**Лекция 5**

**МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Все вещества являются магнетиками и намагничиваются во внешнем магнитном поле.

По магнитным свойствам материалы подразделяются на слабомагнитные (*диамагнетики* и *парамагнетики*) и сильномагнитные (*ферромагнетики* и*ферримагнетики*).

*Диамагнетики* – вещества с магнитной проницаемостью μr< 1, значение которой не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. Диамагнетиками являются вещества, атомы (молекулы) которых в отсутствие намагничивающего поля имеют магнитный момент равный нулю: водород, инертные газы, большинство органических соединений и некоторые металлы (Cu, Zn, Ag, Au, Hg), а также Вi, Gа, Sb.

*Парамагнетики* – вещества с магнитной проницаемостью μr > 1, которая в слабых полях не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К парамагнетикам относятся вещества, атомы (молекулы) которых в отсутствие намагничивающего поля обладают магнитным моментом отличным от нуля: кислород, оксид азота, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов, щелочные металлы, алюминий, платина.

У диамагнетиков и парамагнетиков магнитная проницаемость μr близка к единице. Применение в технике в качестве магнитных материалов носит ограниченный характер.

У сильномагнитных материалов магнитная проницаемость значительно больше единицы (μr>> 1) и зависит от напряженности магнитного поля. К ним относятся: железо, никель, кобальт и их сплавы, а также сплавы хрома и марганца, гадолиний, ферриты различного состава.

**6.1. Магнитные характеристики материалов**

Магнитные свойства материалов оценивают физическими величинами, называемыми магнитными характеристиками.

**Магнитная проницаемость**

Различают *относительную* и *абсолютную* *магнитные проницаемости* вещества (материала), которые между собой связаны соотношением

μa= μo·μ,  Гн/м

μo – магнитная постоянная, μo= 4π·10-7Гн/м;

μ – относительная магнитная проницаемость (безразмерная величина).

Для описания свойств магнитных материалов применяют относительную магнитную проницаемость μ (чаще называемую магнитная проницаемость), а для практических расчетов используют абсолютную магнитную проницаемость μa, вычисляемую по уравнению

μa = *В*/*Н*,  Гн/м

*Н* – напряженность намагничивающего (внешнего) магнитного поля, А/м

*В* – магнитная индукция поля в магнетике.

Большая величина μ показывает, что материал легко намагничивается в слабых и сильных магнитных полях. Магнитная проницаемость у большинства магнетиков зависит от напряженности намагничивающего магнитного поля.

Для характеристики магнитных свойств широко используется безразмерная величина, называемая *магнитной восприимчивостью* χ.

μ = 1 + χ

**Температурный коэффициент магнитной проницаемости**

Магнитные свойства вещества зависят от температуры μ = μ(*T*).

Для описания характера изменения магнитных свойств с температурой используют температурный коэффициент магнитной проницаемости.



Зависимость магнитной восприимчивости парамагнетиков от температуры *T* описывается законом Кюри



где *C -*постоянная Кюри*.*

**Магнитные характеристики ферромагнетиков**

Зависимость магнитных свойств ферромагнетиков имеет более сложный характер, показанный на рисунке, и достигает максимума при температуре близкой к Qк.



Температура, при которой магнитная восприимчивость резко снижается, почти до нуля, носит название температуры Кюри - Qк. При температурах выше Qк процесс намагничивания ферромагнетика нарушается из-за интенсивного теплового движения атомов и молекул и материал перестает быть ферромагнитным и становится парамагнетиком.

Для железа Qк = 768 °C, для никеля Qк= 358 °C, для кобальта Qк= 1131°C.

Выше температуры Кюри зависимость магнитной восприимчивости ферромагнетика от температуры *T* описывается законом Кюри-Вейса



Процесс намагничивания сильномагнитных материалов (ферромагнетиков) обладает *гистерезисом*. Если производить намагничивание размагниченного ферромагнетика во внешнем поле, то он намагничивается по *кривой намагничивания* *B* = *B*(*H*). Если затем, начиная с некоторого значения *H* начать уменьшать напряженность поля, то индукция *B* будет уменьшаться с некоторым запаздыванием (*гистерезисом*) по отношению к кривой намагничивания. При увеличении поля противоположного направления ферромагнетик размагничивается, затем перемагничивается, и при новой смене направления магнитного поля может вернуться в исходную точку, откуда начинался процесс размагничивания. Получившаяся петля, изображенная на рисунке, называется *петлей гистерезиса*.



