

Классификация магнитных материалов

Магнитные материалы подразделяют на две основные группы: *магнитомягкие* и *магнитотвердые*. В отдельную группу выделяют *материалы специального назначения*.

К *магнитомягким* относят магнитные материалы с *малой коэрцитивной силой* и *высокой магнитной проницаемостью*. Они обладают способностью намагничиваться до насыщения в слабых магнитных полях. Характеризуются узкой петлей гистерезиса и малыми потерями на перемагничивание. Магнитомягкие материалы используют в качестве сердечников трансформаторов, электромагнитов, магнитных систем электроизмерительных приборов и так далее.

Классификация магнитных материалов

К *магнитотвердым* относят материалы с большой коэрцитивной силой. Они перемагничиваются в сильных магнитных полях и служат в основном для изготовления постоянных магнитов.

Магнитомягкими считают материалы, у которых $H_c < 0,8$ кА/м, а магнитотвердыми – с $H_c > 4$ кА/м. Необходимо, отметить, что у лучших магнитомягких материалов коэрцитивная сила может составлять менее 0,001 А/м, а в лучших магнитотвердых материалах ее значение превышает 500 кА/м.

Среди *материалов специального назначения* выделяют материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), ферриты для устройств сверхвысокочастотного диапазона и магнитострикционные материалы.

Классификация магнитных материалов

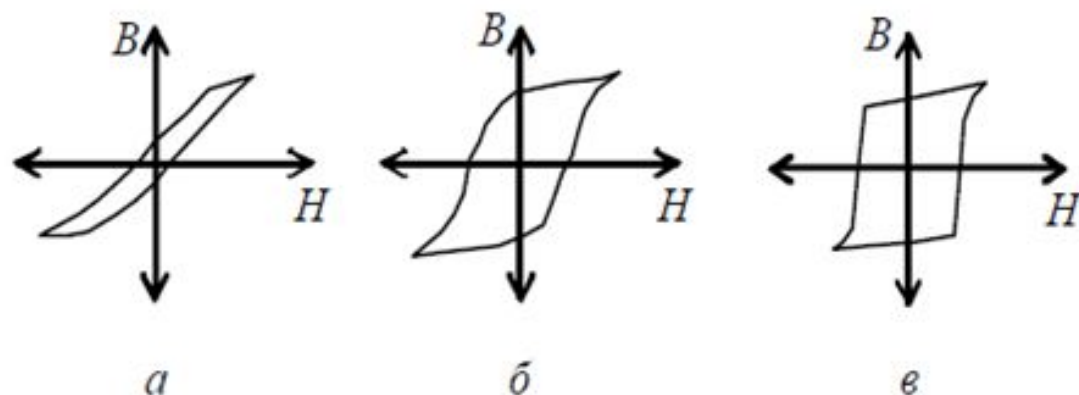


Рисунок 1. Предельные петли гистерезиса различных материалов: *a* - магнитомягкие материалы; *б* - магнитотвёрдые материалы; *в* - материалы с ППГ

Магнитомягкие материалы - это материалы, которые имеют относительно небольшое значение коэрцитивной силы, не превышающее $0,8 \text{ кА/м}$ и, в связи с этим, характеризующиеся узкой петлей гистерезиса.

Магнитотвёрдые материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы (более 4 кА/м) и обладают широкой петлей гистерезиса.

Материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) имеют форму петли гистерезиса, близкую к прямоугольной.

Классификация низкочастотных магнитомягких материалов



Общие требования, предъявляемые к низкочастотным магнитомягким материалам:

- высокая индукция насыщения ($B_s \approx 1$ Тл), что позволяет разработчику снижать массо-габаритные характеристики проектируемой магнитной системы;
- относительно невысокие потери на перемагничивание ($p_M = 20 \dots 30$ Вт/кг) при работе в переменных электромагнитных полях и достаточно высокое электросопротивление ($\rho \approx 0,6 \times 10^{-6}$ Ом·м);
- высокая пластичность, позволяющая осуществлять механическую обработку, и малая зависимость магнитных свойств от механических напряжений, возникающих при деформировании листовых ферромагнитных материалов.

Магнитомягкие материалы для работы в постоянных магнитных полях

1. Технически чистое железо -

это железо, содержащее менее 0,1% примесей. Характеристики технического железа приведены в таблице 1.

Таблица 1

μ_H	$H_c, \text{ А/м}$	$B_s, \text{ Т}$	$\rho \cdot 10^6, \text{ Ом}\cdot\text{м}$
250–500	50–100	2	0,1

2. *Электротехническая нелегированная сталь с содержанием 0,3% кремния (Si)*. Этот материал выпускается в виде ленты и листов по ГОСТ 3863 и ГОСТ 11036.

Обозначение марок электротехнической нелегированной стали состоит из пяти цифр, например: сталь 10895, сталь 21864. В условном обозначении *первая цифра* означает способ проката стали (1 - горячекатаная, 2 - холоднокатаная); *вторая цифра* - 0 или 1, говорит о том, что концентрация кремния в стали составляет 0,3%; *третья цифра* - всегда 8 (что указывает на нормировку стали по коэрцитивной силе); *четвертая и пятая цифры* представляют значение коэрцитивной силы, А/м.

Значение коэрцитивной силы H_c электротехнических нелегированных сталей равно 60...100 А/м, индукция насыщения B_s составляет 1,3...1,6 Тл.

