненность насыщения  $J_s$  – максимально возможной. Петля гистерезиса таких материалов узкая и высокая (рис.).
- Магнитотвердые материалы применяются для изготовления постоянных магнитов (сплавы типа Fe-Ni-Al, Fe-Cr-Co, Fe-Co-V, Co-Pt, Cu-Ni-Co и т. д.), гистерезисных двигателей (сплавы типа Fe-Co-Ni-V, Fe-Co-Cr-V, Fe-Co-W-Mo и т. д.), а также носителей магнитной записи (Fe-Cr-Ni). После намагничивания магнитотвердые материалы не должны самопроизвольно размагничиваться, что обеспечивается их высокой коэрцитивной силой ( $H_c > 4000$  А/м). Петля гистерезиса таких материалов



# Магнитомягкие материалы

Петля гистерезиса малой площади

Легкое намагничивание в слабых полях

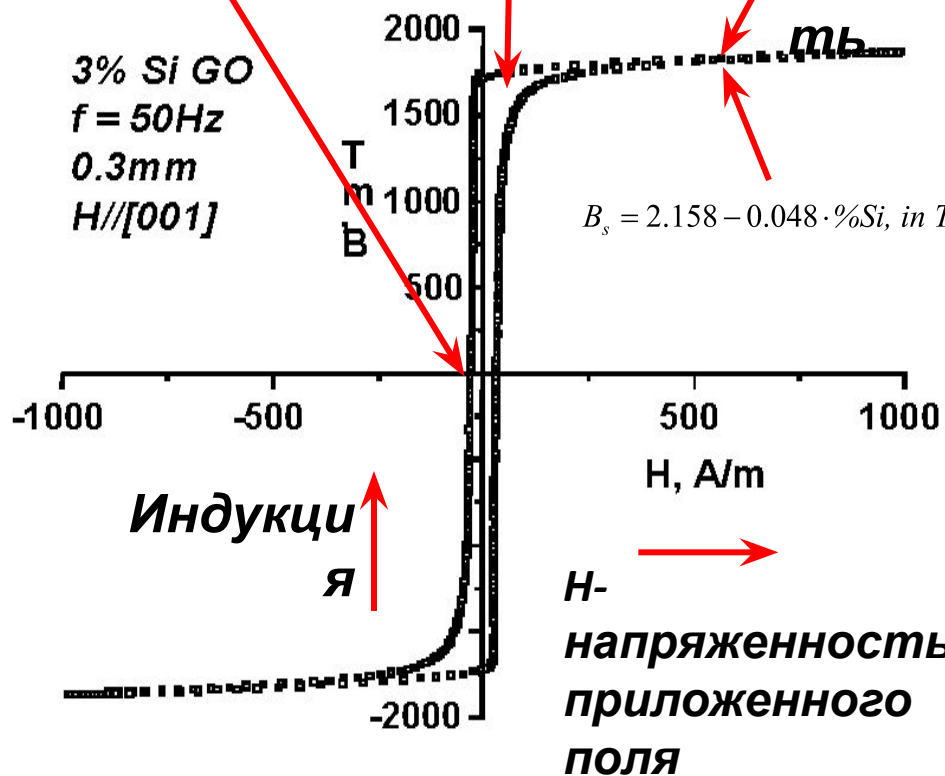
Малая коэрцитивная сила  $H_c$

Большая намагниченность насыщения

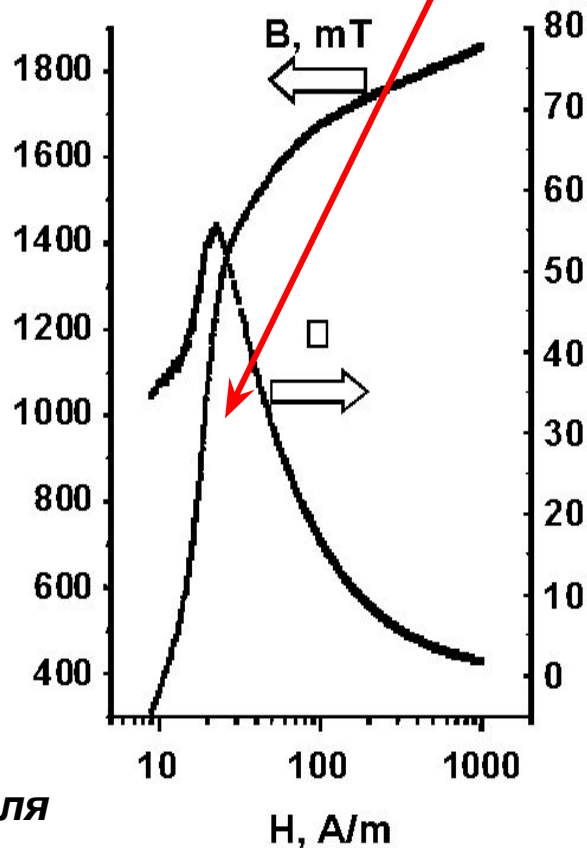
Намагниченность

ть

3% Si GO  
 $f = 50\text{Hz}$   
0.3mm  
 $H // [001]$



Кривая намагниченности и проницаемости для ЭАС



# Основные принципы создания магнитных материалов

## 1. Магнитомягкие сплавы

Магнитомягкие материалы традиционно делят на:

1. Электротехнические стали (сплав Fe-Si);
2. Из-за особенностей получения и способов формирования магнитных свойств в особую группу выделяют аморфные и нанокристаллические магнитомягкие сплавы;
3. Прецизионные магнитомягкие сплавы.

