

**Содержательный  
модуль 5**



# **"Электротехнические материалы"**

## **Лекция 13**

**Магнитомягкие  
материалы**

Lec\_13\_el\_mat\_1MM\_LNA\_30-04-2015

**Доцент Лалазарова Н.А.**

# Содержание

✦ 12.1. Магнитомягкие материалы: общая характеристика

✦ 12.2. Низкочастотные магнитомягкие материалы с высокой индукцией насыщения

✦ 12.3. Низкочастотные магнитомягкие сплавы с высокой магнитной проницаемостью

✦ 12.4. Высокочастотные магнитомягкие материалы

✦ Задания для самостоятельной работы



# 12.1. МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ: ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Магнитомягкие материалы:

- имеют малую коэрцитивную силу ( $H_c < 800 \text{ A/m}$ );

- высокую магнитную проницаемость ( $\mu < 88 \text{ мГн/м}$ );



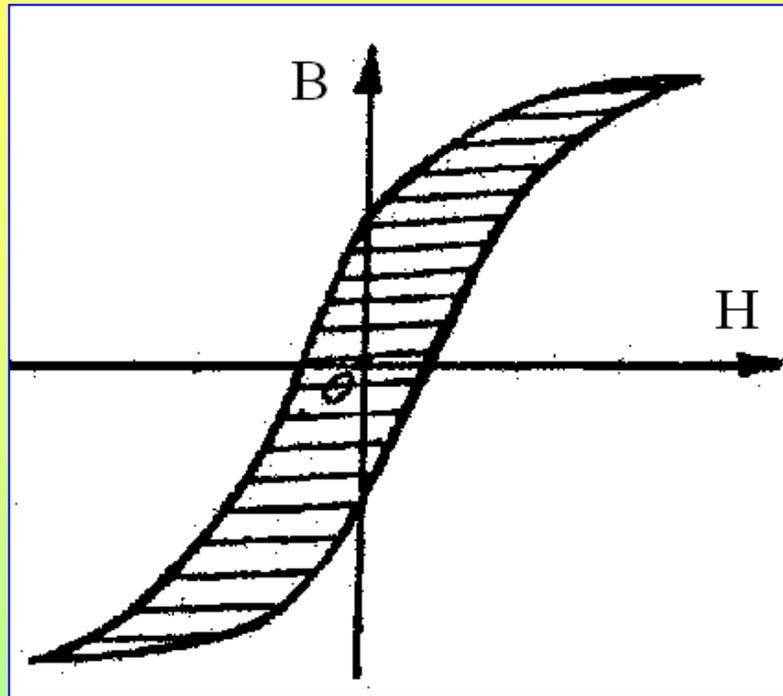
Сердечники трансформаторов

- характеризуются узкой петлей гистерезиса и малыми потерями на перемагничивание;

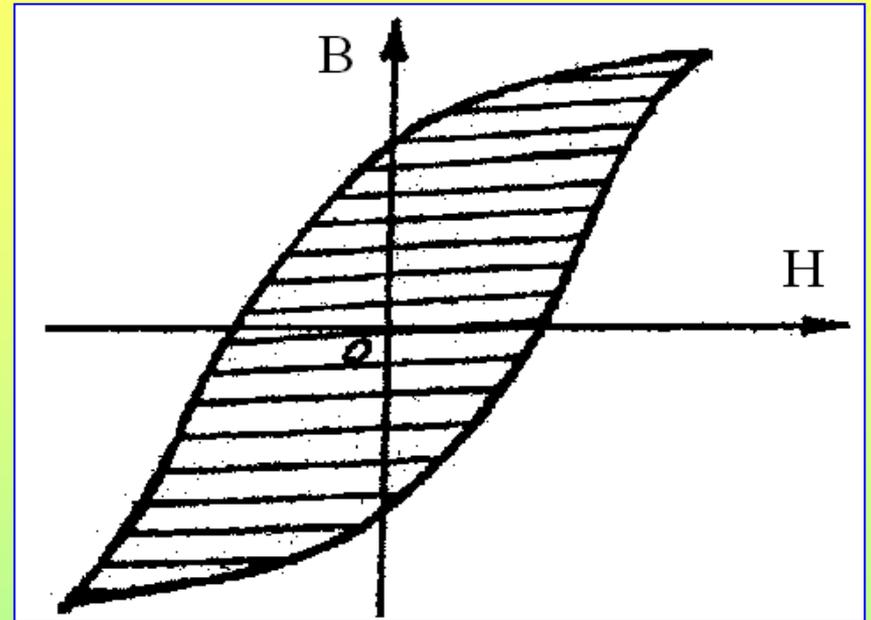
- применяются МММ, в основном, в качестве различных магнитопроводов, сердечников трансформаторов, дросселей, якорей и статоров электромашин, электромагнитов, телефонных мембран.



# ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА



а



б

Петля гистерезиса магнитомягких (а) и магнитотвёрдых (б) материалов



# ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ ПЕРЕМЕННЫМ ПОЛЕМ

При перемагничивании возникают несколько видов энергетических потерь:

- потери на перемагничивание -  $P_{\Gamma}$
- тепловые потери, связанные с возникновением вихревых токов Фуко -  $P_{\text{В}}$ .

Суммарные потери:  $P = P_{\Gamma} + P_{\text{В}}$

Тепловые или динамические потери растут с увеличением частоты магнитного поля, толщины сердечника и уменьшаются с увеличением электросопротивления:

$$P_{\text{в}} = \frac{A \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot d^2}{\rho}$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл,  
 $f$  – частота магнитного поля, Гц,  
 $d$  – толщина листа, мм,  
 $A$  – коэффициент.