Магнитомягкие материалы для работы в низкочастотных магнитных полях

Электротехнические кремнистые стали с содержанием 0,4...4% Si относятся к магнитомягким материалам для работы в низкочастотных магнитных полях. Введение кремния в железо увеличивает электрическое сопротивление стали и снижает удельные потери на перемагничивание.

Изготавливаются электротехнические стали в соответствии с требованиями государственных стандартов: ГОСТ 21427.0 “*Сталь электротехническая листовая. Классификация и марки*”; ГОСТ 21427.1 “*Сталь листовая электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая*”; ГОСТ 21427.2 “*Сталь электротехническая холоднокатаная изотропная тонколистовая*”.

Текстурированные электротехнические стали

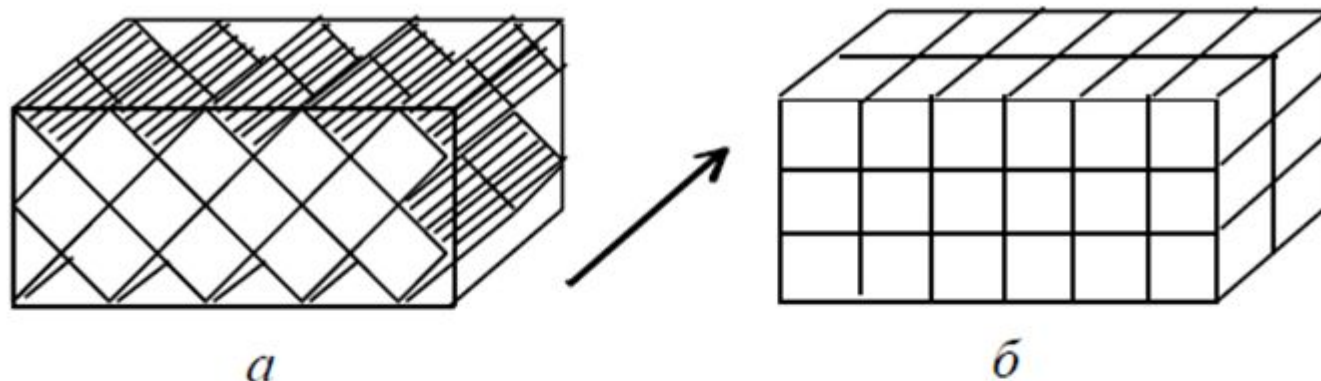


Рисунок 2. Условное изображение текстур электротехнической стали: *а* - ребровая текстура; *б* - кубическая текстура (стрелкой указано направление проката)

Для получения высокого значения индукции насыщения B_s электротехническую кремнистую сталь подвергают холодной прокатке с последующим отжигом для снятия остаточных механических напряжений. Такая сталь называется *текстурированной*. Различают два вида текстурированной стали (рис. 2)

Стали с ребровой текстурой, при которой ребра кубических кристаллографических ячеек расположены в направлении проката (рис. 2а). Этот случай соответствует кристаллографическим направлениям $\langle 100 \rangle$ вдоль направления проката. Главная диагональ куба с направлением $\langle 111 \rangle$ расположена под углом 55° к направлению проката.

Стали с кубической текстурой, при которой ребра кубов с кристаллографическими направлениями $\langle 100 \rangle$ ориентированы вдоль и поперек направления проката (рис. 2б). По этим направлениям проявляются наилучшие магнитные свойства электротехнической стали.

Система обозначения электротехнических кремнистых сталей

Стали различных марок, обозначаются трех-четырёхзначными цифрами. Согласно ГОСТ 21.4270 обозначение электротехнической кремнистой стали состоит из трех цифр, например **сталь 341, сталь 342**. *Первая цифра* указывает на тип стали (1 - горячекатаная изотропная, 2 - холоднокатаная изотропная, 3 - холоднокатаная с ребровой текстурой, 5 - холоднокатаная с кубической текстурой). *Вторая цифра* обозначает содержание кремния в стали (0 - 0,4%, 1 - 0,4...0,8%, 2 - 0,8...1,8%, 3 - 1,8...2,8%, 4 - 2,8...3,8%, 5 - 3,8...4,8%). *Третья цифра* означает группу по основной нормируемой характеристике (0 – удельные потери при $B = 1,7$ Т и частоте 50 Гц; 1 – удельные потери при $B = 1,5$ Т и частоте 50 Гц; 2 – удельные потери при $B = 1$ Т и частоте 400 Гц для горячекатаной и при $B = 1,5$ Т и частоте 400 Гц для холоднокатаной анизотропной; 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при $H = 0,4$ А/м; 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при $H = 10$ А/м);

Основные характеристики электротехнической стали

Марка стали	Магнитная проницаемость		Коэрцитивная сила H_c , А/м	Магнитная индукция при $H = 2000$ А/м, Тл	Удельные потери, Вт/кг	Удельное сопр. ρ , 10^{-6} Ом·м
	начальная	максимальная				
1411	250	5500	44	1,52	2	0,52
1511	300	6000	36	1,49	1,55	0,6
1561	600	10 000	20	$7,7 \cdot 10^{-4}$	–	0,55
1572	600	7000	–	1,3	–	0,55
3411	500	16 000	20	1,81	1,1	0,5
3421	~600	–	36	~1,7	20...21	0,5

Низкокоэрцитивные магнитомягкие сплавы

Это сплавы системы Fe-Ni (пермаллои), сплавы системы Fe-Co (пермендюры) и сплавы системы Fe-Co-Ni с добавками Mn, Cr, Si, Cu, Va, Ti. Особенностью этих сплавов является чрезвычайно высокое значение начальной магнитной проницаемости μ_H , достигающее $5 \times 10^4 \dots 10^5$.