# Требования к магнитным свойствам магнитомягких материалов при использовании в различных электротехнических устройствах

| Применение                                                                                                                                                                        | Требования к магнитным свойствам магнитопровода                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Силовые трансформаторы<br/> Согласующие трансформаторы<br/> Широкополосные трансформаторы<br/> Трансформаторы питания<br/> Электрические машины<br/> Электромагнитное реле</p> | <p>Низкие удельные магнитные потери,<br/> высокая магнитная индукция</p> <p>Высокая индукция,<br/> низкая коэрцитивная сила</p>                                                |
| <p>Измерительные трансформаторы тока<br/> и напряжения</p> <p>Насыщающиеся реакторы<br/> Задающие трансформаторы<br/> Магнитные усилители<br/> Магнитные ключи</p>                | <p>Высокая начальная магнитная<br/> проницаемость</p> <p>Высокий коэффициент прямоугольности<br/> петли магнитного гистерезиса,<br/> низкая динамическая коэрцитивная сила</p> |
| <p>Импульсные трансформаторы<br/> Сигнальные трансформаторы</p>                                                                                                                   | <p>Низкий коэффициент прямоугольности<br/> петли магнитного гистерезиса,<br/> высокая магнитная индукция</p>                                                                   |
| <p>Накопительные трансформаторы<br/> Накопительные реакторы<br/> Токоограничивающие реакторы<br/> Сглаживающие реакторы<br/> Реакторы помехоподавления</p>                        | <p>Высокая запасенная магнитная энергия</p>                                                                                                                                    |
| <p>Магнитомеханические преобразователи<br/> (вибраторы)</p>                                                                                                                       | <p>Высокая магнитострикция,<br/> высокий коэффициент<br/> магнитомеханической связи</p>                                                                                        |
| <p>Магнитные экраны</p>                                                                                                                                                           | <p>Высокая магнитная проницаемость<br/> в заданном поле</p>                                                                                                                    |

# Основные принципы создания магнитных материалов

## Магнитомягкие сплавы

### Железо и низкоуглеродистые

Основным компонентом большинства магнитных материалов является железо. Само по себе железо типичный магнитомягкий материал, магнитные свойства которого существенно зависят от содержания примесей.

$H_c \sim 48 \text{ А/м}$  – эл/литическое железо;  $H_c \sim 0,8 \text{ А/м}$  – зонная плавка.

Чистое железо вследствие низкого удельного сопротивления используют редко, в основном для изготовления материалов постоянного магнитного потока. Для работы в переменных полях применяются электротехнические стали (98,5% всех магнитомягких материалов).

**Электролитическое железо** получают при электролизе раствора сернокислого или хлористого железа, причем анодом служит чистое железо, а катодом – пластина мягкой стали. Осажденное на катоде железо (толщина слоя 4 – 6 мм) после тщательной промывки снимают и измельчают в порошок в шаровых мельницах; подвергают вакуумному отжигу или переплавляют в вакууме.

**Карбонильное железо** получают посредством термического разложения пентакарбонила железа, который представляет собой продукт воздействия оксида углерода на железо при температуре около  $200^\circ\text{C}$  и давлении 15 МПа. Карбонильное железо имеет вид тонкого порошка, что делает его удобным для изготовления прессованных магнитных сердечников. В карбонильном железе отсутствуют кремний, фосфор и сера, но содержится углерод.

**Технически чистое железо** содержит небольшое количество примесей углерода, серы, марганца, кремния и других элементов, ухудшающих его магнитные свойства. Технически чистое железо вследствие низкого удельного сопротивления используют редко, в основном для изготовления материалов постоянного магнитного потока. Технически чистое железо изготавливают рафинированием чугуна в мартеновских печах или в конверторах.

# Основные принципы создания магнитных материалов

## Магнитомягкие сплавы

### 1 Электротехнические стали

- В настоящее время наиболее распространенными материалами для изготовления магнитопроводов электрических машин и трансформаторов являются **электротехнические стали** (98,5% всех производимых магнитомягких материалов):

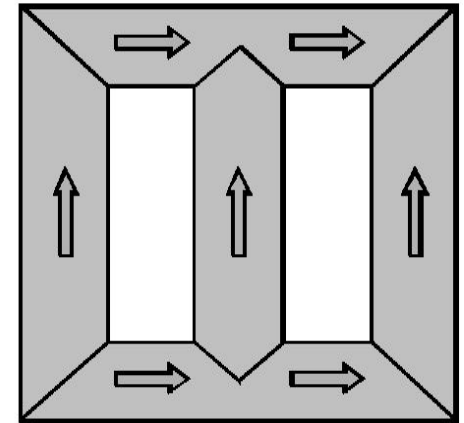
- 1) Электротехнические изотропные (динамные) стали;
- 2) Электротехнические анизотропные (трансформаторные) стали;
- 3) Электротехнические релейные стали.

Традиционно они изготавливаются на основе сплавов железа с кремнием (до 3.5 % Si).

# 1 Электротехнические стали

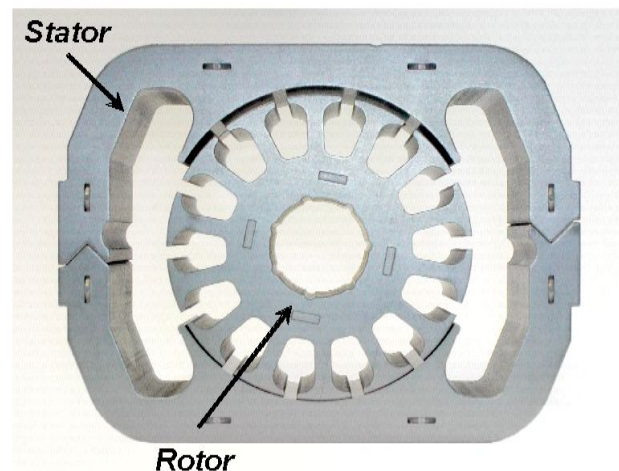
## Электротехническая анизотропная сталь (GO Electrical Steel)

