

2.4 Магнитные материалы

Лекция № 12

В качестве магнитных материалов применяются вещества, относящиеся к классу сильномагнитных, то есть ферро- и ферримагнетики. Среди них можно выделить 3 основные группы в зависимости от особенностей магнитного поведения:

- 1) магнитомягкие;
- 2) магнито жесткие или магнитотвердые;
- 3) магнетики специального назначения.

В каждой из названных групп представлены как металлические, так и оксидные материалы. Условно магнетики разделяются на мягкие (легко перемагничивающиеся) и жесткие (трудно перемагничивающиеся) по величине коэрцитивной силы H_c . Материалы с $H_c < 4$ кА относят к магнитомягким (обычно H_c не более 1 кА), а с $H_c > 4$ кА – к магнито жестким.

Магнитомягкие материалы

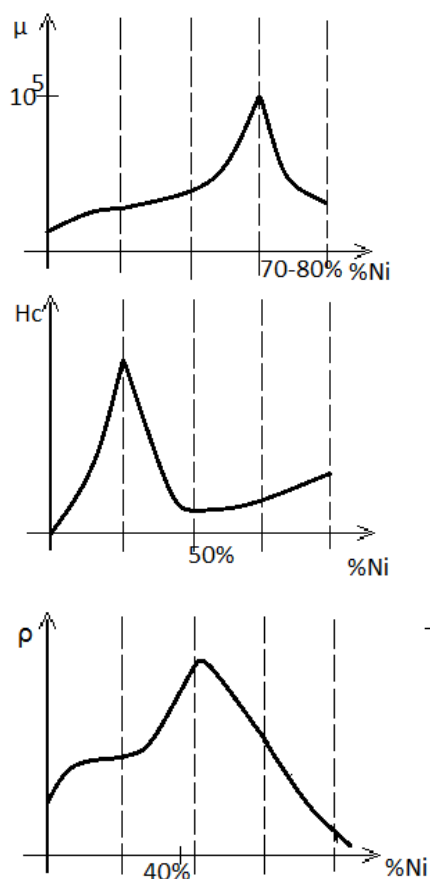


Рис. 1. Концентрационная зависимость магнитной проницаемости (а), коэрцитивной силы (б), электрического сопротивления для сплавов Ni+Fe

К магнитомягким материалам, обладающим узкой петлей магнитного гистерезиса, предъявляются следующие требования: низкая коэрцитивная сила $\downarrow H_c$, высокая намагниченность и магнитная индукция насыщения $B_{нас} \uparrow$, высокая магнитная проницаемость в данном интервале температур $\mu \uparrow$, повышенное значение электрического сопротивления $\uparrow \rho$, заданное значение температуры Кюри T_c . Такие параметры обеспечивают эффективное перемагничивание магнитных элементов с минимальными потерями и затратами материала.

Магнитомягкие свойства проявляет основной конструкционный материал *железо*. На его основе создана *кремнистая электротехническая сталь*, основной фазой которой является твердый раствор кремния в железе. Содержание Si в электротехнической стали может достигать 5,6%. Si обеспечивает увеличение электрического сопротивления и стабильность сплава, а также препятствует образованию нежелательной фазы цементита Fe_3C в стали, что способствует увеличению магнитной проницаемости. Нежелательным влиянием кремния является увеличение хрупкости сплава. Электротехническая сталь

является основным магнитомягким материалов массового потребления благодаря пониженной стоимости.

Для ответственных магнитных деталей используется более дорогостоящий материал – сплавов Ni+Fe с преобладанием Ni, которые называются *пермаллои*. На практике используют сплавы с содержанием Ni 50-70%, которому соответствует наибольшее значение магнитной проницаемости, пониженное значение коэрцитивной силы и повышенное значение электросопротивления (рис. 1). Наиболее высокие магнитные характеристики демонстрирует сплав – *суперпермаллой*, который имеет состав 79% Ni, 15% Fe, 5% Mo, 0,5% Mn и $\mu = 150000$, $B_r = 0,34$ Тс, $H_c = 0,3$ А/м. Недостатками пермалоев являются пониженное электросопротивление и следовательно большие потери при перемагничивании, повышенная стоимость, высокая чувствительность к механическим напряжениям. Области применения пермалоев определяется их составом (табл. 1)

Для использования в цепях с частотой сигнала свыше 1 кГц необходимы высокоомные *неметаллические магнитомягкие* материалы. Среди них можно выделить *ферриты* и *магнитодиэлектрики*.