Магнитномягкие материалы по величине потерь подразделяются на **НИЗКО- И ВЫСОКО-ЧАСТОТНЫЕ**.



# Контрольные вопросы

1. Назовите свойства магнитомягких материалов.

2. Какие потери возникают при перемагничивании?

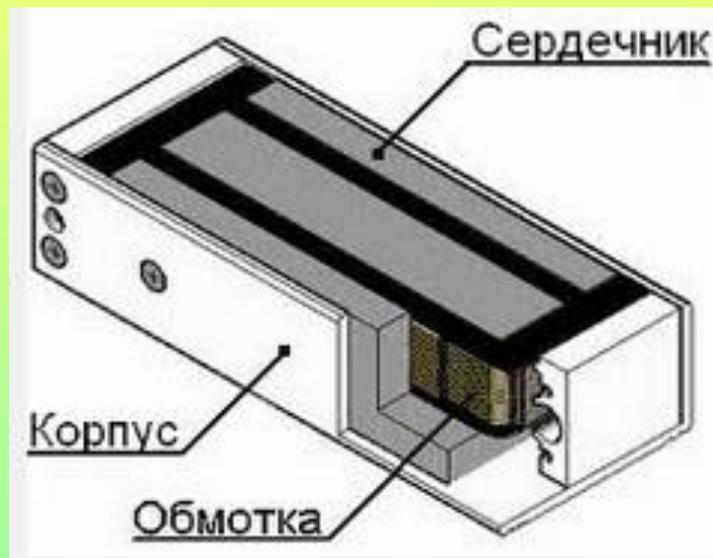
3. На какие группы делятся магнитные материалы по величине потерь?



## 12.2. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКОЙ ИНДУКЦИЕЙ НАСЫЩЕНИЯ

Низкочастотные МММ подразделяются на низкочастотные с высокой индукцией насыщения  $B_s$  и низкочастотные с высокой магнитной проницаемостью  $\mu$  ( $\mu_n$  и  $\mu_{max}$ ).

К низкочастотным магнитомягким материалам с **высокой индукцией насыщения  $B_s$**  относятся:



- железо и низкоуглеродистые нелегированные стали,
- электротехнические стали;

- электротехнические легированные кремнием стали;
- высоколегированные кобальтовые сплавы.



# НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ С ВЫСОКОЙ ИНДУКЦИЕЙ НАСЫЩЕНИЯ $B_s$ . ЖЕЛЕЗО

Используют следующие **виды железа**:

- технически чистое железо (армко-железо);
- электролитическое железо;
- электролитическое переплавленное в вакууме железо;
- карбонильное железо.

**Технически чистое железо** (0,02%-0,04%С) – недорогой и технологичный материал.

**Основной недостаток** – малое значение удельного электросопротивления.



Магнитопроводы

Техническое железо применяется для изготовления:

- сердечников полюсных наконечников различных электромагнитов, работающих при низких частотах в средних и сильных магнитных полях;

- магнитопроводов реле;
- динамических громкоговорителей,
- электрических приборов;
- магнитных экранов.



# МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗА

Железо	С, %	$\mu$	$\mu_{\max}$	$H_c$ , А/м
		мГн/м		
Карбонильное	0,005-0,01	4,0	26	6,4
Электролитическое переплавленное вакууме	0,01	-	79	7,2
Электролитическое	0,02-0,025	0,8	19	28
Технически чистое (отжиг)	0,02-0,04	0,3	9	64



# СХЕМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗА

Действующий фактор	Магнитный параметр						
	$\theta$	$B_{max}$	$\mu_H$	$\mu_{max}$	$H_c$	$B_r$	$P_r$
Случайные примеси	→	→	↘	↘	↗	↗	↗
Пластическая деформация, внутренние напряжения	→	→	↘	↘	↗	↗	↗
Размер зерна	→	→	↗	↗	↘	↘	↘



# ЖЕЛЕЗО

**Электролитическое железо** получают путем электролиза окислов железа. Содержание углерода 0,02-0,025%,  $H_c=28$  А/м и  $\mu_{max}=19$  МГ/м.

Наиболее чистое от примесей **карбонильное железо** содержит 0,005-0,01%С и обладает следующими свойствами:  $H_c=6,4$ А/м и  $\mu_{max}=26$ МГн/м.



Сердечники

Карбонильное железо по свойствам значительно превосходит технически чистое и электролитическое железо. Его получают разложением карбонила железа  $Fe(CO)_5$  при температуре  $220^\circ C$  и давлении 150 атм.

Карбонильное железо используют, главным образом, в качестве ферромагнитной фазы магнитоэлектриков (его смешивают с диэлектриком и изготавливают сердечники методом порошковой металлургии, которые используют при высоких частотах), а также для изготовления небольших изделий методом металлокерамики.





ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ  
СОЮЗА ССР

## ЖЕЛЕЗО КАРБОНИЛЬНОЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

ГОСТ 13610—79

Издание официальное

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ

УДК 661.872.626 : 621.39 : 006.354

Группа Э12

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

ЖЕЛЕЗО КАРБОНИЛЬНОЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЕ

Технические условия

Iron carbonyl for radiotechnical uses.  
Specification

ГОСТ

13610—79\*

Взамен  
ГОСТ 13610—68

ОКП 24 3652 0600

Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 19 января 1979 г. № 150 срок вступления в действие установлен

с 01.01.80

Проверен в 1983 г. Постановлением Госстандарта от 23.12.83 № 6447 срок действия продлен

до 01.01.90

Несоблюдение стандарта преследуется по закону

Настоящий стандарт распространяется на карбонильное радиотехническое железо, изготовленное в виде порошка с частицами сферической формы слоистой структуры, предназначенное для изготовления сердечников катушек индуктивности.

