



# Магнитные параметры материалов и их измерение

Гуськов Антон Борисович

Заместитель генерального директора по научной работе ОАО «Завод Магнетон»

(821) 297-5531, [guskov@magneton.ru](mailto:guskov@magneton.ru)

# Материальные уравнения для магнитного поля

в СИ  $B = \mu_0(M + H) = \mu\mu_0 H$   $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – универсальная магнитная постоянная.

[В] – Тесла (Тл) [H] – Ампер/метр (А/м)  $\mu$  – безразмерна.

в СГСМ  $B = H + 4\pi M = \mu H$ , [H] = Э, [В] = Гс,  $1\text{Э} = 80$  А/м;  $1\text{Тл} = 10000$  Гс

*Большинство материалов в природе немагнитные. Среди них есть парамагнетики, у которых  $\mu$  немного меньше 1 и диамагнетики, у которых  $\mu$  немного больше 1.*

*На практике можно считать, что у всех них  $\mu = 1$ .*

# Природа магнетизма

У магнитных материалов  $\mu \gg 1$ . Сильный магнетизм, связан с упорядочением атомных магнитных моментов.

Он есть у электрона – т.н. спин (электрон «крутится вокруг своей оси»)

Или у некоторых атомов, за счет движения электронов вокруг ядра по орбите. В большинстве веществ есть электроны в противоположными спинами, нейтрализующие магнитные поля друг друга, и по орбитам летают в разные стороны. Поэтому атом магнитно-нейтрален.

**В магнитных материалах нейтралитет нарушен и атомы имеют собственный магнитный момент.** Они – «микромагниты». Под действием температурного движения эти «микромагниты» повернуты в разные стороны и на макроуровне намагниченности нет.

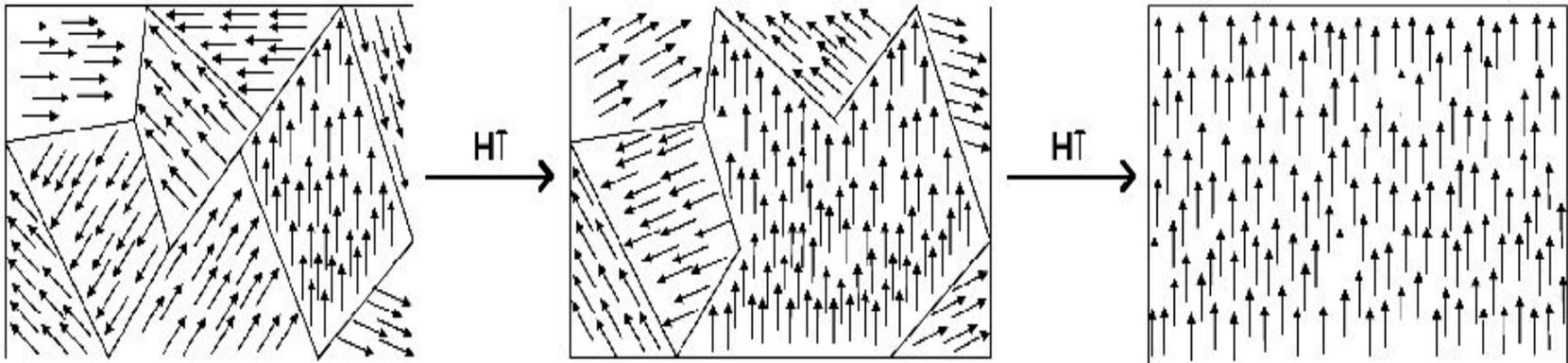
**Магнитное поле поворачивает их вдоль себя** и намагниченность вещества резко возрастает. Пока поле мало – поворачиваются только те, которым легче. Потом с ростом внешнего поля еще и еще. Когда повернутся все наступит НАСЫЩЕНИЕ и дальше останутся только те механизмы, которые есть в немагнитных материалах.

Теперь если поле уменьшать, «атомы – микромагниты» разупорядочиваются снова. Но не все! Даже когда внешнее магнитное поле убрать совсем, часть остается направленной. И вещество оказывается намагниченным. Эта намагниченность называется остаточной, а соответствующая ему индукция – **остаточной индукцией  $B_r$** . Чтобы ее убрать надо приложить внешнее магнитное поле определенной величины  $H_c$  в противоположном направлении (коэрцитивное поле).

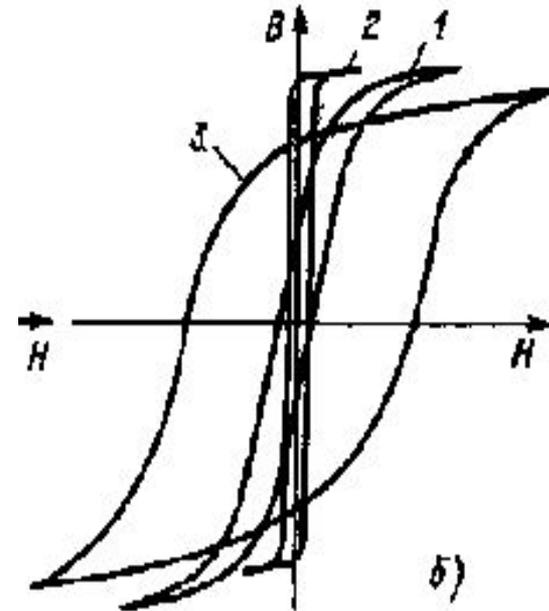
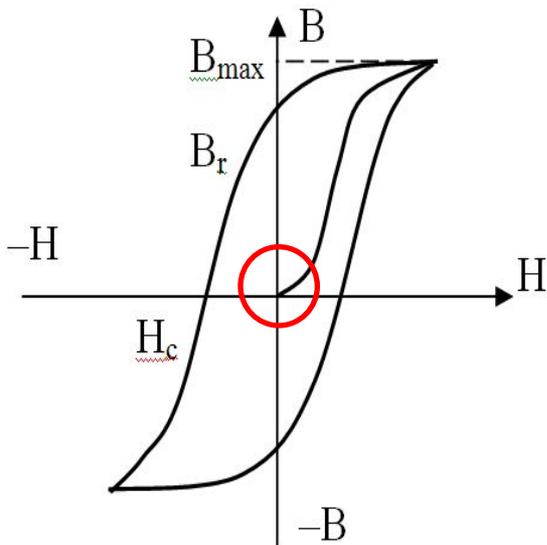
# Природа магнетизма