Таблица 1

Области применения пермалоев

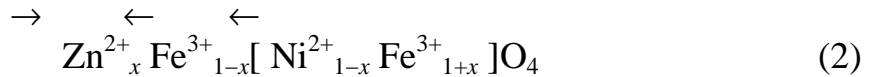
Низконикелевые (40-50 % Ni)	Высоконикелевые (60-80 % Ni)
$\uparrow\rho, \downarrow\mu, \uparrow B_s$	$\downarrow\rho, \uparrow\mu, \downarrow B_s$
Магнитопровода для силовых трансформаторов; Элементы магнитных цепей, работающие в сильных полях при высоких частотах.	Магнитные элементы для слабых полей; Сердечники, трансформаторы, магнитные экраны; Головки магнитной записи.

Наиболее широкое применение для СВЧ-устройств находят ферритовые керамические материалы. Ферриты представляют собой смешанные оксиды на основе оксидов двухвалентных металлов Ni, Co, Mn, Cu, Mg, Zn, Cd и оксида железа Fe₂O₃. Эти ферриты кристаллизуются в структуре шпинели общей формулы AB₂O₄. Для описания структурных и вытекающих магнитных особенностей сложных ферритов используется модель плотнейших упаковок. Различают структуру нормальной (ион Fe³⁺ только в октаэдрических пустотах) и обращенной (ион Fe³⁺ и в тетра- и в октаэдрических пустотах) шпинели. Структура нормальной шпинели характерна для немагнитного феррита цинка, а обращенной шпинели – для магнитного феррита никеля.



Косвенные обменные взаимодействия в структуре шпинели приводят к определенной ориентации магнитных моментов ионов образующих решетку. На практике используются смешанные ферриты, содержащие магнитные и немагнитные ионы и образующие твердые растворы со структурой шпинели. Регулирование состава феррита за счет управления степенью компенсации магнитных моментов А- и В-подрешеток шпинельной структуры ферритмагнетика позволяет изменять магнитные характеристики материала, а

именно его намагниченность, магнитную проницаемость и температуру Кюри, а также уменьшать стоимость материала. Так, при введении немагнитного иона Zn^{2+} в никелевый феррит (формула 1) магнитный момент формульной единицы $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ увеличивается за счет уменьшения компенсации между подрешетками шпинельной ферритовой структуры (формула 2). Кроме того, цинк снижает температуру Кюри феррита, что приводит к увеличению реальной магнитной проницаемости материала при рабочих температурах.



Таким образом, среди достоинств ферритовых шпинельных материалов можно отметить высокое удельное сопротивление, удобство керамической технологии производства изделий, пониженную стоимость, доступность, долговечность. Недостатками этих материалов в сравнении с металлическими аналогами являются пониженные магнитные характеристики $T_C \downarrow$, $\mu \downarrow$, $B_s \downarrow$, $H_C \uparrow$, пониженные механические свойства, достаточно большая усадка при изготовлении (до 30%), пониженная воспроизводимость магнитных свойств.

Магнитомягкие ферриты используются при изготовлении сердечников импульсных трансформаторов, контурных катушек, а также в устройствах управления СВЧ-колебаниями.

Магнитодиэлектрики представляют собой композиционные магнитомягкие материалы, которые содержат ферритовый наполнитель и диэлектрическую связку органической (например, фенолформальдегидные смолы, полистирол) или неорганической (стекло) природы. Роль наполнителя выполняет высокодисперсный порошкообразный ферромагнетик, например, *альсифер*, который обладает высокой магнитной проницаемостью при 54% Al, 36% Fe, 10% Si. Магнитная проницаемость магнитодиэлектрика $\mu_{мд}$ можно оценить с учетом магнитной проницаемости ферромагнетика $\mu_{фм}$ по формуле (3).

$$\mu_{мд} = \frac{1}{\frac{1}{\mu_{фм}} + \frac{V}{3}} \quad (3)$$

где V – относительный объем электроизоляционной фазы.

