

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

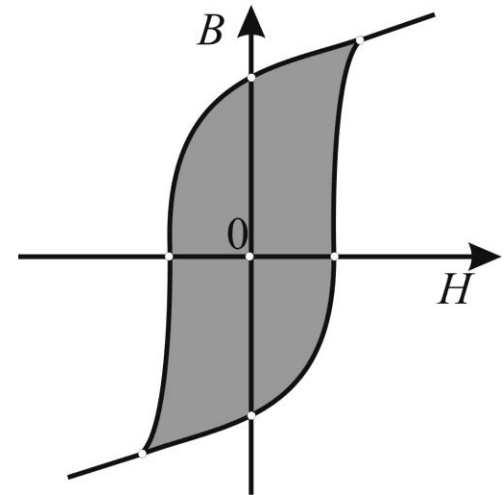
Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы

- Магнитомягкие материалы имеют высокое значение $\mu_{\text{нач}}$, способны намагничиваться до насыщения даже в слабых полях, т. е. обладают малой величиной H_c и имеют малые потери p при перемагничивании вдоль направления магнитопроводов.
- Магнитомягкие материалы используются в основном для изготовления магнитопроводов переменного магнитного поля. Применяются в электроэнергетике, электромашино- и моторостроении, в электро- и радиотехнической промышленности, измерительной и вычислительной технике, системах автоматики и телемеханики.
- Магнитомягкие материалы: **металлические** – ферромагнитное чистое железо, низкоуглеродистые электротехнические стали, магнитомягкие сплавы на железной и железоникелевой основе, в том числе аморфные металлические сплавы; магнитомягкие **ферриты** – комплексные оксиды переходных металлов, содержащие группу Fe_2O_3 ; **магнитодиэлектрики** – композиты на основе порошка магнитомягкого ферро- или ферримагнетика в диэлектрической матрице.

1. Материалы для работы в широком диапазоне изменения магнитной индукции

- Назначение: машины постоянного и переменного тока; силовые трансформаторы; силовая коммутирующая аппаратура.
- Виды материалов: технически чистое железо, электротехнические стали, магнитомягкие сплавы.
- Высокие значения свойств: B_s , ρ , $\mu_{\max}$.
- Низкие значения свойств: H_c , ρ .



Область
применения

1.1. Требования к материалам

- Требования к материалам:
 - хорошая магнитная связь между элементами устройств;
 - значительный магнитный поток при минимальном использовании магнитного материала;
 - минимальные потери на перемагничивание.
- Приведенные выше требования выполняются:
 - выбором рабочей точки, соответствующей максимальной магнитной проницаемости $\mu_{\max}$;
 - использованием материалов с большой индукцией насыщения B_s , основным компонентом которых является железо;
 - выбором материалов с соответствующим комплексом значений различных магнитных свойств.

1.2. Чистое железо

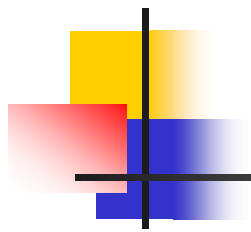
- **Технически чистым** называют железо, в котором суммарное содержание примесей – до 0,8÷0,1 %, в том числе углерода – до 0,05 %. Железо имеет малое удельное электрическое сопротивление, обладает повышенными потерями на вихревые токи, в связи с чем применение его ограничено: в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока (полюсные наконечники, магнитопроводы реле). Технически чистое железо – главный компонент большинства магнитных материалов.
- В зависимости от способа получения **особо чистое железо** называется **карбонильным** или **электролитическим**. Карбонильное железо получают при термическом разложении пентакарбонила железа $\text{Fe}(\text{CO})_5$ и рафинируют в токе водорода. Электролитическое железо изготавливают электролитическим рафинированием в расплавленных солях и поставляют в виде порошка (ПЖЭ-1 и ПЖЭ-2) или кусков (ЖЭ-МП). Чистое железо марок 005ЖР и 008ЖР получают из продуктов прямого восстановления руд.

