

Материалы с особыми физическими свойствами

Материалы с магнитными свойствами

Намагничивание материалов в магнитном поле связано с наличием у атомов собственного магнитного поля

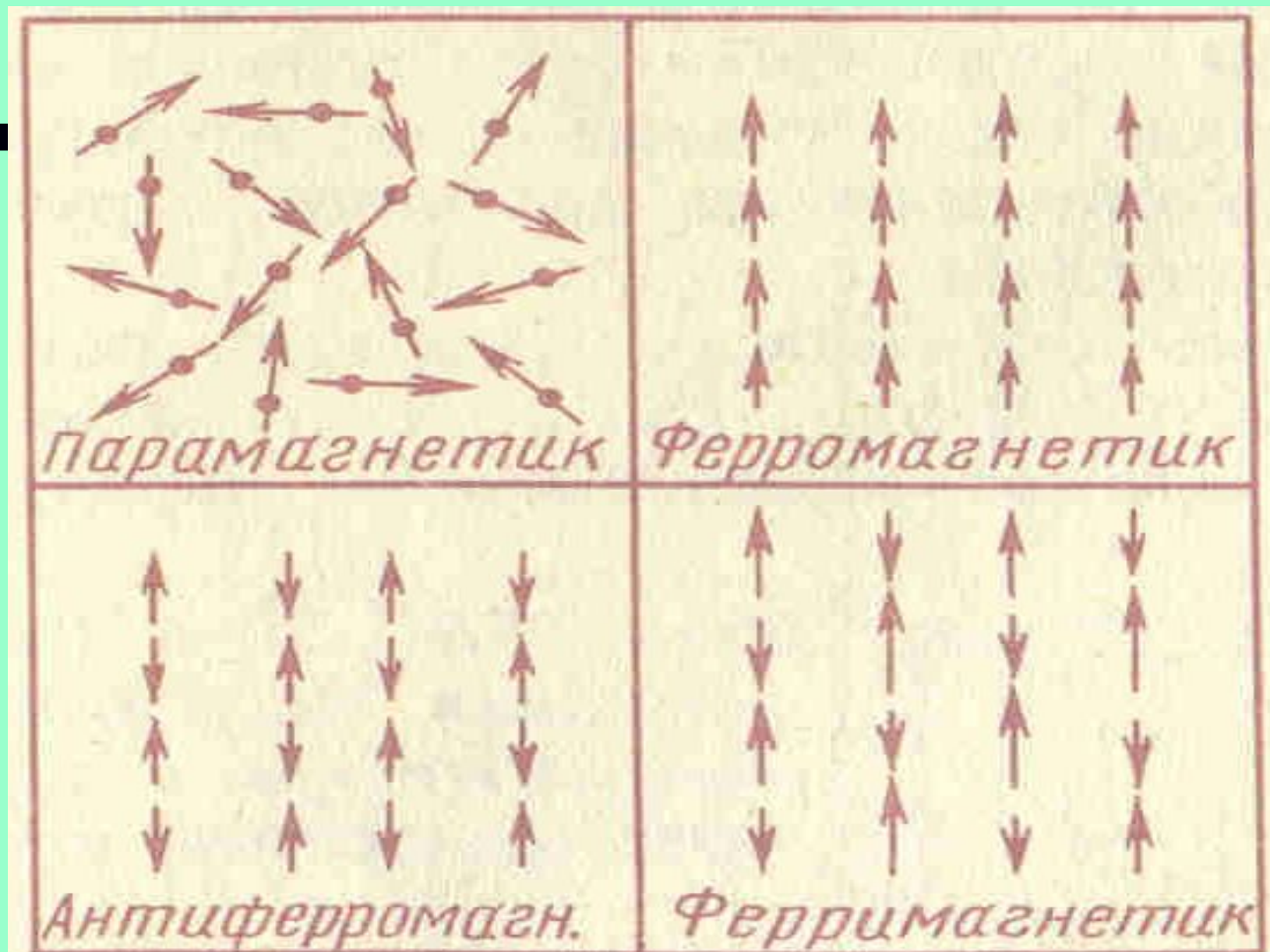
Магнитный момент атома является суммой векторов орбитальных и собственных (спиновых) моментов электронов.

При наложении внешнего магнитного поля векторы ориентируются вдоль поля.

Орбитальный момент — уменьшается, так как в атоме индуцируется добавочный добавочный момент, направленный против поля, - *диамагнитный эффект*.

Наличие нескомпенсированных спинов электронов, наоборот, усиливает намагниченность атома — *парамагнитный эффект*.

Схема ориентации магнитных моментов атомов различных материалов



Диамagnetиками называют кристаллы, в которых преобладает диамагнитный эффект: *Cu, Ag, Au, Be, Zn, Ge, Si*. Они слабо намагничиваются в направлении, противоположном направлению магнитного поля.

Парамагнетиками называют кристаллы, в которых преобладает парамагнитный эффект: *Pt, Al, Mg, Ti, Zr*. Они слабо намагничиваются в направлении намагничивающего поля.

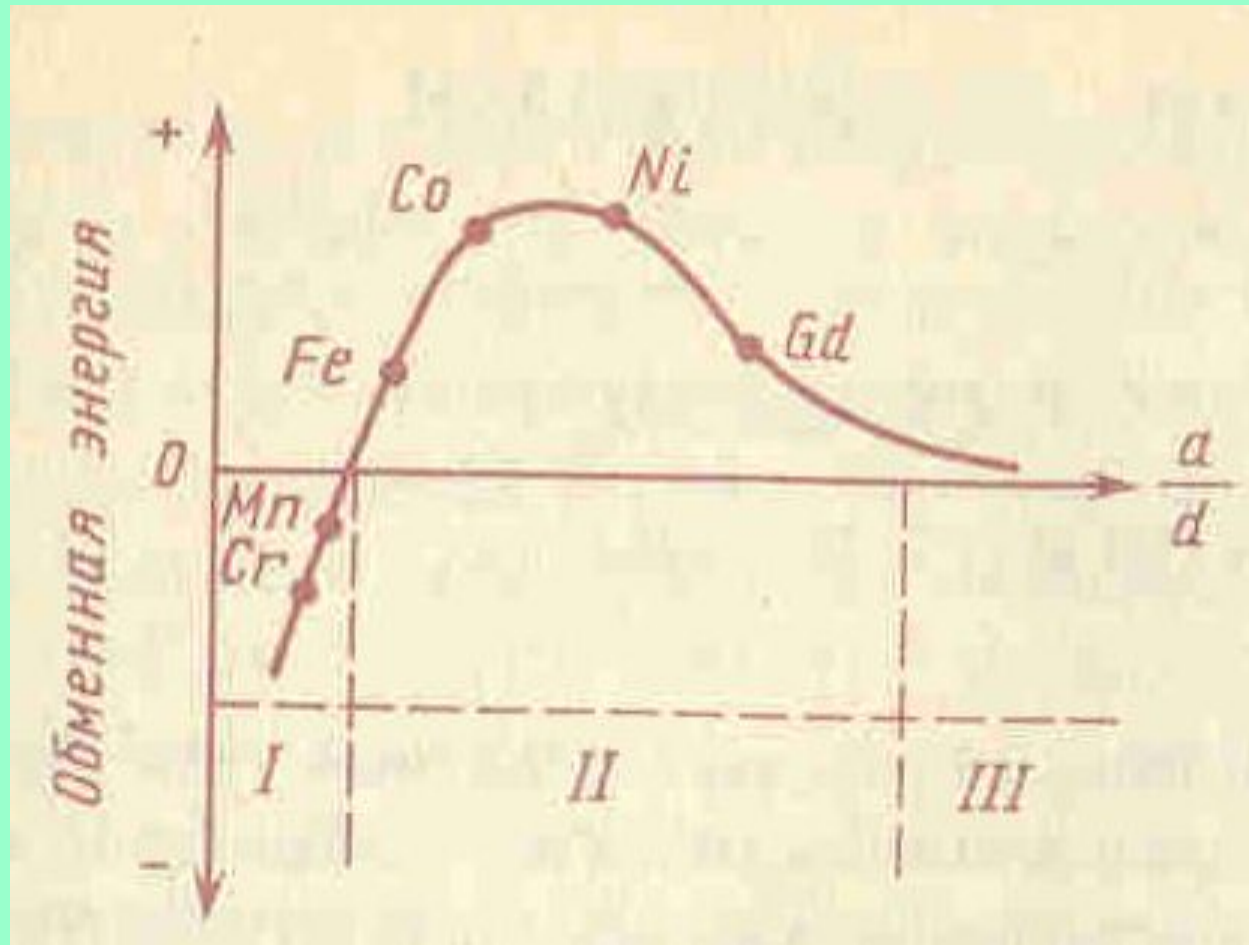
Ферромагнетики – особая группа кристаллов, обладающие большим собственным магнитным полем и способные создавать при намагничивании большие магнитные поля. Это *Fe, Ni, Co*, многие редкоземельные металлы и химические соединения.

В **антиферромагнетиках** магнитные моменты атомов ориентируются антипараллельно, и результирующий момент равен нулю. (Если момент не равен нулю, материал называют **ферримagnetиком**.)

Ферромагнетизм – результат обменного взаимодействия электронов недостроенных подуровней соседних атомов, перекрывающихся при образовании кристаллов.

