

7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Магнитные материалы подразделяют на две основные группы: магнитомягкие и магнитотвердые. В отдельную группу выделяют материалы специального назначения.

К *магнитомягким* относят магнитные 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 используют в качестве: сердечников дросселей, трансформаторов, электромагнитов, магнитных систем электроизмерительных приборов и т. п.

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

Условно магнитомягкими считают материалы, у которых $H_c < 800$ А/м, а магнитотвердыми – с $H_c > 4$ кА/м. Необходимо, отметить, что у лучших магнитомягких материалов коэрцитивная сила может составлять менее 1 А/м, а в лучших магнитотвердых материалах ее значение превышает 500 кА/м.

Среди материалов *специального назначения* выделяют материалы с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), ферриты для устройств сверхвысокочастотного диапазона и магнитоотрицательные материалы.

7.2. МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ И НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

7.2.1. 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. Выполнение этого требования позволяет уменьшить габаритные размеры и массу магнитной системы.

Магнитный материал, используемый в переменных полях, должен иметь *малые потери на перемагничивание*, которые складываются в основном из потерь на гистерезис и вихревые токи. Для уменьшения потерь на вихревые токи выбирают материалы с повышенным удельным сопротивлением.

Важным требованием является *стабильность 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.

7.2.2. Железо и низкоуглеродистые стали.

Основным компонентом большинства магнитных материалов является железо. Само по себе железо типичный магнитомягкий материал, магнитные свойства которого существенно зависят от содержания примесей.

Электролитическое железо получают при электролизе раствора сернокислого 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, который представляет собой продукт воздействия оксида углерода на железо при температуре около 200°C и давлении 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.

Технически чистое железо содержит небольшое количество примесей углерода, серы, марганца, кремния и других элементов, ухудшающих его магнитные свойства. Технически чистое железо вследствие низкого удельного сопротивления используют редко, в основном для изготовления материалов постоянного магнитного потока. Технически чистое железо изготавливают рафинированием чугуна в мартеновских печах или в конверторах.

7.2.3. Кремнистая электротехническая сталь.

Эта сталь является основным магнитомягким материалом массового потребления. Введение в состав

стали кремния способствует повышению удельного сопротивления. Кроме того, наличие кремния способствует выделению углерода в виде графита, а также почти полному раскислению стали за счет химического связывания кислорода. Легирование кремнием приводит к увеличению μ_H и μ_{max} , уменьшению H_c и снижению потерь на гистерезис.

Кремнистая сталь обладает магнитной анизотропией, подобной анизотропии чистого железа, т. е. направление легкого намагничивания совпадает с кристаллографическим направлением [100], а наиболее трудное намагничивание совпадает с пространственной диагональю [111] кубической элементарной ячейки. Свойства стали улучшаются за счет образования магнитной текстуры при холодной прокатке и последующего отжига в водороде. При холодной прокатке происходит сильное обжатие материала; возникающие деформации вызывают преимущественную ориентацию кристаллических зерен. Отжиг при температуре 900 – 1000°C не только снимает внутренние механические напряжения, но и сопровождается интенсивной рекристаллизацией (укрупнением зерен), в результате которой кристаллические зерна осями легкого намагничивания ориентируются вдоль направления проката. Получается так называемая *ребровая текстура*. При этом кристаллографические плоскости типа (110) большинства кристаллических зерен располагаются параллельно плоскости прокатки.

Текстурованная сталь анизотропна по свойствам: вдоль направления прокатки наблюдается существенно более высокая магнитная проницаемость и меньшие потери на гистерезис. Объясняется это тем, что намагничивание вдоль направления прокатки осуществляется за счет смещения доменных границ. Эффективное использование текстурованных сталей возможно лишь при такой конструкции, при которой магнитный поток целиком проходит вдоль направления легкого намагничивания.

Сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты. Она может быть без электроизоляционного покрытия или иметь его. Толщина листов стали 0,05 – 1 мм. Сталь используют для изготовления магнитных цепей аппаратов, трансформаторов, приборов, электрических машин. Применение ленточных сердечников из текстурованной стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и габаритные размеры на 20 – 25%, а в радиотрансформаторах – на 40%.

Листы тонкого проката предназначены в основном для использования в полях повышенной частоты (до 1 кГц). С уменьшением толщины листов уменьшаются потери на вихревые токи. Однако в очень тонких листах наблюдается резкое возрастание коэрцитивной силы, соответственно увеличиваются и потери на гистерезис.

7.2.4. Низкокоэрцитивные сплавы.

Пермаллои – железоникелевые сплавы, обладающие большой магнитной проницаемостью в области слабых полей и малой коэрцитивной силой. Пермаллои подразделяют на высоко- и низконикелевые. Высоконикелевые пермаллои содержат 72 – 80 % никеля, а низконикелевые – 40 – 50 % никеля.