Показатели технического уровня, установленные настоящим стандартом, соответствуют требованиям высшей категории качества.

(Измененная редакция, Изм. № 1).

### 1. МАРКИ

1.1. Карбонильное радиотехническое железо выпускают следующих марок:

P—10 (ОКП 24 3652 0601), P—20 (ОКП 24 3652 0602),  
P—100Ф—1 (ОКП 24 3652 0603), P—100Ф—2 (ОКП 24 3652 0605)  
— для сердечников катушек индуктивности радиоаппаратуры,

Пс (ОКП 24 3652 0604) — для сердечников катушек индуктивности проводной аппаратуры и радиоаппаратуры.

(Измененная редакция, Изм. № 1).

Издание официальное

Перепечатка воспрещена

★

\* Переиздание апрель 1984 г., с Изменением № 1, утвержденным в декабре 1983 г.; Пост № 6448 от 23.12.83 (ИУС 4—84).

© Издательство стандартов, 1984



## 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

2.1. Карбонильное железо должно изготавливаться в соответствии с требованиями настоящего стандарта и по технической документации, утвержденной в установленном порядке.

2.2. Электромагнитные параметры определяют на образцах стержневых и кольцевых сердечников, изготовленных из порошка карбонильного железа.

2.3. Электромагнитные параметры стержневых и кольцевых сердечников должны соответствовать нормам, указанным в табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Норма для марки				
	P-10	P-20	P-100Ф-1	P-100Ф-2	Пс
1. Относительная добротность, $Q_{отн}$ , не менее	1,85	2,00	1,10	1,10	2,00
2. Эффективная магнитная проницаемость, $\mu_{эф}$ , не менее	2,90	2,95	1,60	1,60	2,90
3. Относительная начальная магнитная проницаемость, $\mu_{нл}$	13,0—15,0	12,0—14,0	10,0—12,0	10,0—12,0	11,0—13,0
4. Температурный коэффициент магнитной проницаемости $\alpha \cdot 10^6$ при температуре от минус 60 до плюс 100°C, 1/град	25—180	20—150	Не более 80	50—150	25—110
5. Массовая доля углерода, %, не более	—	—	—	—	0,8

Примечание. Нормы по подпунктам 1 и 2 таблицы для марок P-10, P-20 и Пс установлены при частоте 5 МГц, для марок P-100Ф-1 и P-100Ф-2 при частоте 50 МГц.

2.4. Карбонильное железо должно использоваться в интервале температур от минус 60 до плюс 100°C и в следующем диапазоне частот: марки P-10 до 10 МГц, марок P-20 и Пс до 20 МГц, марок P-100Ф-1, P-100Ф-2 до 100 МГц.

2.5. Физико-химический состав порошков карбонильного железа для марок P-10, P-20, P-100Ф-1, P-100Ф-2 и Пс приведен в справочном приложении.

2.3.—2.5. (Измененная редакция, Изм. № 1).

2.6. По истечении гарантийного срока хранения карбонильное железо анализируют перед каждым применением на соответствие

требованиям настоящего стандарта и при установлении соответствия может быть использовано по назначению.

## 3. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

3.1. Предельно допустимая концентрация порошка карбонильного железа в воздухе рабочей зоны — 4 мг/м<sup>3</sup>. Класс опасности 3 в соответствии с ГОСТ 12.1.007—76.

3.2. Порошок карбонильного железа, взвешенный в воздухе, вызывает раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей.

3.3. Карбонильное железо через неповрежденную кожу не проникает, кумулятивными свойствами не обладает.

3.4. В воздушной среде и сточных водах карбонильное железо токсичных соединений не образует.

3.5. Карбонильное железо—пожаро-, взрывобезопасное вещество. Температура самовоспламенения 600°C.

3.6. Работы с карбонильным железом проводят в помещениях с приточно-вытяжной вентиляцией. Кратность обмена воздуха в помещении в час не менее 5.

3.7. При работе с карбонильным железом применяют индивидуальные средства защиты: резиновые перчатки по ГОСТ 20010—74, перчатки из трикотажного полотна по ГОСТ 1108—74, хлопчатобумажные халаты по ГОСТ 12.4.131—83 и ГОСТ 12.4.132—83, респираторы ШВ-1 «Лепесток» по ГОСТ 12.4.028—76 или другого типа с аналогичными свойствами.

Разд. 3. (Измененная редакция, Изм. № 1).

## 4. ПРАВИЛА ПРИЕМКИ

4.1. Приемку карбонильного железа проводят по ГОСТ 3885—73.

За партию принимают количество усредненного порошка карбонильного железа одной марки массой до 1000 кг.

Каждая партия карбонильного железа должна сопровождаться документом о качестве, содержащим:

наименование предприятия-изготовителя или его товарный знак;

наименование продукта;

номер партии;

массу брутто и нетто;

дату изготовления;

обозначение настоящего стандарта;

результаты проведенных испытаний или подтверждение о со-

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ НЕЛЕГИРОВАННЫЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

Эти стали поставляют с гарантированными магнитными свойствами для электротехнической промышленности. Марки стали: 10895, 20895, 10864 и др.

Первая цифра в марке указывает способ изготовления:

горячекатанная сталь (1), холоднокатанная изотропная (2). Вторая цифра 0 указывает на низкое содержание кремния (<0,03%).