Такое взаимодействие электронов оценивают ***обменной энергией***

Обменная энергия ферромагнитных материалов



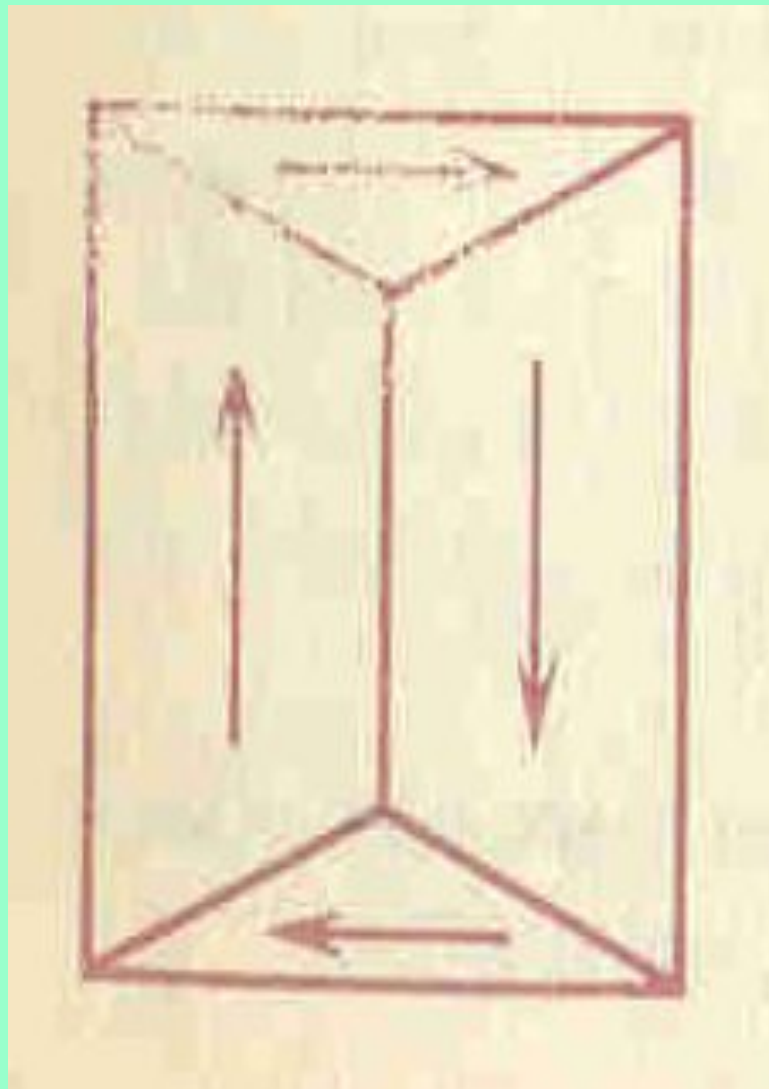
I-антиферромагнетики

II-ферромагнетики

III-парамагнетики

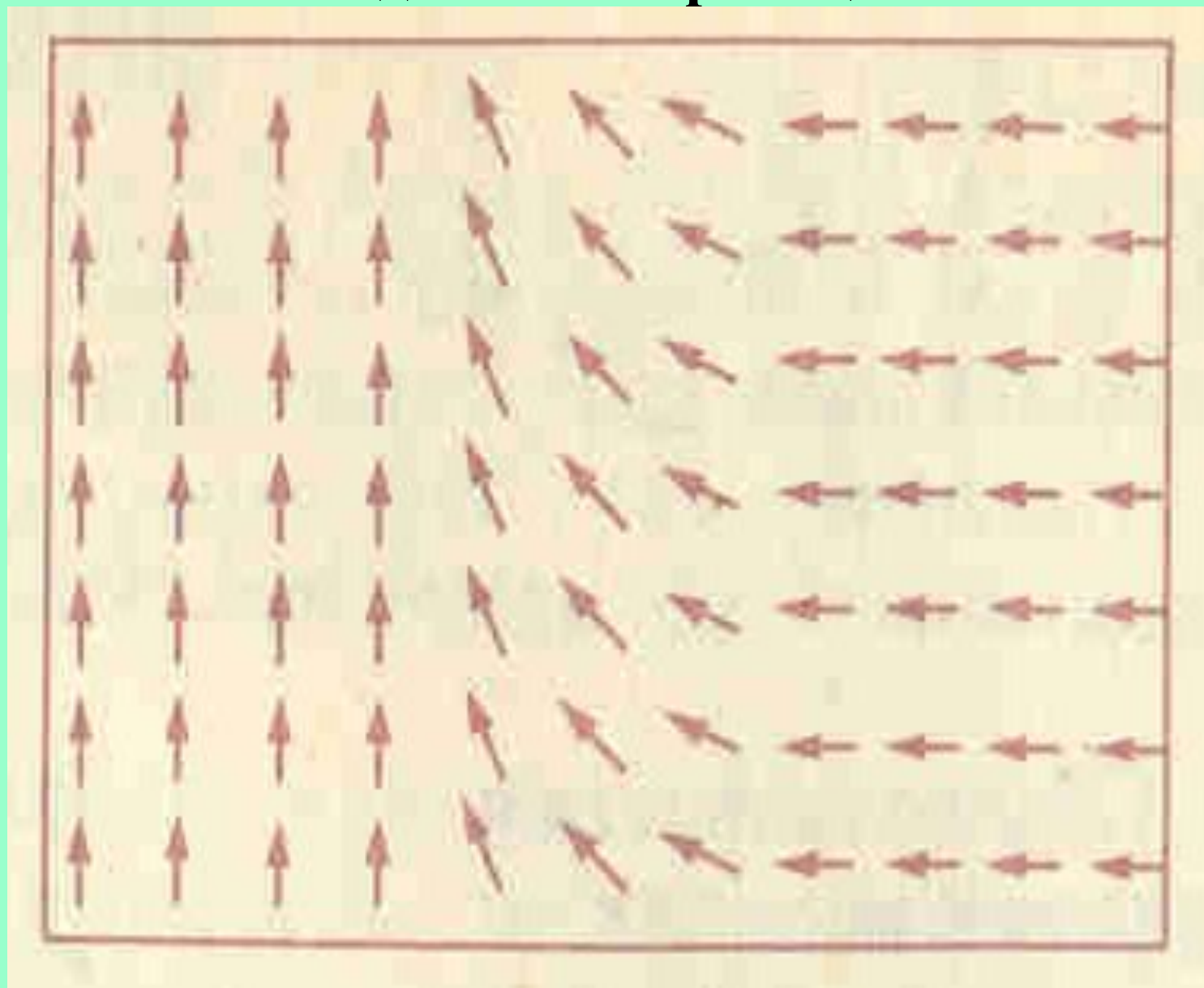
Домен – это область кристалла размером 10^{-4} - 10^{-6} м, где магнитные моменты атомов ориентированы параллельно определенному кристаллографическому направлению.

Энергетически выгодная четырех доменная структура с замкнутым магнитным полем

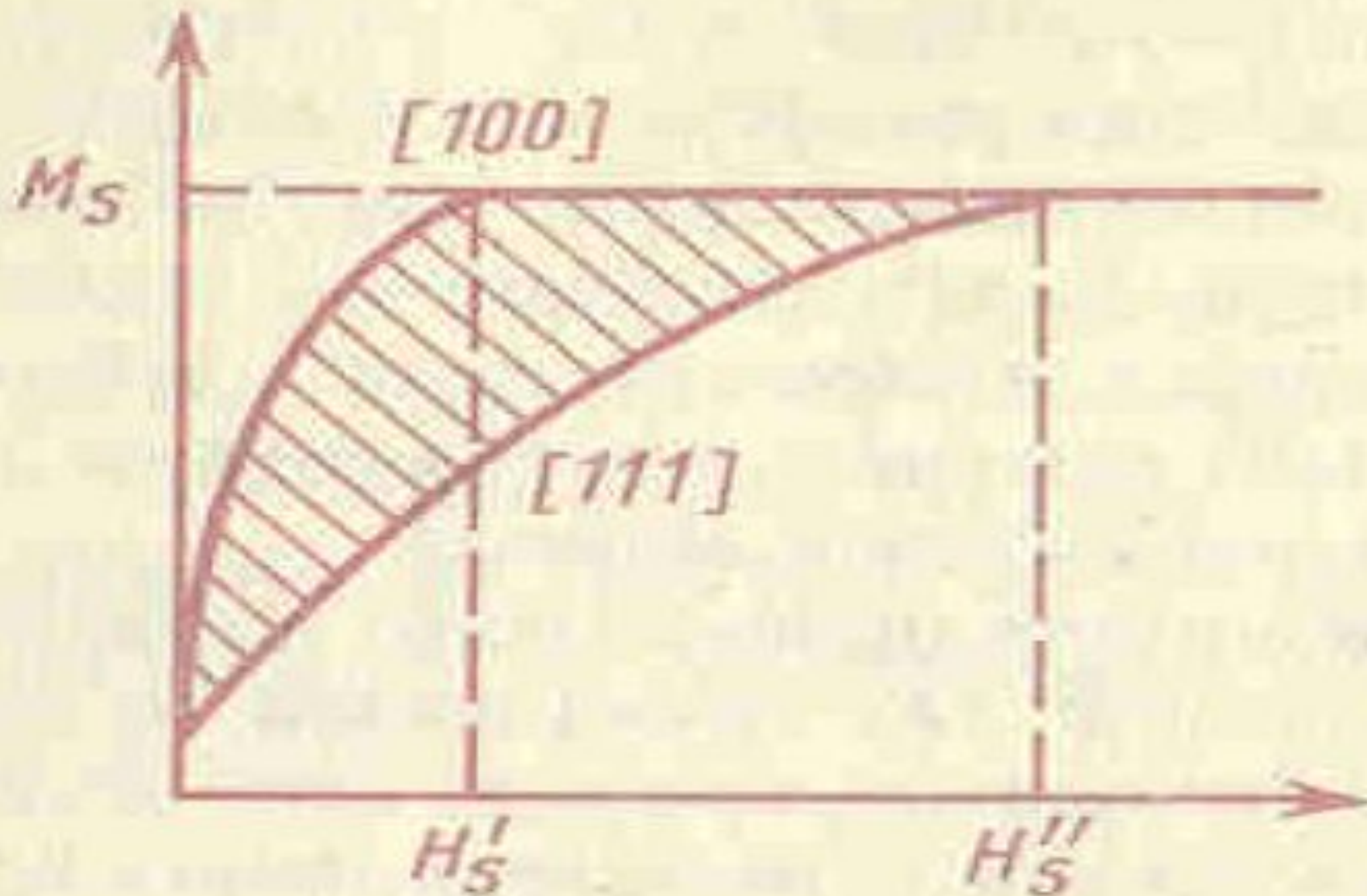


Между доменами имеются переходные слои (*доменные стенки*) шириной 10^{-7} - 10^{-8} м, внутри которых спиновые магнитные моменты постепенно поворачиваются

Изменение ориентации магнитных моментов атомов в доменной границе



Кривые намагничивания для монокристалла железа



Удельная энергия, которую необходимо затратить на перемагничивание из направления легкого намагничивания в направление трудного намагничивания, называется ***константой кристаллографической магнитной анизотропии***.

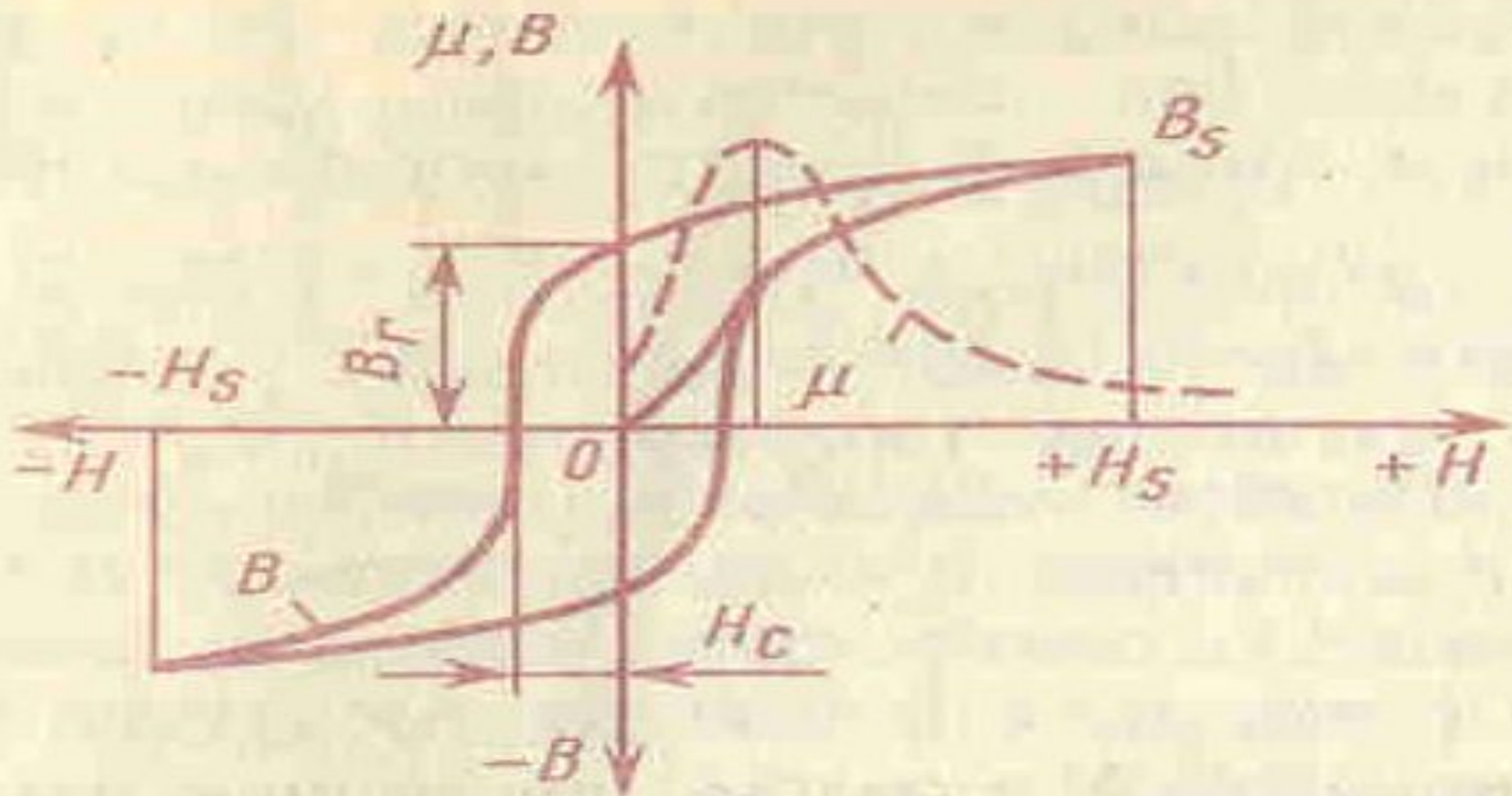
Прокаткой можно создать кристаллографическую анизотропию, которая облегчит намагничивание.

