

**КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ
ВЫСОКАЯ СТОЙКОСТЬ К ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ**

х р о м и с т ы е	хромоникелевые	хромомарганцевые	хромомолибденовые
<p><u>мартенситные</u> <i>20X13,30X13,40X13.</i></p> <p><u>мартенсито-ферритные</u> <i>08X13,12X13:</i> <i>Закалка и отпуск.</i> применение: в атмосферн.услов. и слабоагрессивных средах износостойк.инструмент (ножи) в пищевой и хим.промышл.</p>	<p><u>ферритные</u> <i>12X17,08X18T,15X25T</i> <i>Нормализация и отжиг.</i> применение: для деталей в окислительных средах (HNO₃), в легкой, пищевой пром., в энергомашиностроении</p> <p><u>суперферриты</u> – %до0,035C,18-28Cr, 2-4Mo, +Ti,Nb – высокая стойкость во многих агрессивных средах при целевой коррозии, питтинг., под напряжением.</p>	<p><u>аустенитные</u> <i>Закалка в воду на А</i></p> <p><u>хромоникелевые</u><i>12X18H9,</i> применение: высокие служебные свойства, в разных отраслях промышленности</p> <p><u>хромомарганцевоникелевые</u> <i>10X14Г14Н4Т,</i> <u>хромомарганцевые</u> <i>10X14АГ15</i> применение: во многих агрессив. средах, кроме высокой агрессивности вHNO₃, с сульфатами, сульфидами, галогенами из-за влияния Mn</p>	<p><u>аустенито-ферритные</u> <i>08X22H6T,08X21H6M2T</i> <i>Закалка в воду (возможен отпуск).</i> применение: повышенное сопротивление ММК за счет мелкозернистой 2-фазн. структуры, в хим.машиностр., судостроении, авиации.</p> <p><u>аустенито -мартенситные</u> <i>07X16H6,09X15H9Ю</i> <i>Закалка или нормализация, обработка холодом, деформация, старение450°C (выделение Nail, NiTi интерметаллидов);</i> _применение: для деталей с повышенной прочностью в агрессивных средах.</p>

Сплавы на железоникелевой и никелевой основе - кислотостойкие

<p><i>железо-никелевой</i> <i>04XH40МДТЮ-</i> после закалки: аустенит +карбонитриды титана</p>	<p><i>никельмолибденовой –</i> <i>хастеллой (НИМО)</i> <i>Н70МФ</i>(25-29%Mo после закалки: α- тв. ра-р Мо в Ni + спец. карбиды</p>	<p><i>хромоникелевой</i> <i>ХН58В</i> после закалки: α- тв. раствор+ первичные спец. карбиды</p>	<p><i>хромоникельмолибденовой</i> <i>ХН65МВ</i> после закалки α- тв. раствор+ первичные спец. карбиды</p>
--	---	--	---

ЖАРОПРОЧНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

теплоустойчивые стали			аустенитные жаропрочные			жаропрочные сплавы
<p><u>хромистые</u> при <u>600-650 °C</u> мартенситные мартенсито- ферритные <i>15X5, 15X5M, 15X11MФ, 12X8BM1БФР</i></p>	<p><u>углеродистые</u> <i>Ст.2, Ст.3 до 120°C</i> котельные <i>12K, 15K, 20K до 400 °C</i> нормализация, закалка + высок. отпуск</p>	<p><u>низко</u> <u>легированные</u> <u>до 500-600°C</u> феррито-перлитн. феррито-бейнитн. бейнитные, мартенситные. <i>разл. т.о.</i> <i>12XM, 25X1MФ, 20X3BMФ.</i></p>	<p><u>гомогенные</u> <u>до 650-700 °C</u> <i>10X18H12T 08X15H24B4TP Ni/ Cr > 1 закалка и отпуск от 700-750 °C</i></p>	<p><u>с карбидн.</u> <u>упрочнением</u> <u>до 650-700 °C</u> <u>при высоких</u> <u>напряжениях</u> <i>37X12H8Г8МФБ, 4 0X15H7ГФ2С закалка и старение для деталей ответств. назначения</i></p>	<p><u>с интерме-</u> <u>таллидным</u> <u>упрочнением</u> <u>до 750-850 °C</u> <i>(Ni до 38%) 10X11H20T3P 08X11H35MTЮP закалка и старение</i></p>	<p><u>сплавы на</u> <u>основе Ni</u> <u>сплавы на</u> <u>основе Co</u> <u>до 6</u> <u>сплавы</u> <u>на основе Ti.</u> <u>+Al, Zr, Sn, Si</u> <i>BT3-1, BT8, BT9, BT18</i> <u>сплавы на</u> <u>основе</u> <u>тугоплавких</u> <u>металлов</u> <u>неметаллич.</u> <u>материалы</u></p>

ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ

<u>сплавы на основе</u>	<u>сплавы на основе Co</u>	<u>сплавы на основе</u>	<u>сплавы на основе</u>	<u>неметаллические</u>
<p style="text-align: center;">Ni</p> <p>1. деформируемые литые</p> <p>2. монокристаллич. 700-1100 °C <i>XH77TЮP9ЭИ929</i> закалка + старение</p> <p>3. дисперсноупрочненные: до 1250 °C нихром <i>X20H80</i></p>	<p>до 1000 °C, высокая крроз. стойкость</p>	<p style="text-align: center;">Ti.</p> <p>+Al, Zr, Sn, Si <i>BT3-1, BT8, BT9, BT18</i> «ВИАМ титан», <i>OT-4, «Опытный титан»</i> <i>ПТ «Прометей титан»</i> малая плотность до 500 °C, до 6000 час. в авиации легированиет): Al(8%), V(16%), Mo(30%), Mn(8%), Sn(13%), Zr(10%), Cr(10%), Cu(3%), Fe(5%), W(5%), кремнием(0,5%), Nb(25%), по структуре однофазные α-сплавы; β-сплавы; двухфазные α/β—упрочняются термобработкой.</p>	<p style="text-align: center;">ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ</p> <p>1. со структурой твердого раствора; 2. упрочняемые старением. НА ОСНОВЕ:</p> <p style="text-align: center;">V и Cr при 1000-1100 °C жаростойкость выше Ni-сплавов</p> <p style="text-align: center;">Nb при 1300-1500 °C кратковременно</p> <p style="text-align: center;">Mo- при 1300-1400 °C</p> <p style="text-align: center;">Ta при 2000 °C</p> <p style="text-align: center;">W при 2000-2500</p>	<p style="text-align: center;">графит при 1000-2400 °C окисляется при 520-560 °C</p> <p style="text-align: center;">керамические материалы на основе Si₃N₄-1500 °C, SiC-1800 °C, Si-Al-O-N для деталей в двигателях внутр. сгорания</p>

ЖАРОСТОЙКИЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

<p>АУСТЕНИТНЫЕ СТАЛИ : до 600-700 °С закалка в воде от 1050-1150 °С (или нормализация) высокая пластичность и универсальность, жаропрочность</p> <p>недостаток: низкое сопрот. газ. коррозии</p> <p><i>08X18H9T, 12X18H9, 12X18H9T, 10X23H18, 20X25H20C2, 36X18H25C2, 12X25H16Г7AP, 55X20Г9АН4</i></p>	<p>АУСТЕНИТО- ФЕРРИТНЫЕ не выше 350 °С</p> <p><i>078X22H6T, 08X21H6M5T</i> закалка в воде от 1000- 1100 °С <i>дешевле</i> <i>аустенитных</i> <i>стойкость ниже,</i> <i>аустенитных</i></p>	<p>ФЕРРИТНЫЕ СТАЛИ не выше 350 °С, <i>дешевле</i> <i>аустенитных</i> <i>стойкость</i> <i>ниже,</i> <i>аустенитных</i></p> <p>1. хромистые 13-28% Cr 08X13 08X17T, 12X17, 15X25T, 15X28T,</p>	<p>АУСТЕНИТО- МАРТЕНСИТНЫЕ до 450 °С 08X17H5M3</p> <p>закалка в воде, обработка холодом(или пластич. деформирование), старение при 350- 500°С</p> <p><i>Чем больше</i> <i>аустенита, тем б.</i> <i>ударная вязкость и</i> <i>меньше корроз.</i> <i>растрескивание.)</i></p>	<p>МАРТЕНСИТНЫЕ -СИЛЬХРОМЫ до 700 °С, высокая прочность и твердость</p> <p>отжиг, закалка и высокий отпуск</p> <p>15X6CЮ, 40X9C2, 40X10C2M, 30X13H7C2, 30X13H7C2, 70X20H2C2B, 40X23H4M3C;</p>
---	---	--	---	--

(называемый также **Хромель А**) - общее название группы, состоящих, в зависимости от марки сплава, из 55—78 %, 15—23 %,

сильхромы - жаростойкие стали, содержащие Cr (5-14%) и Si (1-3%).

хромаль - —состава: (4,5—6,5%);.

