

5.3 Тема: Магнитомягкие материалы

1 Магнитомягкие материалы

Магнитомягкие материалы должны иметь высокую магнитную проницаемость, малую коэрцитивную силу, большую индукцию насыщения, узкую петлю гистерезиса, малые магнитные потери.

Магнитомягкие материалы можно разделить на следующие группы: технически чистое железо (низкоуглеродистая сталь); кремнистая электротехническая сталь; сплавы с высокой начальной магнитной проницаемостью (пермаллой); сплавы с большой индукцией насыщения (пермендюр); ферриты.

2 Технически чистое железо (низкоуглеродистая сталь)

Железо представляет собой магнитомягкий материал, свойства которого сильно зависят от содержания примесей.

Технически чистое железо содержит не более 0,1 % углерода, серы, марганца и других примесей и обладает сравнительно малым удельным электрическим сопротивлением, что ограничивает его применение. Используется оно в основном для магнитопроводов постоянных магнитных потоков. Магнитные свойства железа сильно зависят от его чистоты и способа обработки.

В зависимости от способа получения чистого железа различают железо электролитическое и карбонильное.

Свойства разновидностей технически чистого железа приведены в таблице 5.1.

Свойства стали можно значительно улучшить путем холодной прокатки, которая вызывает преимущественную ориентацию кристаллитов, и отжига в среде водорода при температуре 900...1000 °С, снимающего механические напряжения и способствующего укрупнению кристаллических зерен, причем оси легкого намагничивания кристаллитов ориентируются вдоль направления проката; о такой стали, говорят, что она текстурованная, обладает ребровой текстурой. Магнитные свойства вдоль направления прокатки существенно выше.

Электротехническая сталь выпускается в виде отдельных листов, рулонов или ленты и предназначена для изготовления магнитопроводов.

Таблица 5.1- Свойства магнитомягких материалов.

Материал	$\mu_{нач}$	μ_{max}	$B_s,$ Тл	$H_c,$ А/м	$\rho,$ мкОм· м
Технически чистое железо	250-400	3500-4500	2,18	50- 100	0,1
Электролитическое железо	600	15000	2,18	30	0,1
Карбонильное железо	2000- 3000	20000- 21500	2,18	6,4	0,1
Железо, обработанное в водороде особо тщательно	60000	200000	2,18	2,4	0,1
Электротехническая сталь	200-600	3000-8000	1,95- 2,02	10-65	0,17-0,6
Низконикелевые пермаллой	1500- 4000	15000- 60000	1,0-1,6	5-32	0,45-0,9

Высоконикелевые пермаллои	700-100000	50000-300000	0,65-1,05	0,65-6	0,16-0,85
Альсифер	34500	117000	1,0	1,8	0,8

3 Пермаллои

Они относятся к магнитомягким материалам, обладающим высокой магнитной проницаемостью в слабых полях, и представляют собой же- лезоникелевые сплавы. Такие сплавы характеризуются тем, что магнитная анизотропия и магнитострикция практически отсутствуют; это является одной из причин особенно легкого намагничивания пермаллоев. Пермаллои подразделяются на высоконикелевые (72...80 % никеля) и низконикелевые (40...50 % никеля).

В настоящее время в большей мере используются сплавы, легированные молибденом, хромом, медью, марганцем, кремнием, а также другими элементами. Классический пермаллой с концентрацией никеля 78,5 % имеет наибольшее значения μ_{\max} и $\mu_{\text{н}}$. Высокие магнитные свойства классического пермаллоя получаются в результате высокотемпературного отжига при 1300°C в чистом сухом водороде и длительном отпуске при 400...500 °С.

Магнитные свойства пермаллоев сильно зависят от химического состава и наличия примесей в сплаве. Отрицательно на свойства пермаллоев влияют примеси, которые не образуют твердых растворов со сплавом, такие, как углерод, сера и кислород; кроме того, свойства резко изменяются от режимов термообработки.

Из железоникелевых сплавов с высокой магнитной проницаемостью можно выделить следующие группы:

1) Нелегированные низконикелевые пермаллои - марки 45 Н и 50 Н (содержание никеля 45 и 50 %);

2) Сплавы, обладающие текстурой и прямоугольной петлей гистерезиса, - 50 НП, 65 НП, 34 НКП;

3) Низконикелевые пермаллои (50% Ni), легированные хромом и кремнием, - 50 НХС;

4) Высоконикелевые пермаллои легированные соответственно молибденом, хромом и кремнием, хромом и медью, - 79 НМ, 80 НХС, 76 НХД.

Все сплавы содержат в небольших количествах марганец и кремний. В марках пермаллоев буква Н означает никель, М-марганец, Х-хром, Д-медь, К-кобальт, С-кремний, П-прямоугольную петлю гистерезиса. Сплавы с улучшенными свойствами обозначают дополнительно буквой У.

Недостатками пермаллоев являются их относительно высокая стоимость, сильная зависимость магнитных свойств от механических напряжений.

Альсифер — тройной сплав, состоящий из алюминия, кремния и железа. Сплав оптимального состава (9,6 % Si, 5,4 % Al, остальное Fe) по своим свойствам не отличается от пермаллоев и имеет следующие характеристики: $\mu_{\text{н}}=35500$, μ_{\max} 120000, $H_c=18$ А/м, $p = 0,8$ мкОм·м. Альсифер получают как литой, нековкий материал, с высокой твердостью и хрупкостью, поэтому изделия из альсифера изготавливаются методом литья с толщиной стенок не менее 23 мм. Область применения альсифера - магнитные экраны, корпуса приборов машин, детали магнитопроводов для работы в постоянных или медленно меняющихся магнитных полях.

Материал с особо высокой индукцией насыщения — сплав **пермендюр**, который состоит из 30...50 % кобальта, 1,5...2 % ванадия и остальное железо. Этот сплав обладает наивысшей из всех известных ферромагнетиков индукцией насыщения до 2,43 Тл.

К числу недостатков перпендюра относится малое удельное электрическое сопротивление, которое приводит к значительным потерям на вихревые токи при работе в переменных магнитных полях.

4 Аморфные магнитные материалы

В последнее время уделяется большое внимание вопросам получения и применения аморфных магнитных материалов (АММ). Такие материалы получают при быстром охлаждении из расплавленного состояния без кристаллизации. Аморфная структура получается при скорости охлаждения расплава до 10^6 °С/с. Современными методами можно изготовить из аморфного материала проволоку или ленту различного профиля непосредственно из расплава со скоростью до 1800 м/мин. АММ обладают очень высокими магнитными характеристиками наряду с повышенным сопротивлением. Перспективными высокопроницаемыми материалами являются аморфные сплавы железа и никеля с добавками хрома, молибдена, бора, кремния, фосфора, углерода или алюминия с магнитной проницаемостью до 500, коэрцитивной силой H_c около 1 А/м и индукцией насыщения B_s от 0,6 до 1,2 Тл.

5. Ферриты

Основным достоинством ферритов является сочетание высоких магнитных параметров с большим электрическим сопротивлением, которое превышает сопротивление ферромагнитных металлов и сплавов в $10^3 \dots 10^{13}$ раз, и, следовательно, они имеют относительно малые потери в области повышенных частот, что позволяет использовать их в высокочастотных электромагнитных устройствах.

Контрольные вопросы:

- 1 Что значит магнитомягкий материал?
- 2 Перечислите магнитомягкие материалы.
- 3 Где применяются магнитомягкие материалы?