Магнитная индукция — плотность магнитного потока — определяется как сумма внешнего и внутреннего магнитных полей:

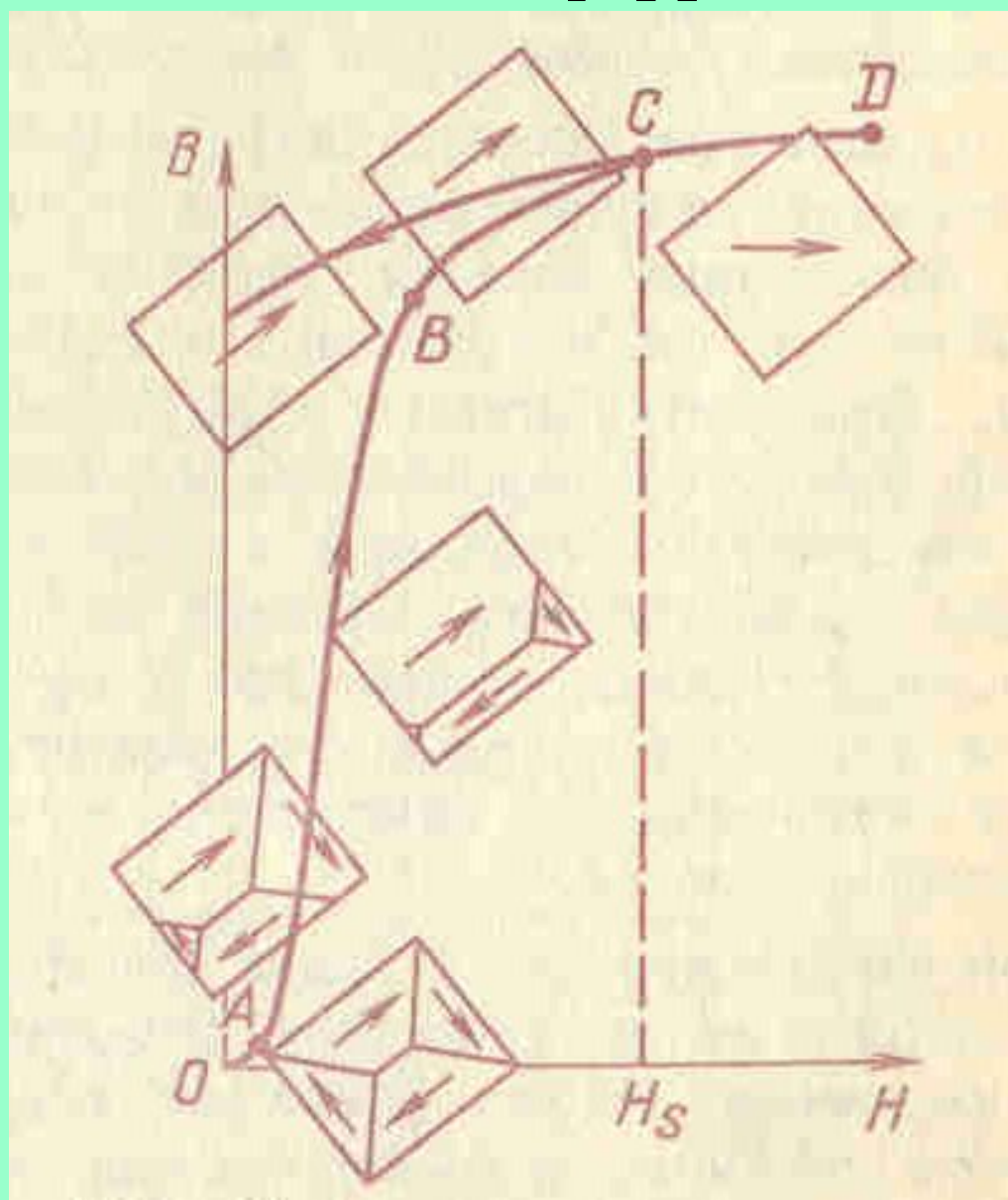
$$B = \mu_0 (H + M)$$

Интенсивность роста индукции при увеличении напряженности намагничивающего поля характеризует ***магнитная проницаемость***.

Петля гистерезиса ферромагнетика



Изменение индукции и доменной структуры при намагничивании ферромагнетика



Намагничивание в полях напряженностью меньше H_s называют *техническим намагничиванием*, а в полях с большей напряженностью — *истинным намагничиванием*, или *парапроцессом*.

Намагниченность полностью исчезает при нагреве выше температуры *точки Кюри*

На процесс намагничивания влияют магнитострикционные явления, которые могут как облегчать, так и тормозить намагничивание

$$\lambda = \pm \Delta l/l$$

При выборе магнитных материалов следует учитывать:

1. То, что магнитные характеристики M_s, B_s, K, λ_s *точка Кюри*, зависят только от химического состава ферромагнетика.
2. H_c, B_r, H_s, μ – зависят также и от вида термической обработки, так как являются структурно чувствительными

Легко намагничиваются химически чистые ферромагнитные металлы и однофазные сплавы на их основе.

Количество дефектов в них должно быть минимальным (крупнокристаллическая структура, минимальное количество дислокаций, минимальный уровень остаточных напряжений, особенно вредны примеси)

Намагничивание идет тем легче, чем меньше K и λ_s

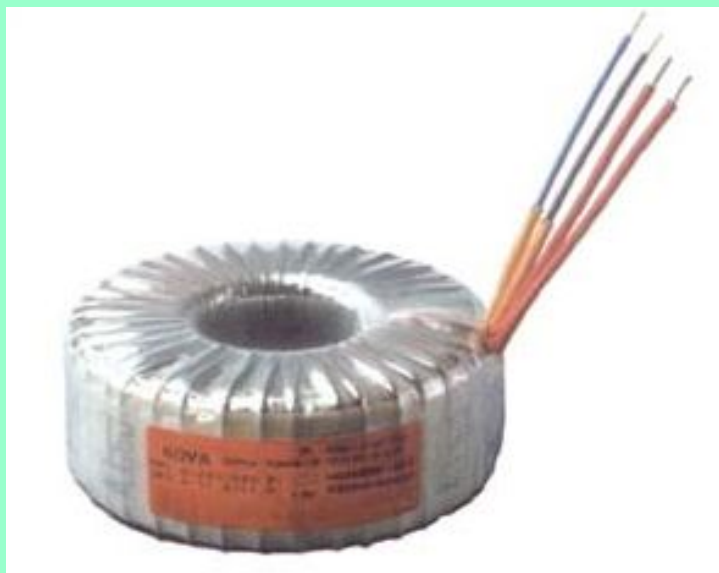
Магнитные материалы делятся на:

1. Магнитомягкие
2. Магнитотвердые
3. Магнитные материалы со специальными свойствами

Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы намагничиваются в слабых магнитных полях вследствие большой магнитной проницаемости и малых потерь на перемагничивание.

Применяют для изготовления сердечников катушек, электромагнитов, трансформаторов, динамомашин



При перемагничивании ферромагнетиков в магнитном поле возникает несколько видов энергетических потерь:

- Потери на гистерезис
- Потери на перемагничивание
- Тепловые потери, связанные с возникновением токов Фуко

$$P = A \times \frac{B_m^2 \times f^2 \times d^2}{\rho}$$

$$\mu = \mu_1 + i\mu_2$$

В переменных полях появляются потери связанные со сдвигом по фазе индукции и напряженности поля. В таком поле μ_1 магнитная проницаемость выражается комплексным числом

$$tg\delta$$

Магнитомягкие материалы подразделяют на:

1. Низкочастотные
2. Высокочастотные

Глава 17

Материалы с особыми тепловыми свойствами

17.1. Сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения

17.2. Сплавы с заданным температурным коэффициентом модуля упругости

Материалы с высокой индукцией насыщения

Магнитные свойства железа

Железо	C, %	μ_n	$\mu_{\max}$	H_c , А/м
		мГн/м		
Карбонильное	0,005 — 0,01	4,0	26	6,4
Электролитическое переплавленное в вакууме	0,01	—	79	7,2
Электролитическое	0,02 — 0,025	0,8	19	28
Технически чистое	0,02 — 0,04	0,3	9	64

Магнитные свойства нелегированной электротехнической тонколистовой стали (ГОСТ 3836-83)

Сталь	H_c А/м	$\mu_{\max}$ мГн/м	B (Тл) при $H = 30$ кА/м
10895 20895	95	3,8	2,05
10864 20864	64	5,6	2,05
10848 20848	48	6,0	2,05

Электрическое сопротивление стали можно повысить легированием кремнием. Кремний образует легированный твердый раствор. Один процент кремния повышает удельное электросопротивление на 0,12 мкОм х м.

При отжиге кремний способствует росту кристаллов и несколько уменьшает коэрцитивную силу.

Магнитные свойства легированной электротехнической тонколистовой стали (ГОСТ 21427-75)

Сталь	Толщина листа, мм	$P_{1,5/50}$, Вт/кг	B (Тл) при H (кА/м), не менее	
			2,5	30
Горячекатаная изотропная				
1311	0,50	6,1	1,48	1,95
1411	0,50	4,4	1,46	1,94
1511	0,50	3,5	1,46	1,90
Холоднокатаная изотропная				
2011	0,65	9,0	1,60	2,02
2111	0,65	10,0	1,58	2,0
2211	0,65	7,0	1,56	1,96
2311	0,65	5,8	1,52	1,96
2411	0,50	3,6	1,49	1,96
Холоднокатаная анизотропная				
3411	0,50	2,45	1,75	—
3416	0,28	0,89	1,9	—

После технологических операций, необходимых для изготовления деталей магнитопровода (резка, штамповка и др.), магнитные свойства сталей ухудшаются.

Для восстановления магнитных свойств применяют отжиг при температуре ниже температуры фазового превращения ($880-900^{\circ}\text{C}$) в среде, предохраняющей от окисления и науглероживания.

Материалы с высокой магнитной проницаемостью

Для достижения больших значений индукции в слабых магнитных полях применяют сплавы с большой начальной проницаемостью.

Это сплавы систем *Fe-Ni* (пермаллои), *Fe-Co*, *Fe-Al* (альсиферы)

Для маркировки магнитомягких сплавов используют буквенно-цифровую систему.