сильхромаль -легированная хромом-кремнием-алюминием10X13СЮ

Под **жаростойкостью (окалиностойкость)** понимают сопротивление металла окислению в газовой среде при температурах выше 550°C. Для этого сталь легируют Cr, Al, Si, которые создают на поверхности оксидные пленки Cr₂O₃, Al₂O₃, SiO₂ и др. Это сильхромы, хромали, сильхромали.

К ним относятся стали 40X9C2, 40X10C2M (сильхромы), 10X13СЮ (сильхромаль). Аустенитные стали 12X18Н10Т, 36X18Н25С2 жаростойкие до 1100°C, ферритная сталь 08X17Т применяется в теплообменниках до 900°C. Стали 12X17Т, 15X25Т, 12X18Н10Т, 10X23Н18ТБ, 12X25Н16Г7АПА, ХН32Т, ХН45Ю, ХН78Т, 30X24Н12С2Л, 15X25Н19С2ЛА особо жаростойкие при вы- соких температурах и воспринимают термические удары при многократных закалках.

ЖАРОСТОЙКИЕ СТАЛИ:

ферритные --хромистые 08X17T, 12X17, 15X25T, 15X28T,

хромоалюминовые 1X13Ю4, 05X27Ю5;

мартенситные –сильхромы 15X6СЮ, 40X9C2, 40X10C2M, 30X13H7C2, 30X13H7C2, 70X20H2C2B, 40X23H4M3C;

аустенитные –08X18H9T, 12X18H9, 12X18H9T, 10X23H18, 20X25H20C2, 36X18H25C2, 12X25H16Г7AP, 55X20Г9АН4

КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ

ферритные - 12X17, 08X18Г1, 15X25T ; суперферриты—0,025-0,035%С и 18-28% и 2-4%Мо

мартенситные- 40X13, 30X13

аустенитные -: 05X18A120 12X18H9, 10X17H13M3T, 10X14Г14H4T, 10X14AГ15, 06XH28MДT

до 450 °С закалка в воде от 1050-1150 °С (или нормализация)- -высокая пластичность и универсальность недостаток: склонность к МКК: хромоникелевые 9-11%Ni, 17-19 Cr, 12X18H9, 12X18H10T ; хромомарганцевые 14-19%Mn, 4-5% Ni, до 20% Cr-стабилизированные Ti и Nb-10X14Г14H4T, безникелевые 18-24% Cr и до 1,3%N

аустенито – ферритные 0822H6T, 08X21H6M2T

Термоэлектродные сплавы

Термоэлектродные сплавы – это группа сплавов, применяемых для создания термопар и других элементов термоэлектрических устройств. Работа термопары основана на возникновении термической электродвижущей силы (ТЭДС) в месте контакта двух разнородных металлов. Эта сила зависит от температуры, что дает возможность ее измерения. Кроме температуры, ТермоЭДС зависит от типа термопары, то есть, от составляющих ее материалов.

Общие требования к материалам для термопар

Поскольку термопары являются ключевыми компонентами измерительных приборов, к материалам, из которых они изготавливаются, предъявляется множество требований.

- Сплавы, из которых изготавливается термопара, должны создавать достаточно большую (ТермоЭДС), чтобы ее можно было измерить с приемлемой точностью. При этом напряжение на выводах термопары должно быть однозначной функцией температуры, не имеющей экстремумов в рабочем диапазоне, по возможности, близкой к линейной.
- От термоэлектродных сплавов требуется стойкость к нагреву. При любой рабочей температуре термопара должна сохранять коррозионную стойкость в тех средах, для которых она предназначена, и не достигать точки плавления.
- Материалы термопар должны обеспечивать воспроизводимость качеств при производстве в промышленном масштабе и сохранять неизменными характеристики термопар весь период их эксплуатации.
- Сплавы должны быть достаточно пластичными, чтобы из них можно было изготавливать проволоку и придавать другие формы.
- Цена термопары не должна быть слишком высокой, поэтому в состав сплавов нежелательно включать драгоценные металлы.

Всем этим требованиям соответствуют никелевые и медно-никелевые сплавы, легированные специальными добавками. Сплавы производятся как термопарная проволока, лента или круг.

Алюмель

Это сплав на основе никеля, содержание которого составляет около 93,5 %. Вместе с никелем, в качестве примеси, в состав входит кобальт в количестве 0,6—1,2 %. Содержание других элементов – алюминия, углерода, железа, марганца, кремния колеблется от 0,1 до 2,4 %.

Проволока алюмель применяется в качестве элемента термопары хромель-алюмель (тип К), а также как термоэлектродные провода, входящие в конструкцию измерительных приборов.