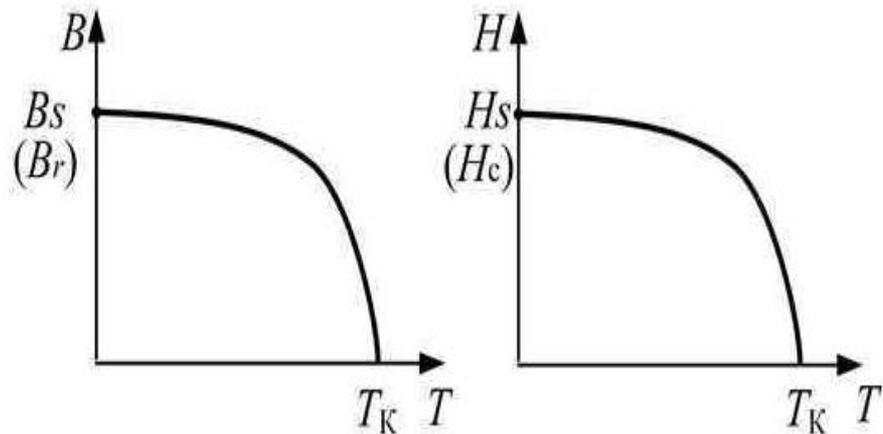
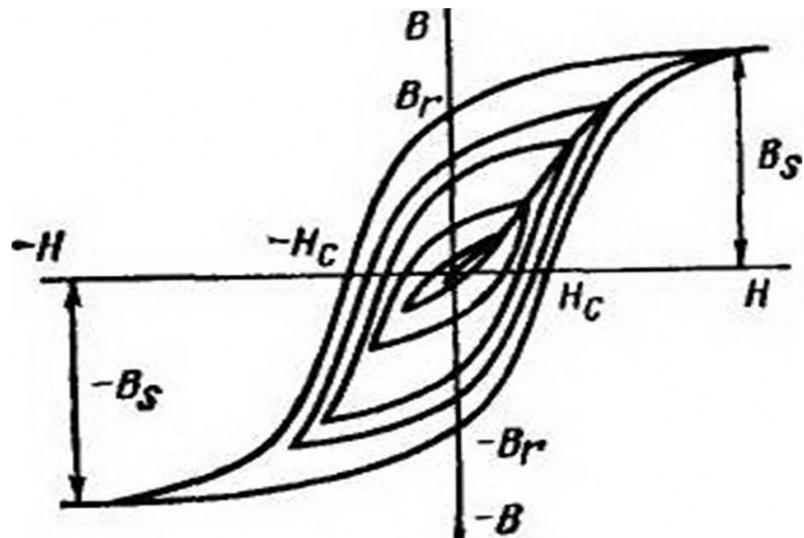
Чуть более аккуратно: в веществе образуются зоны сонаправленной намагниченности (ДОМЕНЫ) они достаточно мелкие и чередуются по направлению намагниченности в них. Это наиболее энергетически выгодное состояние.

Когда прикладывают поле домены, ориентированные по полю растут. Все превратилось в один домен – насыщение. Поле убрали – домены образовались снова.



# Классификация магнитных материалов





Влияние температуры на параметры петли гистерезиса

**1. Магнитомягкие материалы** - это материалы, которые имеют относительно небольшое значение коэрцитивной силы, не превышающее 4 кА/м и, в связи с этим, характеризующиеся узкой петлей гистерезиса.

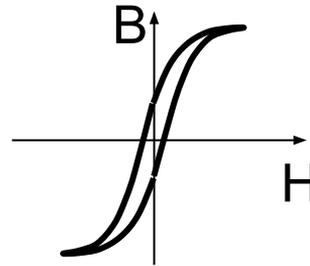
**2. СВЧ ферриты**

**3. Магнитотвердые материалы** ( постоянные магниты) характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы (более 4 кА/м) и обладают широкой петлей гистерезиса.

## Магнитомягкие материалы

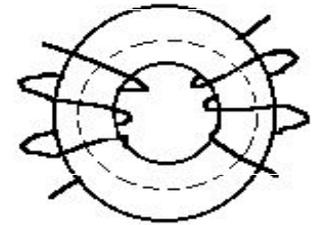
Сердечники катушек индуктивности и трансформаторов

$$U_2 = N_2 \frac{\Delta B}{\Delta t} S \leq U_{2m}$$



Узкая петля гистерезиса (малое  $H_c \ll 1 \text{ кА/м}$ , высокая магнитная проницаемость и начальная магнитная восприимчивость, малые тепловые потери в переменном магнитном поле).

- Высокая намагниченность насыщения
- При использовании материала в переменных магнитных полях необходимо, чтобы тепловые потери были минимальны. Электрическое сопротивление должно быть как можно более высоким. Желательно в этом случае использовать диэлектрики.



Площадь петли гистерезиса = энергия перемагничивания  $1 \text{ м}^3$  за 1 цикл. Поэтому потери на гистерезис прямо пропорциональны частоте

$$P_g = \eta \cdot f \cdot B_{max}^n \cdot V, \text{ Вт}$$

где  $\eta$  – коэффициент гистерезиса для данного материала;

$f$  – частота поля, Гц;

$B_{max}$  – максимальная индукция, Тл;

$V$  – объем образца,  $\text{м}^3$ ;

$n \approx 1,6 \dots 2$  – значение показателя степени;

$$L = \frac{\mu\mu_0 S N^2}{l}$$

Если материал проводящий, возникают токи Фуко.

для ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

$$P_e = \frac{1.64 \cdot h^2 \cdot f^2 \cdot (Bm)^2}{d\rho}$$

$h$  – толщина листа

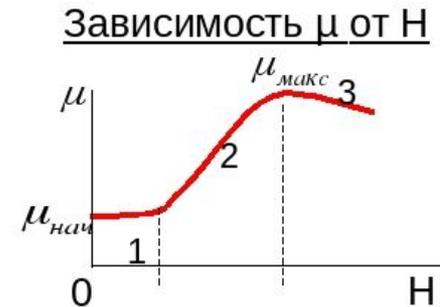
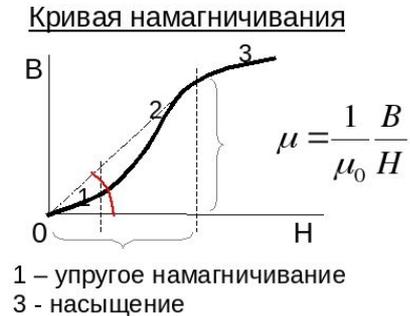
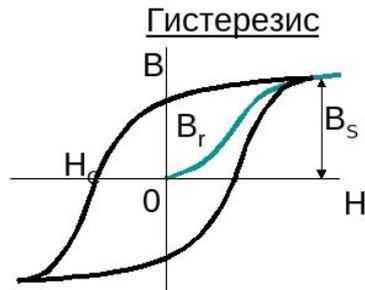
$d\rho$  – удельное электрическое сопротивление

Материал	Применение (параметры)
<b>Технически чистое железо</b> , железо-кобальтовые сплавы	Сердечники электромагнитов (максимальная $B_m$ до 2,4 Тл) Очень узкая петля гистерезиса необязательна
<b>Электротехнические стали</b> (легирована кремнием)	Сердечники трансформаторов (главное – высокая начальная $\mu$ и восприимчивость). Пластинчатая форма сердечника способствует тому, что наведенные электрические токи в сердечнике оказываются заметно меньше.
<b>Пермаллой</b> – сплавы железа с никелем. Другие элементы также входят в состав в меньшем количестве	Трансформаторы (там, где важно, чтобы тепловые потери были как можно меньше), в качестве магнитных экранов (необходимы минимальная $H_c = 0.3 \text{ A/m}$ , максимальная $\mu = 10^6$ ).
<b>Аморфные металлические сплавы</b> (Fe, Ni + B, C, Si для аморфизации) После добавления неметаллов производят быструю закалку расплава, и материал не успевает кристаллизоваться. Выпускаются как правило в виде тонких лент.	Трансформаторы. Поверхность ленты при изготовлении покрывается тонким слоем окисла или иного диэлектрика. Ленты свивают в кольцо. Чем тоньше лента, тем на более высокой частоте способен работать сердечник трансформатора.
<b>Магнитодиэлектрики</b> – композитные материалы, в которых обычно содержатся высокодисперсные металлы, распределенные в матрице полимеров или в другой немагнитной матрице. С одной стороны, сохраняется приемлемая магнитная проницаемость, с другой – электрическое сопротивление материала на макроуровне оказывается очень большим.	Используются как сердечники высокочастотных трансформаторов. Обладают мин. $H_c$ и макс. $\mu$ и $\rho$
<b>Ферриты</b> – чаще всего однофазные материалы, могут обладать большим $\rho$ . Такие магнитомягкие	Используются в ВЧ и СВЧ электронике. Используются как сердечники высокочастотных трансформаторов. Обладают мин. $H_c$ и макс. $\mu$ и $\rho$

# Основные параметры

$\mu_n$  (начальная магнитная проницаемость) - значение магнитной проницаемости по начальной или основной кривой намагничивания по индукции при стремлении напряженности магнитного поля к нулю, деленное на магнитную постоянную.

$\mu_{max}$  (максимальная магнитная проницаемость) - максимальное значение магнитной проницаемости как функции напряженности магнитного поля на основе намагничивания кривой по индукции.



$A_L$  (коэффициент индуктивности, нГн) - отношение индуктивности катушки к квадрату числа витков.

$B_r$  (остаточная магнитная индукция, Тл(Гс))

$H_c$  (коэрцитивная сила, А/м  $H_T$  (поле трогания, А/м (Э)) - значение напряженности магнитного поля, при котором магнитная индукция на восходящей ветви статической петли гистерезиса равна  $0,9 B_r$ .

$H_T/H_c$  (коэффициент квадратности)

$\alpha_{Hc}$  (температурный коэффициент коэрцитивной силы, %/°C) - относительное изменение коэрцитивной силы при изменении температуры на 1°C в заданном диапазоне температур.

$tg_{\delta\mu}$  (тангенс угла магнитных потерь) - отношение мнимой части к действительной части комплексной магнитной проницаемости.

$$\mu = \mu' + j\mu''$$

$$tg_{\delta\mu} = \frac{\mu''}{\mu'}$$

$$Q = \frac{1}{tg_{\delta\mu}}$$

$\alpha_{\text{гцн}}$  (относительный температурный коэффициент начальной магнитной проницаемости,  $1/^\circ\text{C}$ ) - отношение температурного коэффициента магнитной проницаемости к значению начальной магнитной проницаемости при нормальной температуре.

$P$  (удельные объемные магнитные потери,  $\text{кВт/м}^3, \text{мкВт/см}^3\text{Гц}$ ) - мощность, поглощаемая в единице объема магнитного материала и рассеиваемая в виде тепла при воздействии на материал меняющегося во времени магнитного поля.

$f_{\text{кр}}$  (частота критическая,  $\text{МГц}$ ) - частота, при которой тангенс угла магнитных потерь материала равен 0,1.

$\rho$  (удельное электрическое сопротивление,  $\text{Ом}\cdot\text{м}$ ) - величина, равная отношению модуля напряженности электрического поля к модулю плотности тока, скалярная для изотропного вещества и тензорная для анизотропного.