Кольцевой магнитопровод

Третья цифра определяет основное свойство, которое гарантирует завод-изготовитель, а именно: цифра 8 обозначает коэрцитивную силу, а её значение в А/м показывают две последние цифры.

Удельное электросопротивление этих сталей не превышает 0,1 мкОм·м, поэтому их применение ограничивается устройствами с постоянным магнитным полем.





ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ  
СОЮЗА ССР

# СТАЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ НЕЛЕГИРОВАННАЯ ТОНКОЛИСТОВАЯ И ЛЕНТЫ

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

ГОСТ 3836—83

Издание официальное

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО УПРАВЛЕНИЮ  
КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ И СТАНДАРТАМ  
Москва

3 коп.

УДК 669.14/413 : 006.354

Группа В33

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

## СТАЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ НЕЛЕГИРОВАННАЯ ТОНКОЛИСТОВАЯ И ЛЕНТЫ

Технические условия

ГОСТ

3836—83

Electrotechnical unalloyed steel thin sheet and bands.  
Specifications

ОКП 09 8900

Срок действия с 01.07.84  
до 01.07.94

Настоящий стандарт распространяется на электротехническую нелегированную, горячекатаную и холоднокатаную тонколистовую сталь и ленты, применяемые в магнитных цепях электрических аппаратов и приборов.

### 1. МАРКИ

1.1. Сталь изготавливают марок: 10832, 20832, 11832, 21832, 10848, 20848, 11848, 21848, 10860, 20860, 11860, 21860, 10880, 20880, 11880, 21880, 10895, 20895, 11895, 21895.

В обозначении марки цифры означают:

первая — класс по структурному состоянию и виду прокатки: 1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; вторая — тип по содержанию кремния: 0 — сталь нелегированная, без нормирования коэффициента старения; 1 — сталь нелегированная с нормированным коэффициентом старения;

третья — группу по основной нормируемой характеристике: 8 — коэрцитивная сила;

четвертая и пятая — количественное значение основной нормируемой характеристики: для 8-й группы — значение коэрцитивной силы в целых единицах А/м.

1.2. Сталь подразделяют:

по видам продукции:

лист;

Издание официальное

★

Перепечатка воспрещена

© Издательство стандартов, 1983

© Издательство стандартов, 1990

# КРЕМНИСТАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СТАЛЬ

Листовая электротехническая сталь применяется в электродвигателях, генераторах, трансформаторах, в дросселях, в измерительных приборах.

**Легирование кремнием** приводит к повышению:

- удельного электро-сопротивления, что вызывает снижение потерь на вихревые токи.



Магнитопроводы

Введение кремния существенно улучшает другие магнитные свойства:

- снижаются потери на гистерезис;
- увеличивается магнитная проницаемость;
- снижается магнито-стрикция.

Однако при увеличении концентрации кремния свыше 5% сталь становится очень твердой и хрупкой, а, следовательно, не технологичной.



## ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

СТАЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ  
ХОЛОДНОКАТАНАЯ ИЗОТРОПНАЯ ТОНКОЛИСТОВАЯ

## Технические условия

ГОСТ 21427.2-83  
ОКП 098800

Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 21 июня 1983 г. № 2633 срок действия установлен с 01.01.1984 до 01.01.1989.  
Cold-rolled isotropic electrical-steel thinl. Specifications.  
Необходимость стандарта преследуется по закону.

Настоящий стандарт распространяется на тонколистовую холоднокатаную изотропную электротехническую сталь, применяемую в магнитных цепях электрических машин, аппаратов и приборов.

## 1. СОРТАМЕНТ

1.1. Сталь изготавливают марок: 2011, 2012, 2013, 2014, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2312, 2411, 2412, 2413, 2421. Классификация и обозначение марок — по ГОСТ 21427.0-75.

1.2. Сталь подразделяют:

по видам продукции:

- лист,
- рулонная сталь,
- лента режущая (лента);

по точности проката по толщине:

- нормальной точности — Н;
- повышенной точности — П;

по точности изготовления по ширине:

- нормальной точности,
- повышенной точности — П;

по мелкозернистости на классы: 1 и 2;

по шероховатости (для рулонной стали и ленты):

- нормальной точности,
- повышенной точности — С;

по термической обработке:

- термически обработанная на магнитные свойства — Т0,
- без термической обработки на магнитные свойства;

по виду покрытия:

- без покрытия (с металлической поверхностью),
- с термостойким покрытием, не усугубляющим штампуемость — М,
- с термостойким электроизоляционным покрытием, усугубляющим штампуемость — ННН,
- с термостойким электроизоляционным покрытием, усугубляющим штампуемость — ТНН,
- с термостойким электроизоляционным покрытием, усугубляющим штампуемость — Т;

по коэффициенту затенения на группы: А и Б.

1.3. Рулонную сталь изготавливают толщиной 0,28; 0,35; 0,50 и 0,65 мм и шириной 500, 530, 600, 670, 740, 750, 805, 815, 825, 840, 860, 865, 880, 905, 935, 965, 985, 990, 1000, 1015, 1030, 1050, 1065 мм. Размеры листов должны соответствовать указанным в табл. 1.

Таблица 1

Толщина, мм	Длина листов при ширине, мм		
	500	750	1000
0,28, 0,35, 0,50, 0,65	1500	1500	2000

Примечание:

По требованию потребителя допускается изготавливать рулоны и листы другой ширины, но не более 1100 мм.