- Электротехнические анизотропные (трансформаторные) стали используются для изготовления магнитопроводов трансформаторов, работающих при низких частотах, где **направление магнитного потока неизменно**;



## Электротехническая изотропная сталь (NO Electrical Steel)

- Электротехнические изотропные (динамные) стали используются в магнитопроводах электрических машин, где **магнитный поток либо вращается, либо охватывает все направления в плоскости листа**;



Электротехнические релейные стали (далее отдельно не рассматриваются) применяются в качестве материалов для **электромагнитных реле** (пускателей и т.п.) и представляют из себя особочистые низколегированные стали (основное требование – низкая коэрцитивная сила). Нелегированные динамные стали могут использоваться как релейные.

# 1 Электротехнические стали

Современные электротехнические стали представляют из себя сплав железа с кремнием и иногда алюминием, при малом содержании углерода (углерод является вредной примесью, снижающей магнитные свойства).

## Отличия кривых намагничивания NO и GO (3-% Si Electrical Steel)

- Индукция насыщения

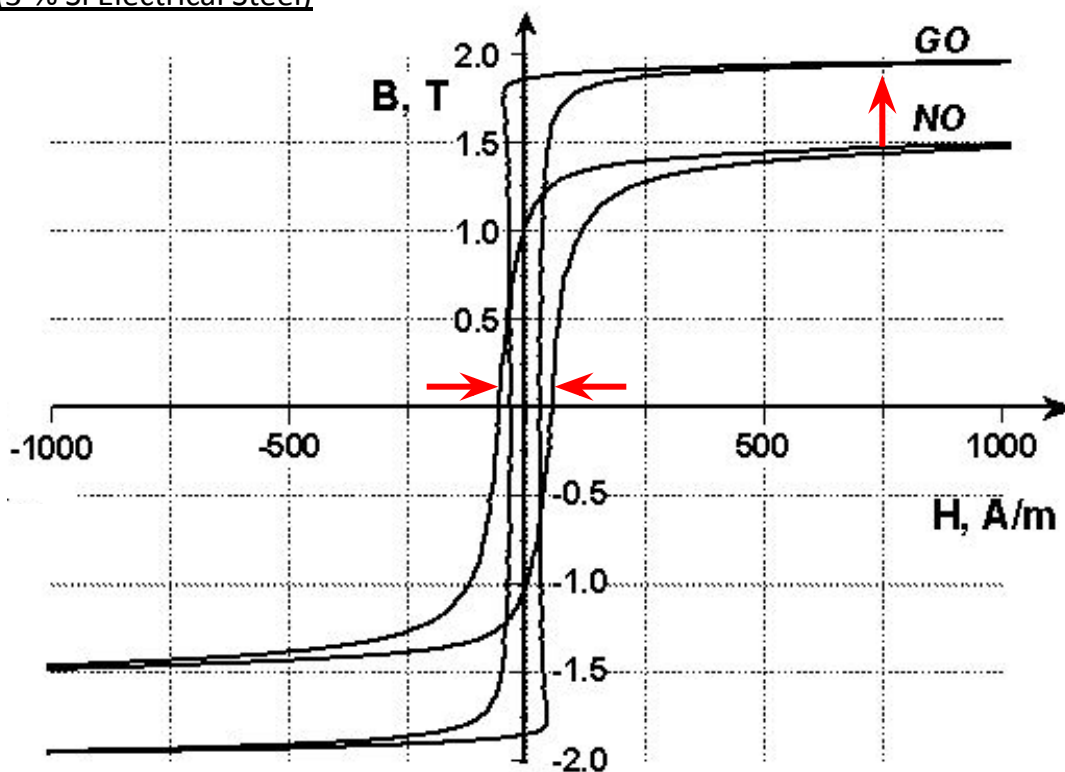
- Ширина петли.

### Электротехническая анизотропная сталь (GO Electrical Steel)

- Основная проблема в области получения трансформаторной стали состоит в получении текстуры. Разработаны способы получения стали с текстурой (110)[001], за счет вторичной рекристаллизации.

### Электротехническая изотропная сталь (NO Electrical Steel)

- Динамные стали являются изотропными. От них требуется как можно большая величина магнитного потока. Сочетание зеренной структуры с текстурой составляет предмет исследования в этих материалах.



Релейные стали, как правило, представляют из себя особочистые низколегированные стали (основное требование – низкая коэрцитивная сила и высокая индукция), без особенностей в технологии производства. Нелегированные динамные стали (ЭИС) могут использоваться как релейные. Поэтому далее отдельно не рассматриваются.

# **Основные принципы создания магнитных материалов**

## **Магнитомягкие сплавы**

### **2 Аморфные и нанокристаллические сплавы**

- Из-за особенностей получения и способов формирования оптимальных магнитных свойств в особую группу выделяют аморфные и нанокристаллические магнитомягкие сплавы, которые к настоящему времени составляют серьезную конкуренцию электротехническим сталям. Это обусловлено низкими суммарными потерями, которые в лучших сплавах на порядок ниже, чем у кремнистых электротехнических сталей.

# **Основные принципы создания магнитных материалов**

## **Магнитомягкие сплавы**

**3 Прецизионные магнитомягкие сплавы.** По объему производства прецизионные сплавы значительно уступают электротехническим сталям, однако области их применения гораздо разнообразнее. В настоящее время сложилось разделение магнитомягких сплавов по основным свойствам и назначению на 7 групп.