**$\theta$  (точка Кюри,  $^\circ\text{C}$ )** - критическая температура, выше которой ферромагнетик (ферримагнетик) становится парамагнетиком.

Примечание: Термины и определения приведены в соответствии с ГОСТ 19693-74 МАТЕРИАЛЫ МАГНИТНЫЕ Термины и определения.

# Измерение параметров магнитомягких материалов.

ГОСТ 12635—67

## МАТЕРИАЛЫ МАГНИТНОМЯГКИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ  
от 10 кГц до 1 МГц

Число витков подобрано так,  
чтобы баланс получился:

$$\mu' = \frac{L'_x D_{cp} 10^7}{4S\omega^2};$$

Надо знать  $\mu'$  заранее. Если неизвестно, то можно оценить индуктивность на измерителе L или по величине протекающего по ней переменного тока из формулы

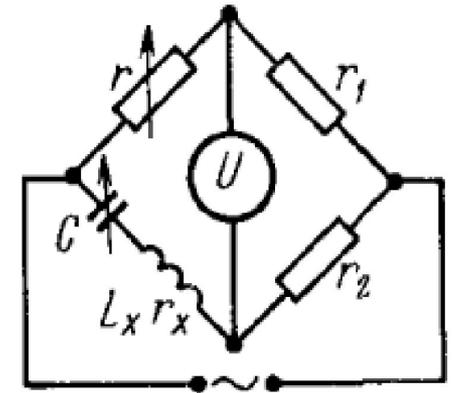
$$U = \omega LI$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\mu} = \frac{r_n}{\omega L_x} = \frac{r'_x - r'_0}{\omega L'_x},$$

Образец – кольцо с обмоткой.

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L_x D_{cp} \cdot 10^7}{4S\mu'}},$$

$$S = \frac{D_H - D_B}{2} h,$$



$$L_x = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad r_x = r \frac{r_2}{r_1}$$

Более современный способ, описанный в ГОСТе - резонансный подразумевает использование готового прибора- измерителя добротности катушек – Q метра.

$$\operatorname{tg} \delta_{\mu} = \frac{1}{Q_x} - \frac{r'_0}{\omega L'_x}$$



Сейчас на Заводе Магнетон используют прибор Keysight E4980A и формулы ГОСТа. Он показывает на заданной частоте и индуктивность и вещественную составляющую импеданса и сопротивление обмотки постоянному току.



ГОСТ предусматривает измерение поправок на увеличение потерь от вихревых токов и от увеличения амплитуды сигнала за счет гистерезиса, а также изменения магнитной проницаемости с температурой.

$$\rho_B = \frac{\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1}{f_2 - f_1} \quad \rho_r = \frac{\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1}{H_{m_2} - H_{m_1}} \quad \beta_1 = \frac{\mu'_2 - \mu'_1}{\mu'_1(t_2 - t_1)}$$

Для этого проводят измерение при разных частотах и разных полях и разных температурах. Зависимости потерь от частоты, поля и температуры предполагают линейной.

# Ферриты СВЧ

Для ферритов на СВЧ переменные поля  $\vec{b}$  и  $\vec{h}$ , действующие на фоне постоянного магнитного поля  $H$ , направленного вдоль оси  $z$  связаны тензором магнитной проницаемости

$$\vec{b} = \|\mu\| \cdot \vec{h} \quad \text{где } \|\mu\| = \mu_0 \begin{vmatrix} \mu' & -i\kappa & 0 \\ i\kappa & \mu' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} -$$

$$\text{Где, } \mu' = 1 + \frac{\omega_0 \cdot \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad \kappa = \frac{\omega \cdot \omega_m}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

на высоких частотах или при слабых магнитных полях  $\kappa \approx -\frac{\omega_m}{\omega}$

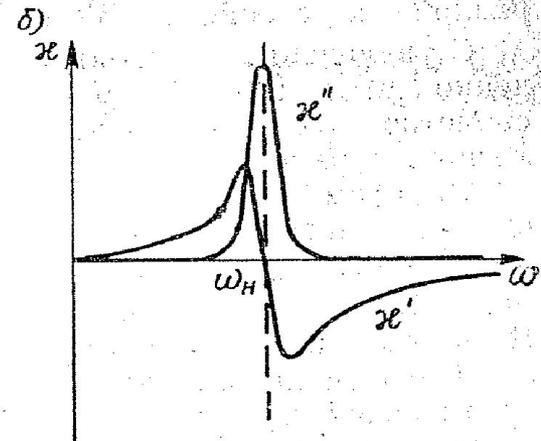
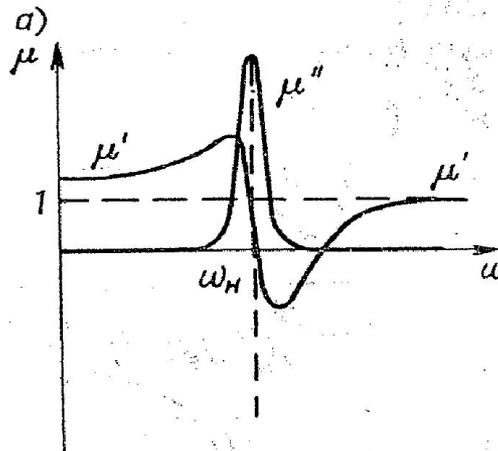
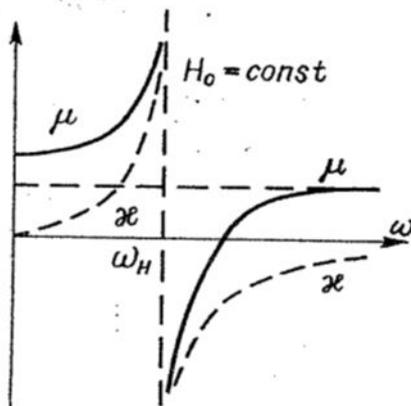
Здесь  $\omega$  - частота СВЧ поля, взаимодействующего с ферритом,