1.3. Сталь электротехническая нелегированная



- Электротехническая нелегированная сталь с нормированными свойствами в постоянных полях используется для изготовления магнитопроводов всех видов и самых сложных форм: детали реле, сердечники, полюсные наконечники электромагнитов, элементы магнитоэлектрических, индукционных и электромагнитных приборов, экраны, телефонные мембраны, магнитопроводы двигателей переменного и постоянного тока малой и средней мощности и т. д.
- Основной вид термической обработки – высокотемпературный отжиг ($> 950\text{ C}$).
- Электротехническая нелегированная сталь подразделяется на **сортовую** и **тонколистовую**. У тонколистовой стали магнитные характеристики несколько выше.

1.3.1. Маркировка электротехнической нелегированной стали



■ Электротехническая нелегированная сталь

маркируется цифрами: *первая* – класс по виду обработки давлением (1 – горячекатаная и кованая, 2 – холоднокатаная и калиброванная); *вторая* – тип по содержанию кремния (0 – нелегированная, с содержанием Si до 0,3%; 1 – то же, но с заданным коэффициентом старения); *третья* – группа основной нормируемости (например, 8 – коэрцитивная сила); *четвертая и пятая* – значение нормируемой характеристики (например, коэрцитивной силы, в А/м). Марки: например, 10864, 20864, 11880, 10895, 20848, 21832.

1.4. Электротехническая кремнистая сталь

- Растворение кремния в α -Fe вызывает уменьшение обменного взаимодействия, следовательно, T_C и M_s уменьшаются.
- Легирование кремнием вызывает:
 - уменьшение магнитной анизотропии и магнитострикции, увеличение размеров зерна и, следовательно, уменьшение H_c ;
 - увеличение ρ и снижение потерь на вихревые токи;
 - некоторое снижение B_s ;
 - возрастание B в слабых и средних полях вследствие большой магнитной мягкости материала.
- Применение: изготовление двигателей и генераторов всех типов, дросселей и трансформаторов, электромеханизмов и приборов, работающих как на постоянном, так и на переменном токе различной частоты. Разнообразные технические требования, предъявляемые к электротехническим сталям, удовлетворяются изменением их химического состава, толщины листов или ленты и применением специальных технологических процессов изготовления и термической обработки.

1.4.1. Маркировка электротехнической кремнистой стали

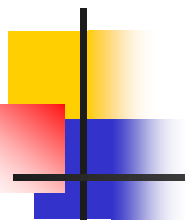
■ Электротехническая кремнистая сталь маркируется

цифрами: **первая** – по структурному состоянию (1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой); **вторая** – по содержанию кремния ($0 - \text{Si} \leq 0,4 \%$; $1 - 0,4 \% < \text{Si} \leq 0,8 \%$; $2 - 0,8 \% < \text{Si} \leq 1,8 \%$; $3 - 1,8 \% < \text{Si} \leq 2,8 \%$; $4 - 2,8 \% < \text{Si} \leq 3,8 \%$; $5 - 3,8 \% < \text{Si} \leq 4,8 \%$); **третья** – по основной нормируемой характеристике (0 – удельные потери при магнитной индукции, равной 1,7 Тл и частоте 50 Гц; 1 – то же при 1,5 Тл и частоте 50 Гц; 2 – то же при 1 Тл и частоте 400 Гц; 4 – удельные потери при 0,5 Тл и 3000 Гц; 6 – магнитная индукция в слабых полях при напряженности магнитного поля 0,4 А/м; 7 – то же при напряженности 10 А/м); **четвертая** – порядковый номер типа стали (первые три цифры). Примеры марок: **горячекатаная изотропная** – 1211, 1311, 1411, 1511 и др., **холоднокатаная изотропная** – 2011, 2111, 1211, 2311, 2411 и др.

1.5. Магнитомягкие сплавы

- Сплавы Fe с Ni, с Co и с Ni и Co обладают при определенных составах исключительно высокими магнитными свойствами, недостижимыми в других сплавах. Эти свойства еще больше повышаются при дополнительном легировании такими элементами, как Mo, Cr, Si, Cu, V и Ti. Высокие магнитные свойства этих сплавов обусловлены тем, что при определенных химических составах достигаются минимальные значения константы магнитной анизотропии K и константы магнито-стрикции λ_s и, следовательно, максимальное значение μ .
- **По магнитным свойствам сплавы делятся на три класса:** I – с нормальными магнитными свойствами, II – с повышенными, III – с высокими.
- Необходимо учитывать, что стоимость магнитомягких сплавов выше, чем электротехнических сталей.