# Классификация прецизионных магнитомягких сплавов

| Группа сплавов                             | Основа сплава      | Марка                                                                | Основные параметры                                                                                                                                                                 | Назначение                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                          | 2                  | 3                                                                    | 4                                                                                                                                                                                  | 5                                                                                                                                                           |
| С наивысшей $\mu$ в слабых магнитных полях | Fe—Ni              | 79НМ,<br>80НХС,<br>81НМА,<br>83НФ                                    | $\mu_a \approx (2...20) \cdot 10^4$ ,<br>$\mu_{\max} \approx 10^5...10^6$ ,<br>$\rho \approx 0,55...0,80 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ,<br>$B_s \approx 0,5...0,8 \text{ Тл}$      | Сердечники малогабаритных трансформаторов, дросселей, реле, головок магнитной записи, феррозондов, магнитные экраны                                         |
| С высокой $\mu$ и повышенным $\rho$        | Fe—Ni              | 50НХС                                                                | $\mu_a \approx (1,5...6) \cdot 10^3$ ,<br>$\mu_{\max} \approx (1,5...10) \cdot 10^4$ ,<br>$\rho \approx 0,9...1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ,<br>$B_s \approx 1...1,4 \text{ Тл}$ | Сердечники дросселей, импульсных трансформаторов                                                                                                            |
| С высокой $\mu$ и повышенной $B_s$         | Fe—Ni              | 45Н,<br>50Н                                                          | $\mu_a \approx (2...5) \cdot 10^3$ ,<br>$\mu_{\max} \approx (2...10) \cdot 10^4$ ,<br>$B_s \approx 1,3...1,5 \text{ Тл}$                                                           | Сердечники малогабаритных трансформаторов, дросселей, реле                                                                                                  |
| С прямоугольной петлей гистерезиса         | Fe—Ni,<br>Fe—Ni—Co | 50НП,<br>68НМП,<br>79НМП,<br>77НМДП<br>34НКМП,<br>35НКХСП,<br>40НКМП | $B_r/B_s \approx 0,85...0,98$ ,<br>$\mu_{\max} \approx (4...120) \cdot 10^4$ ,<br>$B_s \leq 1,5 \text{ Тл}$                                                                        | Сердечники магнитных усилителей, бесконтактных реле, контактных выпрямителей, дросселей модуляторов, импульсных трансформаторов, магнитных элементов ЭВМ    |
| С высокой $B_s$                            | Fe—Co              | 27КХ,<br>49КФ,<br>49К2Ф,<br>49К2ФА                                   | $B_s \leq 2,4 \text{ Тл}$ ,<br>$T_c \approx 1000 \text{ }^\circ\text{C}$                                                                                                           | Сердечники и полюсные наконечники магнитов, роторов и статоров электрических машин, малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, магнитных усилителей |

# Классификация прецизионных магнитомягких сплавов

| 1                                                          | 2                  | 3                                | 4                                                                                                                                                                              | 5                                                                                                            |
|------------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| С низкой остаточной индукцией                              | Fe–Ni,<br>Fe–Ni–Co | 64Н,<br>47НК,<br>47НКХ,<br>40НKM | $B_r/B_s \leq 0,05...0,07$ ,<br>$\mu_a \approx 1000...3000$ ,<br>$\mu_{\max}/\mu_a \approx 1,05...1,2$ ,<br>$TK_{\mu} \approx 0,06 \% \cdot K^{-1}$<br>(от $-60$ до $+120$ °C) | Сердечники катушек постоянной индуктивности, дросселей фильтров, широкополосных и импульсных трансформаторов |
| С высокой $\mu$ при однополярном импульсном намагничивании | Fe–Ni              | 68НМ,<br>79НЗМ,<br>53Н-ВИ        | $\mu_{\text{имп}} \approx (5...10) \cdot 10^3$ ,<br>$TK_{\mu_{\text{имп}}} \approx 0,25 \% \cdot K^{-1}$<br>(от $-60$ до $+60$ °C)                                             | Сердечники однополярных импульсных трансформаторов, токовые переключатели                                    |

Обозначения:  $\mu$  — магнитная проницаемость ( $\mu_a$  — начальная,  $\mu_{\max}$  — максимальная,  $\mu_{\text{имп}}$  — импульсная),  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление,  $B_s$  — индукция насыщения,  $T_c$  — температура Кюри,  $B_r/B_s$  — коэффициент прямоугольности петли гистерезиса,  $TK_{\mu}$  — температурный коэффициент проницаемости.

# Классификация прецизионных магнитомягких сплавов

## 1. Магнитомягкие железоникелевые сплавы:

45-83%Ni – **пермаллои** ( $\gamma$  твердый раствор замещения с ГЦК решеткой);

- Максимальная магнитная проницаемость  $\mu$ ;
- При 73-82% Ni константа магнитокристаллической анизотропии  $K_1$  и магнитострикция насыщения  $\lambda_s$  обращаются в ноль (условие наиболее легкого перемагничивания материала и наивысшая проницаемость). Для получения максимальной проницаемости стараются не допустить выделения сверхструктуры  $Ni_3Fe$  (легирование Mo и Cr). Основное использование при высоких частотах, так как, кроме высокой проницаемости, сплавы имеют высокое удельное электросопротивление;
- Сплавы имеют два типа упорядочения: химическое (сверхструктура) и направленное (актуально для средненикелевых 64-68%Ni пермаллоев – используют в практике для создания анизотропии за счет ТМО).
- За счет ТМО получают прямоугольную петлю гистерезиса в пермалоях с 65%Ni и перминварах (*характеризуются малой зависимостью магнитной проницаемости  $\mu$  от напряжённости поля*) Fe-Ni-Co с 25-30%Co.
- В сплавах с 50%Ni прямоугольную петлю гистерезиса получают путем создания текстуры (100)[001] – холодная прокатка ( $\epsilon \geq 90\%$ ) и отжиг при 1100-1150°C (первичная рекристаллизация и нормальный рост).