79НМ, 50НП

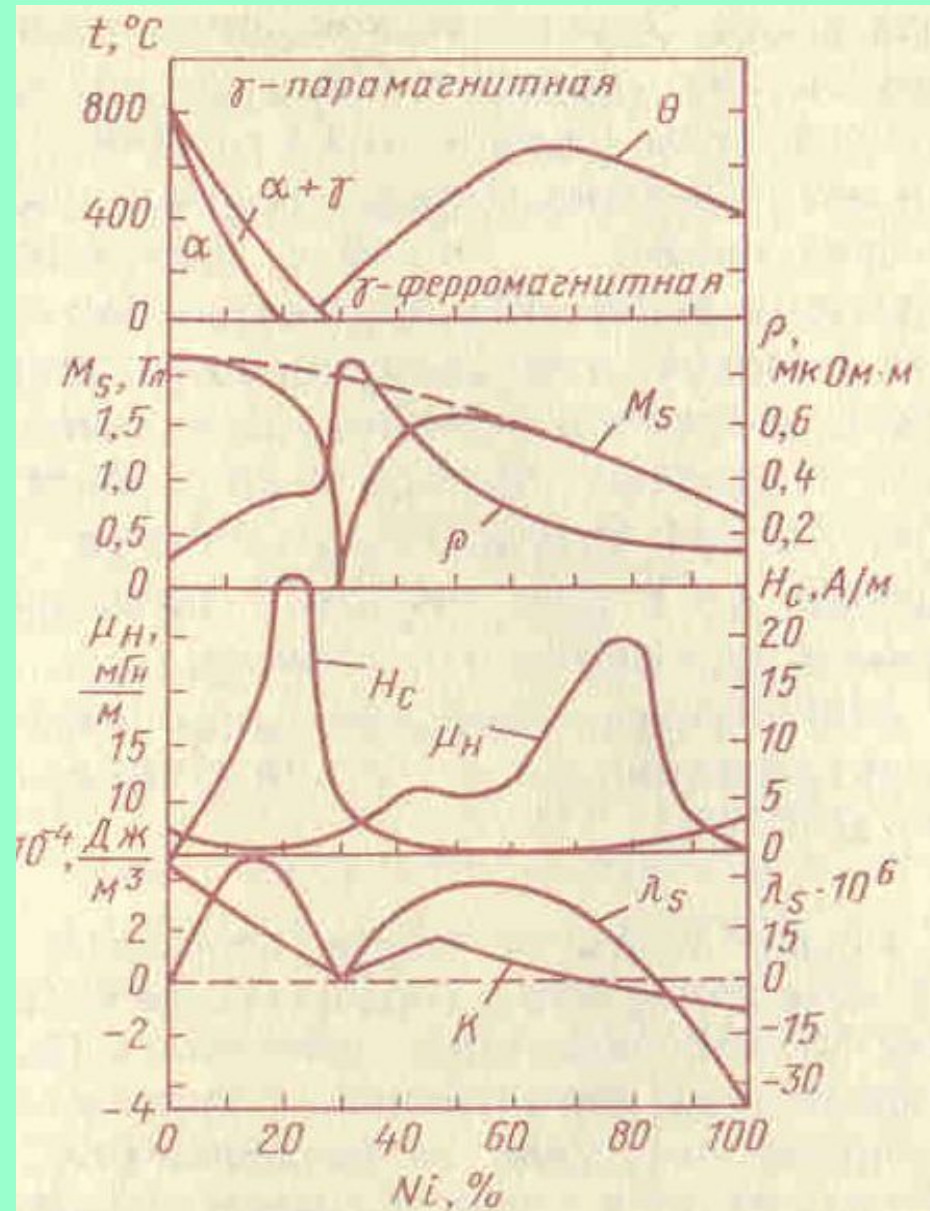
Магнитомягкие сплавы являются прецизионными:

- концентрации легирующих элементов поддерживают в узких интервалах
- содержание углерода и других примесей ограничено

По качеству сплавы разделяют на классы:

1. С нормальными магнитными свойствами (обеспечивается выплавкой в открытых печах)
2. С повышенными магнитными свойствами (обеспечивается выплавкой в вакууме)
3. С высокими магнитными свойствами (обеспечивается выплавкой вакуумных индукционных печах с последующими переплавами)

Влияние состава на магнитные характеристики железоникелевых сплавов



Магнитные свойства холоднокатаных лент толщиной 0,1 мм из пермаллоев (ГОСТ 10160-75)

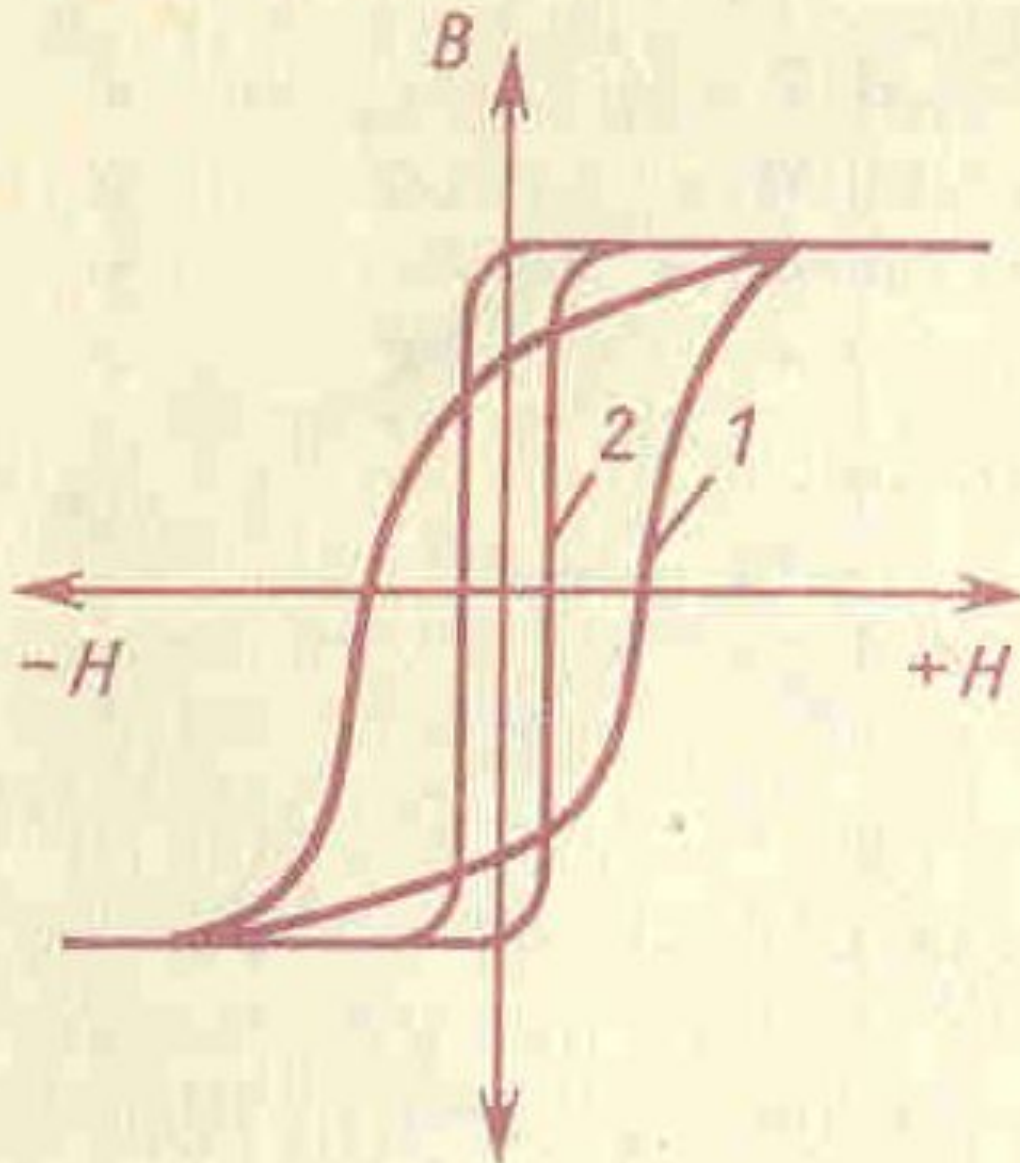
Сплав	Магнитная проницае- мость, мГн/м		H_c , А/м	B_s , Тл	ρ , мкОм·м
	μ_n	μ_{max}			
79НМ*	25	150	2,4	0,75	0,55
	28	190	1,2	0,73	
	38	250	1,2	0,73	
81НМА	88	310	0,64	0,50	0,8
45Н	2,9	31	16	1,5	0,45
50Н	3,8	38	14	1,5	0,45
50НХС	3,1	31	13	1,0	0,90

* Для сплава 79НМ приведены магнитные свойства для I—III классов.

Магнитные свойства сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса (холоднокатаная лента)

Сплав	Толщина ленты, мм	J_{max} , МГн/м	H_c , А/м	B_s , Тл	Коэффициент прямоугольности при $H = 800$ А/м
50НП	0,10	50	18	1,5	0,85
65НП	0,10	250	2,8	1,3	0,90
79НМП	0,003	—	9,6	0,61	0,90

**Петля гистерезиса сплава 65НП до (1)
и после (2) обработки в магнитном поле**



Железоалюминиевые сплавы – альсифер 5,4%*Al* и 9,6%*Si*

Преимуществом альсиферов перед пермаллоями является отсутствие в их составе дорогих или дефицитных элементов.

- Высокая твердость
- Хрупкость
- Изделия получают литьем или порошковой металлургией

Аморфные металлические сплавы (АМС)

По химическому составу разделяют на:

- Железные *2НСР, 10НСР, 9КСР*
- Железоникелевые *АМАГ225, АМАГ245*
- Кобальтовые *84КСР, 84КХР*

Они содержат 20-25% элементов-аморфизаторов (*B, Si, P, C*), а также добавки *Cr, Mo, Nb, V, Mn*.

Основной технологией производства лент из АМС является быстрая закалка расплава.

Ленты являются основным видом полуфабрикатов, из которых изделия получают гибкой, навивкой, вырубкой.

Высокочастотные магнитомягкие материалы

К этой группе материалов относятся *ферриты*

Ферриты – магнитная керамика, получаемая спеканием оксида железа с оксидами других металлов:

- Высокое удельное электрическое сопротивление
- Невысокая индукция насыщения
- Относительно большая коэрцитивная сила
- Невысокая температура точки Кюри
- Твердые
- Хрупкие

Большинство ферритов обладают кристаллической структурой типа шпинели и отвечают формуле: $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me – двухвалентные металлы ($Mn, Ni, Mg, Ba, Co, Cu, Zn, Cd$)

Ферриты - ионные кристаллы. Их решетку образуют отрицательные ионы кислорода (32) и положительные ионы металлов (24)

64 тетраэдрические поры (поры А)

32 поры октаэдрические (поры В)

Ионы металлов занимают 8 пор А и 16 пор В.

В результате обменного взаимодействия ионов металлов возникает антипараллельное расположение спиновых моментов.