При некоторой максимальной напряженности *Н*мнамагничивающего поля вещество намагничивается до состояния насыщения, индукция в котором достигает значения*В*Н, которое называется *индукцией насыщения.*

*Остаточная магнитная индукция В*О*–*наблюдается в ферромагнитном материале, намагниченном до насыщения, при его размагничивании, когда напряженность магнитного поля равна нулю. Для размагничивания образца материала надо, чтобы напряженность магнитного поля изменила свое направление на обратное (-*Н*). Напряженность поля *Н*К, при которой индукция равна нулю, называется *коэрцитивной силой*(удерживающая сила)*.*

Перемагничивание ферромагнетика в переменных магнитных полях всегда сопровождается тепловыми потерями энергии, которые обусловлены *потерями на гистерезис* и *динамическими потерями*. Динамические потери связаны с вихревыми токами, индуцированными в объеме материала, и зависят от электрического сопротивления материала, уменьшаясь с ростом сопротивления. Потери на гистерезис *W*в одном цикле перемагничиванияопределяются площадью петли гистерезиса



и могут быть вычислены для единицы объема вещества по эмпирической формуле

,        Дж/м3

где η – коэффициент зависящий от материала, *B*Н – максимальная индукция, достигаемая в течение цикла, *n* – показатель степени, равный в зависимости от материала 1,6 ¸ 2.

*Удельные потери энергии на гистерезис Р*Г*–*потери, затраченные на перемагничивание единицы массы в единице объема материала за секунду.



где *f*– частота переменного тока, *T* – период колебаний.

**Магнитострикция**

*Магнитострикция* – явление изменения геометрических размеров и формы ферромагнетика при изменении величины магнитного поля, т.е. при намагничивании. Относительное изменение размеров материала Δ*l*/*l* может быть положительным и отрицательным. У никеля магнитострикция меньше нуля и достигает величины 0,004 %.

В соответствии с принципом Ле Шателье о противодействии системы влиянию внешних факторов, стремящихся изменить это состояние, механическая деформация ферромагнетика, приводящая к изменению его размера должна оказывать влияние на намагничивание этих материалов.

Если при намагничивании тело испытывает в данном направлении сокращение своих размеров, то приложение механического напряжения сжатия в этом направлении способствует намагничиванию, а растяжение – затрудняет намагничивание.

**6.2.** **Классификация ферромагнитных материалов**

Все ферромагнитные материалы по поведению в магнитном поле делятся на две группы.

*Магнитомягкие –*с большой магнитной проницаемостью μ и малой величиной коэрцитивной силы *Н*К< 10 А/м. Они легко намагничиваются и размагничиваются. Обладают малыми потерями на гистерезис, т.е. узкой петлей гистерезиса.

Магнитные характеристики зависят от химической чистоты и степени искажения кристаллической структуры. Чем меньше примесей (С, Р, S, О, N), тем выше уровень характеристик материала, поэтому необходимо при производстве ферромагнетика их и оксиды удалять, и стараться не искажать кристаллическую структуру материала.

*Магнитотвердые материалы –*обладают большой *Н*К> 0,5·МА/м и остаточной индукцией (*В*О≥ 0,1Т). Им соответствует широкая петля гистерезиса. Они с большим трудом намагничиваются, зато могут несколько лет сохранять магнитную энергию, т.е. служить источником постоянного магнитного поля. Поэтому из них изготовляются постоянные магниты.

По составу все магнитные материалы делятся на:

·           металлические;

·           неметаллические;

·           магнитодиэлектрики.

*Металлические магнитные материалы* - это чистые металлы (железо, кобальт, никель) и магнитные сплавы некоторых металлов.