# Классификация прецизионных магнитомягких сплавов

## 2. Магнитомягкие на железокобальтовой основе.

- Сплавы на железо-кобальтовой основе обладают **наиболее высокой индукцией насыщения** среди магнитных сплавов – около 2,4 Тл.
- Наиболее распространены Fe-Co – **пермендюры**. Они обладают высокой магнитострикцией насыщения  $\lambda_s \sim (60-100)10^{-6}$ , поэтому их используют также как магнитострикционные.
- Пермендюры имеют относительно не высокую константу магнитокристаллической анизотропии  $K_1$ , что обуславливает не высокую коэрцитивную силу  $H_c$  (30-160 А/м), высокую магнитную проницаемость и малые потери при перемагничивании при высоких индукциях.
- При длительном отжиге склонны к химическому упорядочению FeCo (ниже 730°C), приводящему к повышенной хрупкости (для предотвращения легируют V -1,5-2%, что приводит к снижению индукции и повышению удельного электросопротивления).
- Сплавы обладают наиболее высокой температурой Кюри (до 1050°C). Это представляет интерес для использования в устройствах, работающих при высоких температурах. Сплавы с 92%Co при 1000°C имеет индукцию 0,5Тл (любые другие сплавы при такой температуре парамагнитны).

3. Классификация магнито-мягких сплавов, которые помимо магнитных свойств должны обладать дополнительными специальными свойствами – механическими, тепловыми, коррозионными и другими, без которых применение материалов в определенных устройствах невозможно, представлены далее.

# Магнитомягкие сплавы со специальными свойствами

| Группа сплавов                                                            | Основа сплава                   | Марка                                                                                                                       | Основные параметры                                                                                                                                    | Назначение                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| С повышенной деформационной стабильностью и износостойкостью              | Fe-Si-Al,<br>Fe-Al-Cr,<br>Fe-Ni | 10СЮ-ВИ,<br>10СЮ-МП,<br>16ЮХ-ВИ,<br>16ЮИХ-ВИ,<br>81НМА                                                                      | $HV \approx 250...4500$ ,<br>$\sigma_B \leq 760 \text{ МПа}$ ,<br>$\mu_a \approx (1...5) \cdot 10^4$ ,<br>$\rho \leq 1,5 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ | Сердечники магнитных головок записи и воспроизведения звука, кода, видеоизображения                                                       |
| С заданным температурным коэффициентом линейного расширения $\alpha$      | Fe-Ni                           | 52Н,<br>52Н-ВИ,<br>47НД,<br>47НД-ВИ                                                                                         | $\alpha \approx (8,5...11) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ,<br>$I H_c \approx 10...20 \text{ А/м}$ ,<br>$B_s \approx 1,3...1,5 \text{ Тл}$             | Магнитные элементы герметизированных магнитных контактов (герконы)                                                                        |
| С высокой коррозионной стойкостью                                         | Fe-Cr,<br>Fe-Ni-Co              | 16Х, 00Х13,<br>36КНМ                                                                                                        | Скорость коррозии,<br>$B(H)$ , $H_c$                                                                                                                  | Магнитопроводы систем управления, якорей электромагнитов, статоров и роторов электрических машин, магнитопроводов пневмо- и гидроклапанов |
| С высокой магнитострикцией                                                | Ni,<br>Fe-Co,<br>Fe-Al          | Никель<br>НП-2-Т,<br>49К2Ф, 9Ю-ВИ,<br>12Ю, 14Ю                                                                              | $\lambda_s \approx (35...80) \cdot 10^{-6}$ ,<br>$I H_c \leq 240 \text{ А/м}$                                                                         | Сердечники магнитострикционных преобразователей, телефонных мембран, электромеханических фильтров, линий задержки                         |
| Термомагнитные сплавы и термокомпенсационные многослойные материалы (ТКМ) | Fe-Ni                           | 31НХ3Г2,<br>31НХ3Г,<br>32НХ3, 33НХ3,<br>Н38Х14, Н33Ю1,<br>30НГ, 36Н11Х,<br>32Н6ХЮ,<br>ТКМ-09-01,<br>ТКМ-015-1,<br>ТКМ-015-2 | Крутизна температурной зависимости индукции<br>$\beta \approx 0,003...0,006 \text{ Тл/К}$<br>в полях от 2,4 до 120 кА/м                               | Компенсационные магнитные шунты измерительных приборов, тепловые реле, бесконтактные датчики температуры                                  |
| Для работы на сверхвысоких частотах                                       | Fe-Al-Cr                        | 7ЮХ-ВИ                                                                                                                      | Повышенное поверхностное сопротивление в СВЧ-диапазоне                                                                                                | Для устройств СВЧ (волноводов аттенюаторов, термических измерителей мощности)                                                             |

# Принципы создания магнитных материалов

## 2 Магнитотвердые материалы

Применение:

1. Изготовление постоянных магнитов;
2. Изготовление гистерезисных двигателей;
3. Изготовление магнитных лент и барабанов, дисков для записи информации.

Это группа трудноперемагничиваемых материалов с широкой петлей гистерезиса.

1. Коэрцитивная сила. К магнитотвердым материалам относятся материалы с высокой коэрцитивной силой ( $H_c > 4000 \text{ А/м}$ ).

2. Максимальная удельная энергия  $W_{\max} = 0,5(BH)_{\max}$ . От показателя  $W_{\max}$  зависит объем магнита, необходимого для создания магнитного поля в заданном воздушном зазоре. Чем больше магнитная энергия, тем меньше объем, а, следовательно, и масса магнита. Магнитная проницаемость у магнитотвердых материалов значительно ниже и не является основной характеристикой материала. Параметр магнитной проницаемости у магнитотвердых материалов не имеет реального смысла.