Содержащие алюмель термопары, применяются в температурном диапазоне от -200 до $+1000^{\circ}\text{C}$. По заказу производится сплав, легированный микродобавками, с расширенным диапазоном – до $+1200^{\circ}\text{C}$.

Допустимый максимум температуры зависит от диаметра проволоки. При диаметре менее $1,2$ мм верхняя граница диапазона измерений опускается до 800°C (1000), а при диаметре меньшем $0,5$ мм – до 600°C (800). Здесь в скобках указаны величины для сплава с расширенным рабочим диапазоном.

Хромель

Хромель по своему составу близок к алюмели. Основой также является никель с примесью кобальта. Содержание алюминия, кремния и марганца намного ниже.

Хромель имеет удачное сочетание уровня ТЕРМО ЭДС и его стабильности с повышенной термостойкостью: плавится при 1500°C , максимальные температуры измерений – такие же, как у алюмели (для версии «хромель Т»). Сплав устойчив к коррозии в агрессивных средах. При высокой температуре на поверхности изделия появляется стойкая пленка окислов зеленоватого оттенка, защищающая металл от дальнейшего разрушения.

Термо-ЭДС довольно высока, но главное – это практически линейная характеристика и стабильность во времени в широком диапазоне температур.

Лента и проволока хромель используется для производства термопар типов Е, К, L (сплавы хромель-Т и хромель-ТМ) и для изготовления компенсационных проводов (хромель-К и хромель-КМ).

Копель

Это медно-никелевый сплав. Медь в нем служит основой, ее содержание – около 55% . Никеля вместе с примесью кобальта содержится $42,5$ — 44% . Из других компонентов наибольшая доля приходится на марганец – до 1% . Остальное – это железо, углерод, кремний в количествах, измеряемых сотыми долями процента.

Копель имеет невысокий верхний предел измерений – 600°C (до 800°C – по спецзаказу). В паре с железом, медью и хромелем обладает высоким термо-ЭДС, что повышает точность измерений. Термопара хромель-копель при 500°C выдает напряжение $40,3$ мВ, тогда как ближайший «конкурент», железо-константан, показывает лишь 37 мВ. ТЕРМОЭДС большинства других термопар при тех же условиях не превышает 10 мВ. (Здесь приведены табличные значения из ГОСТ Р 8.585-2001).

Проволока копель применяется для изготовления термопар типов L и M. Тип M используется для измерения температур до 100°C . Купить термопары этого типа стоит для измерения низких температур. Нижняя граница их рабочего диапазона простирается до -200°C .

Классификация магнитных материалов

Применяемые в электронной технике магнитные материалы подразделяют на две основные группы: *магнитотвердые* и *магнитомягкие*. В отдельную группу выделяют материалы *специального назначения*.

Магнитомягкие материалы	Магнитотвердые материалы
с малой коэрцитивной силой $H_c < 4$ кА/м.	с большой коэрцитивной силой $H_c > 4$ кА/м.

Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы обладают следующими свойствами:

Узкая петля гистерезиса

Однородность структуры;

Минимальные механические напряжения;

Минимальное количество примесей и включений;

Незначительная кристаллографическая анизотропия.

Магнитомягкие материалы с округлой петлей гистерезиса применяют для работы в низкочастотных магнитных полях.

Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса применяют для изготовления устройств магнитной памяти.

В зависимости от исходного сырья и технологии производства магнитомягкие материалы делятся :

монолитные металлические материалы	порошковые металлические материалы	магнитодиэлектрические и оксидные магнитные материалы- ферриты.
------------------------------------	------------------------------------	---

