

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.1 Магнитомягкие сплавы

Магнитомягкие материалы традиционно делят на:

- электротехнические стали;
- прецизионные магнитомягкие сплавы;
- из-за особенностей получения и способов формирования магнитных свойств в особую группу выделяют аморфные и нанокристаллические магнитомягкие сплавы.

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.1 Магнитомягкие сплавы

#### 1.13.1.1 Железо и низкоуглеродистые стали

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°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.

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.1 Магнитомягкие сплавы

#### 1.13.1.2 Электротехнические стали

- В настоящее время наиболее распространенными материалами для изготовления магнитопроводов электрических машин и трансформаторов являются электротехнические стали. Эта группа материалов применяется преимущественно в трех видах изделий: 1) электрические машины (генераторы, электродвигатели); 2) трансформаторы (преимущественно силовые, работающие при низких частотах); 3) выключающие устройства (электромагнитные реле). Поэтому электротехнические стали в соответствии с тремя названными случаями подразделяют на динамные, трансформаторные и релейные стали. Традиционно они изготавливаются **на основе сплавов железа с кремнием** (до 6.5 % Si).

- Для динамных и трансформаторных сталей требуется высокое значение индукции насыщения и малые потери на перемагничивание. Различие применения этих сталей в том, что в магнитопроводах из анизотропных сталей направление магнитного потока неизменно, а изотропные стали используются в магнитопроводах, где магнитный поток либо вращается, либо охватывает все направления в плоскости листа. Релейные стали как правило представляют из себя особочистые низколегированные стали (основное требование – низкая коэрцитивная сила). Нелегированные динамные стали могут использоваться как релейные.

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.1 Магнитомягкие сплавы

#### 1.13.1.3 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.

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

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

## 1.14 Удельные электромагнитные потери на перемагничивание в электротехнической (трансформаторной) стали

- Несмотря на то, что КПД работы трансформаторов очень высок, по сравнению с другими установками, он никогда не будет равен единице, так как невозможно создать устройство, при работе которого количество отводимой от него энергии равнялось бы или превышало количество подводимой к нему энергии
- За один цикл перемагничивания ферромагнитного материала бесполезно затрачивается энергия, переходящая в тепло, пропорциональная площади динамического цикла гистерезиса. Затраты энергии за единицу времени (секунду), отнесенные к единице массы материала (килограмм, фунт), называются удельными магнитными потерями. Общепринято определять потери в Вт/кг (Вт/фунт) при фиксированных значениях частоты электромагнитного поля и магнитной индукции, создаваемой полем в магнитопроводе – например:  $P_{1.7/50} = 1.25$  Вт/кг, где значение 1.25 Вт/кг измерено в поле с индукцией 1.7 Тл при частоте поля 50 Гц.

- Полные потери на перемагничивание ( $P$ ) складываются из потерь на гистерезис ( $P_G$ ) и вихревые токи ( $P_B$ ). Последние, в свою очередь, можно разделить на потери, связанные с макровихревыми ( $P_{MB}$ ) и микровихревыми ( $P_{AB}$ ) токами:

$$P = P_G + P_B = P_G + (P_{MB} + P_{AB})$$

- Гистерезисная составляющая пропорциональна площади петли гистерезиса, полученной в режиме перемагничивания. Площадь цикла гистерезиса в свою очередь зависит от максимальной индукции ( $B_m$ ), коэрцитивной силы ( $H_c$ ), остаточной индукции ( $B_r$ ), которые определяются свойствами и структурой ферромагнетика (тип и чистота материала, наличие и вид дефектов кристаллического строения, размер кристаллитов ( $D$ ), наличие и степень совершенства кристаллографической текстуры).
- Гистерезисные потери могут быть рассчитаны по следующей формуле:

$$P_G = S f / \gamma.$$

где  $S$  – площадь статического цикла гистерезиса, [ТлА/м];  $\gamma$  – плотность материала, [кг/м<sup>3</sup>];  $f$  – частота переменного тока, [Гц].