$\omega_0 = \frac{e}{m} \cdot \mu_0 \cdot H_0 = \gamma \cdot H_0$  - частота гироманнитного резонанса,  $\gamma = 2,8$  Гс/МГц

$\omega_m = \frac{e}{m} \cdot \mu_0 \cdot M_0$  - где  $M_0$  - техническая намагниченность феррита

( $e$  и  $m$  - заряд и масса электрона)

**Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках**  
**М.: Наука 1973. С.407**



## Параметры ферритов СВЧ

$4\pi M_s$  - Намагниченность насыщения (Гс)

$\Delta H$  - Ширина линии ФМР (Э)

$T_c$  - Температура Кюри (°C)

$\Delta H_k$  - Ширина линии резонанса спиновых волн (Э)

$\alpha_{M_s}$  - Температурный коэффициент намагниченности насыщения (%•°C<sup>-1</sup>)

$H_c$  - Коэрцитивная сила (Э)

$B_r$  - Остаточная намагниченность (Гс)

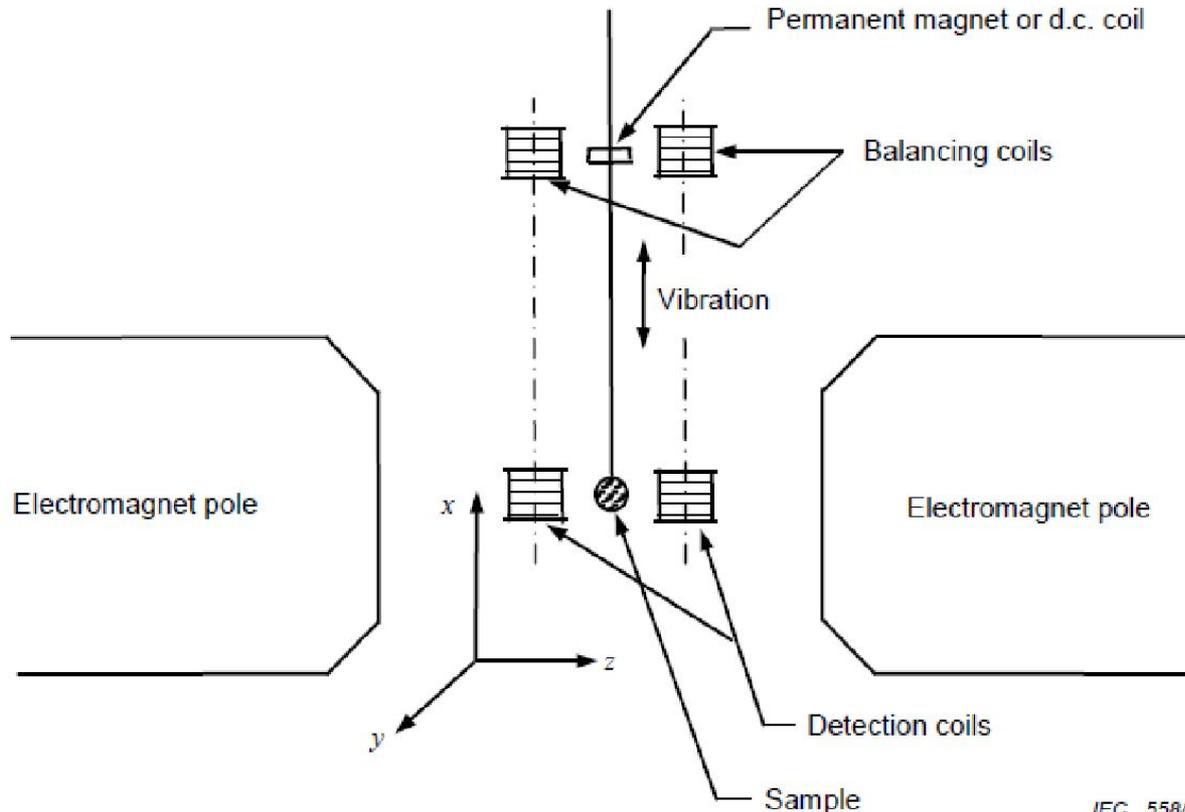
$B_m$  – Максимальная техническая намагниченность (Гс)  $< 4\pi M_s$

# Измерение параметров

$4\pi M_s$  измеряют на **сфере**, помещенной в **однородное магнитное поле**.

В сфере поле  $B$  однородно (и  $M$  тоже)

Намагниченная сфера диаметром 2-3 мм вибрирует в катушке, расположенной в поле постоянного электромагнита. Наведенное напряжение сравнивают с таким же для сферы из известного материала