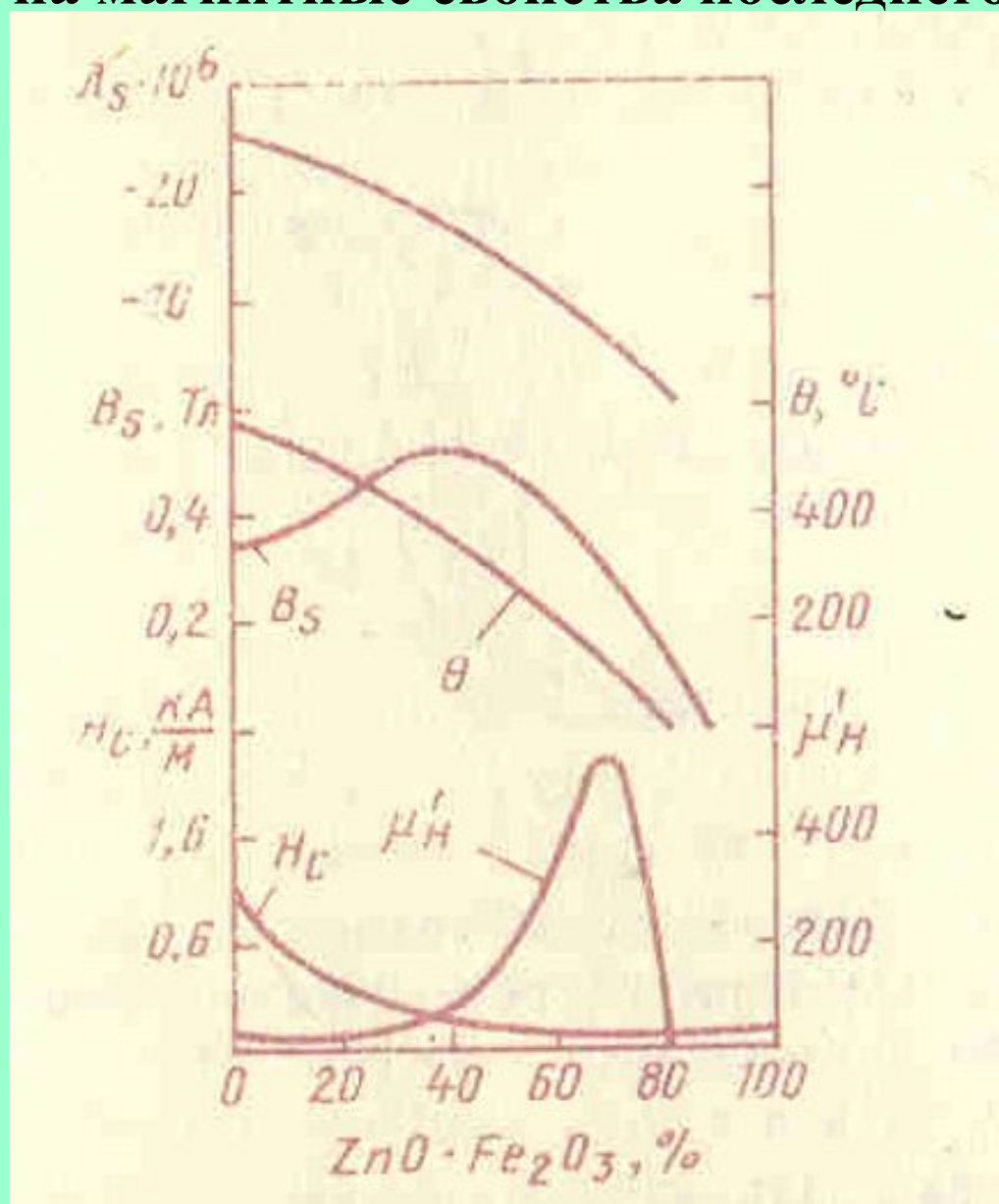
Из-за нескомпенсированного антиферромагнетизма ферриты называют **ферримагнетиками**

Ферриты применяют на радиочастотах до 200 МГц

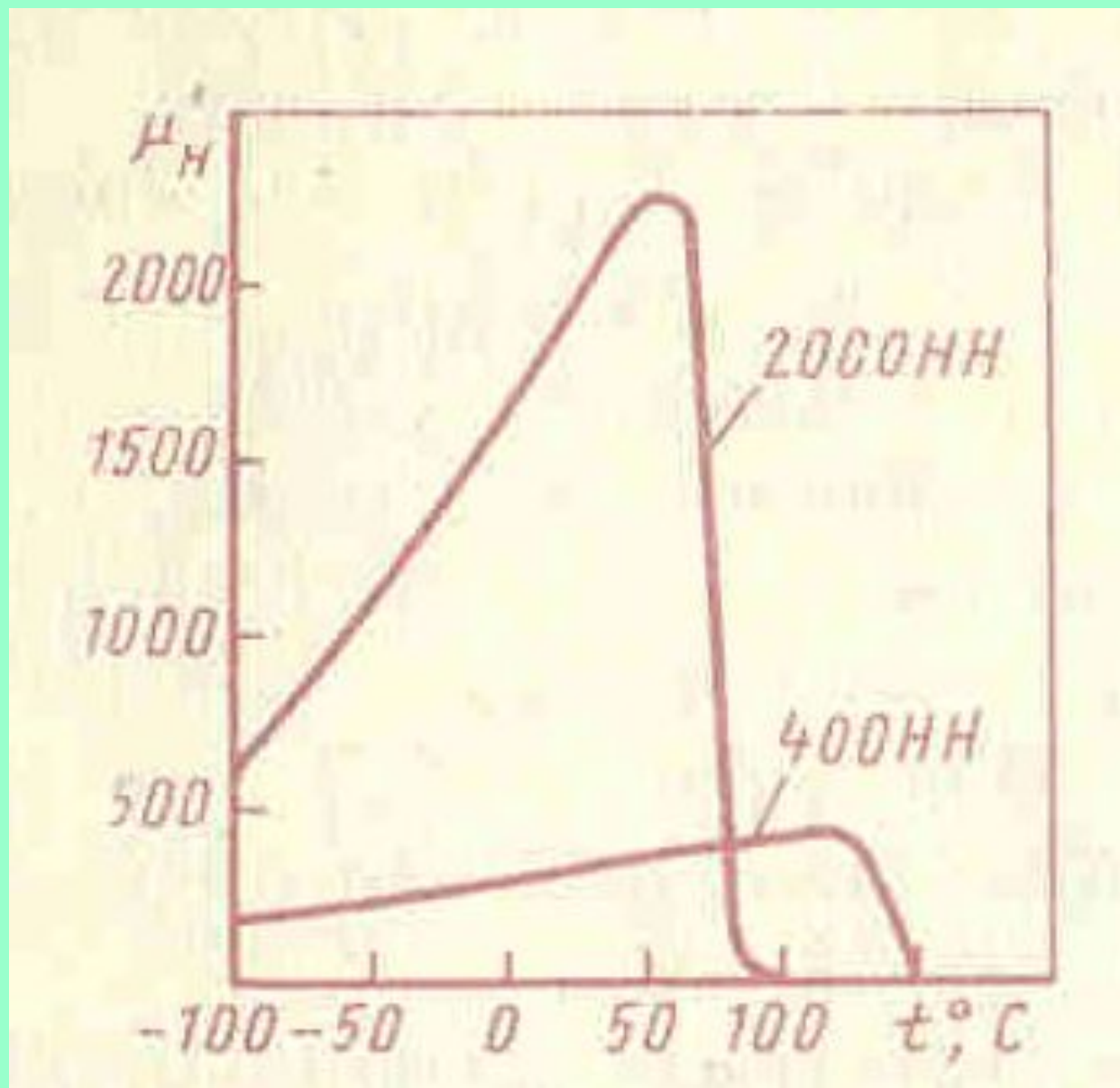
К ним относятся:

- Марганцево-цинковые ферриты
- Никель-цинковые ферриты

Влияние содержания цинкового феррита в никелевом феррите на магнитные свойства последнего



Влияние температуры нагрева на магнитную проницаемость никель-цинковых ферритов



Свойства некоторых ферритов, применяемых при работе в слабых полях на низких и высоких радиочастотах

Группа	Феррит	μ'_H	ρ , Ом·м	$f_{кр}$, МГц, при $tg\delta = 0,1$
1	4000НМ	4000	10^3	0,1
	1000НМ	1000	$5 \cdot 10^3$	1,0
2	1000НМЗ	1000	10^5	2,2
1	1000НН	1000	10^5	0,4
	400НН	400	10^6	2,0
2	300НН	300	10^8	5
	60НН	60	10^8	55
3	100ВЧ	100	10^{10}	35
	30ВЧ2	30	10^{11}	200

**Ферриты для устройств, применяемых на высоких
(до 800 МГц)
и сверхвысоких (более 800 МГц) частотах**

Ферриты имеют сложный состав, их изготавливают из четырех и более оксидов

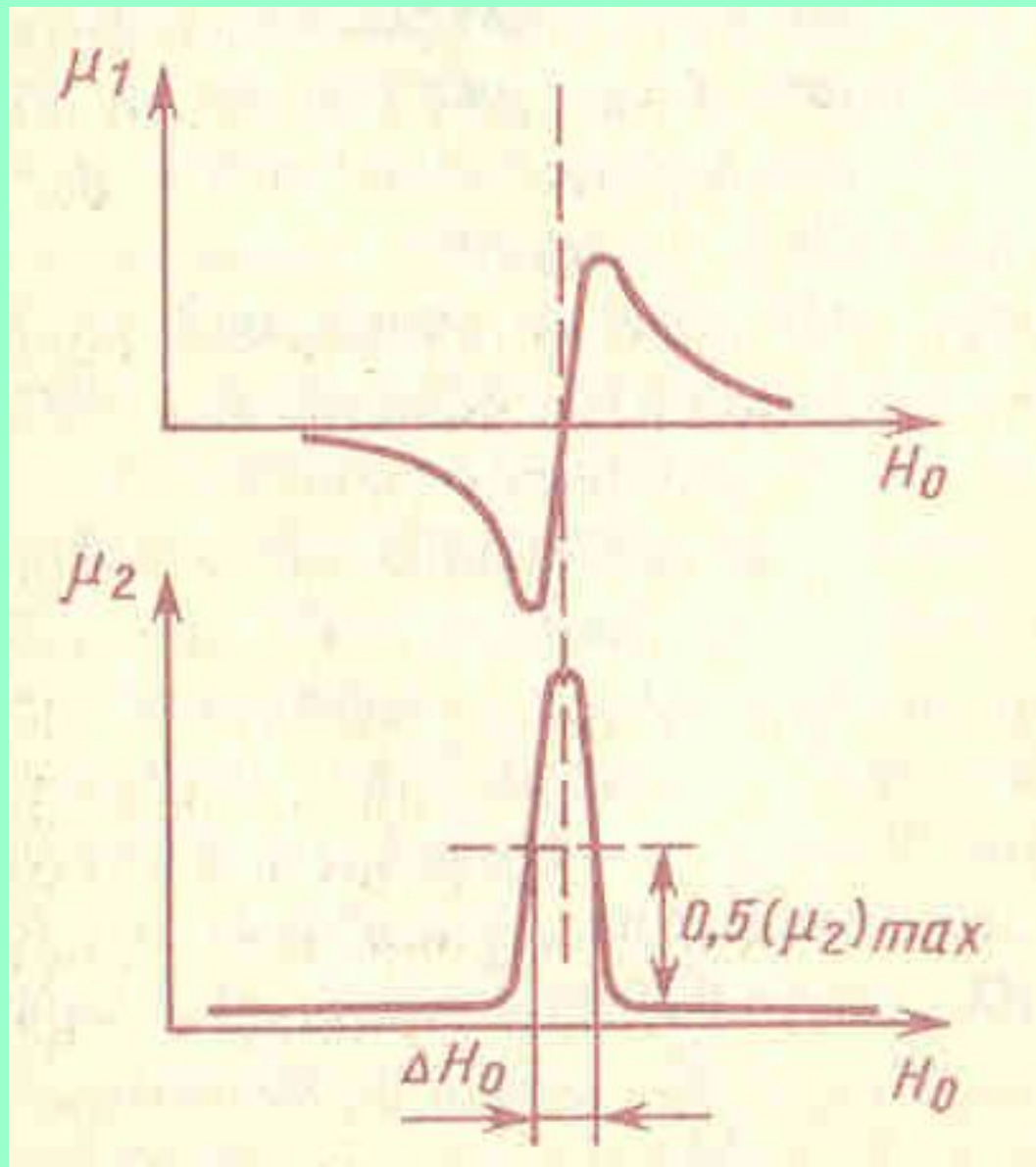
Применение ферритов в СВЧ диапазоне основано на явлениях эффекта Фарадея и ферромагнитного резонанса

Эффект Фарадея используют в модуляторах, фазовращателях, циркуляторах и других устройствах антенной техники

Ферромагнитный резонанс возникает в тех случаях, когда на феррит, перемагничиваемый высокочастотным полем, наложено перпендикулярное постоянное магнитное поле.

На принципе избирательного поглощения основано использование ферритов в резонансных вентилях, фильтрах, быстродействующих переключателях и в других устройствах

Изменение магнитной проницаемости феррита в условиях магнитного резонанса



Свойства ферритов для СВЧ

Феррит	$\mu_0 M_s$, Тл	θ , °С	ΔH_0 (кА/м) при частоте, МГц	
			9200	3000
1СЧ1	0,20	270	40	—
3СЧ4	0,18	200	15,9	—
6СЧ1	0,13	150	—	10,3
30СЧ1	0,13	170	—	12,7
80СЧ	0,03	120	—	4,8—3,2

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса

Ферриты применяют в переключающих устройствах, в запоминающих устройствах.