ГОСТ 21427.2-83

Настоящий документ подготовлен и выпущен в «Санкт» ([www.kavo.srb.ru](http://www.kavo.srb.ru))

1

1.4. Ленту изготавливают толщиной: 0,28; 0,35; 0,50 и 0,65 мм и шириной 90, 95, 107, 123, 130, 138, 140, 150, 156, 160, 170, 175, 187, 200, 215, 226, 233, 250, 260, 280, 290, 300, 322, 325, 360, 400, 445 мм.

Примечание:

По согласованию изготовителя с потребителем допускается изготавливать ленту другой промежуточной ширины.

(Изменения редакции, Виз. №1).

1.5. Масса ленты в рулоне, состоящем из одного отреза, должна быть не менее массы, вычисленной из расчета 0,5 кг на 1 мм ширины ленты.

1.6. Предельные отклонения по толщине стали должны соответствовать указанным в табл. 2.

Таблица 2

Толщина, мм	Предельные отклонения по толщине стали при точности проката, мм	
	нормальной	повышенной
0,28	+0,01 -0,03	+0,01 -0,02
0,35	±0,03	±0,02
0,50	±0,04	±0,03
0,65	±0,05	±0,04

1.7. Листы, рулонную сталь и ленты не оглаивают с обрезными кромками.

1.8. Предельные отклонения по ширине рулонной стали, листов и ленты должны соответствовать табл. 3.

Таблица 3

Ширина, мм	Предельные отклонения при точности изготовления, мм	
	нормальной	повышенной
от 500	+0,3%	+1,0
от 250 до 500 включ.	+1,2	+0,5
до 250 включ.	+0,8	+0,5

(Изменения редакции, Виз. № 1).

1.9. Предельные отклонения листов по длине не должны превышать +0,5%.

1.10. Продольная и поперечная разноточность листа и поперечная разноточность рулонной стали и ленты не должна превышать 1/2 суммы предельных отклонений по толщине. Для рулонной стали и ленты толщиной 0,5 мм повышенной точности прокатки поперечная разноточность не должна превышать 0,02 мм.

1.11. Сталь должна быть плоской. Неплоскость не должна превышать норм, указанных в табл. 4.

1.12. Отношение высоты неплоскости к ее длине должно соответствовать указанному в табл. 5.

Таблица 4

Вид стали	Неплоскость стали на 1 м, мм, для классов	
	1	2
лист	4	8
рулонная сталь	2	4

Примечание:

Для рулонной стали, изготовленной без термической обработки или подвергнутой термообработке в рулонах в непрерывных печах, норма неплоскости не должна превышать 8 мм на 1 м.

ГОСТ 21427.2-83

Настоящий документ подготовлен и выпущен в «Санкт» ([www.kavo.srb.ru](http://www.kavo.srb.ru))  
на основе официально опубликованного ГОСТа.

2



# МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ТОНКОЛИСТОВОЙ СТАЛИ (ГОСТ 21427-75)

Сталь	Толщина листа, мм	$R_{1,5/50}$ , Вт/кг	В (Тл) при Н (кА/м), не менее	
			2,5	30
<b>Горячекатаная изотропная</b>				
1311	0,5	6,1	1,48	1,95
<b>Холоднокатаная изотропная</b>				
2411	0,5	3,6	1,49	1,96
<b>Холоднокатаная анизотропная</b>				
3411	0,5	2,45	1,75	-
3416	0,28	0,89	1,7	-



# КРЕМНИСТАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СТАЛЬ. МАРКИРОВКА

- **Первая цифра** в марке определяет вид проката и структуру: горячекатанная изотропная (1), холоднокатанная изотропная (2), холоднокатанная анизотропная с кристаллографической текстурой направления (3).

- **Вторая цифра** в марке указывает содержание кремния (в %): 0 – содержание менее 0,4%, 1 – (0,4-0,8%), 2 – (0,8-3,8%), 5 – (3,8-4,8%).

- **Третья цифра** характеризует потери на гистерезис при определённом значении  $B$  и  $H$ .

**Четвёртая цифра** – код числового значения нормируемого параметра. Чем цифра больше, тем потери меньше. P1,5/50 – потери при  $B=1,5$  Тл и  $f=50$  Гц.



# КРЕМНИСТАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СТАЛЬ

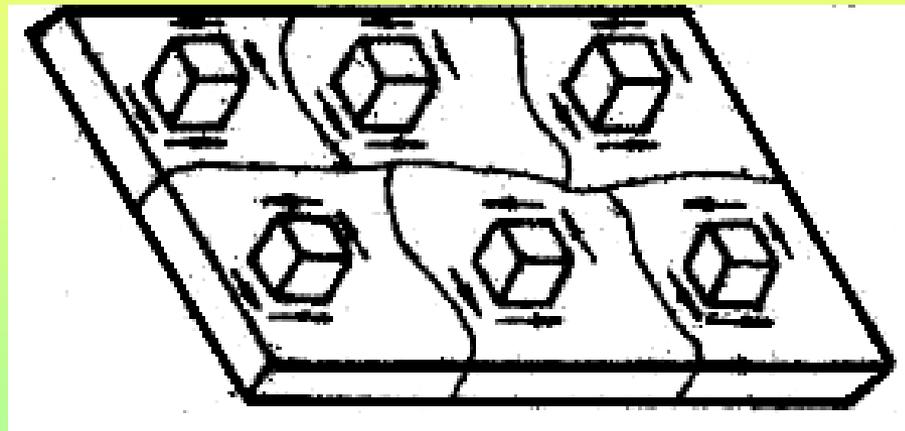
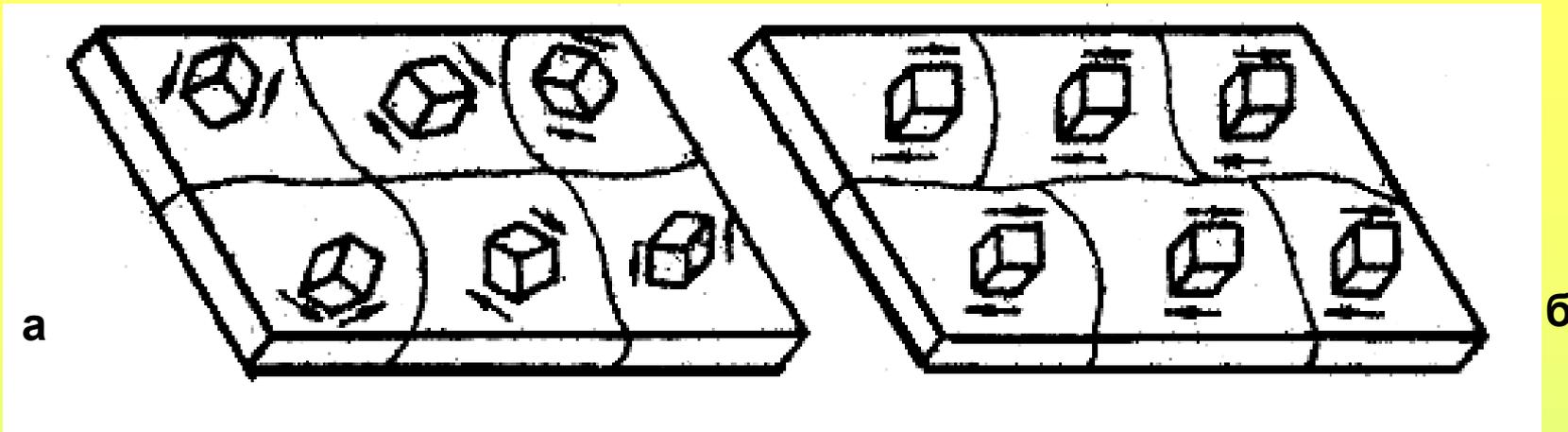
1) При одинаковой толщине пластин наименьшие потери имеет холоднокатаная анизотропная сталь.

2) С уменьшением толщины листа потери уменьшаются.

3) С увеличением количества кремния потери уменьшаются.

Поэтому для восстановления магнитных свойств проводят отжиг при температуре 880-900°C в защитной атмосфере (например, в водороде).





**Схематическое изображение кристаллографической ориентации в зернах электротехнической стали:**

**а — горячекатаная:**

**б — холоднокатаная с ребровой текстурой;**

**в — холоднокатаная с кубической текстурой.**



# КРЕМНИСТАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СТАЛЬ

При изготовлении силовых трансформаторов используют текстурованную сталь с так называемой ребровой текстурой.

Текстурованная электротехническая сталь называется трансформаторной, а изотропная – динамной. Её используют при изготовлении роторов и статоров динамо-машин.



Сердечник трансформатора

Наиболее высококачественную трансформаторную сталь получают прокаткой листа с деформацией 75-80% и дальнейшим отжигом в атмосфере водорода (1000-1200°C) для снятия наклёпа и укрупнения зерна.

Наличие текстуры деформации обеспечивает рост зёрен с преимущественной кристаллографической ориентацией, которую называют текстурой рекристаллизации.



# КРЕМНИСТАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СТАЛЬ

Обработка обеспечивает ориентированные вдоль оси прокатки оси легчайшего намагничивания железа  $\langle 001 \rangle$  (ребро куба), т. е. ребровую текстуру со степенью текстурованности 90%.

Благодаря наличию крупного зерна и так называемой текстуры в определённом направлении увеличивается магнитная проницаемость и уменьшается коэрцитивная сила, следовательно, и площадь петли гистерезиса, несмотря на добавки кремния.



Трансформаторы

Сборку трансформаторов проводят так, чтобы направления  $\langle 001 \rangle$  в листе стали и магнитного потока в сердечнике совпали. Вследствие этого понижаются гистерезисные потери и получается высокая индукция в сравнительно малых полях.

Легирование сталей кремнием способствует повышению их электросопротивления, что позволяет использовать их при частотах до 400 Гц.



# ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫЕ КОБАЛЬТОВЫЕ СПЛАВЫ

Наиболее высокой индукцией насыщения ( $B_s=2,23\text{Тл}$ ,  $\mu_n=1,1$  МГн/м,  $\mu_{\max}=4$  МГн/м) обладают высоколегированные кобальтовые сплавы Fe-Co-V.

Сплав 50КФ2:  
50% Со и 2% V.  
Сплавы,  
содержащие от  
50 до 70%  
кобальта  
называются  
пермендюрами.



**Применяются** при изготовлении:

- мембран телефонов,
- в осциллографах,
- в динамических громкоговорителях;
- электромагнитах.



**Недостатки:**  
1) Высокая стоимость.

Электромаг-  
НИТЫ



# Контрольные вопросы

1. Какие материалы относятся к магнитомягким низкочастотным с высокой индукцией насыщения?

2. Преимущества электротехнической кремнистой стали.

3. Какая электротехническая сталь имеет наименьшие потери?

4. Назовите состав высоколегированных кобальтовых сталей.