Потери на гистерезис зависят от структурных факторов, в частности, от величины зерна  $D$  и текстуры, аналогично тому, как зависит от них «статическая» коэрцитивная сила  $H_c \sim D^{-1}$ .

- Вихретоковая составляющая существенно зависит от электросопротивления и, соответственно, от толщины ( $h$ ) и удельного сопротивления материала ( $\rho$ ), а также от частоты перемагничивания и ширины магнитных доменов ( $d$ ).
- Потери на макровихревые токи возникают в результате изменения общей намагниченности идеально однородного в магнитном отношении вещества. Эти потери равны:

$$P_{MB} = A_1 B_m^2 f^2 h^2 / (\gamma \rho)$$

где  $A_1$  – числовая константа.

- Составляющая потерь на вихревые токи  $P_{AB}$  представляет собой потери на вихревые токи, которые индуцируются внутри доменов в результате локальных изменений индукции при смещении границ. В случае модели плоскопараллельных доменов, которые разделены 180-градусными границами, совершающими синусоидальное движение в тонком листовом материале толщиной  $h$  ( $d \geq h$ ), получено следующее выражение для этого вида потерь (Прай и Бин), которое в явном виде дает связь потерь на вихревые токи с характеристиками доменной структуры (шириной доменов  $d$ ):

$$P_{AB} = A_2 B_m^2 f^2 d h / (\gamma \rho)$$

где  $A_2$  – числовая константа

## 1.14 Удельные электромагнитные потери на перемагничивание в электротехнической (трансформаторной) стали

Параметр	Гистерезисные потери $P_H$	Макровихревые потери ( $P_{MB}$ )	Микровихревые потери ( $P_{AB}$ )
Высокое содержание кремния	Увеличиваются	Снижаются	-
Толщина полосы	Снижаются	Увеличиваются	-
Шероховатость поверхности	Увеличиваются	не влияет	-
Низкое содержание примесей	Снижаются	не влияет	не влияет
Кристаллографическая текстура	Увеличиваются	не влияет	-
Крупный размер зерна	Снижаются	не влияет	Увеличиваются
Механические напряжения	Увеличиваются	не влияет	Увеличиваются
Повышение температуры	-	Снижаются	-
Пиковая индукция	$\sim B^{1.5}-B^2$	$\sim B^2$	$\sim B^{1.5}$
Частота	$\sim f$	$\sim f^2$	$\sim f^{1.5}$

## 1.14 Потери при высоких частотах

Для высокочастотных машин основное значение имеют удельные магнитные потери, т.к. нагрев участков магнитопровода, перемагничиванием с высокой частотой  $f$ , вызывает необходимость ограничения амплитуды  $B$ . Повышение частоты приводит к снижению  $\mu$ , и увеличению потерь. Резкое снижение проницаемости начинается с частоты  $f$ , при которой глубина проникновения магнитного поля становится меньше половины толщины листа. Удельные магнитные потери возрастают главным образом за счет потерь от вихревых токов, т.е.  $\sim f^2$ . Следовательно необходимо максимально снижать толщину листа.

Сталь для высоких частот должна иметь:

1. Высокое удельное электросопротивление;
2. Минимальная толщина для каждой частоты;
3. Минимальный размер зерна  $D$ ;
4. Высокая доля кубической компоненты текстуры.