1.5.1. Маркировка магнитомягких сплавов

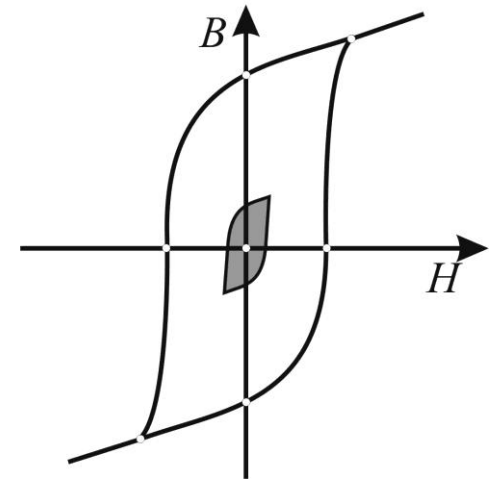


- **Марки сплавов** состоят из двузначного числа, обозначающего (в %) среднее содержание элемента, входящего в основу сплава (Ni, Co, Cr, кроме Fe), и буквенных обозначений элементов (табл. для черных металлов). Буква П в конце означает, что в результате особой технологии и режима окончательной термической обработки сплав обладает прямоугольной петлей гистерезиса. Буква А означает суженные пределы химического состава (более точный состав); другие обозначения относятся к нормированию процесса выплавки: ВИ – вакуумно-индукционный; ЭЛ – электронно-лучевой; П – плазменный; Ш – электрошлаковый; ВД – вакуумно-дуговой.

2. Материалы для работы в слабых полях



- Назначение: аппаратура приема-передачи информации; малогабаритные трансформаторы и дроссели, дефектоскопы, магнитные экраны.
- Виды материалов: электротехнические стали, магнитомягкие сплавы, ферриты, магнитодиэлектрики.
- Высокие значения свойств: ρ , $\mu_{\text{нач}}$.
- Низкие значения свойств: H_c , ρ .



Область
применения

2.1. Требования к материалам

- Требования к материалам:
 - малые потери на гистерезис и вихревые токи.
- Приведенные выше требования выполняются:
 - наличием узкой петли гистерезиса;
 - большой крутизной зависимости $B(H)$ в слабых магнитных полях;
 - высоким значением $\mu_{нач}$;
 - минимальными константами магнитострикции и анизотропии.

2.3. Электротехнические стали и пермаллои

- **Электротехнические стали:** горячекатаные стали марок 1561, 1562, работающие в звуковом диапазоне частот с амплитудой индукции $10^{-4} \div 10^{-3}$ Тл.
- **Высоконикелевые пермаллои** – железоникелевые сплавы, характеризующиеся высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой и низкими потерями при перемагничивании (72НМДХ, 76НХД, 77НВ, 77НМД, 80НМ, 79НМ, 80НХС, 81НМА, 83НФ).
- Магнитомягкие сплавы на основе Fe, Ni и Co с низкой остаточной индукцией и постоянной магнитной проницаемостью после термической обработки в поперечном магнитном поле имеют **линейный участок кривой намагничивания** в широком интервале магнитной индукции ($\mu_{\max} / \mu_{\text{нач}} = 1,15 \div 1,20$) и применяются для изготовления аппаратуры связи, измерительных трансформаторов.

2.4. Ферриты

- Материалы, работающие при очень высоких частотах, должны обладать большим ρ (для уменьшения потерь на вихревые токи) и максимальной скоростью установления намагниченности. Таким требованиям отвечают **ферромагнетики**, к которым в первую очередь относятся **ферриты**. Их $\rho = 10^{-5} \div 10^8$ Ом·м и сильно зависит от состава и структуры.
- **Магнитомягкие ферриты** представляют собой в основном поликристаллические материалы. Наибольшее распространение получили **марганцево-цинковые ферриты** (твердые растворы MnFe_2O_4 и ZnFe_2O_4) и **никель-цинковые ферриты** (твердые растворы NiFe_2O_4 и ZnFe_2O_4). Разнообразие свойств этих ферритов определяется главным образом соотношением основных компонентов, легирующими добавками (Co, Li, Ti, Ca) и режимами синтеза.
- Каждая марка магнитомягких ферритов обладает **критической частотой** – верхней частотной границей применения, начиная с которой резко возрастают потери и снижается μ ввиду инерционности процессов намагничивания.