Наибольшее применение получили ферриты из оксидов магния и марганца, а также полиферритов, содержащих дополнительно оксиды цинка, кальция, лития.

Изделия из ферритов изготавливают в виде тонких пленок или слоистых матриц, что обеспечивает их малые габаритные размеры и высокое быстродействие

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса

Феррит	H_c , А/м	B_r , Тл	Коэффициент прямоуголь- ности	θ , °С
10ВТ	9,6	0,20	0,91	115
30ВТ	29,6	0,14	0,93	145
56ВТ	56,0	0,23	0,93	160
100ВТ	104	0,23	0,91	160
140ВТ	140	0,21	0,90	200
180ВТ	184	0,13	0,89	224

Магнитотвердые материалы

Используют для изготовления постоянных магнитов.

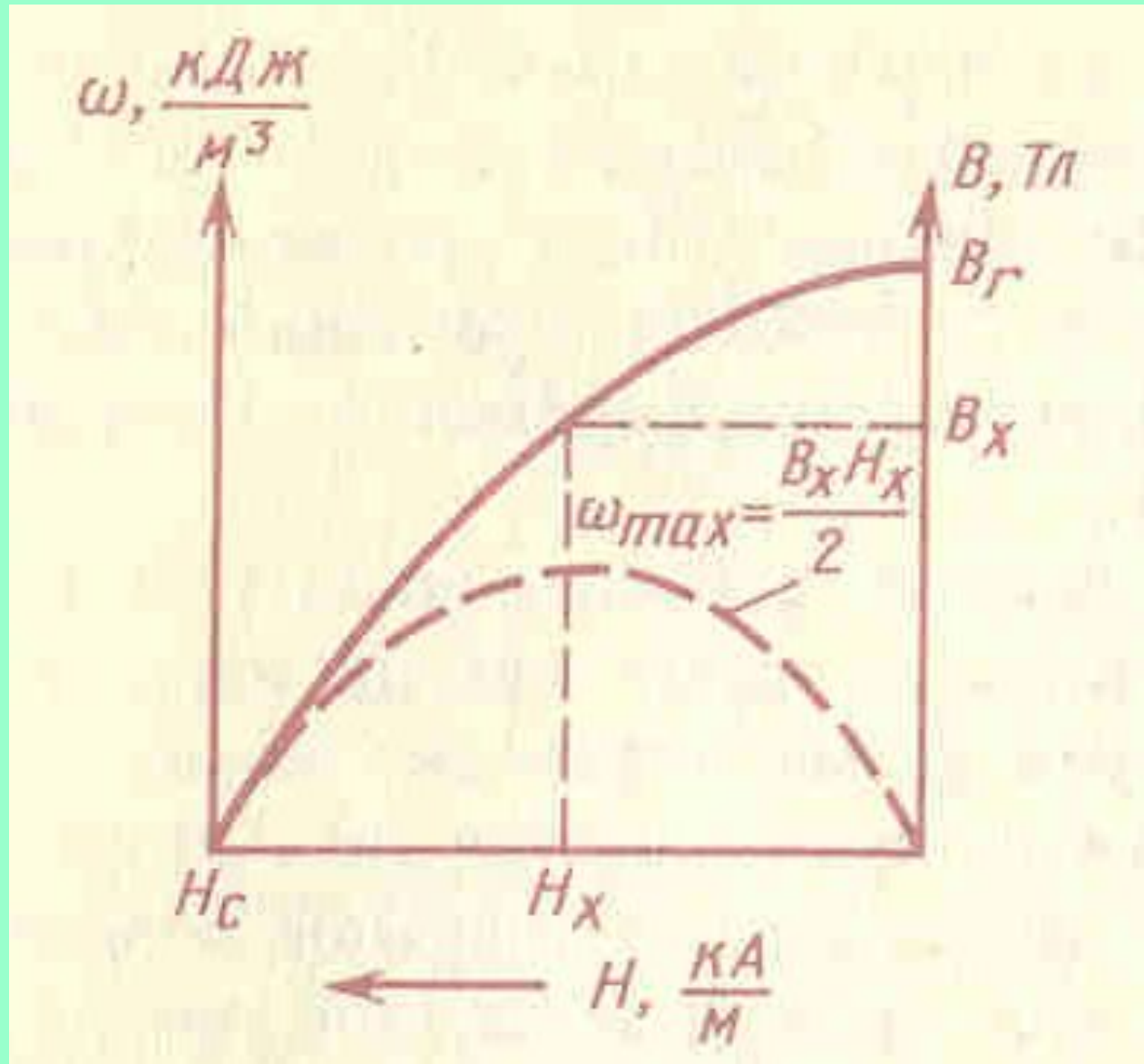
Они намагничиваются в сильных полях 1000 кА/м, имеют:

- Большие потери при перемагничивании
- Большую остаточную индукцию
- Большую коэрцитивную силу

Важная характеристика магнитотвердых материалов –
максимальная удельная магнитная энергия

$$\omega_{\max} = \frac{B_x \times H_x}{2}$$

Изменение магнитной индукции и удельной магнитной мощности при размагничивании магнитно-твёрдого материала



Размагничивание связано с теми же процессами, что и намагничивание:

- Смещением доменной стенки
- Вращением векторов намагничивания

Основным процессом при размагничивании является процесс вращения векторов намагничивания, который определяет значения H_c , B_r и $\omega_{\max}$

Для однодоменных кристаллов размагничивание идет только в результате вращения векторов намагничивания.

Размер однодоменных кристаллов определяется:

- Формой кристалла
- Параметром кристаллической решетки
- Магнитными характеристиками (H_c , M_s , θ)

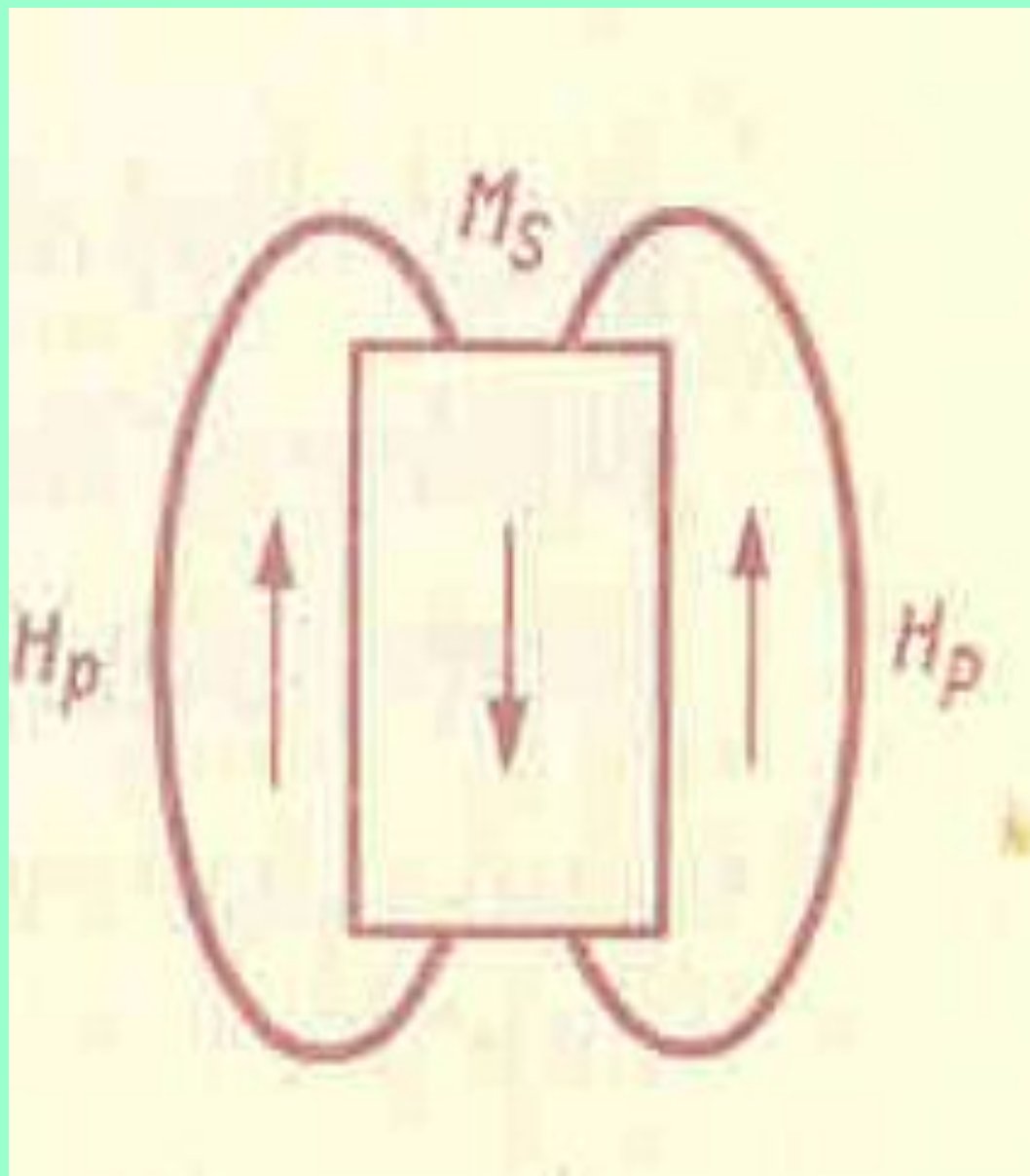
Значения коэрцитивной силы однодоменных кристаллов для различных видов анизотропии

Анизотропия	H_c , кА/м		
	Fe	Co	Ni
Кристаллографическая	40	480	11
Формы	850	700	252
Магнитно-упругая для $\sigma = 200$ МПа	48	48	320

Анизотропия формы вызывает появления размагничивающего поля H_p , которое уменьшает намагничивающее поле и тем самым увеличивает коэрцитивную силу H_c

Магнитоупругая анизотропия проявляется при возникновении неоднородных напряжений вследствие магнитострикции или приложения внешних сил.

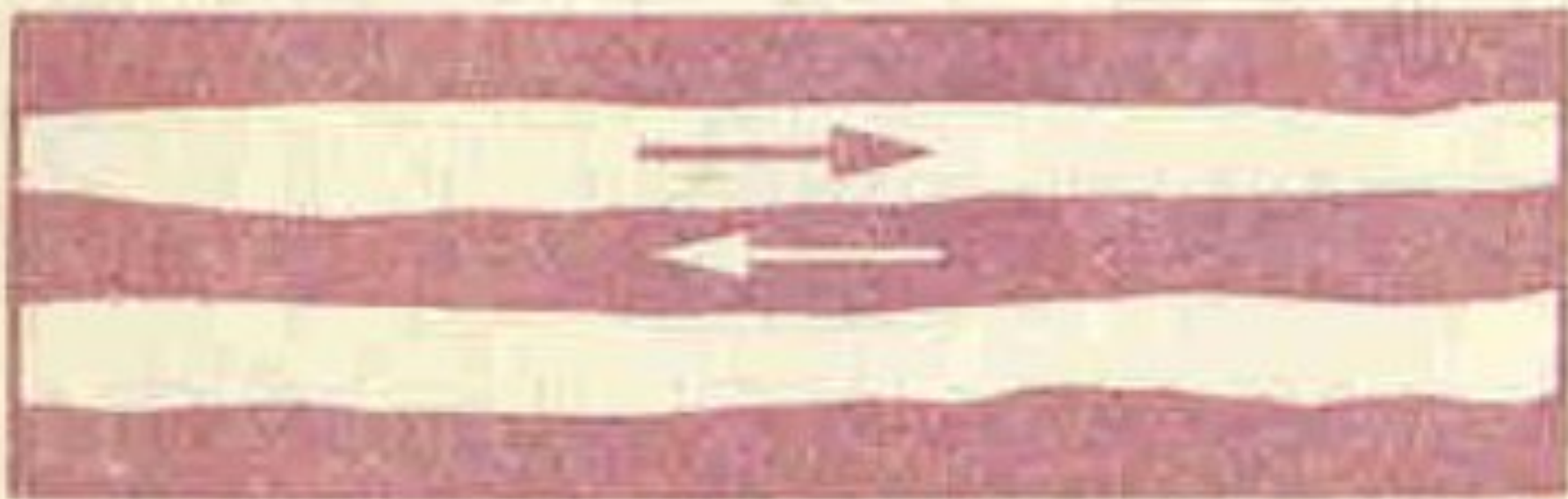
Размагничивающее поле однодоменного неравноосного кристалла



Тонкие пленки толщиной 0,1-30 мкм однодоменны и магнитоанизотропны. При толщине пленки, близкой к 30 мкм, в них появляется полосовая доменная структура.