Пермаллои и пермендюры в виде листовых материалов толщиной до 0,005 мм можно использовать для работы в переменных электромагнитных полях с частотой 10...30 кГц. Высокие магнитные свойства низкокоэрцитивных магнитомягких сплавов объясняются малой кристаллографической анизотропией намагниченности этих материалов. В результате облегчается поворот магнитных моментов атомов из направления легкого намагничивания в направление намагничивающего внешнего поля H .

Пермаллои – железоникелевые сплавы, легированные хромом, молибденом, кремнием, медью или другими присадками. Пермаллои характеризуются высокой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях (при напряженности поля менее 0,1 Нс) на низких частотах. Эти сплавы имеют высокую магнитную проницаемость, высокое удельное электрическое сопротивление, малую коэрцитивную силу и значительное магнитное насыщение.

Система обозначения низкокоэрцитивных магнитомягких сплавов

Согласно ГОСТ 10994 и ГОСТ 10160 в обозначении пермаллоя или пермендюра две первые цифры обозначают содержание элемента, условное обозначение которого указано после этих цифр. Обозначения элементов кодируются следующими буквами: Н- Ni, К- Co, М- Mo, Х- Cr, С- Si, Д- Cu, Ю- Al, Ф- Va, Г- Mn. Буквы А или И в конце обозначения сплава указывают на его улучшенные свойства, буква П означает, что сплав характеризуется прямоугольной петлей гистерезиса. Через дефис может быть указан способ выплавки сплава (ВИ- вакуумно-индукционный, ЭЛ- электронно-лучевой, П- плазменный, Ш- электрошлаковый, ВД- вакуумно-дуговой). **Например**, 82НМП-ВИ - это обозначение марки железоникелевого пермаллоя с ППГ и кубической текстурой, полученного вакуумно-индукционным способом.

Марки пермаллоев

Марка сплава*	Основная характеристика сплава
45Н, 50Н	Наивысшая магнитная проницаемость в слабых полях
38НС, 42НС, 50НХС	Высокая магнитная проницаемость и повышенное удельное электрическое сопротивление
50НП, 68НМП, 34НКМП, 35НКХСП, 40НКМП, 79НМП, 77НМДП, 65НП	Прямоугольная петля гистерезиса. Сплавы обладают анизотропией магнитных свойств
79НМ, 80НХС, 81МА, 83НФ	Наивысшая магнитная проницаемость в слабых полях

* Буквенные обозначения сплавов: Н – никель, С – кремний, Х – хром, М – молибден, Д – медь, Ф – ванадий, А или И – улучшенные свойства, П – прямоугольная петля гистерезиса.

Характеристики пермендюров

μ_H	$H_c, A/M$	B_s, T	$\rho \cdot 10^6, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$
$5 \cdot 10^3$	160	2...2,2	0,2

Пермендюры, как уже отмечалось, относятся к сплавам системы Fe-Co с добавками ванадия, введение которого улучшает технологические свойства сплава при механической обработке. В виде листовых материалов выпускаются пермендюры марок 48К2Ф, 49КФ, 49КНФ.

Аморфные магнитные сплавы

Аморфные магнитные сплавы – современные магнитные материалы на основе сплавов системы Fe-Ni-Co с аморфной структурой и характеристиками, превышающими аналогичные свойства кристаллических сплавов – пермаллоев. Металлические магнитные сплавы с аморфной структурой обладают комплексом уникальных свойств с высокими магнитными, прочностными, коррозионно-стойкими свойствами, большим удельным сопротивлением. Изделия из аморфных магнитных материалов, относящихся к магнитомягким материалам, обладают высокими начальной и максимальной проницаемостью $\mu=(5000\dots370\ 000)$, индукцией насыщения $B_s=(0,78\dots1,5\ \text{T})$, малой коэрцитивной силой $H_c=(0,15\dots10\ \text{A/m})$, высоким удельным сопротивлением $\rho=(0,013\dots0,016\ \text{Ом}\cdot\text{м})$.

Аморфные магнитные сплавы

Аморфные магнитные сплавы технологичны при изготовлении и обработке, они не требуют дополнительного проката и поверхностной обработки. Очень важным обстоятельством, стимулирующим внедрение аморфных сплавов, является необязательность отжига при изготовлении из них магнитопроводов. Для получения оптимальных магнитных свойств применяют термомагнитную обработку (ТМО), которая проще термообработки пермаллоя и осуществляется в ряде случаев на воздухе.

Классификация высокочастотных магнитомягких материалов

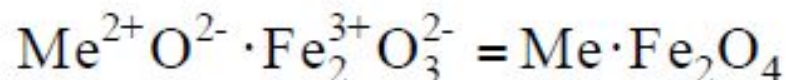


Ферриты

Ферриты - это оксидные магнитные поликристаллические или (реже) монокристаллические материалы, относящиеся к классу ферримагнетиков. Основными особенностями ферритов являются высокое удельное электросопротивление ρ , достигающее $10 \dots 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и широкий диапазон значений начальной магнитной проницаемости μ_H от 10 до 50000. Недостатком ферритов является невысокое значение индукции насыщения B_s , составляющее $0,2 \dots 0,4 \text{ Тл}$. Значениями электрических параметров можно управлять путем изменения химического состава феррита.

Кристаллографическая структура ферритов характеризуется ионной связью между атомами и аналогична структуре минерала шпинели $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Химическая формула феррита записывается в виде



где Me^{2+} - катион двухвалентного металла, так называемый *характеризующий ион*.