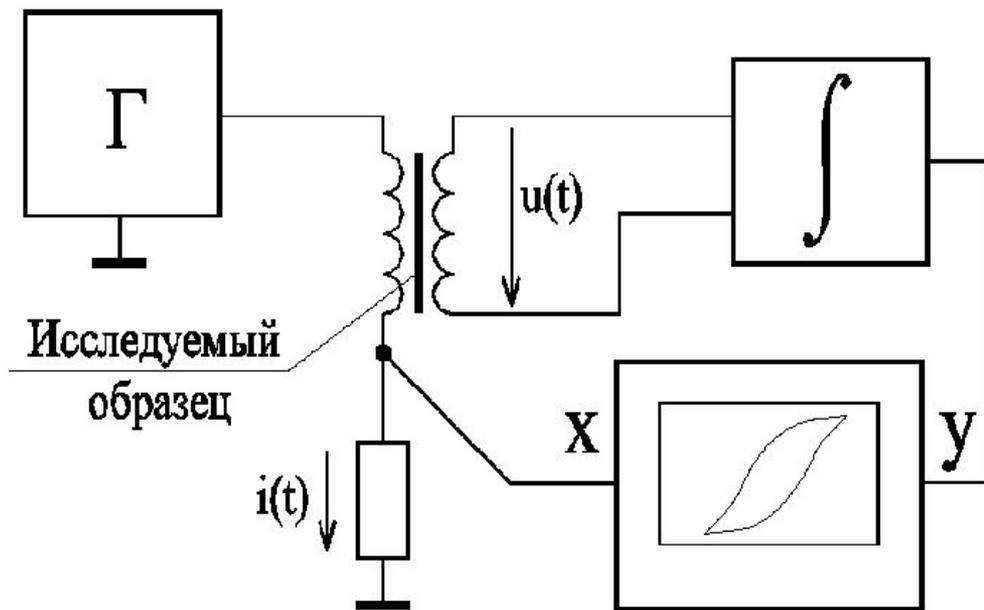
$$x = x_0 + \delta \sin \omega t$$

$$M_s = M_c \cdot \frac{E_s}{E_c} \cdot \frac{d_c^3}{d_s^3}$$

IEC 558/06

# Измерение параметров

Параметры петли гистерезиса можно измерять в динамическом режиме:  
Образец – ферритовое кольцо.

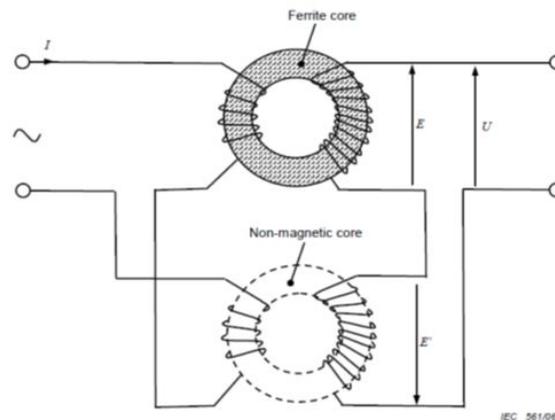


$$H \cdot l = N_1 \cdot i$$
$$u(t) = N_2 \cdot S \cdot dB/dt$$

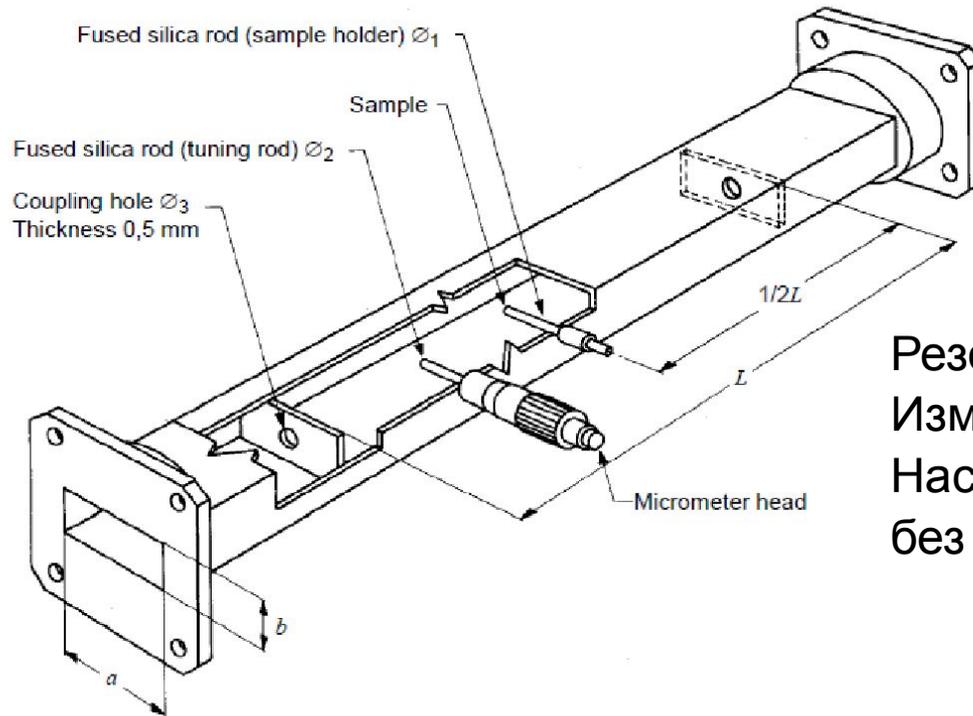
Сейчас можно применить цифровой осциллограф и численное интегрирование.

Частота – от 50 Гц. Ниже плохо – сигнал слабый.

Можно измерить  $M(H)$ . Тогда нужно второе кольцо такое-же, но немагнитное.



# Измерение ширины ФМР $\Delta H$



Резонатор в поле электромагнита  
Изменяют магнитное поле.  
Настраивают резонатор в резонанс  
без поля - потери  $\alpha_0$

В максимуме резонанса  $\alpha_r$  уровень  
 $\frac{1}{2}$

$$\alpha_{1/2} = \alpha_0 + 10 \lg 2 - 10 \lg \left( 10^{(\alpha_0 - \alpha_r)/10} + 1 \right)$$

Смотрят, на каком поле он был – вычисляют  $\Delta H$ .

**Измерение  $\Delta H_k$**  Проводят, помещая сферу в высокодобротный резонатор. Он питается СВЧ сигналом большой (известной/измеряемой мощности) Добротность резонатора известна и известно, какое поле создаётся в ферритовой сфере.

Измеряют и мощность на выходе резонатора.

Повышают мощность до тех пор пока не начнется резкое возрастание потерь. Этот уровень фиксируют и пересчитывают в  $\Delta H_k$

**Измерение  $T_c$  (температуры Кюри)** Проводят, измеряя индуктивность катушки, намотанной на кольцевой сердечник. С ростом температуры она падает. Параллельно делают такую-же на немагнитном сердечнике  $L_{nm}$ . Троят график  $L(T)$ . В области температур, в которой происходит сильное снижение индуктивности  $L_{nm}$  строят интерполяцию до

# Магнитотвердые материалы

Общие требования:

- Широкая петля гистерезиса, чему соответствует высокая коэрцитивная сила

$H_c > 10 \text{ кА/м}$ .