Магнитодиэлектрики имеют невысокие магнитные характеристики, но они технологичны, дешевы и находят применение в катушках индуктивности для радиоаппаратуры и устройств связи.

Магнитотвердые или магнито жесткие материалы

Магнито жесткие материалы должны обладать высокой коэрцитивной силой $\uparrow H_C$, повышенной остаточной индукцией $\uparrow B_r$, а также высокой магнитной энергией или энергетическим произведением $(B \cdot H)_{\max}$. Коэрцитивная сила определяется дефектностью решетки и размером зерна, а

величина остаточной индукции – составом материала. Магнитотвердыми свойствами обладают магнетики, которые находятся в *высококоэрцитивном* состоянии, которому способствуют:

- минимальные размеры (до 1 мкм) структурных элементов для обеспечения монодоменности кристаллитов;

- электромагнитная изоляция отдельных элементов магнетика в пределах кристаллитов.

Эти материалы создаются на основе металлов или ферритов.

Среди *металлических магнито жестких* материалов можно выделить:

1) Литые высококоэрцитивные сплавы ($H_C \cong 110$ кА/м) – сплавы системы Fe – Ni – Al, в которых содержится 10-20% Al, до 17% Ni, остальное Fe + легирующие добавки Co, Si, влияющие на механические и магнитные свойства. В этих материалах возможно управлять магнитными свойствами с помощью введения легирующих добавок, но они весьма капризны в технологическом плане.

2) Сплавы, содержащие редкоземельные металлы. Эта группа сплавов на основе Co с добавлением редкоземельных элементов, например, самария, церия и других. Основной фазой в этих сплавах являются интерметаллиды, например, $SmCo_5$ или Sm_2Co_{17} . У этих материалов наиболее высокая H_C (> 1000 кА/м); неплохая пластичность, однако повышенная хрупкость, нестабильность и стоимость.

3) Сплавы, содержащие благородные металлы, например, Co + Pt или Co + Pd или Ag+Mg+Al. У этих магнетиков повышенная H_C (несколько сотен кА/м); повышенная пластичность; хорошая химическая стойкость. Они используются для изготовления миниатюрных ответственных деталей.

Ферритовые магнито жесткие материалы

Магнитотвердыми свойствами обладают гексаферриты Ba, Sr, Co, Pb. Гексаферриты бария и стронция имеют гексагональную кристаллическую структуру типа магнетоплюмбита с большой константой кристаллографической анизотропии, что позволяет при мелкокристаллической структуре материала иметь большую коэрцитивную силу. Однако, вследствие того, что гексаферриты стронция и бария являются ферримагнетиками, индукция насыщения у них невелика. Бариевые и стронциевые магнитотвердые ферриты имеют химический состав близкий к формуле: $(Ba/SrO) \cdot 6Fe_2O_3$. На практике для достижения тонкой кристаллической структуры материала от стехиометрической формулы отходят в сторону снижения содержания железа, а также применяют добавки, образующие межкристаллические прослойки из стеклообразующих компонентов (оксидов кремния, бора, висмута и других). Замещение BaO на SrO также делает процесс изготовления ферритовых магнитов более технологичным и экологичным. Сочетание высокой коэрцитивной силы с достаточно высокой остаточной индукцией позволяет получать магниты с удовлетворительной (для очень большого числа применений) удельной магнитной энергией, а доступность и дешевизна исходного сырья, низкая себестоимость производства позволяет производить ферритовые магниты

массой в десятки тысяч тонн в год и удовлетворять порядка 75% потребностей мирового рынка постоянных магнитов.

Ферритовые магниты характеризуются высокой коррозионной (химической) и структурной (кристаллической) стабильностью, что делает их экологически безопасными и годными к применению практически без ограничений во времени. Однако, в условиях, когда в пористую структуру феррита возможно попадание влаги, необходимо применять защитные покрытия. К достоинствам ферритовых магнитов можно отнести также возможность осуществлять у них многополюсное намагничивание на цельном компактном изделии, а также низкую электропроводность, позволяющую применять ферритовые магниты при наличии высокочастотных магнитных полей. Недостатком ферритовых магнитов является существенная зависимость коэрцитивной силы от температуры, которая ограничивает использование таких магнитов при отрицательных (ниже -20°C) температурах.