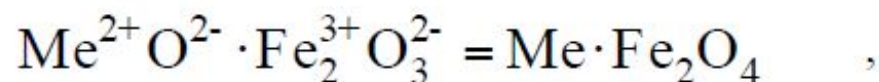
Высокие магнитные свойства феррошпинели проявляются, если в качестве Me используются такие металлы, как **Ni**, **Mn**. Худшие магнитные свойства проявляются у ферритов, в которых ионами металла служат такие химические элементы, как Co , Cu , Mg . Феррит является немагнитным, если характеризующими ионами являются Zn и Cd .

Ферриты

Ферриты - это оксидные магнитные поликристаллические или (реже) монокристаллические материалы, относящиеся к классу ферромагнетиков. Основными особенностями ферритов являются высокое удельное электросопротивление ρ , достигающее $10 \dots 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и широкий диапазон значений начальной магнитной проницаемости μ_n от 10 до 50000. Недостатком ферритов является невысокое значение индукции насыщения B_s , составляющее $0,2 \dots 0,4 \text{ Тл}$. Значениями электрических параметров можно управлять путем изменения химического состава феррита.

Кристаллографическая структура ферритов характеризуется ионной связью между атомами и аналогична структуре минерала шпинели $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

Химическая формула феррита записывается в виде



где Me^{2+} - катион двухвалентного металла, так называемый *характеризующий ион*.

Высокие магнитные свойства феррошпинели проявляются, если в качестве Me используются такие металлы, как **Ni**, **Mn**. Худшие магнитные свойства проявляются у ферритов, в которых ионами металла служат такие химические элементы, как **Co**, **Cu**, **Mg**. *Феррит является немагнитным, если характеризующими ионами являются Zn и Cd.*

Элементарная ячейка феррошпинели

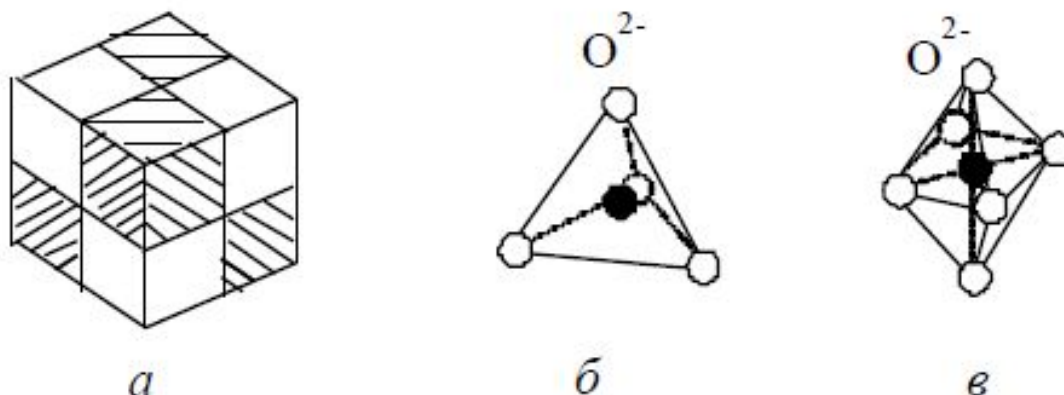


Рисунок 3. Структура феррошпинели: *a* - элементарная ячейка; *б* - тетраэдрическое междузие (тип *A*);
в - октаэдрическое междузие (тип *B*)

Элементарная ячейка шпинели представляет кубическую плотноупакованную ячейку, в вершинах и центрах граней которой находятся ионы кислорода O^{2-} . Элементарная ячейка состоит из 8 структурных единиц типа $MeFe_2O_4$ (рис. 3 *a*). Ионы Me^{2+} и Fe^{3+} расположены внутри этих структурных единиц в междузлиях. Элементарная ячейка, изображенная на рис. 3 *a*, содержит 56 ионов, в том числе 32 иона O^{2-} , 16 ионов Fe^{3+} и 8 ионов Me^{2+} .

Таким образом, в ферритах решающую роль в обеспечении магнитных свойств играет косвенное обменное взаимодействие, осуществляемое при участии кислородных ионов. Главным является взаимодействие по типу А-О-В, где А и В- ионы, находящиеся в междузлиях А и В, разделенных атомами кислорода, О.

Основные электромагнитные характеристики магнитомягких ферритов

Марка феррита	Начальная магнитная проницаемость	Критическая частота, МГц	Параметры петли гистерезиса		Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
			B_s , Т	H_c , А/м, не более	
400НН	350...500	3,5	0,25	64	10^4
1000НН	800...1200	0,4	0,27	20	10^4
1000НМ	800...1200	0,6	0,37	28	0,5
1500НМ	1200...1800	0,6	–	24	0,5
1500НМ1	1200...1800	0,6	0,35	16	5
2000НН	1700...2500	0,1	0,25	8	10
2000НМ	1700...2500	0,5	0,39	24	0,5
2000НМ1	1700...2500	0,5	0,34	16	5
2000НМС	1600...2400	0,33	0,25*	22	1
2000НМС1	1600...2400	0,34	0,27*	18	1
3000НМС	2600...3400	0,36	0,28*	12	1
4000НМ	3500...4800	0,1	0,37	8	0,5
10000НМ	8000...15000	0,05	–	4	0,1

Характеристики ферритов

1. Ферриты общего применения. К этой группе ферритов относятся Ni-Zn ферриты марок 100НН, 400НН, 600НН, 1000НН, 2000НН и др. с предельными (критическими) частотами применения $f_{кр}$, составляющими 30...0,1 МГц. Mn-Zn ферриты марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ рассчитаны для работы в диапазоне частот от 0,6 до 0,1 МГц. Видно, что значение критической частоты снижается с ростом магнитной проницаемости феррита.