Магнитные свойства пермаллоев очень чувствительны к внешним механическим напряжениям, зависят от химического состава и наличия инородных примесей в сплаве, а также изменяются в зависимости от режимов термообработки материала (температуры, скорости нагрева и охлаждения, окружающей среды и т. д.). Термическая обработка высоконикелевых пермаллоев сложнее, чем низконикелевых.

Магнитные проницаемости высоконикелевых пермаллоев в несколько раз выше, чем у низконикелевых, и намного превосходят проницаемости электротехнических сталей. 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 снижается с увеличением частоты. Это объясняется возникновением в материале заметных вихревых токов из-за небольшого удельного сопротивления.

Для придания сплавам необходимых свойств в состав пермаллоев вводят ряд добавок. Молибден и хром повышают удельное сопротивление и начальную магнитную проницаемость пермаллоев и уменьшают чувствительность к механическим деформациям. Однако одновременно с этим снижается индукция насыщения. Медь увеличивает постоянство μ в узких интервалах напряженности магнитного поля, повышает температурную стабильность и удельное сопротивление, а также делает сплавы легко поддающимися механической обработке. Кремний и марганец только увеличивают удельное сопротивление пермаллоев.

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 эластичным веществом.

Альсиферы – тройные сплавы железа с кремнием и алюминием. Оптимальный состав альсифера: 9,5% Si, 5,6% Al, остальное – Fe. Такой сплав отличается твердостью и хрупкостью, но может быть изготовлен в виде фасонных отливок. Изделия из альсифера – магнитные экраны, корпуса приборов и т. п. – изготавливают методом литья с толщиной стенок не менее 2 – 3 мм ввиду хрупкости сплава. Эта особенность ограничивает применение данного материала. Благодаря хрупкости альсифера его можно размалывать в порошок и использовать наряду с карбонильным железом для изготовления высокочастотных пресованных сердечников.

7.3. МАГНИТОМЯГКИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Под *высокочастотными магнитомягкими материалами* понимают вещества, которые выполняют функции магнетиков при частотах свыше нескольких сотен или тысяч герц. По частотному диапазону применения в свою очередь можно подразделить на материалы для звуковых, ультразвуковых и низких радиочастот, для высоких радиочастот и для СВЧ.

По физической природе и строению высокочастотные магнитомягкие материалы подразделяют на *магнитоэлектрики* и *ферриты*. Кроме того, при звуковых, ультразвуковых и низких радиочастотах можно использовать тонколистовые рулонные холоднокатаные электротехнические стали и пермаллои. Толщина сталей достигает 30 – 25 мкм, а пермаллой, как механически более мягкий сплав, может быть получен толщиной до 3 – 2 мкм. Основные магнитные свойства таких тонких материалов близки к свойствам материалов больших толщин, однако они имеют несколько повышенную коэрцитивную силу и высокую стоимость, а технология сборки магнитных цепей из них весьма сложна.

7.3.1. Ферриты

Ферриты представляют собой оксидные магнитные материалы, у которых спонтанная намагниченность доменов обусловлена нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Большое удельное сопротивление и незначительные потери энергии в области высоких частот наряду с высокими магнитными свойствами обеспечивают ферритам широкое применение в радиоэлектронике.

Получение ферритов. Ферриты получают в виде керамики и монокристаллов. Благодаря невысокой стоимости и относительной простоте технологического цикла керамические материалы занимают ведущее место среди высокочастотных магнетиков.

При изготовлении *ферритовой керамики* в качестве исходного сырья часто используют оксиды соответствующих металлов. Однако при получении материалов с заданными магнитными свойствами предъявляют жесткие требования в отношении химической чистоты, степени дисперсности и химической активности. Ферритовая керамика совершенно не содержит стекловидной фазы; все процессы массопереноса при синтезе соединения и спекания изделий происходят лишь за счет диффузии в твердой фазе.

Исходные оксиды подвергают тщательному измельчению и перемешиванию в шаровых или вибрационных мельницах тонкого помола, а затем после брикетирования или гранулирования массы осуществляют предварительный обжиг с целью ферритизации продукта, т. е. образования феррита из оксидов. Ферритизованный продукт вновь измельчают, и полученный ферритовый порошок идет на формовку изделий. Предварительно его пластифицируют, причем в качестве пластификатора обычно используют водный раствор поливинилового спирта.

Формование изделий наиболее часто осуществляют методом пресования в стальных пресс-формах. Высокой производительностью формовки отличается также метод горячего литья под давлением. В этом случае в качестве пластифицирующего и связующего веществ применяют парафин.

Отформованные изделия подвергают спеканию при температуре 1100 – 1400°C в контролируемой газовой среде. Контроль состава газовой среды особенно необходим на стадии охлаждения для предотвращения выделения побочных фаз.

Ферриты являются твердыми и хрупкими материалами, не позволяющими производить обработку резанием и допускающими только шлифовку и полировку.