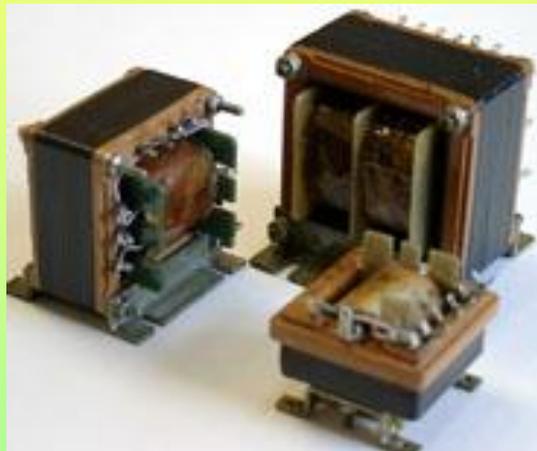


## 12.3. НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ СПЛАВЫ С ВЫСОКОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

- Пермаллои (Fe-Ni);
- Альсиферы (Fe-Al-Si).

### Преимущества пермаллоев:

- большая величина  $\mu_n$  и  $\mu_{max}$ ;
- малая  $H_c$ , что позволяет им намагничиваться в слабых магнитных полях;
- высокая технологичность



### Недостатки:

- магнитные свойства пермаллоев меняются под воздействием даже слабых напряжений, например, при прокатке.

Назначение: для удаления примесей, для снятия остаточных напряжений, укрупнения зерна, проводят термическую обработку, которая заключается в нагреве до температуры 1100-1150°C в водороде или вакууме, выдержке при этой температуре 3-6 ч, медленном охлаждении до 600°C и дальнейшем быстром охлаждении.



# ПЕРМАЛЛОИ

Все пермаллои по составу можно разделить на две группы:

• низконикелевые (Ni=45-50%) с высокой магнитной проницаемостью ( $\mu_H < 4$  мГн/м) при относительно высокой индукции насыщения, которые делятся на:



– нелегированные (**45Н**:  $\mu_H=2,5$  МГн/м,  $\mu_{max}=31$  МГн/м,  $H_c=13$  А/М,  $B_s=1,0$  Тл,  $\rho=0,45$  мкОм·м; **50Н**),  
– легированные (**50НХС**:  $\mu_H=3,1$  МГн/м,  $\mu_{max}=31$  МГн/м,  $H_c=16$  А/М,  $B_s=1,5$  Тл,  $\rho=0,9$  мкОм·м;).

• высоконикелевые (Ni=79-83%) с чрезвычайно высокой магнитной проницаемостью ( $\mu_H < 35$  мГн/м): **79НМ**, **81НМА**:  $\mu_H=88$  МГн/м,  $\mu_{max}=310$  МГн/м,  $H_c=0,64$  А/М,  $B_s=0,5$  Тл,  $\rho=0,8$  мкОм·м. Сплавы легируют для улучшения электромагнитных и технологических свойств.



# НИЗКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ СПЛАВЫ С ВЫСОКОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ

Повышенное электросопротивление (до  $0,9 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ) позволяет использовать эти сплавы: при частотах до 25 кГц в слабых магнитных полях; в телефонии, радиотехнике, в измерительных приборах.

## Низконикелевые нелегированные пермаллои

применяются:

- в трансформаторах,
- реле,
- дросселях, т. е. устройствах, работающих с подмагничиванием.



Реле

## Легированные низконикелевые

имеют повышенное электросопротивление . Их применяют:

• для изготовления

сердечников трансформаторов,

• катушек

индуктивности,

• магнитопроводов в приборах и аппаратах,

работающих при повышенных

давлениях.

## Высоколегированные пермаллои

применяются:

- в магнитных усилителях,
- в слаботочных трансформаторах,
- катушках индуктивности,
- в автоматике.



# СОЗДАНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

Повышенное электросопротивление (до 0,9 мкОм·м) позволяет использовать пермаллои: при частотах до 25 кГц в слабых магнитных полях; в телефонии, радиотехнике, в измерительных приборах.

1) **Кристаллографическая текстура** создаётся прокаткой с большими степенями обжатия;



Телефон

2) **Магнитная текстура** создаётся термомагнитной обработкой – закалкой с охлаждением в магнитном поле.

Коэффициент прямоугольности:  $\alpha = V_r / V_s$  достигает 0,85-0,9.

50НП – прямоугольность достигается прокаткой;

65НП – обработкой в магнитном поле.



# АЛЬСИФЕРЫ

Альсиферы – сплав системы **Fe-Al-Si** (9,6%Si, 5,4%Al).

## Недостатки:

- высокие твердость и хрупкость.

## Достоинства:

- невысокая стоимость.



Магнитопровод

- высокие литейные свойства, поэтому их применяют для изготовления тонкостенных деталей сложной формы.
- используют также для получения тонких порошков при изготовлении магнитодиэлектриков.

Альсиферы используют для изготовления:

- литых экранов,
- деталей магнитопроводов,
- прессованных сердечников из порошков.



# МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКИ

**Магнитодиэлектрики** получают путем прессования ферромагнитного порошка с изолирующей органической или неорганической связкой.

В качестве **магнитной основы** используется порошкообразные:

- альсиферы,
- карбонильное железо,
- реже пермаллой и электролитическое железо.



В качестве **связующего вещества** используют для низкочастотных сердечников:

## Сердечники

- формальдегидные и эпоксидные смолы, а для высокочастотных:
- полистирол и другие смолы с малым  $\text{tg}\delta$ .



# Контрольные вопросы

1. Преимущества пермаллоев.

2. Преимущества альсиферов.

3. Что такое альсиферы?

4. Что такое пермаллои?



# 12.4. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Требования:

- Высокая магнитная проницаемость;
- Магнитная проницаемость не должна меняться с изменением напряженности магнитного поля;
- Малые потери;
- Большое  $\rho$ .

**Ферриты**  
( $\rho < 10^{11} - 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ).



**Ферриты** – магнитная керамика – системы из оксидов железа и оксидов других, в большинстве случаев двухвалентных металлов.