2. Термостабильные ферриты характеризуются низким значением температурного коэффициента начальной магнитной проницаемости, не превышающим $(1...10) \times 10^{-6}$ 1/К. К ним относятся Ni-Zn ферриты марок 7ВН, 20ВН, 30ВН, 50ВН, 100ВН, 150ВН, рассчитанные на предельные частоты применения 200...25 МГц. Марганец-цинковые ферриты марок 700НМ, 1000НМЗ, 1500НМ1, 2000НМ1 применяются на более низких частотах 5...0,5 МГц.

3. Высокопроницаемые ферриты представляют Mn-Zn ферриты марок 4000НМ, 6000НМ, 10000НМ, 20000НМ, рассчитанные для работы в сравнительно низкочастотном диапазоне 0,05...0,1 МГц.

4. Ферриты для телевизионной техники используются в качестве стержневых и броневых магнитопроводов трансформаторов строчной развертки (ТВС) телевизоров. К ним относятся Mn-Zn ферриты марок 2500НМС1, 3000НМС, рассчитанные для применения на частотах 0,36...0,4 МГц.

5. Ферриты для импульсных трансформаторов - это, как правило, Ni-Zn ферриты, которые служат в качестве магнитопроводов мощных импульсных трансформаторов для работы при частотах 2...0,3 МГц. Выпускаются ферриты марок 300ННИ, 350ННИ, 450ННИ, 1000ННИ.

Характеристики ферритов

6. *Ферриты для ферровариометров* предназначены для применения в катушках индуктивности с перестраиваемой индуктивностью в диапазоне частот от 250 до 6 МГц. К этой группе относятся ферриты из ряда 10ВНП, 35ВНП, 55ВНП, 60ВНП, 65ВНП, 90ВНП, 150ВНП, 200ВНП, 300ВНП.

7. *Ферриты для широкополосных трансформаторов* применяются в высокочастотных трансформаторах радиочастотного диапазона 80...8 МГц. Ферриты марок 50ВНС...300ВНС характеризуются значением $\text{tg}\delta_{\mu} = (6,7...33) \times 10^{-3}$.

8. *Ферриты для магнитных головок* выпускаются в виде дисков. Для их изготовления используются Ni-Zn ферриты марок 500НТ, 1000НТ, 2000НТ и Mn-Zn ферриты марок 500МТ, 1000МТ, 2000МТ, 5000МТ.

9. *Ферриты для индуктивных бесконтактных датчиков* марок 800НН и 1200НН характеризуются резким уменьшением магнитной проницаемости вблизи температур Кюри 70 °С и 195 °С.

10. *Ферриты для магнитного экранирования* представляют Ni-Zn ферриты марок 200ВНРП и 800ВНРП, отличающиеся большим значением $\text{tg}\delta_{\mu}$, достигающим 10^{-2} .

Магнитодиэлектрики

Таблица 2

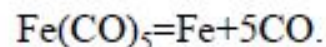
μ_n	ρ , Ом·м	$f_{кр}$, кГц	$\alpha_{\mu, T} \cdot 10^6$, 1/К
10...250	10^9	100	25...180

Магнитодиэлектрики, представляют композиционные магнитные материалы, содержащие наполнитель - порошок ферромагнетика и связующее из изолирующего материала, в качестве которого применяется бакелитовая смола, полистирол, стекло. Обобщенные характеристики магнитодиэлектриков представлены в таблице 2.

Магнитодиэлектрики характеризуются достаточно хорошими частотными характеристиками в широком диапазоне частот, отличаются высокой температурной и временной стабильностью магнитных характеристик. Поэтому магнитодиэлектрики нашли широкое применение в качестве сердечников высокочастотных катушек индуктивности. Недостатком магнитодиэлектриков является сравнительно невысокое значение начальной магнитной проницаемости μ_n .

Характеристики магнитодиэлектриков

Карбонильное железо. Этот материал получают в виде порошка в результате химической реакции восстановления пентакарбонила железа:



Размер частиц порошка 1,5...3,5 мкм. Восстановленное железо содержит 1% примесей углерода, азота, кислорода. Широкое распространение получили такие марки карбонильного железа, как **P-10**, **P-20**, **P-100**. В обозначении марки железа число характеризует предельную частоту использования данного материала, в МГц. Начальная магнитная проницаемость μ_H сердечников, изготовленных из карбонильного железа, обычно составляет 10...15 единиц.

Альсифер представляет собой тройной металлический сплав системы Fe-Al-Si, содержащий 9,6% Si и 5,6% Al. Это твердый и хрупкий материал с высокими магнитными свойствами. Сплав размалывается в порошок, который и является основой для изготовления сердечника

Согласно ГОСТ 8763 для обозначения марки альсифера используется буквенно-цифровая система обозначений. Выпускаются альсиферы марок **ТЧ-90**, **ТЧК-55**, **ТЧ-50**, **ТЧ-60**, **ВЧ-22**, **ВЧК-22**, **ВЧ-32** (**ТЧ** - для тональной частоты, **ВЧ** - высокочастотный материал, **К** - пониженное значение температурного коэффициента магнитной проницаемости $\alpha_{\mu, T}$, число, стоящее после дефиса - значение начальной магнитной проницаемости μ_H).