- Высокая остаточная намагниченность и, соответственно, высокая остаточная магнитная индукция  $B_r$ . Высокая остаточная намагниченность связана с высокой намагниченностью насыщения (спонтанной намагниченностью).

- Высокая магнитная энергия, определяется следующим образом:  $W_m = SBH \approx 4B_r \cdot H_c$  (площадь петли гистерезиса)

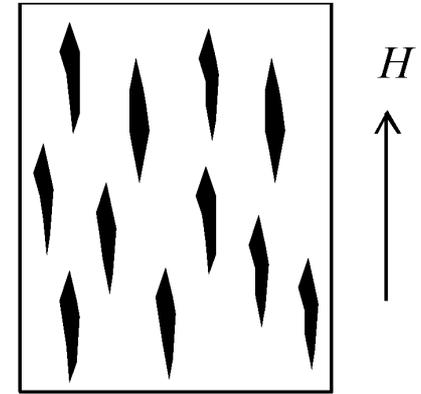


Рис. 3.24. Распределение пластинчатых выделений магнитной фазы под воздействием сильного магнитного поля

Достигается путем создания текстурированного состояния магнетика.

**Магнитная текстура** создается способом охлаждения высококоэрцитивного сплава из расплавленного состояния в сильном магнитном поле с напряженностью  $H=150...300 \text{ кА/м}$ . В результате достигается упорядоченность пластинчатых выделений сильномагнитной фазы (рис. 3.24). Этот метод эффективен, например, для сплавов, содержащих кобальт.

**Кристаллическая текстура** создается методом направленной кристаллизации расплава из магнитного материала, заливаемого в форму.

Материал	Применение (параметры)
Сплав алнико (Fe-Al-Ni-Co)	Коэрцитивная сила таких магнитов $H_c$ до 150 кА/м, $W_m = 80$ кДж/м <sup>3</sup> .
Сплавы РЗЭ-кобальт (пример: SmCo <sub>5</sub> ) «Самарий-кобальтовый магнит»	В магнитах $H_c$ до 1000 кА/м, $W_m = 250$ кДж/м <sup>3</sup> . Обладают высокой термостабильностью.
Сплав неодим-железо-бор (Nd-Fe-B, Fe <sub>14</sub> Nd <sub>2</sub> B)	В магнитах $H_c$ до 1600 кА/м $W_m = 450$ кДж/м <sup>3</sup> .
Сплав (пленки) кобальт-хром	$H_c$ до 150 кА/м Используется в магнитной записи (аудио и видеокассеты)
Ферриты (гексаферрит)	В магнитах $H_c$ до 300 кА/м, $W_m = 40$ кДж/м <sup>3</sup> . Магнитная запись до 150 – 400 кА/м. Чем более плотная запись, тем более высокая коэрцитивная должна быть. Магниты на основе этого материала термостабильны, и остаточная намагниченность может сохраняться до 200-250 Цельсия. Со временем такие магниты не размагничиваются. Устойчивы с коррозиям и механическим повреждениям.

Для Магнитотвердых постоянных магнитов снять петлю намагничивания  $B(H)$  не просто, т.к. они намагничиваются медленно меняющимися полями (они – металлы) .

Измеряют магнитный поток, создаваемый образцом.

$$\Phi = N \cdot B \cdot S$$

[Ф] – Вебер. 1 Вебер — это магнитный поток такой величины, что при убывании его до нуля, по сцепленной с ним проводящей цепи сопротивлением 1 Ом, пройдет заряд в 1 Кулон. Используют **баллистические гальванометры или веберметры.**

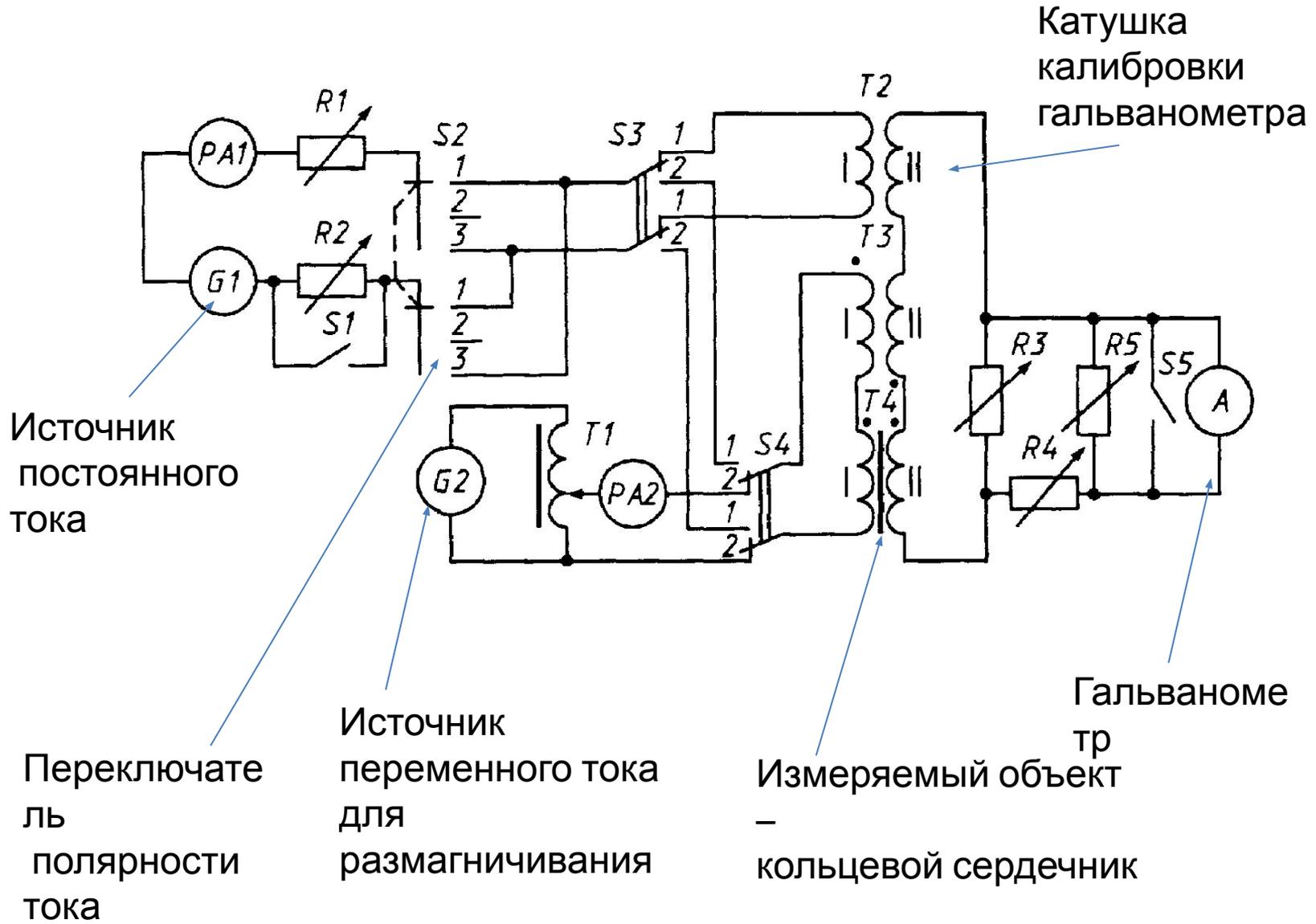
Измеряют изменение потока при переключении коммутацией (или изменении) тока или удалении катушки веберметра (гальванометра) от образца.