В некоторых случаях используются недорогие композиционные магнитотвердые материалы – *магнитопластмассы*. Они содержат полимерную связку и обычно ферритовый магнетик, в микродисперсном состоянии. Комбинация коррозионно-стойких порошков ферритовых магнитов с полимерными связующими позволяет производить эластичные и пластичные изделия методами экструзии или проката с размерами невозможными для керамических изделий, например в форме лент или тонкослойных плёнок.

Магнитные материалы специального назначения

Эта группа объединяет магнетики со специфическими свойствами для определенных устройств. Среди них можно отметить:

- термомагнитные;
- магнестрикционные;
- магнетики с прямоугольной петлей гистерезиса.

Термомагнитные сплавы представляют собой магнетики с сильной зависимостью намагниченности от температуры в интервале, близком к обычным условиям. Среди них применяются *термаллои* (сплав Fe-Ni с содержанием Ni около 30%) и *компенсаторы* (сплавы Fe-Ni-Cr с содержанием Ni до 30% и Cr до 10%). Лучшие характеристики показывают более дорогостоящие компенсаторы. В отличие от термаллоев они имеют обратимую температурную кривую намагниченности и повышенную намагниченность, а также технологичны в обработке. Компенсаторы широко используются в измерительных приборах для компенсации погрешности и стабилизации работы.

Магнестрикционные материалы

Магнестрикция – это явление возникновения механических деформаций в образце при наложении магнитного поля. Магнестрикционные материалы обладают анизотропией намагничивания. Вдоль оси легкого намагничивания относительное удлинение образца K_m максимально. Эта ось искусственно создается в реальных материалах с

помощью магнитного поля либо текстурированием. Примерами магнестрикционных материалов являются чистое *железо* и *никель*, а также сплавы *пермендюр* (приблизительно 50% Fe + 50% Co) и *альфер* (Fe + 10-13% Al). Самый высокий коэффициент магнестрикции порядка $1,2 \cdot 10^{-4}$ наблюдается для сплавов Fe с благородными металлами, например, 50% Pt + 46% Fe + легирующие компоненты. Магнестрикционными свойствами обладают также некоторые ферриты, например, никель-кобальтовый феррит.

Магнетики с прямоугольной петлей гистерезиса

Эти материалы практически не размагничиваются при снятии магнитного поля. Они характеризуются следующими параметрами:

– коэффициент прямоугольности петли гистерезиса $K_{\text{ППГ}}$.

$$K_{\text{ППГ}} = \frac{B_r}{B_s} \approx 0,85 \div 0,96; \quad (4)$$

– коэффициент переключения, оценивающий количество электричества Q , необходимое для переключения из одного состояния $(+B_r)$ в другое $(-B_r)$.

$$S_q = \frac{Q}{d}, \quad (5)$$

где d – диаметр или толщина

магнетика.

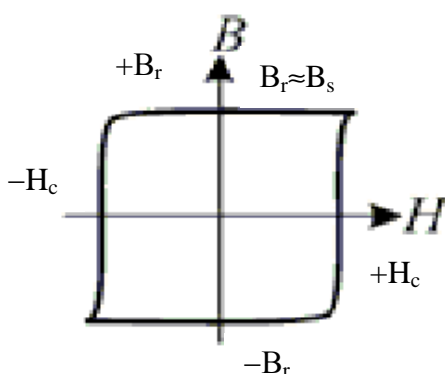


Рис. 2.17. Общий вид прямоугольной петли гистерезиса

Среди магнетиков с ППГ выделяют *металлические ферромагнитные пленки* и *ферриты с ППГ*. В качестве фольгированных или пленочных материалов можно использовать дорогостоящие высоконикелевые пермаллои толщиной 1÷10 мкм. Более доступными являются ферриты с ППГ, например, магний-марганцевые ферриты с переменной валентностью марганца $Mg^{2+}Mn^{2+ \rightarrow 3+}Fe_2O_4$, а также Li-содержащие ферриты. Достоинствами ферритов с ППГ являются высокая надежность и стабильность, низкая энергоемкость, низкая стоимость, долгий срок службы. Материалы используются в переключателях и запоминающих устройствах.