Альсиферы используются в сравнительно низкочастотном диапазоне 0,02...0,7 МГц. Специфической особенностью альсиферов является отрицательное значение $\alpha_{\mu, T}$, достигающее минус $(200... 600) \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Характеристики магнитодиэлектриков

Порошкообразные пермаллои представляют из себя порошок железо-никелевого сплава. Система обозначения порошкообразных пермаллоев аналогична системе обозначений альсиферов. Для производства сердечников выпускается порошкообразный пермаллой марок **П-250, П-160, П-140, П-100, П-60, П-20, ПК-100, ПК-60, ПК-20**. Критическая частота магнитодиэлектриков с наполнителем из порошкообразного пермаллоя составляет 0,03...1 МГц.

Ферритовые порошки изготавливают из отходов ферритового производства и применяют в качестве наполнителя при изготовлении магнитодиэлектриков. При обозначении в технической документации используется система маркировки ферритовых порошков, принятая для карбонильного железа. Выпускаются ферритовые порошки марок **НМ-5, ВН-20, ВН-60, ВН-220** (НМ- низкочастотный материал на основе Mn-Zn феррита, ВН- высокочастотный материал на основе Ni-Zn феррита, число, стоящее после дефиса - значение предельной рабочей частоты $f_{кр}$ в МГц).

Характеристики магнитотвердых материалов

Основные параметры магнитотвердых материалов определяются по **кривой размагничивания**, которая представляет собой второй квадрант предельной кривой намагничивания $B=f(H)$ при циклическом перемагничивании (рис. 4 а). Для характеристики удельной магнитной энергии W_{\max} , накопленной в магните, пользуются кривой $B=f(BH)$, изображенной на рис. 4 б.

Из графиков рис. 4 а, б следует, что к основным параметрам магнитотвердых материалов относятся:

H_c - коэрцитивная сила, А/м; B_r - остаточная индукция, Тл; $(BH)_{\max} = 2W_{\max}$ - максимальное значение произведения индукции B на значение напряженности магнитного поля H для данной кривой размагничивания, кДж/м³; W_{\max} - удельная магнитная энергия.

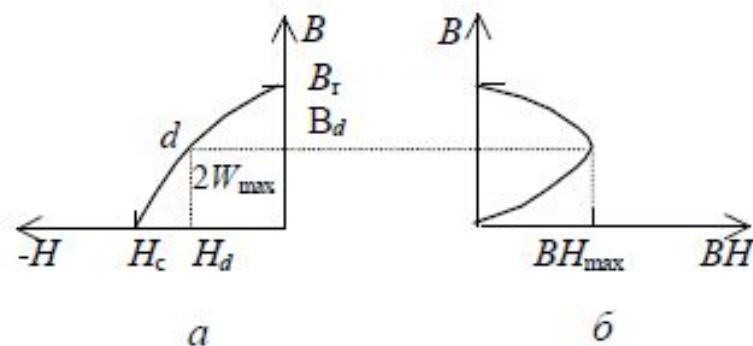


Рисунок 4. Характеристики магнитотвердых материалов: а - кривая размагничивания $B=f(H)$; б - график $B=f(BH)$

Специфическим параметром магнитотвердого материала является коэффициент выпуклости γ кривой $B=f(BH)$, который определяется из соотношения

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{B_r H_c}$$

Природа намагниченного состояния

Для того, чтобы получить высокое значение коэрцитивной силы H_c , необходимо затруднить процесс перемагничивания материала, обусловленный смещением доменных границ. Это достигается путем создания текстурированного состояния магнетика.

Магнитная текстура создается способом охлаждения высококоэрцитивного сплава из расплавленного состояния в сильном магнитном поле с напряженностью $H=150...300$ кА/м. В результате достигается упорядоченность пластинчатых выделений сильномагнитной фазы (рис. 5). Этот метод эффективен, например, для сплавов, содержащих кобальт.

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

Для создания текстурированного магнитного состояния применяется также прессование порошкообразного магнетика в сильном магнитном поле с напряженностью $H=250...400$ кА/м. В этом случае магнитожесткий материал предварительно измельчается до частиц размером $0,1...1$ мкм. Границы доменов совпадают с физическими границами зерен и в дальнейшем их смещение становится невозможным.