Иногда используют понятие «энергетическое произведение»  $(BH)_{\max} > 10^3 \text{ Дж/м}^3$ .

3. Коэффициент выпуклости (оценивает форму кривой размагничивания). Петля должна быть как можно более выпуклой.

$$\gamma = (BH)_{\max} / (BH)_{\text{ост}}$$

# Принципы создания магнитных материалов

## 2 Магнитотвердые материалы

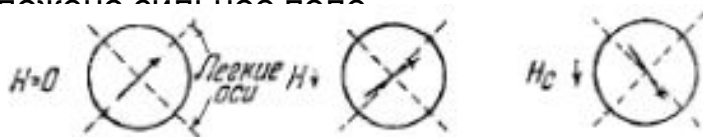
В принципах создания магнитотвердых материалов лежат:

1. Затрудненность смещения границ доменов за счет создания включений.
2. Однодоменность в частицах материала.

Достаточно малые частицы с диаметром менее  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  см, образуют один домен, что является результатом доменной теории. В случае таких очень маленьких частиц образование границы домена энергетически не выгодно, так как при этом слишком большая часть объема маленькой частицы будет занята не зависящим от размеров частички слоем между доменами.

Если маленькая частичка вынуждена оставаться одним доменом, то будет невозможно изменять и обращать намагниченность путем смещения границы, которое обычно требует сравнительно небольших полей. Вместо этого намагниченность частицы должна вращаться как целое (рис.), т.е. будет изменяться в результате процесса, требующего больших полей, зависящих от энергии анизотропии материала или формы частицы. Потребность больших полей является следствием того, что мы должны поворачивать намагниченность через энергетический горб, соответствующий направлению трудного намагничивания.

Если маленькие частички обладают удлиненной формой, то коэрцитивная сила увеличивается из-за анизотропии энергии размагничивающего поля, даже если энергия кристаллической анизотропии невелика. Это значит, что намагниченность стремится установиться вдоль длинной оси частички, и чтобы повернуть намагниченность в направлении коротких осей, должно быть приложено сильное поле.



*Изменение намагниченности в очень маленьких частичках происходит путем вращения полного магнитного момента частички*

# Принципы создания магнитных материалов

## 2 Магнитотвердые материалы

**Пример 1.** Закаленные заэвтектоидные стали легированные карбидообразующими элементами Cr, V, Mo в очень небольшом количестве. Закалку производят из межкритического интервала. После закалки сталь содержит карбиды и мартенсит с высоким уровнем внутренних напряжений (затрудненность смещения границ доменов за счет создания включений).

Для постоянных магнитов применяют высокоуглеродистые стали со структурой мартенсита, содержащие около 1% C, дополнительно легированные хромом (3 %) – EX3, а также одновременно хромом и кобальтом – EX5K5, EX9K15M2. Например, сталь EX6K6 содержит 1 % C, 6 % Cr и 6 % Co. Легирующие элементы повышают магнитные характеристики, одновременно улучшая механическую и температурную стабильность постоянных магнитов. Эти стали подвергают нормализации и низкому отпуску.

Высокая коэрцитивная сила в сплавах системы Fe-V-Co (**викаллой**) возникает в результате  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Магнитные свойства формируются благодаря холодному деформированию и последующему отпуску. В сплавах этой системы  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение происходит при холодной деформации. Увеличение степени деформации (обычно не менее 80-90 %) приводит к полному  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращению и созданию в сплаве кристаллической текстуры. Рост  $H_c$  происходит в процессе последующего отпуска в двухфазной  $\alpha + \gamma$ -области вследствие обратного превращения.

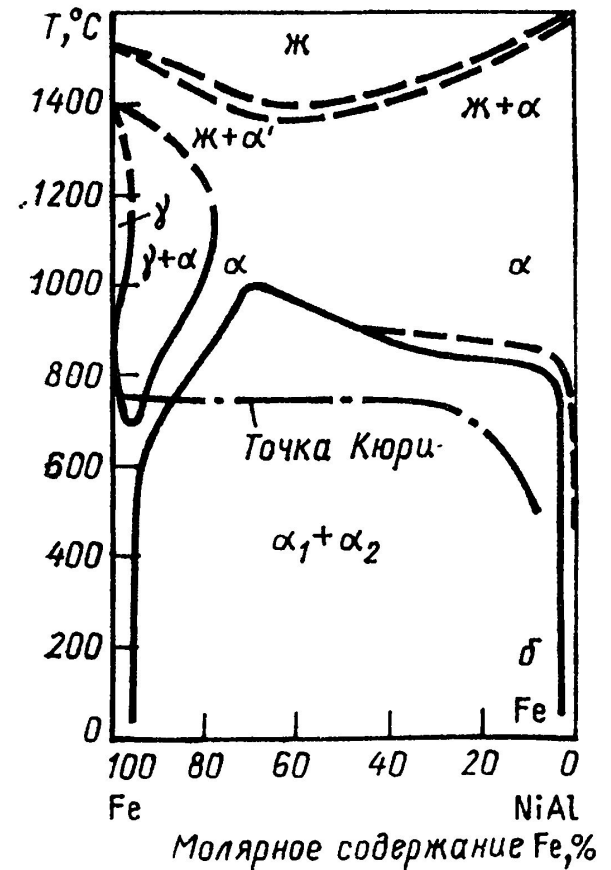
Сплавы, содержащие 12 % Co и 10–20 % Mo, называют **комол**. Эти сплавы деформируются только в горячем состоянии, так как высокое значение коэрцитивной силы достигается в результате распада пересыщенного твердого раствора.