Классификация по физическим характеристикам

Магнитомягкие материалы		
Низкочастотные магнитные материалы	Высокочастотные магнитные материалы	
<p style="text-align: center;">с высокой индукцией насыщения</p> <p>Электролитическое железо</p> <p>Карбонильное железо</p> <p>Технически чистое железо</p> <p>Электротехническая тонколистовая сталь</p> <p>по структурному состоянию и виду прокатки на классы:</p> <p>1-й -горячекатанная</p> <p>2-й — холоднокатаная изотропная;</p> <p>3-й — холоднокатаная анизотропная.</p> <p><i>Номера указанных классов означают первую цифру в марках</i></p> <p>по содержаниюSi:</p> <p>0-й —до 0,4%;</p> <p>1-й — 0,4-0,8%;</p> <p>2-й — 0,8-1,8%</p> <p>3-й — 1,8-2,8%;</p>	<p style="text-align: center;">с высокой магнитной проницаемостью</p> <p><i>(ПРЕЦИЗИОННЫЕ МАГНИТОМЯГКИЕ)</i></p> <p><u>пермаллои,45-85%Ni</u></p> <p>Супермаллой (Ni – 79%, Fe – 15%, Mo – 5%, Mn – 0,5%) – высокие магнитные свойства в слабых полях $\mu_{\text{макс}} = 8000 - 1500000$, $H_s = 0,3$ А/м.</p> <p>Изопермаллой (Ni – 50%, Fe – 50%) + специальная термообработка – почти линейная кривая намагничивания, т.е. $\mu = \text{const}$ при изменении H.</p> <p>Низконикелевые</p> <p>45Н, 50Н, 50НХС</p> <p><i>пов. магн. индукцию насыщения и пов. уд. электросопрот-е</i></p> <p>Высоконикелевые пермаллои 79НМ, 80НХС, 81НМА, 83НФ <i>высокие значения магн. проницаемости в слабых полях</i></p> <p><u>Аморфные сплавы</u></p> <p>по уровню магнитных свойств:</p> <p>I — с нормальными магн. св</p> <p>.II — с повышенными</p>	<p><u>альсиферы Fe-Si</u>^(9.5%) - <u>Al</u>^(5.6%). (Ферриты) — химические соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов, обладающие уникальными магнитными (ферримагнетики) свойствами, сочетающие высокую намагниченность и полупроводниковые или диэлектрические свойства, благодаря чему они получили широкое применение как магнитные материалы в радиотехнике, радиоэлектронике, вычислительной технике.</p> <p>а) ферриты с гарантированными потерями и проницаемостью: марганец-цинковые, никель-цинковые ;</p> <p>б) ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса никель-цинковые или магний-марганцевые. ;</p> <p>в) ферриты со специальными свойствами магний-цинковые.</p> <p style="text-align: center;">Материалы специального назначения:</p>

<p>4-й — 2,8-3,8%.</p> <p><i>Номера (от 0 до 4) представляют вторую цифру в марках стали;</i></p>	<p>магн.св.</p> <p>III — с высокими магн.св.</p> <p>⋮</p>	<p><i>материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ);</i></p> <p><i>магнотрикциионные материалы; термомагниты;</i></p> <p><i>ферриты СВЧ;</i></p> <p><i>материалы с постоянной магнитной проницаемостью;</i></p> <p><i>Материалы для звукозаписи</i></p>
---	---	--

МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Магнитотвердые материалы имеют большие значения коэрцитивной силы H_c , трудно намагничиваются, но способны длительное время сохранять намагниченность. Они обладают широкой петлей гистерезиса с большой коэрцитивной силой $H_c > 4$ кА/м (рис 1.3, а) и наличием однодомных структур, возникающих в небольших объемах магнитного вещества.

Магнитотвердые материалы служат для изготовления постоянных магнитов

МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ			
ПО СОСТАВУ И СПОСОБУ ПОЛУЧЕНИЯ			
<p style="text-align: center;">Легированные стали, закаленные на мартенсит</p> <p>высокоуглеродистые стали, легированные W,</p>	<p style="text-align: center;">литые сплавы</p> <p>железо-никель-алюминий (Fe-Ni-Al)</p> <p>железо-никель-</p>	<p style="text-align: center;">порошковые</p> <p>металлокерамические</p> <p style="text-align: center;">е</p> <p>металлопластические</p>	<p style="text-align: center;">прочие с узкоспециальным применением:</p> <p><i>пластически деформируемые сплавы</i></p> <p><i>эластичные магниты</i></p> <p><i>материалы для магнитных носителей информации жидкие</i></p>

<p>Mo, Cr, Co</p> <p>применение ограничено</p> <p>вследствие низких магнитных свойств</p>	<p><i>кобальт</i> (Fe-Ni-Co)</p> <p>применение <i>прецизионные</i> <i>, для</i> <i>изготовления</i> <i>постоянных</i> <i>магнитов</i></p>	<p>оксидные</p> <p>магнитотвердые ферриты (оксидные магниты)</p> <p><i>феррит бария BaO 6Fe₂O₃,</i> (в зависимости от технологии изотропные, анизотропные)</p> <p><i>феррит кобальта CoO 6Fe₂O₃</i></p> <p><i>феррит стронция SrO 6Fe₂O₃.</i></p> <p>микropорошковые</p> <p>применение постоянные магниты</p>	<p><i>магниты</i></p>
--	--	---	-----------------------

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

К *магнитомягким* относят 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 используются в основном в качестве различных магнитопроводов: сердечников дросселей, трансформаторов, электромагнитов, магнитных систем электроизмерительных приборов и т. п.