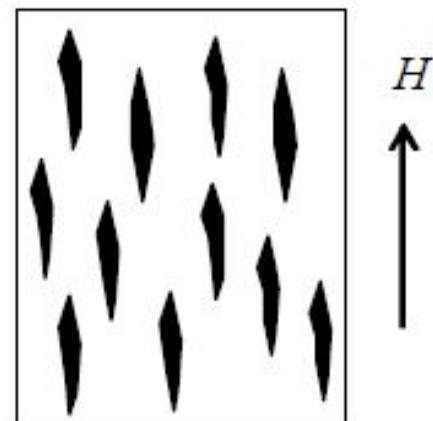
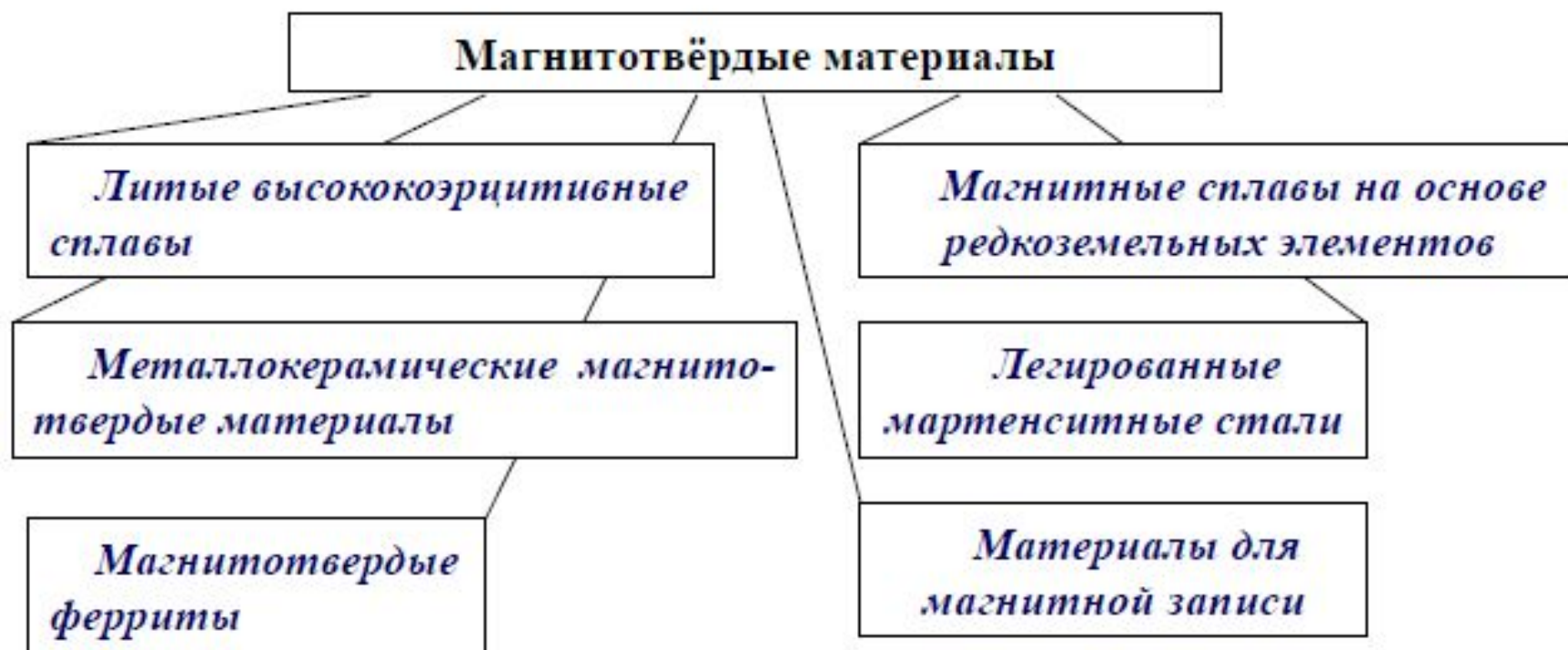


Рисунок 5. Распределение пластинчатых выделений магнитной фазы под воздействием сильного магнитного поля

Классификация магнитотвердых материалов



Характеристики магнитотвердых материалов

1. Литые высококоэрцитивные сплавы. К этой группе магнито жестких материалов относятся сплавы систем Al-Ni-Cu-Fe (ЮНД) и Al-Ni-Cu-Co-Fe (ЮНДК), содержащие около 50% Fe, 7...14% Al, 14...25% Ni, 2...4% Cu, а сплавы ЮНДК - 14...40% Co.

Условное обозначение литого высококоэрцитивного сплава в технической документации состоит из букв, являющихся условным обозначением легирующего элемента (Ю- Al, Н- Ni, Д- Cu, К- Co, Т- Ti, Б- Nb, С- Si), и чисел, указывающих процентное содержание компонента в сплаве. Добавки Cu, Ti и Nb обеспечивают стабильность магнитных характеристик сплавов. В конце обозначения могут стоять буквы А (сплав с кристаллической текстурой) или АА (монокристаллический материал).

Основные характеристики литых высококоэрцитивных сплавов представлены в таблице 3 где B_r - индукция насыщения, H_c - коэрцитивная сила, W_{max} - магнитная энергия. Из таблицы 3 видно, что сплавы ЮНДК обладают более высокими магнитными характеристиками, чем сплавы ЮНД.

Характеристики магнитотвердых материалов

Наиболее высокими значениями магнитной энергии W_{\max} обладают монокристаллические сплавы ЮНДК. Например, монокристалл сплава ЮНДК40Т8АА характеризуется значением коэрцитивной силы $H_c=145$ кА/м.

Таблица 3

Тип сплава	B_r , Т	H_c , кА/м	W_{\max} , кДж/м ³
Сплавы ЮНД: ЮНД4, ЮНТС	0,4... 0,5	40 ...50	4...5
Сплавы ЮНДК: ЮНДК31Т3БА	1,15	92	32

Характеристики магнитотвердых материалов

2. Металлокерамические магнитотвердые материалы. Магниты на основе сплавов ЮНДК изготавливаются также методом *порошковой металлургии*. С этой целью порошок из сплава ЮНДК прессуется в форме под давлением около 103 МПа с последующим спеканием при $T=1200...1350$ °С. Для получения магнитных свойств металлокерамическое изделие подвергается термомагнитной обработке. Выпускаются металлокерамические магниты марок ММК-1, 2, 3,...,11. Характеристики магнитов ММК близки к характеристикам сплавов ЮНДК, однако они имеют более высокую (в 3...6 раз) механическую прочность, могут быть изготовлены с более сложной геометрической конфигурацией. При использовании связующего из пластмассы методом прессования порошка из сплава ЮНДК можно изготовить **металлопластические магниты**.