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.1 Магнитомягкие сплавы

**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.

## 1.13 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, 80НХС, 81НМА, 83НФ	$\mu_a \approx (2...20) \cdot 10^4$ , $\mu_{\max} \approx 10^5...10^6$ , $\rho \approx 0,55...0,80$ мкОм·м, $B_s \approx 0,5...0,8$ Тл	Сердечники малогабаритных трансформаторов, дросселей, реле, головок магнитной записи, феррозондов, магнитные экраны
С высокой $\mu$ и повышенным $\rho$	Fe–Ni	50НХС	$\mu_a \approx (1,5...6) \cdot 10^3$ , $\mu_{\max} \approx (1,5...10) \cdot 10^4$ , $\rho \approx 0,9...1$ мкОм·м, $B_s \approx 1...1,4$ Тл	Сердечники дросселей, импульсных трансформаторов
С высокой $\mu$ и повышенной $B_s$	Fe–Ni	45Н, 50Н	$\mu_a \approx (2...5) \cdot 10^3$ , $\mu_{\max} \approx (2...10) \cdot 10^4$ , $B_s \approx 1,3...1,5$ Тл	Сердечники малогабаритных трансформаторов, дросселей, реле
С прямоугольной петлей гистерезиса	Fe–Ni, Fe–Ni–Co	50НП, 68НМП, 79НМП, 77НМДП 34НКМП, 35НКХСП, 40НКМП	$B_r/B_s \approx 0,85...0,98$ , $\mu_{\max} \approx (4...120) \cdot 10^4$ , $B_s \leq 1,5$ Тл	Сердечники магнитных усилителей, бесконтактных реле, контактных выпрямителей, дросселей модуляторов, импульсных трансформаторов, магнитных элементов ЭВМ
С высокой $B_s$	Fe–Co	27КХ, 49КФ, 49К2Ф, 49К2ФА	$B_s \leq 2,4$ Тл, $T_c \approx 1000$ °С	Сердечники и полюсные наконечники магнитов, роторов и статоров электрических машин, малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, магнитных усилителей

## 1.13 Классификация прецизионных магнитомягких сплавов

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

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.2 Магнитотвердые материалы

Применение:

1. Изготовление постоянных магнитов;
2. 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 ( $H_c > 4000$  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»  $(BH)_{\max} > 10^3$  Дж/м<sup>3</sup>.

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

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

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.2 Магнитотвердые материалы

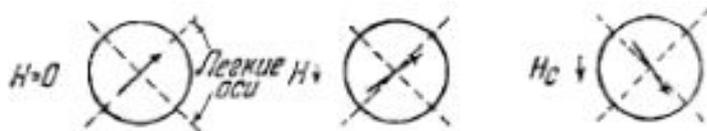
В принципах создания магнитотвердых материалов лежат:

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*

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.2 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 (**викаллои**) 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.

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.2 Магнитотвердые материалы

**Пример 2.** На принципе однодоменности. Альнико.

Сплавы на основе Fe-Ni-Al и Fe-Ni-Al-Co с добавкой 2-4 % Cu. Иногда их называют сплавами типа «альнико». Сплавы этой системы подвергают термомагнитной обработке (ТМО), которая состоит из нагрева до 1280–1300°C, выдержки при этой температуре для получения однофазного состояния, быстрого охлаждения до 900°C с последующим медленным охлаждением в магнитном поле с  $H_c = 160-280$  кА/м. Затем проводится отпуск при 560–630 °C, длительность которого определяется маркой сплава.

В процессе охлаждения при 900–650 °C в магнитном поле анизотропные по форме выделившиеся частицы фазы с высоким магнитным насыщением располагаются своей длинной осью в направлении, параллельном вектору напряженности магнитного поля (анизотропия формы – упорядочение по форме).

Распад идет по типу спинодального на слабый ферромагнетик  $\alpha$  и сильный ферромагнетик  $\alpha'$ .  $\alpha'$  – выделяется по направлению  $\langle 100 \rangle$  в виде однодоменных частиц  $\sim 10$  нм. Термомагнитной обработкой добиваются при отжиге (распаде) в магнитном поле выделения  $\alpha'$  фазы вдоль определенного направления  $[100]_\alpha$  с подавлением распада в других направлениях, создавая также кристаллографическую анизотропию.