Длинные домены намагничиваются во взаимно противоположных направлениях и вращаются всей системой полос под действием внешнего поля.

Полосовая доменная структура в тонких пленках



Большие значения коэрцитивной силы имеют:

- Многофазные сплавы со структурой однодоменных неравноосных ферромагнитных включений в немагнитной основной фазе
- Сплавы с ферромагнитной основной фазой и неферромагнитными включениями

Требования к составу и структуре магнитотвердых материалов:

- Применение имеют сплавы, а не чистые металлы
- Желательна для ферромагнитных включений однодоменная неравноосная форма кристаллов
- Для неферромагнитных включений важны их количество и размер
- Ферромагнитная основа должна иметь различного рода искажения: структура – предпочтительно неравновесный пересыщенный твердый раствор внедрения; желательны остаточные напряжения.

Нестабильность свойств может вызываться структурными изменениями (структурное старение), а также ударами и вибрацией (магнитное старение)

Магнитотвердые материалы для постоянных магнитов по способу изготовления подразделяют на:

- Литые
- Порошковые
- Деформируемые

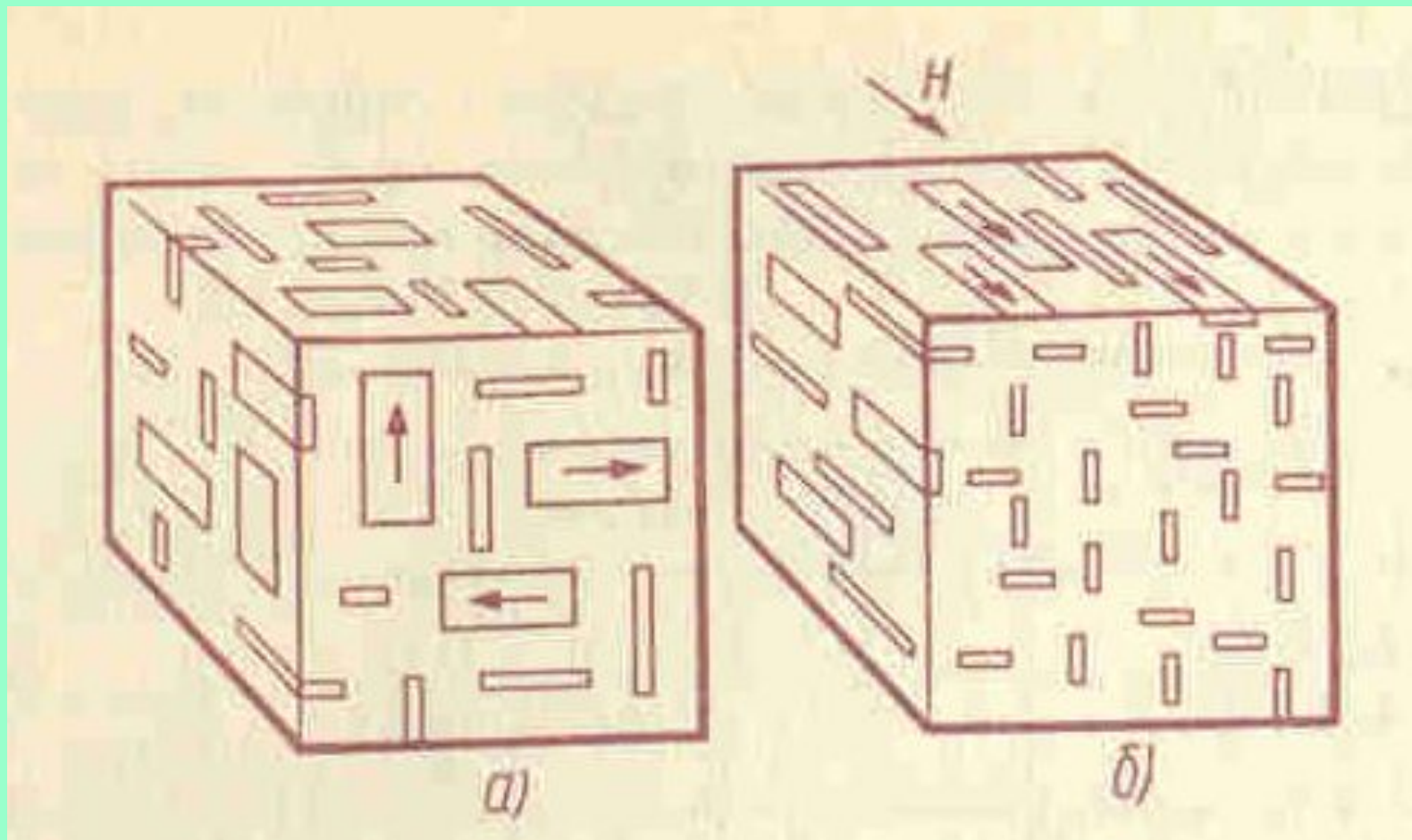
Магнитотвердые литые материалы

К магнитотвердым литым материалам относятся сплавы системы ***Fe-Ni-Al***.

При 20 °С в своей структуре они содержат ферромагнитную β_1 фазу с большим содержанием железа, вкрапленную в слабомагнитную фазу β_2 .

В результате термической обработки получают однодоменные кристаллы ферромагнитной фазы пластинчатой формы

Ориентация вторичных фаз в сплавах *Fe-Ni-Al*



а-охлаждение при закалке без поля

б-охлаждение при закалке в магнитном поле

Закалка - нагрев до 1200–1280 °С и охлаждение с критической скоростью, обеспечивающей наибольшую дисперсность выделений фазы β_1 . При отпуске (590-650 °С) происходит дораспад фаз.

Сплавы системы *Fe-Ni-Al* содержат:

Ni - 12-35%

Al - 6,5-16%

сплавы дополнительно легируют *Cu, Co, Ti, Nb*

Магнитные свойства литых сплавов *Fe-Ni-Al* для изготовления магнитов (ГОСТ 17809-72)

Сплав	$(\rho)_{\text{max}}$, кДж/м ³	H_c , кА/м	B_r , Тл	Маг- нитная анизотропия	Форма кри- стал- лов
ЮНД4 ЮНД8	3,6 5,1	40 44	0,5 0,6	Нет	Рав- ноос- ная
ЮНДК18 ЮНДК35Т5Б ЮНДК35Т5БА	9,7 16 36	55 96 110	0,9 0,75 1,02	Есть	Стол- бча- тая

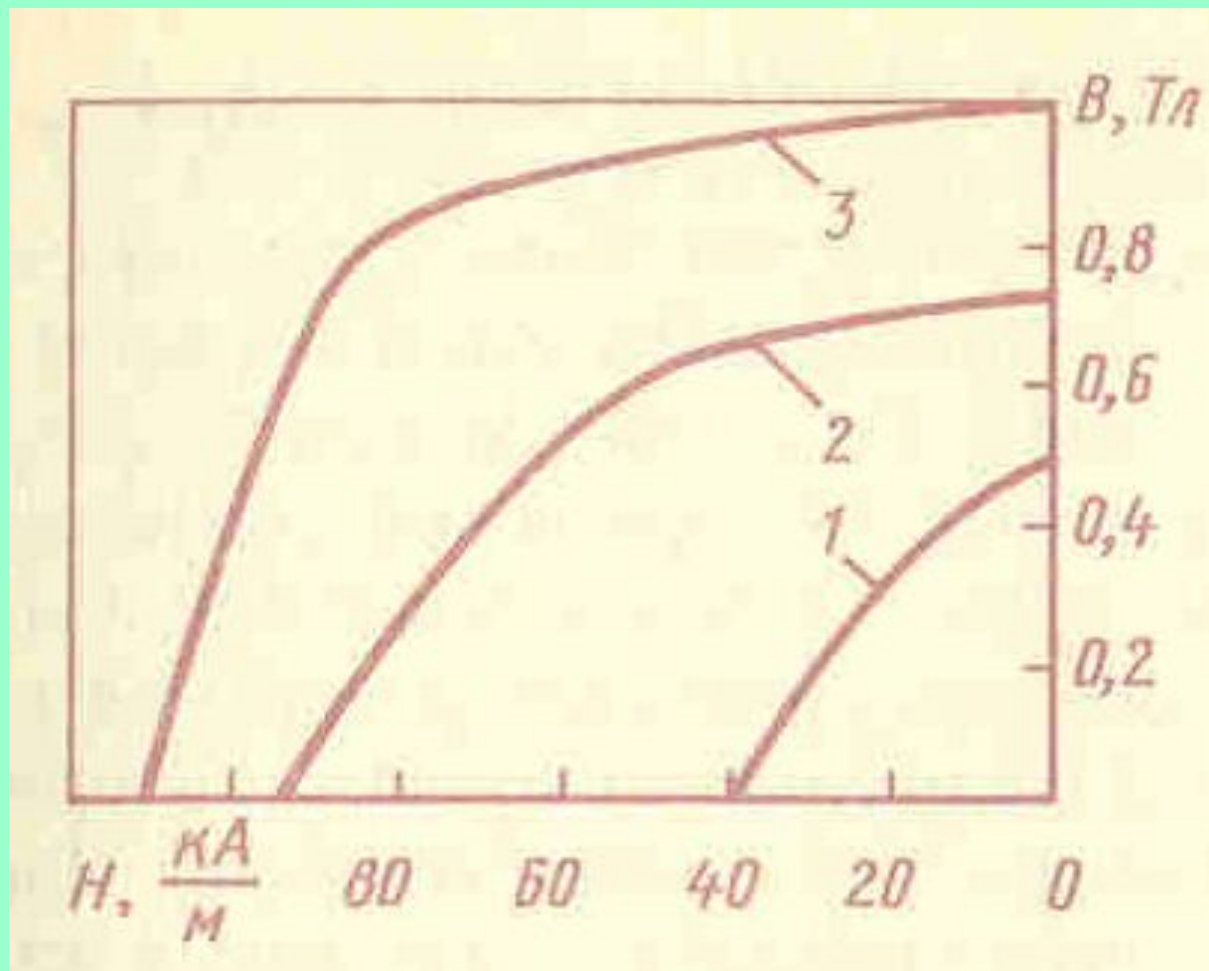
Магнитные свойства можно улучшить:

- Охлаждением при закалке в сильном магнитном поле
- Получением столбчатых кристаллов направленным теплоотводом (длина кристаллов до 300 мм) в магнитном поле.

Недостатки литых сплавов:

- Высокая твердость
- Повышенная хрупкость
- Исключены все виды обработки, кроме шлифования

Кривые размагничивания литых сплавов *Fe-Ni-Al*



1-ЮНД4

2-ЮНДК35Т5Б

3-ЮНДК35Т5БА

Порошковые магнитотвердые материалы

Сплавы системы **Fe-Ni-Al** получают спеканием порошков металлов при 1300°C в защитной атмосфере.