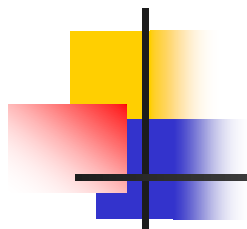
2.4.1. Маркировка ферритов

- По своим электрическим свойствам ферриты являются полупроводниками. Их проводимость увеличивается с ростом температуры, эффективная проводимость растет с частотой.
- По механическим свойствам поликристаллические ферриты подобны керамике и обладают высокой твердостью и хрупкостью.
- Общий недостаток ферритов – сильная зависимость магнитной проницаемости μ от температуры.
- Маркировка: в марке феррита число означает среднее значение $\mu_{\text{нач}}$; следующая за ним буква соответствует назначению ферритов (Н – низкочастотный или общего применения; В (ВЧ) – высокочастотный); вторая буква соответствует: Н – никель-цинковым ферритам; М – марганцево-цинковым ферритам.
- Примеры: 2000НН, 400НН, 100НН, 100ВЧ, 6000НМ, 3000НМ, 1500НМ, 1000НМ, 700НМ

2.5. Магнитодиэлектрики

- **Магнитодиэлектрики** – материалы, состоящие из ферро- или ферромагнитных частиц размерами от 1 до 100 мкм, разделенных изолирующим веществом (жидкое стекло, синтетические смолы). Из-за внутреннего размагничивания частиц уменьшаются потери на вихревые токи, слабо изменяется проницаемость в магнитных полях до 2000 А/м, обеспечиваются высокая стойкость к подмагничивающим полям, хорошая стабильность во времени. Электромагнитные свойства магнитодиэлектриков сохраняются при механических нагрузках до полного их разрушения.
- Выпускаются магнитодиэлектрики, в которых наполнителями являются: карбонильное железо (Р-10, Р-20, Р-100, З-100Ф, Пс), **альсифер** – тройной сплав Al, Si, Fe (ТЧ-90, ТЧ-60, ТЧК-55, ВЧ-32, ВЧ-22, ВЧК-22), пермаллои (П-250, П-160, П-140, П-100, П-60, П-20, ПК-20), ферритовые порошки (НМ-5, ВН-20, ВН-60, ВН-220).
- Недостаток магнитодиэлектриков – поглощение влаги, что приводит к изменению их электромагнитных параметров. При эксплуатации в условиях повышенной влажности их необходимо герметизировать.

2.5.1. Маркировка магнитодиэлектриков

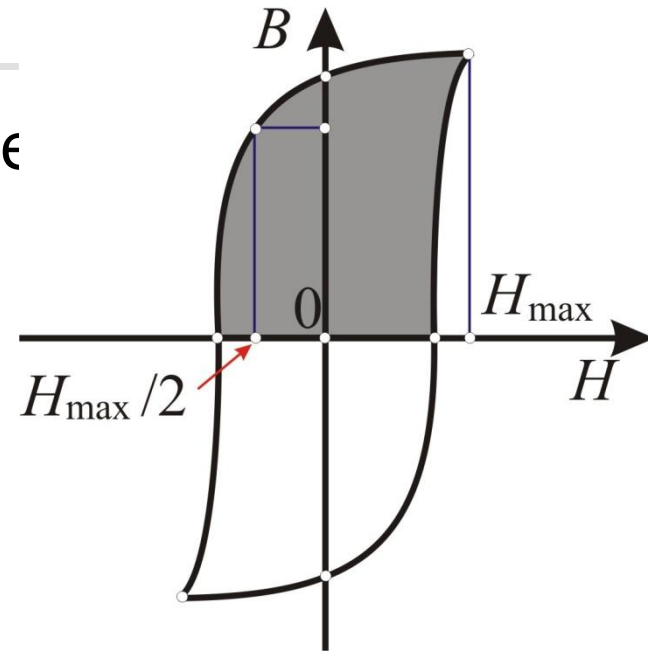


- В наименовании марок магнитодиэлектриков: **на основе карбонильных порошков** число означает максимальную частоту (в МГц), на которой используется соответствующий магнитодиэлектрик; **на основе альсифера** – числа означают магнитную проницаемость, а буквы: ТЧ – тональная частота, ВЧ – высокая частота, К – компенсированный (пониженный) TK_{μ} ; **на основе пермаллоя** – числа указывают на значение $\mu_{нач}$, буквы: П – пермаллой; **на основе ферритов** – буквы используются аналогично маркировке ферритов, а числа означают максимальную рабочую частоту (в МГц).

3. Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса



- Назначение: магнитные запоминающие устройства, магнитные усилители, бесконтактные реле, коммутационные дроссели.
- Виды материалов: магнитомягкие сплавы, ферриты.
- Высокие значения свойств: $B_{\max}$, B_r , ρ , R_s , α_n , $\mu_{\max}$.
- Низкие значения свойств: H_c , $\tau_s = 10\mu B_{\max} \delta^2 / \rho(H_{\max} - H_c)$ – время переключения; δ – толщина материала.



Область
применения

3.1. Требования к материалам

- Требования к материалам:
 - надежность и достоверность записи и воспроизведения информации;
 - минимальное время переключения;
 - большой коэффициент усиления.
- Приведенные выше требования выполняются:
 - наличием узкой петли гистерезиса;
 - большого коэффициента прямоугольности α_{Π} ;
 - большого коэффициента квадратичности R_s ;
 - высокой магнитной проницаемости μ ;
 - высокого электросопротивления ρ .

3.1.1. Требования к магнитным материалам

- Коммутационной аппаратуры:
 - большая остаточная магнитная индукция B_r ;
 - крутая кривая от $+B_r$ к $-B_{\max}$ для обеспечения значительной скорости изменения индукции;
 - малые значения H_c и $H_{\max} - H_c$.
- Бесконтактных реле и запоминающих устройств:
 - большой коэффициент прямоугольности α_n ;
 - большое приращение индукции при перемагничивании;
 - минимальное время переключения τ_s .
- Магнитных усилителей:
 - коэффициентом прямоугольности $\alpha_n \approx 1$;
 - крутым спадом петли магнитного гистерезиса.

3.2. Магнитомягкие сплавы на основе Fe, Ni, Co

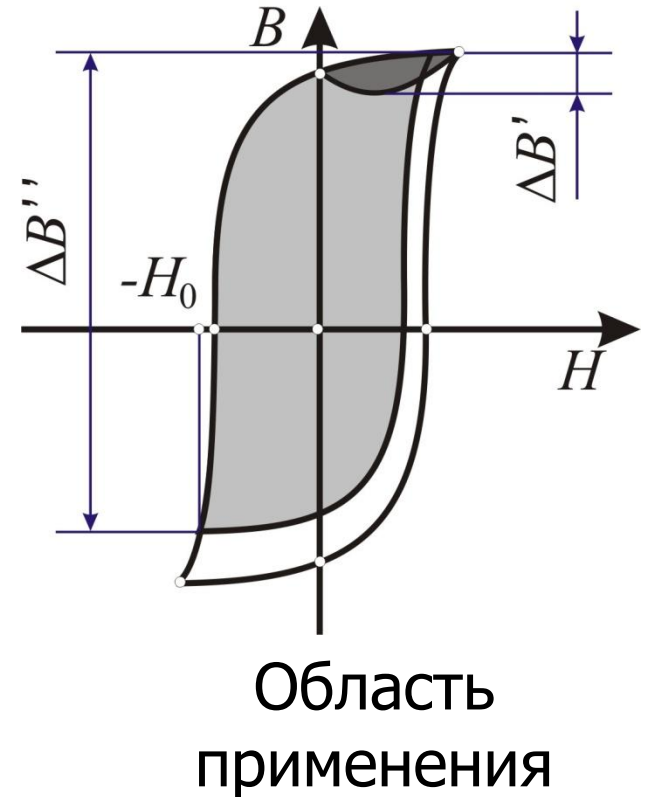
- Пермаллои (50НП, 47НМП, 82НМП-ВИ, 79НМ) с кристаллографической кубической текстурой, образующейся в результате особой технологии прокатки при последующей термической обработке. Такая текстура обеспечивает высокие магнитные свойства в двух направлениях в плоскости листа или ленты (вдоль и поперек направления прокатки).
- Сплавы (65НП, 68НМП, 37НКДП, 34НКМП, 40НКМПЛ) – магнито-текстурованные, с $\alpha_n = 0,85 \div 0,98$. При термической обработке в продольном магнитном поле в этих сплавах возникает индуцированная одноосная анизотропия, которая создает при намагничивании прямоугольную петлю гистерезиса. Эти сплавы обладают повышенной температурной стабильностью к воздействию радиации.
- Исключительно высокие магнитные свойства сплавов после отжига очень чувствительны к воздействию механических напряжений и деформаций. Поэтому для защиты от случайных и конструктивно неизбежных механических воздействий необходимо применение защитных каркасов и амортизаторов.