Характеристики магнитотвердых материалов

3. *Магнитотвердые ферриты.* В качестве магнитотвердых ферритов применяют феррит бария $\text{BaO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$, феррит стронция $\text{SrO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$, кристаллизующиеся в гексагональную структуру, а также феррит кобальта $\text{CoO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ с кубической структурой типа шпинели. Магнитотвердые ферриты изготавливаются методами порошковой металлургии и в 3...4 раза дешевле литых сплавов.

К особенностям магнитотвердых ферритов относятся высокие значения коэрцитивной силы H_c , достигающие 150...300 кА/м, большое значение удельного электросопротивления ($\rho = 10 \dots 10^6$ Ом \times м), относительно невысокое значение остаточной индукции B_r , равное 0,19...0,39 Т. К недостаткам магнитотвердых ферритов следует отнести пониженную температурную стабильность магнитных параметров и хрупкость.

В технической документации используется буквенно-цифровая система условных обозначений магнитотвердых ферритов: БИ - феррит бария изотропный; БА, СА - феррит бария или стронция анизотропный; РА - бариево-стронциевый феррит анизотропный. Число перед буквенным обозначением указывает на величину удвоенной магнитной энергии $2W_{\max} = (BH)_{\max}$ в кДж/м³, число после буквенного обозначения является значением коэрцитивной силы магнита H_c , кА/м. Например, к распространенным маркам магнито жестких ферритов относятся **4БИ145, 21СА320, 28БА190**.

Характеристики магнитотвердых материалов

4. Магнитные сплавы на основе редкоземельных элементов. К этим сплавам относятся интерметаллические соединения кобальта с редкоземельными металлами типа RCo_5 , R_2Co_7 , R_2Co_{17} , где индексом R обозначены редкоземельные металлы Sm , Pr , Ce , La , Y . Указанные сплавы имеют очень большую магнитную кристаллографическую анизотропию и характеризуются рекордными значениями коэрцитивной силы H_c , составляющими $(2...20) \times 10^6$ А/м. Изделия из сплавов на основе редкоземельных металлов изготавливаются методами порошковой технологии в виде дисков, колец, пластин. Разработаны образцы пленочных магнитов, наносимых на подложку методом вакуумного напыления.

Промышленностью освоен выпуск магнитов на основе сплавов $SmCo_5$ и $PrCo_5$. В технической документации используется буквенно-цифровая система обозначений марок этих сплавов, где $КС$ означает кобальтово-самариевый магнит, $КСП$ - магнит на основе сплава кобальта, самария и празеодима. Число после буквенного обозначения указывает на процентное содержание самария (или самария и празеодима) в сплаве. Например, **КС37**, **КСП37А** (буква A в конце обозначения указывает на сплав с улучшенной текстурой). Типичные характеристики выпускаемых магнитов следующие: $B_r = 0,7... 0,9$ Т, $H_c = 640...1300$ кА/м, $W_{max} = 55...72$ кДж/м³.

Характеристики магнитотвердых материалов

5. Легированные мартенситные стали. К магнитотвердым материалам этой группы относятся закаленные на мартенсит нержавеющей стали с добавками Cr, W, Co. Этот вид магнитотвердых материалов находит в настоящее время ограниченное применение из-за невысоких магнитных свойств. Значение коэрцитивной силы H_c легированных мартенситных сталей не превышает 5...15 кА/м, магнитная энергия W_{\max} составляет 1..2,5 кДж/м³. Распространены марки мартенситных сталей **EX3, EXB6, EX9K15M**, допускающие обработку резанием.

Магнитотвердые материалы для магнитной записи

Это материалы, которые наносятся в виде ферролакового покрытия на полимерные или металлические носители - ленты и диски для осуществления аудио- и видеозаписи, а также для записи, хранения и ввода информации в ЭВМ. Оптимальным требованиям удовлетворяют ферромагнитные материалы с коэрцитивной силой $H_c=20...50$ кА/м, характеризующиеся формой кривой размагничивания, близкой к прямоугольной.

В качестве магнитного компонента широко применяются порошки закиси железа $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ с мелкими однодоменными частицами коричневого цвета. Часто используется смесь магнетита Fe_3O_4 и $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, представляющая материал с повышенным значением коэрцитивной силы.

Другой широко распространенный материал для магнитной записи - это диоксид хрома CrO_2 , представляющий порошок черного цвета. Диоксид хрома характеризуется более высокой коэрцитивной силой, а элементы памяти на его основе обладают повышенной чувствительностью в области высоких частот. Применяют также ленты и диски с двойным магнитным слоем $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3+\text{CrO}_2$, позволяющие осуществить более качественную запись и чтение информации.

Магнитотвердые материалы для магнитной записи

Для маркировки магнитных лент отечественного производства используется буквенно-цифровая система обозначений, где первая буква указывает на назначение ленты (А- звукозапись, Т- видеозапись, В- вычислительная техника), первая цифра после буквы обозначает материал основы (2- диацетат, 3- триацетат, 4- лавсан), второй цифрой кодируется толщина ленты (0- менее 10 мкм, 1- 10...15 мкм, 2- 15...20 мкм, 3- 20...30 мкм, 4- 30...40 мкм при стандартных толщинах ленты 18, 27 и 37 мкм), третья и четвертая цифры маркировки ленты обозначают номер технологической разработки, затем через дефис записывается число, обозначающее ширину ленты в мм. В конце обозначения стоят буквы Б (лента для бытовой записи) или Р (лента для студийной записи). Например, обозначением **А4205-3Б** маркируется лента для компакт-кассеты на лавсановой основе, толщиной 18 мкм, номер разработки 05, с шириной 3,8 мм.