Похожим методом измеряют и петли гистерезиса металлических магнитомягких материалов

ГОСТ 12119.1-98. Сталь электротехническая

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ  
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СТАТИЧЕСКИХ  
МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ГОСТ 8.268–77



Источник  
постоянного  
тока

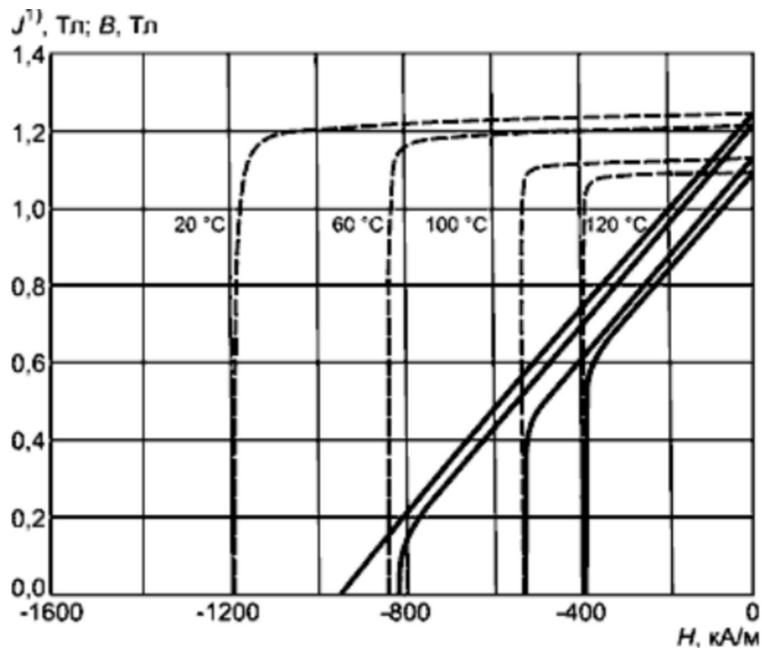
Переключате  
ль  
полярности  
тока

Источник  
переменного тока  
для  
размагничивания

Измеряемый объект  
-  
кольцевой сердечник

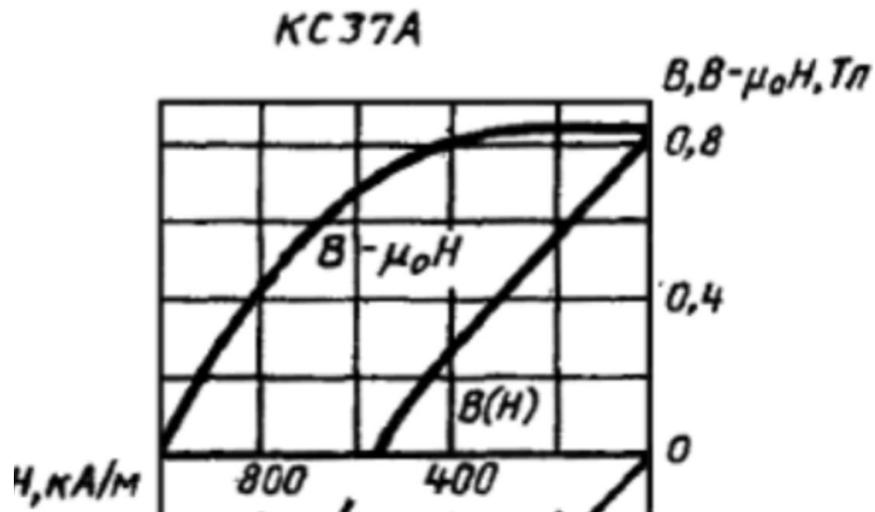
Катушка  
калибровки  
гальванометра

Гальваноме  
тр



ГОСТ Р 52956-2008

МАТЕРИАЛЫ МАГНИТОТВЕРДЫЕ  
СПЕЧЕННЫЕ НА ОСНОВЕ СПЛАВА  
НЕОДИМ-ЖЕЛЕЗО-БОР



ГОСТ 21559-76

МАТЕРИАЛЫ  
МАГНИТОТВЕРДЫЕ  
СПЕЧЕННЫЕ  
Марки