Для обеспечения высоких значений B_r и $\omega_{\max}$:

- Сплавы не должны быть пористыми
- Порошки должны быть мелкодисперсными, неравноосными

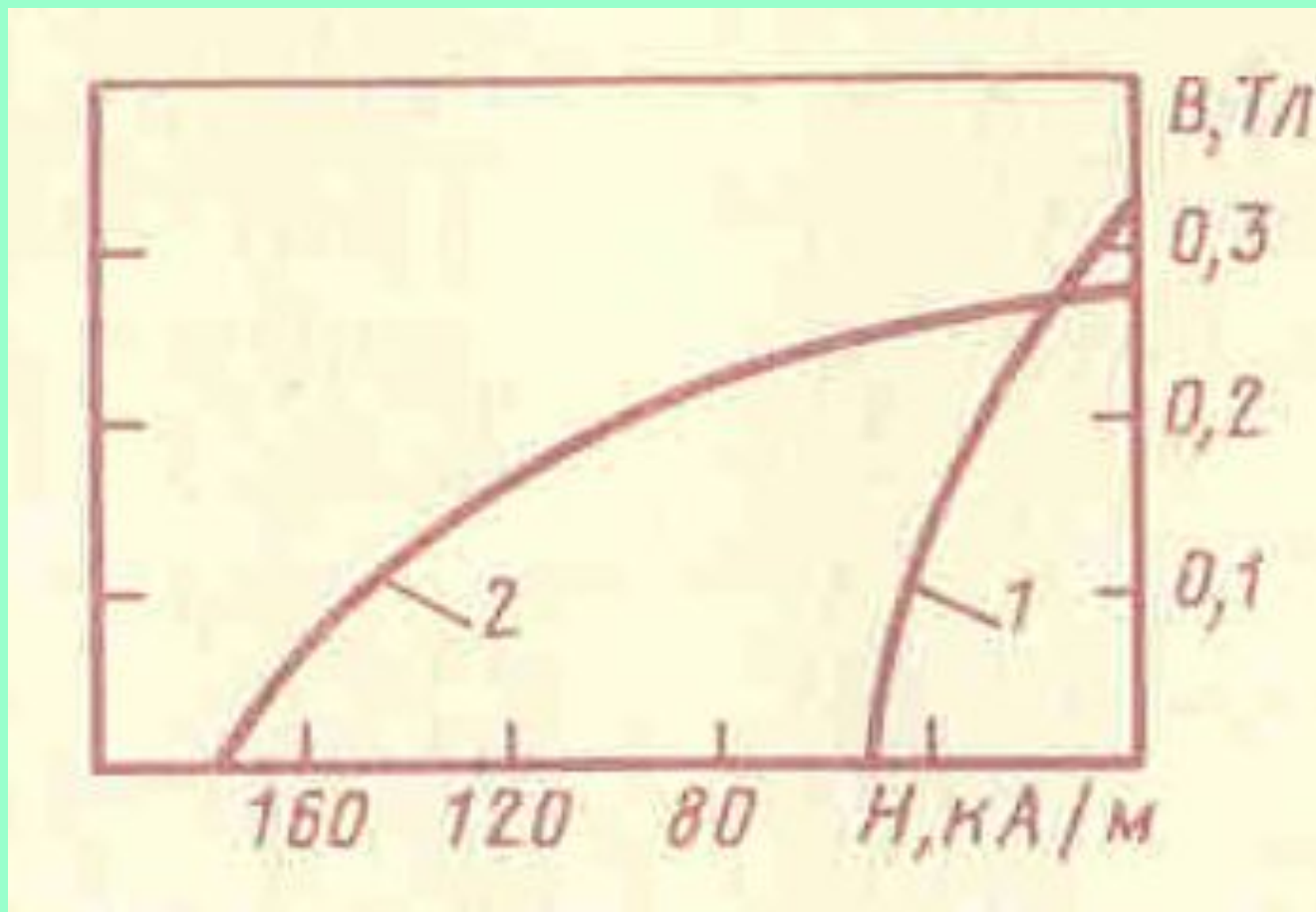
Магнитные свойства спеченных сплавов *Fe-Ni-Al* для изготовления магнитов (ГОСТ 13596-68)

Сплав	ω_{max} , кДж/м ³	H_c , кА/м	B_r , Тл	Магнит- ная ани- зотропия
ММК1 ММК6	3 5	24 44	0,6 0,65	Нет
ММК7 ММК11	10,5 16	44 118	0,95 0,7	Есть

Магнитотвердые ферриты также получают спеканием порошков оксидов *FeO*, *BaO*, *CoO*.

Они относятся к диэлектрикам (имеют большое электросопротивление) и поэтому могут использоваться как постоянные магниты в высокочастотных магнитных полях без тепловых потерь.

Кривые размагничивания ферритов



1-порошки сферической формы

2-порошки неравноосные, прессованные в магнитном поле

Магнитные свойства бариевых (ГОСТ 24063-80) и кобальтовых ферритов для изготовления магнитов

Феррит	Состав	Магнитная анизотропия	ω_{max} , кДж/м ³	H_{cB}	H_{cM}	B_r , Тл
				кА/м		
6БИ240 28БА190	$\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	Нет Есть	3 14	125 185	240 190	0,19 0,39
10КА165 14КА135	$\text{CoO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	Есть	5 7,15	143 127	165 135	0,23 0,28

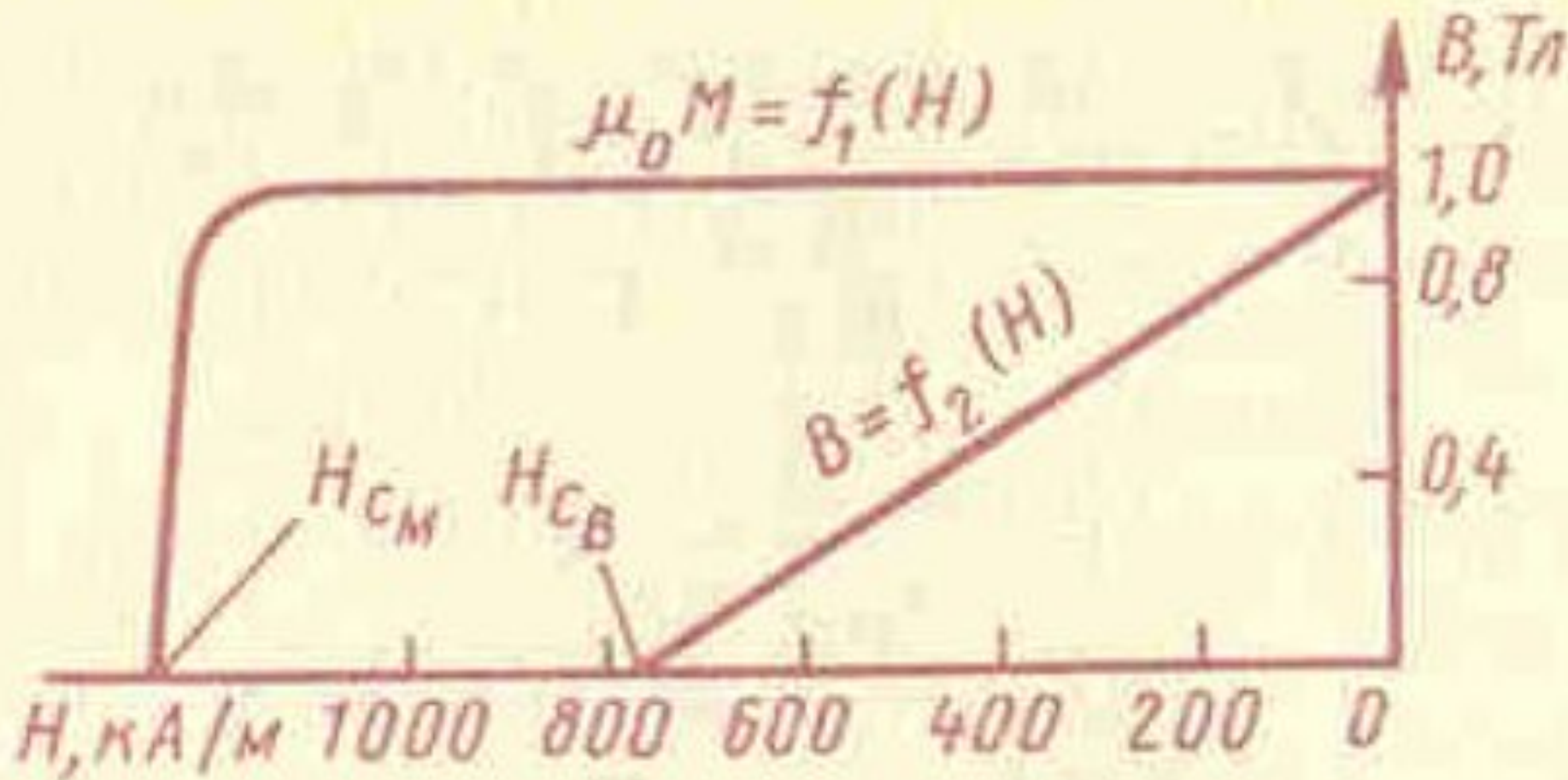
Магниты также изготавливают из кристаллов промежуточных фаз редкоземельных металлов с кобальтом, состав которых отвечает формулам RCo_5 и R_2Co_{17} (R – редкоземельный металл Sm, Pr, Y)

Технология изготовления магнитов из соединений с редкоземельными металлами является сложной, но это позволяет получать большие значения $\omega_{\max}$: от 55-72,5 кДж/м³ ($Sm-Co$)
до 250-400 кДж/м³ ($Nd_2Fe_{14}B$)

Магнитные свойства спеченных сплавов на основе РЗМ для изготовления магнитов (ГОСТ 21559-76)

Сплав	Состав, %	ω_{max} , кДж/м ³	H_{cB}	H_{cM}	B_r , Тл
			кА/м		
КС37	37Sm	55	540	1300	0,77
КС37А	63 Co	65	560	1000	0,82
КСП37	37(Sm + Pr)	65	520	800	0,85
КСП37А	63 Co	72,5	500	640	0,9

Кривые размагничивания анизотропного сплава из РЗМ



Деформируемые магнитотвердые сплавы

Сплавы получают на основе пластичных металлов (*Fe, Co, Cu*)
Их подвергают обработке давлением, используют как магниты в виде тонких лент и проволоки.
Хорошие магнитные свойства получают после закалки и старения.

Магнитные свойства сталей для изготовления магнитов (ГОСТ 6862-71)

Сталь	$\omega_{\text{max}},$ кДж/м ³	$H_c,$ кА/м	$B_r,$ Тл
EX3	1,2	4,8	0,95
EX5K5	1,6	8	0,85
EX9K15M2	2,4	13,6	0,8

Магнитные свойства деформируемых сплавов для изготовления магнитов

Сплав			Магнитная анизотропия	ω_{max} , кДж/м ³	H_c , кА/м	B_r , Тл
Наименование	Состав, %	Марка				
Хромко	45 Fe; 30 Cr; 25 Co	30ХК25	Нет	7,7	56	0,8
			Есть	16,3	62	0,9
Викаллой	52 Co; 35 Fe; 13 V	52К13Ф	Есть	8,8	28	0,6
Кунико	50 Cu; 21 Ni; 29 Co	—	Нет	6,5	36	0,53
Кунифе	60 Cu; 20 Ni; 20 Fe	—	Есть	6,7	47	0,55
Платинакс	78 Pt; 22 Co	ПлК78	—	40	320	0,80

Рубежный контроль №3

Термическая обработка сплавов с эвтектоидным превращением

1. Нарисуйте диаграмму железо цементит и проведите фазовый анализ.
2. Постройте кривую охлаждения для стали с содержанием углерода 0,45%.
3. Какие виды термической обработки применяют для сталей? Перечислите.
4. Какой вид термической обработки применяют для получения равновесной структуры?
5. Как осуществляют закалку деталей из стали?
6. Какую структуру получают при закалке стали на максимальную твердость?
7. Какие существуют способы закалки сталей? Перечислите.
8. Для какой цели после закалки деталей проводят отпуск?
9. Какие структурные изменения происходят при нагреве закаленной стали?
0. Какой вид отпуска применяют для пружин из стали?