Условно магнитомягкими считают материалы, у которых $H_c < 800$ А/м, а магнитотвердыми - с $H_c > 4$ кА/м. Необходимо, однако, отметить, что у лучших магнитомягких материалов коэрцитивная сила может составлять менее 1 А/м, а лучших магнитотвердых материалах ее значение превышает 500 кА/м. По масштабам применения в электронной технике среди материалов специального назначения следует выделить материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), ферриты для устройств сверхвысокочастотного диапазона и магнитострикционные материалы.

Внутри каждой группы деление магнитных материалов по родам и видам отражает различия в их строении и химическом составе, учитывает технологические особенности и некоторые специфические свойства.

Свойства магнитных материалов определяются формой кривой намагничивания и петли гистерезиса. Магнитомягкие материалы применяются для получения больших значений магнитного потока. Величина магнитного потока ограничена магнитным насыщением материала, а потому основным требованием к магнитным материалам сильноточной электротехники и электроники является высокая индукция насыщения. Свойства магнитных материалов зависят от их химического состава, от чистоты используемого исходного сырья и технологии производства. В зависимости от исходного сырья и технологии производства магнитомягкие материалы делятся на три группы: монолитные металлические материалы, порошковые металлические материалы (магнитодиэлектрические) и оксидные магнитные материалы, кратко называемые ферритами.

Основные требования к материалам

Помимо высокой магнитной проницаемости и малой коэрцитивной силы магнитомягкие материалы должны обладать большой индукцией насыщения, т.е. пропускать максимальный магнитный поток через заданную площадь поперечного сечения магнитопровода. Выполнение этого требования позволяет уменьшить габаритные размеры и массу магнитной системы.

Магнитный материал, используемый в переменных полях, должен иметь, возможно, меньшие потери на перемагничивание, которые складываются в основном из потерь на гистерезис и вихревые токи.

Для уменьшения потерь на вихревые токи в трансформаторах выбирают магнитомягкие материалы с повышенным удельным сопротивлением. Обычно магнитопроводы собирают из отдельных изолированных друг от друга тонких листов. Широкое применение получили ленточные сердечники, навиваемые из тонкой ленты с межвитковой изоляцией из диэлектрического лака. К листовым и ленточным материалам предъявляется требование высокой пластичности, благодаря которой облегчается процесс изготовления изделий из них.

Важным требованием к магнитомягким материалам является обеспечение стабильности их свойств, как во времени, так и по отношению к внешним воздействиям, таким, как температура и механические напряжения. Из всех магнитных характеристик наибольшим изменениям в процессе эксплуатации материала подвержены магнитная проницаемость (особенно в слабых полях) и коэрцитивная сила.

Железо и низкоуглеродистые стали

Основным компонентом большинства магнитных материалов является железо. Само по себе железо в элементарном виде представляет собой типичный магнитомягкий материал, магнитные свойства которого существенно зависят от содержания примесей. Среди элементарных ферромагнетиков железо обладает наибольшей индукцией насыщения (около 2,2 Тл).

Особо чистое железо (электролитическое, карбонильное), содержащее малое количество примесей (менее 0,05%), получают двумя сложными способами.

Электролитическое железо изготавливают путем электролиза раствора серноокислого или хлористого железа, причем анодом служит чистое железо, а катодом - пластина

мягкой стали. Осажденное на катоде железо (толщина слоя 4-6 мм) после тщательной промывки снимают и измельчают в порошок в шаровых мельницах; подвергают вакуумному отжигу или переплавляют в вакууме.

Карбонильное железо получают посредством термического разложения пентакарбонила железа согласно уравнению: $Fe(CO)_5 = Fe + 5CO$.

Пентакарбонил железа представляет собой продукт воздействия окиси углерода на железо при температуре около 200°C и давлении примерно 15 МПа. Карбонильное железо имеет вид тонкого порошка, что делает его удобным для изготовления прессованных магнитных сердечников. В карбонильном железе отсутствуют кремний, фосфор и сера, но содержится углерод.

Магнитные свойства различных видов чистого железа приведены в табл.1). Примеси относительно слабо влияют на магнитные свойства железа, если их концентрация ниже предела растворимости. Низким пределом растворимости в железе обладают углерод, кислород, азот и сера. Соответственно, эти примеси оказываются и наиболее вредными. При охлаждении металла после термообработки такие примеси из-за ограниченной растворимости выделяются в виде микровключений побочных фаз, которые затрудняют смещение доменных границ в слабом магнитном поле.

Свойства железа зависят не только от содержания примесей, но и от структуры материала, размера зерен, наличия механических напряжений. Из табл.1 видно, что магнитные свойства даже лучших промышленных разновидностей железа далеки от того, чего можно добиться, используя современные технологические методы получения чистых и однородных по структуре материалов.