К неметаллическимматериалам относятся*ферриты,*получаемые из порошков оксидов железа и других металлов. Их прессуют и обжигают при 1300 – 1500 °С и они превращаются в твердые монолитные магнитные детали. Ферриты, как и металлические магнитные материалы, могут быть магнитомягкими и магнитотвердыми.

*Магнитодиэлектрики –*это композиционные материалы из 60 – 80 % порошка магнитного материала и 40 – 20 % органического диэлектрика. Ферриты имагнитодиэлектрики имеют большое значение удельного электрического сопротивления (ρ = 10 ÷ 108Ом·м), Высокое сопротивление этих материалов обеспечивает низкие динамические потери энергии в переменных электромагнитных полях и позволяет широко использовать их в высокочастотной технике.

**6.3. Металлические магнитные материалы**

**6.3.1. Металлические магнитомягкие материалы**

К металлическим магнитомягким материалам относятся карбонильное железо, пермаллои, альсиферы и низкоуглеродистые кремнистые стали.

*Карбонильное железо****–***получают термическим разложением жидкости пентакарбонила железа Fе(СО)5 с получением частиц чистого порошкообразного железа:

Fе(СО)5→ Fе + 5СО,

при температуре около 200 °С и давлении 15 МПа. Частицы железа имеют сферическую форму размером 1 – 10 мкм. Для освобождения от частиц углерода порошок железа подвергают термической обработке в среде Н2.

Магнитная проницаемость карбонильного железа достигает 20000, коэрцитивная сила составляет 4,5 ¸6,2 А/м. Применяют порошок железа для изготовления высокочастотных магнитодиэлектрических сердечников, в качестве наполнителя в магнитных лентах.

*Пермаллои –*пластичные железоникелевые сплавы. Для улучшения свойств вводят Мо, Сr, Сu, получая легированные пермаллои. Обладают высокой пластичностью, легко прокатываются в листы и ленты до 1 мкм.

Если содержание никеля в пермаллое 40 – 50 %, то он называется низконикелевым, если 60 – 80 % – высоконикелевым.

Пермаллои имеют высокий уровень магнитных характеристик, который обеспечивается не только составом и высокой химической чистотой сплава, но и специальной тепловой вакуумной обработкой. Пермаллои имеют очень высокий уровень начальной магнитной проницаемости от 2000 до 30000 ( в зависимости от состава) в области слабых полей, который обусловлен низкой величиной магнитострикции и изотропностью магнитных свойств. Особенно высокие характеристики имеет супермаллой, начальная магнитная проницаемость которого имеет значение 100000, а максимальная достигает 1,5·106 при *B* = 0,3 Тл.

Пермаллои поставляют в виде лент, листов и прутков. Низконикелевые пермаллои применяют для изготовления сердечников дросселей, малогабаритных трансформаторов и магнитных усилителей, высоконикелевые пермаллои*–*для деталей аппаратуры, работающих на звуковых и сверхзвуковых частотах. Магнитные характеристики пермаллоев стабильны при –60 +60°С.

*Альсиферы –*нековкие хрупкие сплавы состава Al – Si – Fe, состоящие из 5,5 – 13 % Аl, 9 – 10 % Si, остальное – железо. Альсифер близок по свойствам к пермаллою, но более дешев. Из него изготовляют литые сердечники, отливают магнитные экраны и другие полые детали с толщиной стенок не менее 2 – 3 мм. Хрупкость альсифераограничивает области его применения. Используя хрупкость альсифера, его размалывают в порошок, который используется в качестве ферромагнитного наполнителя впрессованных высочастотных магнитодиэлектриках (сердечники, кольца).

*Кремнистая низкоуглеродистая сталь*(*электротехническая сталь) –*сплав железа и кремния (0,8 – 4,8 % Si). Основной магнитомягкий материал массового применения. Она легко прокатывается в листы и ленты 0,05 – 1 мм и является дешевым материалом. Кремний, находящийся в стали в растворенном состоянии, выполняет две функции.

·           Повышая удельное сопротивление стали, кремний вызывает снижение динамических потерь, связанных с вихревыми токами. Сопротивление повышается за счетобразования кремнезема SiO2 в результате протекания реакции

2FeO + Si → 2Fe + SiO2.