Ферритные сердечники в катушке обеспечивают уменьшение её веса на 62%, объёма до 87%.

Общая формула ферритов  $\text{MeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

**Недостатки:**

- Высокая хрупкость;
- Обработка резанием затруднена;
- Зависимость магнитных свойств от способа изготовления, механических воздействий и температуры.



# ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

## Достоинства ферритов:

- стабильность их магнитных свойств в широком диапазоне частот,

- малые потери на вихревые токи,

- простота изготовления деталей.



Их изготавливают методами порошковой металлургии.

Детали имеют простую форму и небольшие размеры.

Для повышения электрических свойств ферриты легируют цинком, марганцем, никелем, магнием.



# ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Марганцевоцинковые ферриты обладают относительно небольшим удельным сопротивлением ( $10^3$ - $10^5$  Ом·м), поэтому их применение ограничено частотами 1-3 МГц:

- 4000НН и 1000НН, не содержащие специальных добавок используются в диапазоне до 1 МГц;
- 1000НМЗ с присадками других металлов применяют до частот 3 МГц.



## Маркировка:

- на первом месте в марке стоит число, соответствующее относительной магнитной проницаемости ( $\mu' = 1 + k_m$ ).

- На втором – буквы, определяющие частотный диапазон: Н – низкочастотные, ВЧ – высокочастотные, СЧ – сверхвысокие частоты.
- На третьем – буква, обозначающая легирующий элемент: Н – никель-цинковый феррит, М – марганец-цинковый феррит (табл.1).



# ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Никелево-цинковые ферриты отличаются высоким удельным сопротивлением (до  $10^{11}$  Ом·м), малыми потерями, поэтому их используют при более высоких частотах (<22 МГц): 1000НН, 400НН, 300НН, 100ВЧ и др.

Из ферритов изготавливают цилиндрические и трубчатые детали для телевизоров (сердечники для строчных трансформаторов, регуляторы размера строк), Ш-образные трансформаторы.



Для работы при более высоких частотах ( $f < 800$  МГц) используются бариевые и литиевые ферриты  $\text{Li}(\text{Ba})\text{O} \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$ . На частотах  $f > 800$  МГц используют ферриты марок 1СЧ1, 3СЧ4 и др.

- первая цифра в марке обозначает длину волны, на которой работает феррит,
- последняя цифра – разновидность феррита.



# ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ ФЕРРИТЫ

№ группы	Феррит	f, МГц	$\rho$ , Ом·м
1	4000НМ 1000НМ (марганцевые ферриты)	< 1 МГц	$10^3 \cdot 10^5$
2	1000НМ3	< 30 МГц	До $10^{11}$
1	1000НН 400НН (никелевые ферриты)	< 2 МГц	-
2	300НН 60НН	< 55 МГц	-
3	100ВЧ 30ВЧ2	< 200 МГц	-





ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ  
СОЮЗА ССР

## ФЕРРИТЫ МАГНИТОТВЕРДЫЕ

МАРКИ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

ГОСТ 24063—80

Издание официальное

Цена 3 коп.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ  
Москва

УДК 621.318.126 : 006.354

Группа Э13

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

ФЕРРИТЫ МАГНИТОТВЕРДЫЕ

Марки и основные параметры

Magnetically hard ferrites.  
Grades and main parameters

ГОСТ  
24063—80\*

ОКСТУ 0860

Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 3 апреля 1980 г. № 1502 срок введения установлен

с 01.07.81

Проверен в 1985 г. Постановлением Госстандарта от 20.06.85 № 1742 срок действия продлен

до 01.07.91

Несоблюдение стандарта преследуется по закону

Настоящий стандарт устанавливает марки, химический состав и параметры магнитотвердых гексаферритов, являющихся материалом постоянных магнитов, используемых для создания магнитных полей в устройствах различного назначения.

Термины, применяемые в стандарте, — по ГОСТ 19693—74.

### 1. МАРКИ

1.1. Спеченные магнитотвердые гексаферриты (далее ферриты) изготавливают следующих марок: 6БИ240, 16БА190, 18БА220, 22БА220, 24БА210, 25БА150, 25БА170, 28БА190.

1.2. Химический состав ферритов должен соответствовать следующим требованиям:

основные составляющие компоненты соединения в молярных долях —  $\text{BaO} \cdot n\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $n$  от 4,7 до 5,9);

примесные составляющие:

редкоземельные элементы в массовых долях — от 0,1 до 1% сверх основных составляющих;

Al, Si, B, Bi и др. в массовых долях — от 0,1 до 3% сверх основных составляющих.

Издание официальное

Перепечатка воспрещена

\* Переиздание (декабрь 1985 г.) с Изменением № 1, утвержденным в июне 1985 г. (ИУС 9—85).

© Издательство стандартов, 1986

# Контрольные вопросы

1. Что такое ферриты?

2. Назовите достоинства ферритов.

3. Назовите недостатки ферритов.

4. Назовите области применения ферритов.



# **Задания для самостоятельной работы**

**1. Изучить области применения электротехнических материалов с ковалентным типом связи.**

**2. Ознакомиться с областями применения электротехнических материалов с ионным типом связи.**

**3. Изучить сущность энергетических уровней в атомах.**

**4. Изучить сущность энергетических зон в веществах.**

**3. Изучить схемы винтовых и краевых дислокаций.**





# Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лалазарова Наталиа Алексеевна

E-mail: [lalaz1991@mail.ru](mailto:lalaz1991@mail.ru)

г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М  
Tel.(8-057 )707-37-92