# Принципы создания магнитных материалов

## 2 Магнитотвердые материалы

### Пример 2. Альники.

- Сплавы на основе Fe-Ni-Al и Fe-Ni-Al-Co с добавкой 2-4 % Cu. Иногда их называют сплавами типа «альники». Сплавы этой системы подвергают терромагнитной обработке (ТМО), которая состоит из нагрева до  $\sim 1300^\circ\text{C}$ , выдержки при этой температуре для получения однофазного состояния, быстрого охлаждения до  $900^\circ\text{C}$  с последующим медленным охлаждением в магнитном поле. Затем проводится отжиг при  $560\text{--}630^\circ\text{C}$ , длительность которого определяется маркой сплава.
- Свойства сплава зависят от химического состава. В верхнем интервале температур (медленное охлаждение) происходит распад (формируется структура с большим числом равномерных выделений), а в нижнем – дораспад (увеличение разницы по составу между сформировавшимися частицами фаз  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ). При большой скорости охлаждения не успевает пройти подготовительная стадия распада, а при малой скорости успевает пройти рост и коагуляция фаз, что приводит к снижению коэрцитивной силы.
- Распад высокотемпературного раствора  $\alpha \rightarrow \alpha_1 + \alpha_2$  идет по типу спинодального. Частицы  $\alpha_1$  – выделяются по направлению  $\langle 100 \rangle_\alpha$ . При избытке железа распад идет на сильный ферромагнетик  $\alpha_1$  и упорядоченную фазу  $\alpha_2$  размером  $\sim 10$  нм. При оптимальных химических составах ферромагнетик  $\alpha_1$  выделяется в виде дисперсных однодоменных частиц в матрице  $\alpha_2$  (однодоменность в частицах материала).
- Добавление кобальта: терромагнитной обработкой добиваются выделения  $\alpha_1$  фазы вдоль определенного направления  $[100]_\alpha$  с подавлением распада в других направлениях, создавая кристаллографическую анизотропию. Фазовый состав сплавов становится более сложным.



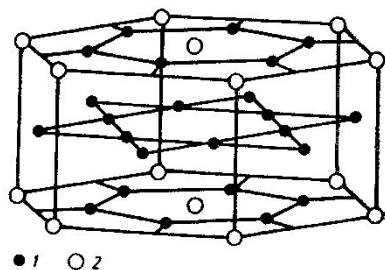
# Принципы создания магнитных материалов

## 2 Магнитотвердые материалы

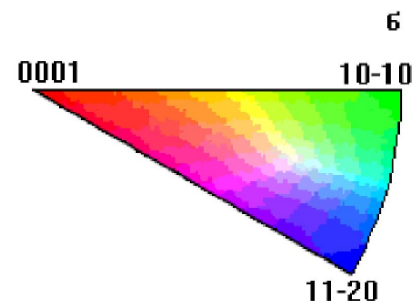
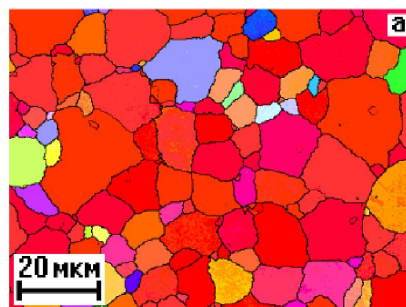
**Пример 3.** Самыми высокоэрцитивными являются материалы на основе R-Co. Вместо R может быть La...Sm. Способ получения включает: выплавка слитка из чистых компонентов; получение порошка сплава путем измельчения слитка; текстурирование частиц порошка и их уплотнение; термическая обработка, включающая спекание и последующий отжиг; намагничивание изделия. С целью получения текстуры в порошковом материале его в процессе компактирования подвергают воздействию сильного постоянного магнитного поля, которое ориентирует большую часть частиц порошка в определенном направлении, совпадающем с направлением окончательного намагничивания изделия.

Для некоторых составов принцип совмещает затрудненность смещения границ доменов за счет создания включений и вращение намагниченности в однодоменных частицах  $\text{SmCo}_5$ .  $H_c \sim 1200000 \text{ А/м}$ .

В настоящее время созданы новые магнитные материалы с применением таких редкоземельных элементов, как неодим и самарий. Широко осуществляют производство магнитов на основе химического соединения  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , полученные методом порошковой металлургии с последующим прессованием и спеканием в атмосфере аргона при  $1370^\circ\text{C}$ .