·           Наличие кремния, растворенного в стали, способствует распаду цементита Fе3С – вредной примеси, снижающей магнитные характеристики, и выделению углерода в виде графита. При этом образуется чистое железо, рост кристаллов которого повышает уровень магнитных характеристик стали.

Введение кремния в сталь в количестве, превышающем 4,8 %, не рекомендуется, так как, способствуя улучшению магнитных характеристик, кремний резко повышает хрупкость стали и снижает ее механические свойства.

**6.3.2. Металлические магнитотвердые материалы**

*Магнитотвердые материалы* - это ферромагнетики с высокой коэрцитивной силой (более 1 кА/м) и большой величиной остаточной магнитной индукции *В*О. Применяются для изготовления постоянных магнитов.

Подразделяются в зависимости от состава, состояния и способа получения на:

·           легированные мартенситные стали;

·           литые магнитотвердые сплавы.

*Легированные мартенситные стали*– это углеродистые стали и стали, легированные Сr, W, Со, Мо. Углеродистые стали быстро стареют и изменяют свои свойства, поэтому редко применяются для изготовления постоянных магнитов. Для изготовления постоянных магнитов используют легированные стали – вольфрамовую и хромистую (*Н*С ≈ 4800 А/м, *В*О ≈ 1 Т), которые изготавливаются в виде прутков с различной формой сечения. Кобальтовая сталь обладает более высокой коэрцитивной силой (*Н*С ≈ 12000 А/м, *В*О ≈ 1 Т) по сравнению с вольфрамовой и хромистой. Коэрцитивная сила*Н*С кобальтовой стали растет с увеличением содержания Со.

*Литые магнитотвердые сплавы.*Улучшенные магнитные свойства сплавов обусловлены специально подобранным составом и специальной обработкой – охлаждением магнитов после отливки в сильном магнитном поле, а также специальной многоступенчатой тепловой обработкой в виде закалки и отпуска в сочетании с магнитной обработкой, называемой дисперсионным твердением.

Для изготовления постоянных магнитов находят применение три основных группы сплавов:

·           *Железо – кобальт – молибденовый сплав* типа *ремаллой*  с коэрцитивной силой *Н*К= 12 – 18 кА/м.

·           Группа сплавов:

§         *медь – никель – железо;*

§         *медь – никель – кобальт;*

§         *железо – марганец,*легированные алюминием или титаном;

§         *железо – кобальт – ванадий* (Fе – Со – V).

Сплав медь – никель – железо называется *кунифе*(Сu – Ni - Fе). Сплав Fе – Со – V (железо – кобальт - ванадий) называется *викалой.*Сплавы этой группы имеют коэрцитивную силу*Н*К= 24 – 40 кА/м. Выпускаются в виде проволоки и в листах.

·           Сплавы системы*железо – никель – алюминий*(Fе*–*Ni *–*Аl), известные ранее под названием сплав *альни*. Сплав  содержит 20 - 33 % Ni + 11 – 17 % Al,остальное железо. Добавление в сплавы кобальта, меди, титана, кремния, ниобия улучшает их магнитные свойства, облегчает технологию изготовления, обеспечивает повторяемость параметров, улучшает механические свойства. Современная маркировка марки содержит буквы, обозначающие добавляемые металлы (Ю – алюминий, Н – никель, Д – медь, К - кобальт, Т – титан, Б – ниобий, С – кремний), цифры - содержание элемента, буква которого стоит перед цифрой, например, ЮНДК15.

Сплавы обладают высоким значением коэрцитивной силы*Н*К= 40 – 140 кА/м и большой запасенной магнитной энергией.

**6.4. Неметаллические магнитные материалы. Ферриты**

Ферриты представляют собой керамические ферромагнитные материалы с малой электронной электропроводностью. Низкая электропроводность в сочетании с высокими магнитными характеристиками позволяет широко использовать ферриты на высоких частотах.

Изготовляют ферриты из порошкообразной смеси, состоящей из окиси железа и специально подобранных окислов других металлов. Их прессуют, а затем спекают при высоких температурах. Общая химическая формула имеет вид:

МеО·Fе2О3 или МеFе2О4,

где Ме символ двухвалентного металла.