Материал	Начальная магнитная проницаемость	Максимальная магнитная проницаемость	Коэрцитивная сила, А/м	Индукция насыщения, Тл	Удельное сопротивление, мкОм/м
Технически чистое железо	250 - 400	3500 - 4500	50- 100	2,18	0,1
Электролитическое железо	600	15000	30	2,18	0,1
Карбонильное железо	2000 - 3000	20000-21500	6,4	2,18	0,1
Монокристалл чистейшего железа	> 20000	1430000	0,8	-	0,097
Электротехническая сталь	200 - 600	3000 - 8000	10-65	1,95-2,02	0,25 - 0,6
Низконикелевый пермаллой	1500-4000	15000-60000	5-32	1,0-1,6	0,45 - 0,9
Высоконикелевый пермаллой	7000-100000	50000 - 300000	0,65 - 5	0,65 - 1,05	0,16-0,85

Табл.1. Некоторые свойства магнитомягких ферромагнитных материалов.

Технически чистое железо обычно содержит небольшое количество примесей углерода, серы, марганца, кремния и других элементов, ухудшающих его магнитные свойства. Вследствие сравнительно низкого удельного сопротивления технически чистое железо используют довольно редко, в основном для изготовления магнитопроводов постоянного магнитного потока.

Железо и низкоуглеродистые стали (окончание)

Обычное технически чистое железо изготавливают рафинированием чугуна в мартеновских печах или в конверторах; оно имеет суммарное содержание примесей 0,08-0,1%.

Кремнистая электротехническая сталь (по ГОСТу электротехническая тонколистовая) является основным магнитомягким материалом массового потребления. Введением в состав этой стали кремния, достигается повышение удельного сопротивления, что вызывает снижение потерь на вихревые токи. Кроме того, наличие в стали кремния способствует выделению углерода в виде графита, а также почти полному раскислению стали за счет химического связывания кислорода в SiO_2 . Последний в виде шлака выделяется из расплава. В результате легирования кремнием приводит к увеличению магнитной проницаемости, уменьшению коэрцитивной силы и снижению потерь на гистерезис.

Положительное влияние кремния на магнитную проницаемость стали обусловлено также уменьшением констант магнитной анизотропии и магнитострикции. У стали с содержанием кремния 6,8% константа магнитной анизотропии в три раза меньше, чем у чистого железа, а значение магнитострикции практически равно нулю. При таком содержании кремния сталь обладает наибольшей магнитной проницаемостью. Однако промышленные марки электротехнической стали содержат не более 5% кремния. Это термообработки материала (температуры, скорости нагрева и охлаждения, окружающей среды и т.д.). Термическая обработка высоконикелевых пермаллоев сложнее, чем низконикелевых.

Удельное сопротивление высоконикелевых пермаллоев почти в три раза меньше, чем у низконикелевых, поэтому при повышенных частотах предпочтительнее использовать низконикелевые пермаллои. Кроме того, магнитная проницаемость пермаллоев сильно снижается с увеличением частоты. Это объясняется возникновением в материале заметных вихревых токов из-за небольшого удельного сопротивления.

Диапазон изменения магнитных свойств и удельного сопротивления промышленных марок пермаллоев указан в табл.1. Вследствие различия свойств низконикелевые и высоконикелевые пермаллои имеют несколько различные применения.

Низконикелевые сплавы 45Н и 50Н применяют для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, реле и деталей магнитных цепей, работающих при повышенных индукциях без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием. Высоконикелевые сплавы 79НМ, 80НХС, 76НХД используют для изготовления сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов.

Сильная зависимость магнитных свойств пермаллоя от механических напряжений вынуждает принимать специальные меры защиты сердечников, поскольку механические нагрузки неизбежно возникают даже при наложении токовых обмоток. Обычно кольцеобразные ленточные сердечники из пермаллоя помещают в немагнитные защитные каркасы из пластмассы или алюминия. В целях амортизации динамических нагрузок свободное пространство между каркасом и сердечником заполняют каким-либо эластичным веществом.

Магнитные материалы специализированного назначения

Ферриты и металлические сплавы с ППГ. Магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) находят широкое применение в устройствах автоматики, вычислительной техники, в аппаратуре телеграфной связи. Сердечники из материала с ППГ имеют два устойчивых магнитных состояния, соответствующих различным

направлениям остаточной магнитной индукции. Именно благодаря этой особенности их можно использовать в качестве элементов для хранения и переработки двоичной информации. Запись и считывание информации осуществляются переключением сердечника из одного магнитного состояния в другое с помощью импульсов тока, создающих требуемую напряженность магнитного поля.