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

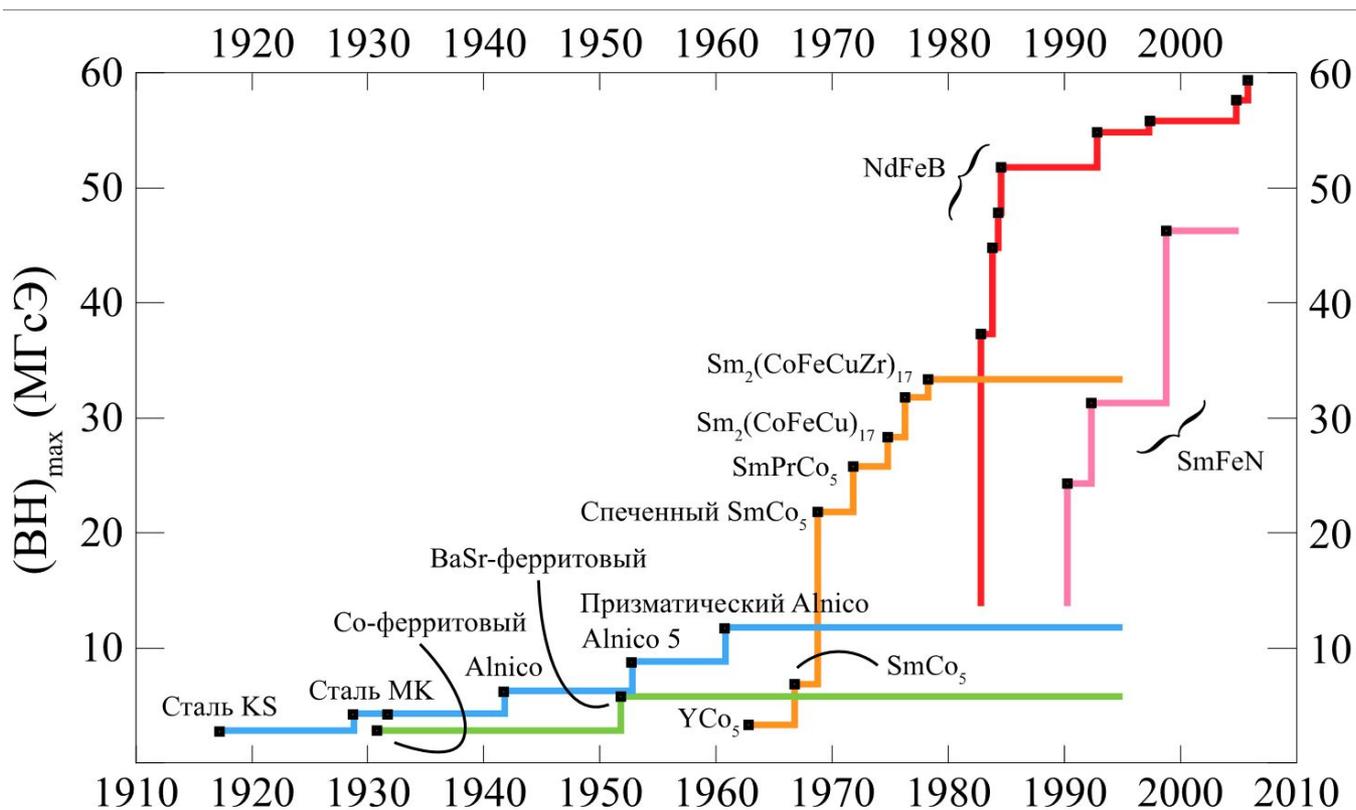
### 1.13.2 Магнитотвердые материалы

**Пример 3.** Самыми высокоэрцитивными являются материалы на основе R-Co. Вместо R может быть La...Sm. Принцип совмещает и затрудненность смещения границ доменов за счет создания включений и вращение намагниченности в однодоменных частицах  $\text{SmCo}_5$ . Частицы намагничиваются вдоль  $[0001]$ .  $H_c \sim 1200000$  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  $1370^\circ\text{C}$ .

## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.2 Магнитотвердые материалы



## 1.13 Принципы создания магнитных материалов

### 1.13.3 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!**