Например,

ZnO·Fe2O3 или

NiO·Fe2O3 или NiFe2O4

Ферриты обладают кубической решеткой типа шпинели MgOAl2O3- алюмината магния. Не все ферриты обладают магнитными свойствами. Наличие магнитных свойств связано с расположением ионов металлов  в кубической решетке шпинели. Так система ZnFe2O4не обладает ферромагнитными свойствами.

Ферриты изготовляют по керамической технологии. Исходные порошкообразные окислы металлов измельчают в шаровых мельницах, прессуют и обжигают в печах. Спекшиеся брикеты размалывают в тонкодисперсный порошок, вводят пластификатор, например раствор поливинилового спирта. Из полученной массы прессуют ферритовые изделия – сердечники, кольца, которые обжигают на воздухе при 1000 – 1400 °С. Полученные твердые хрупкие изделия в основном черного цвета можно обрабатывать только шлифованием и полированием.

**Магнитомягкие ферриты**

Магнитомягкие ферриты широко применяют в области высоких частот электронной техники и приборостроении для изготовления фильтров, трансформаторов усилителей низких и высоких частот, антенн радиопередающих и радиоприемных устройств, импульсных трансформаторов, магнитных модуляторов. Промышленностью выпускаются следующие виды магнитомягких ферритов с широким спектром магнитных и электрических свойств: никель – цинковые, марганец – цинковые и литий – цинковые. Верхняя граничная частота применения феррита зависит от их состава и изменяется у разных марок ферритов от 100 кГц до 600 МГц, коэрцитивная сила составляет около 16 А/м.

Достоинством ферритов является стабильность магнитных характеристик, относительная  простота изготовления радиодеталей. Как все ферромагнитные материалы ферриты сохраняют свои магнитные свойства только до температуры Кюри, которая зависит от состава ферритов и колеблется в пределах от 45 ° до 950 °С.

**Магнитотвердые ферриты**

Для изготовления постоянных магнитов используют магнитотвердые ферриты, наибольшее применение имеют ферриты бария (ВаО·6Fе2О3). Они имеют гексагональную кристаллическую структуру с большой *Н*К. Ферриты бария представляют собой поликристаллический материал. Могут быть изотропными - одинаковость свойств феррита во всех направлениях обусловлена тем, что кристаллические частицы ориентированы произвольно. Если в процессе прессования магнитов порошкообразную массу подвергнуть воздействию внешнего магнитного поля большой напряженности, то кристаллические частицы феррита будут ориентированы в одном направлении, и магнит будет являться анизотропным.

Бариевые ферриты отличаются хорошей стабильностью своих характеристик, но чувствительны к изменению температуры и механическим воздействиям. Магниты из бариевых ферритов дешевы.

**6.5. Магнитодиэлектрики**

*Магнитодиэлектрики* - это композиционные материалы, состоящие из мелкодисперсных частиц магнитомягкого материала, связанных друг с другом органическим или неорганическим диэлектриком. В качестве магнитомягких материалов применяют карбонильное железо, альсифер и некоторые сорта пермаллоев, измельченные до порошкообразного состояния.

В качестве диэлектриков применяют полистирол, бакелитовые смолы, жидкое стекло и др.

Назначение диэлектрика не только в том, чтобы соединить частицы магнитного материала, но и изолировать их друг от друга, а, следовательно, резко повысить величину удельного электрического сопротивления магнитодиэлектрика. Удельное электрическое сопротивление r магнитодиэлектриков составляет  103 – 104 Ом×м

Магнитодиэлектрики применяют для изготовления сердечников высокочастотных узлов радиоаппаратуры. Процесс производства изделий проще, чем из ферритов, т.к. они не нуждаются в высокотемпературной тепловой обработке. Изделия из магнитодиэлектриков отличаются высокой стабильностью магнитных свойств, высоким классом чистоты поверхности и точностью размеров.

Наиболее высокими магнитными характеристиками обладают магнитодиэлектрики, наполнителем в которых служит молибденовый пермаллой или карбонильное железо.