Двоичные элементы на магнитных сердечниках с ППГ характеризуются высокой надежностью, малыми габаритами, низкой стоимостью, относительной стабильностью характеристик. Они обладают практически неограниченным сроком службы, сохраняют записанную информацию при отключенных источниках питания.

К материалам и изделиям этого типа предъявляют ряд специфических требований, а для их характеристики привлекают некоторые дополнительные параметры. Основным из таких параметров является коэффициент прямоугольности петли гистерезиса $K_{\text{пу}}$, представляющий собой отношение остаточной индукции B_r к максимальной индукции B_{max} : $K_{\text{пу}} = B_r / B_{\text{max}}$.

Для определенности B_{max} измеряют при $H_{\text{max}} = 5\text{Hc}$. Желательно, чтобы $K_{\text{пу}}$ был возможно ближе к единице. Для обеспечения быстрого перемагничивания сердечников они должны иметь небольшой коэффициент переключения S_q , численно равный количеству электричества на единицу толщины сердечника, которое необходимо для перемагничивания его из одного состояния остаточной индукции в противоположное состояние максимальной индукции.

Кроме того, материалы с ППГ должны обеспечивать малое время перемагничивания, возможно большую температурную стабильность магнитных характеристик, следовательно, иметь высокую температуру Кюри и некоторые другие свойства.

Ферриты с ППГ в практике распространены шире, чем металлические тонкие ленты. Это объясняется тем, что технология изготовления сердечников наиболее проста и экономична. Свойства ферритовых сердечников приведены в табл.2.

Материал или сердечник	Hc, А/м	B _r , Тл	K _{пу} , (не менее)	S _q , мкКл/м	T _к , °С	Примечание
Ферриты различных марок	10-1200	0,15-0,25	0,9	25-55	110-630	Имеется свыше 25 различных марок
Микронные сердечники из пермаллоев (толщины ленты от 2 до 10 мкм)	8-50	0,6-1,5	0,85-0,9	25-100	300-630	Сплавы 50НП, 65Н, 79НМ, 34НКПМ

Табл.2. Свойства сердечников и материалов с ППГ.

Ферритам свойственна спонтанная прямоугольность петли гистерезиса, т.е. специфическая форма петли реализуется при выборе определенного химического состава и условий спекания феррита, а не является результатом какой-либо специальной обработки материала, приводящей к образованию текстуры (например, механических воздействий или обработки в сильном магнитном поле).

Из ферритов с ППГ наиболее широкое применение находят магний-марганцевые и литиевые феррошпинели. Установлено, что прямоугольная петля гистерезиса характерна для материалов с достаточно сильной магнитной кристаллографической анизотропией и слабо выраженной магнитострикцией. В этом случае процессы перемагничивания происходят главным образом за счет необратимого смещения доменных границ. Сохранение большой остаточной намагниченности после снятия внешнего поля объясняется локализацией доменных границ на микронеоднородностях структуры.

Таковыми неоднородностями могут быть области с разной степенью обращенности шпинели, вакансии и связанные с ними комплексы, междузельные атомы и др. Например, в магний-марганцевых ферритах спонтанная прямоугольность петли

гистерезиса обусловлена тетрагональными искажениями кристаллической решетки за счет ионов Mn^{3+} , образующихся при определенных условиях синтеза.

При использовании ферритов следует учитывать изменение их свойств от температуры. Так, при возрастании температуры от -20 до $+60^{\circ}C$ у ферритов различных марок коэрцитивная сила уменьшается в 1,5-2 раза, остаточная индукция - на 15-30%, коэффициент прямоугольности - на 5-35%.

В зависимости от особенности устройств, в которых применяются ферриты с ППГ, требования, предъявляемые к ним, могут существенно различаться. Так, ферриты, предназначенные для коммутационных и логических элементов схем автоматического управления, должны иметь малую коэрцитивную силу (10-20 А/м). Наоборот, материалы, используемые в устройствах хранения дискретной информации, должны иметь повышенное значение коэрцитивной силы (100-300 А/м).

В запоминающих устройствах ЭВМ применяют либо кольцевые ферритовые сердечники малого размера (имеются сердечники с наружным диаметром 0,3-0,4 мм), либо многоотверстные ферритовые платы в которых область вокруг каждого отверстия выполняет функции отдельного сердечника. При использовании сердечников достигается более высокое быстродействие, однако возникают технологические трудности при прошивке таких сердечников проводниками и сборке матриц.