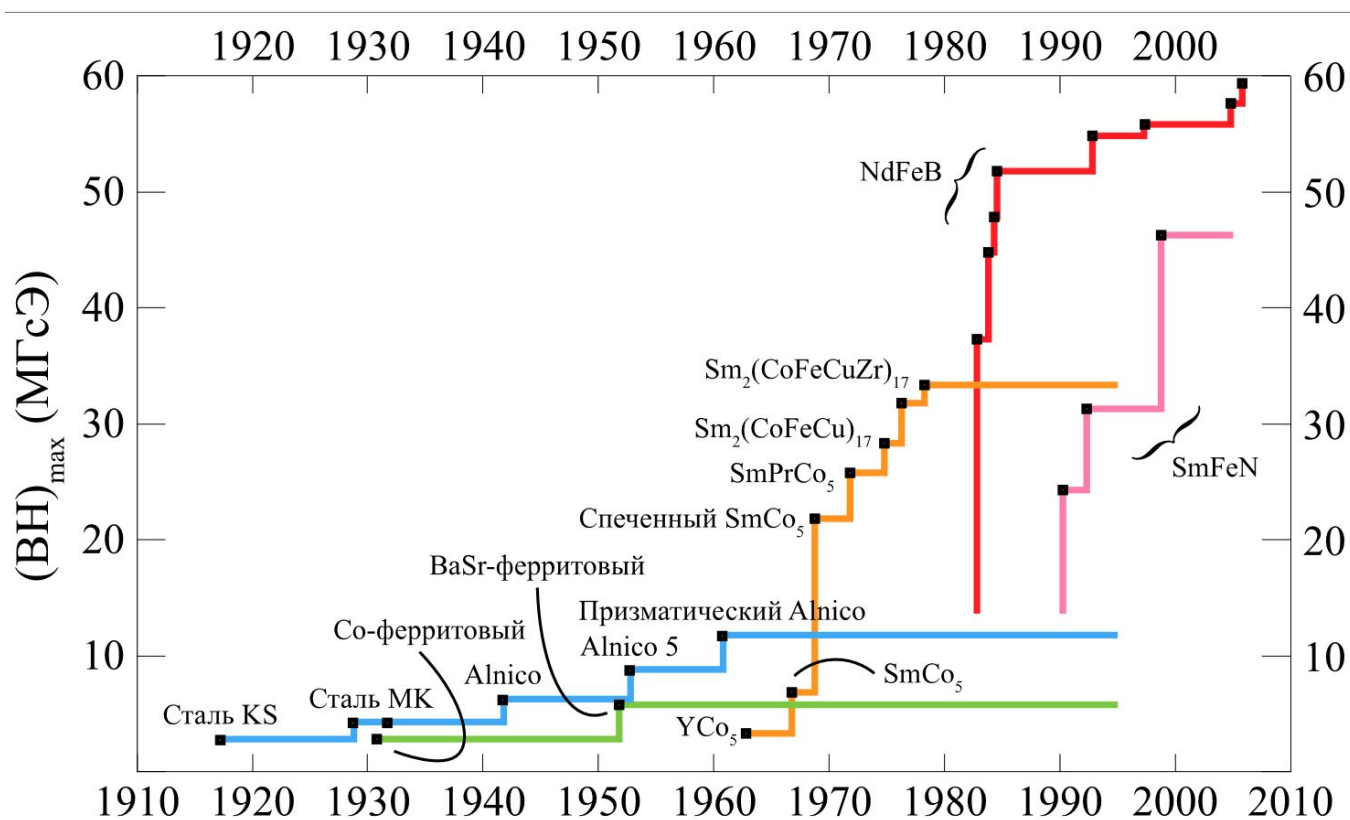
Кристаллическая решетка интерметаллического соединения  $\text{SmCo}_5$  1 – атомы кобальта; 2 – атомы РЗМ



Текстура образца сплава KC37 (в виде ориентационных карт)  
а – с направления намагничивания при прессовке; б – стереографический треугольник с цветовой дифференциацией кристаллографических направлений

# Принципы создания магнитных материалов

## Магнитотвердые материалы



# Магнитомягкие материалы

| Material          | Composition | T <sub>c</sub> (K) | B <sub>s</sub> (T) | H <sub>c</sub> (A.m <sup>-1</sup> ) | μ <sub>r</sub>      | Resis-tivity (μΩm) | W <sub>H</sub> (J.m <sup>-3</sup> .cycle <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|-------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------------------------------------------|
| Iron              | Fe          | 1043               | 2.2                | 4                                   | 2.10 <sup>5</sup>   | 0.1                | 30                                                       |
| Mild steel        | Fe-C        | 1000               | 2.1                | 143                                 | 2.10 <sup>5</sup>   | 0.10               | 500                                                      |
| Transformer steel | Fe-3Si      | 1030               | 2.0                | 12                                  | 4.10 <sup>4</sup>   | 0.5                | 30                                                       |
| Permalloy         | Fe-79Ni     | 800                | 1.1                | 4                                   | 1.10 <sup>5</sup>   | 0.2                |                                                          |
| Supermalloy       | Fe-79Ni-5Mo |                    | 0.80               | 0.16                                | 1.10 <sup>6</sup>   | 0.6                |                                                          |
| Ferroxcube        |             | 570                | 0.25               | 0.8                                 | 1.5.10 <sup>3</sup> | 10 <sup>6</sup>    | 13                                                       |
| Amorphous iron    | FeBSi       | 630                | 1.6                |                                     | > 10 <sup>5</sup>   | 10 <sup>3</sup>    | 13                                                       |

# Магнитотвердые материалы

| Material                | Composition                                       | T <sub>c</sub> (K) | Remanence<br>B <sub>r</sub> (T) | Coercivity<br>H <sub>c</sub> (A.m <sup>-1</sup> ) | BH max<br>(kJ.m <sup>-3</sup> ) |
|-------------------------|---------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------|
| Alnico IV H             | 12Al26Ni8Co2Cu                                    | 1160               | 0.6                             | 63                                                | 13                              |
| Alnico V                | 8Al13.5Ni24Co3Cu                                  | 1160               | 1.35                            | 64                                                | 44                              |
| Barium ferrite          | BaO(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> | 720                | 0.4                             | 264                                               | 28                              |
| Samarium cobalt         | SmCo <sub>5</sub>                                 | 1000               | 0.85                            | 600                                               | 140                             |
| Neodymium iron<br>boron | Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B                | 620                | 1.1                             | 890                                               | 216                             |
| γ iron oxide            | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                    |                    | 0.21                            | 25                                                |                                 |
| Magnetite               | FeOFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 | 850                | 0.27                            | 25                                                |                                 |

# Принципы создания магнитных материалов

## 3 К группе материалов специального назначения

**относят:**

- 1) материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ);
- 2) магнитострикционные материалы;
- 3) термомагниты;
- 4) ферриты СВЧ;
- 5) материалы с постоянной магнитной проницаемостью;
- 6) материалы для записи информации.

**Спасибо за внимание!**