3.3. Ферриты

- Наибольшее распространение получили ферриты на основе системы $\text{MgO-MnO-Fe}_2\text{O}_3$ (т.е. на основе твердых растворов MgFe_2O_4 и MnFe_2O_4).
- Высокое удельное электросопротивление ферритов обеспечивает, ввиду отсутствия вихревых токов, малое время переключения и делает возможным изготовление деталей в виде монолита.
- **Марки** ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса обозначаются в зависимости от наличия или отсутствия в феррите свойств базового состава по-разному. Обозначение марок базового состава состоит из трех цифр и буквы П, например: 100П, 101П, 300П и др. Первая цифра указывает на порядковый номер базового состава, а две последующие (начиная с 00) – порядковый номер модификации базового состава.
- **Обозначение других марок** ферритов состоит из числа (может быть дробное), указывающего значение коэрцитивной силы в эрстедах ($1\text{Э} = 79,5775 \text{ А/м}$), характерное для этой марки феррита, и букв ВТ, например: 0,3ВТ; 2,1ВТ; 3ВТ и др.

4. Материалы для магнитопроводов релейных и импульсных устройств

- Назначение: импульсные трансформаторы, реле, коммутационная аппаратура .
- Виды материалов: магнитомягкие сплавы, ферриты.
- Высокие значения свойств: $B_{\max}$, ρ , $\mu_{\text{и}} = (B_{\max} - B_r) / \mu_0 H_{\max}$ – импульсная относительная магнитная проницаемость, B (при малых H) .
- Низкие значения свойств: B_r , τ_s



4.1. Требования к материалам

- Требования к материалам импульсных устройств:
 - большая величина относительной импульсной магнитной проницаемости $\mu_{\text{и}}$.
- Приведенные выше требования выполняются:
 - высокой индукцией насыщения и малой остаточной индукцией используемых материалов.
- Требования к материалам релейных устройств:
 - надежность срабатывания и отпускания;
 - быстродействие.
- Приведенные выше требования выполняются:
 - для обеспечения надежности срабатывания материалы должны иметь высокую намагниченность при малых полях;
 - надежность отпускания определяется коэрцитивной силой материала;
 - быстродействие зависит от удельного электросопротивления.

4.2. Магнитомягкие сплавы

- Магнитомягкие сплавы с высокими значениями μ и ρ применяются для изготовления аппаратуры связи и импульсных трансформаторов, работающих без подмагничивания или с подмагничиванием слабыми полями (50НХС, 12Ю).
- Магнитные свойства железоникелевых сплавов с высокой магнитной проницаемостью при однополярном импульсном намагничивании, подвергаемых термомагнитной обработке в поперечном поле и применяемых для изготовления импульсных и широкополосных трансформаторов (79НЗМ, 68НМ, 53Н-ВИ).
- Высокой прямоугольностью петли гистерезиса и малым временем перемагничивания в импульсных полях обладают сплавы 79НМ, 77НМДП и специально разработанные сплавы для тончайших лент (0,5÷1 мкм) 80Н2М и 80НЮ, используемые для изготовления ленточных магнитопроводов переключающих устройств.

4.3. Ферриты

- Большое распространение для изготовления импульсных и широкополосных трансформаторов получили ферриты 1500НМ1, 1000НМ3, 1100НМИ, 1000ННИ, 350ННИ, 300ННИ, обладающие высокими значениями μ и приращений индукции при однополярном намагничивании, а также малым отношением B_r / B_s .

5. Магнитные материалы специального назначения

- 
- термомагнитные,
 - магнитострикционные,
 - коррозионностойкие.