Магнитные свойства. Для ферритов, используемых в переменных полях, кроме начальной магнитной проницаемости одной из важнейших характеристик является тангенс угла потерь ($\text{tg}\delta$). Благодаря низкой проводимости составляющая потерь на вихревые токи в ферритах практически мала, и ею можно пренебречь. В слабых магнитных полях незначительны и потери на гистерезис. Поэтому значение $\text{tg}\delta$ в ферритах на высоких частотах в основном определяется магнитными потерями, обусловленными релаксационными и резонансными явлениями. Для оценки допустимого частотного диапазона, в котором может использоваться

данный материал, вводят понятие *критической частоты* $f_{кр}$. Обычно под $f_{кр}$ понимают такую частоту, при которой $\text{tg}\delta$ достигает значения 0,1.

Инерционность смещения доменных границ, проявляющихся на высоких частотах, приводит не только к росту магнитных потерь, но и к снижению магнитной проницаемости ферритов. Частоту $f_{зр}$ при которой начальная магнитная проницаемость уменьшается до 0,7 от ее значения в постоянном магнитном поле, называют *границной*. Как правило, $f_{кр} < f_{зр}$. Сравнение магнитных свойств ферритов с одинаковой начальной магнитной проницаемостью показывает, что в области частот до 1 МГц марганеццинковые ферриты имеют существенно меньший $\text{tg}\delta$, чем никель-цинковые ферриты. Дополнительным преимуществом высокопроницаемых марганеццинковых ферритов является повышенная индукция насыщения и более высокая температура Кюри. В то же время никель-цинковые ферриты обладают более высоким удельным сопротивлением и лучшими частотными свойствами.

Магнитные свойства ферритов зависят от механических напряжений, которые могут возникать при нанесении обмотки, креплении изделий и по другим причинам.

Электрические свойства. По электрическим свойствам ферриты относят к классу полупроводников или даже диэлектриков. Их электропроводность обусловлена процессами электронного обмена между ионами переменной валентности. Электроны, участвующие в обмене, рассматривают как носители заряда, концентрация которых практически не зависит от температуры. Вместе с тем, при повышении температуры экспоненциально увеличивается вероятность перехода электронов между ионами переменной валентности, т. е. возрастает подвижность носителей заряда.

Среди многих факторов, влияющих на электрическое сопротивление ферритов, основным является концентрация в них ионов двухвалентного железа. Под влиянием теплового движения слабосвязанные электроны перескакивают от ионов железа Fe^{2+} к ионам Fe^{3+} и понижают валентность последних. С увеличением концентрации двухвалентных ионов железа линейно возрастает проводимость материала и одновременно уменьшается энергия активации. Отсюда следует, что при сближении ионов переменной валентности понижается высота энергетических барьеров, которые должны преодолевать электроны при переходе от одного иона к соседнему. Наибольшей концентрацией ионов двухвалентного железа и, соответственно, наименьшим удельным сопротивлением обладает магнетит Fe_3O_4 (феррит железа), у которого $\rho = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом·м.

Для ферритов характерна относительно большая диэлектрическая проницаемость, зависящая от частоты и состава материала. С повышением частоты диэлектрическая проницаемость ферритов падает.

Применение ферритов. Магнитомягкие ферриты с начальной магнитной проницаемостью 400 – 20000 в слабых полях во многих случаях эффективно заменяют листовые ферромагнитные материалы – пермаллой и электротехническую сталь. В средних и сильных магнитных полях замена листовых ферромагнетиков ферритами нецелесообразна, поскольку у ферритов меньше индукция насыщения.

Магнитомягкие ферриты широко применяют в качестве сердечников контурных катушек постоянной и переменной индуктивностей, фильтров в аппаратуре радио- и проводной связи, сердечников импульсных и широкополосных трансформаторов, трансформаторов развертки телевизоров, магнитных модуляторов и усилителей. Из них изготавливают также стержневые магнитные антенны, индуктивные линии задержки и другие детали.

7.3.2. Магнитодиэлектрики

Магнитодиэлектрики получают путем прессования порошкообразного ферромагнетика с изолирующей органической или неорганической связкой. В качестве основы применяют карбонильное железо, альсифер и молибденовый пермаллой. Изолирующей связкой служат феноло-формальдегидные смолы, полистирол, стекло и др. Основа обладает высокими магнитными свойствами, а связка – способностью образовывать между зернами сплошную электроизоляционную пленку, которая должна быть одинаковой толщины и прочно связывать зерна между собой.

Магнитодиэлектрики характеризуются относительно невысокой магнитной проницаемостью (10 – 250), которая существенно меньше магнитной проницаемости монолитных ферромагнетиков. Это различие объясняется двумя основными причинами. Во-первых, из-за разобоченности ферромагнитных частиц на их концах при намагничивании образца возникают свободные полюсы, создающие внутреннее поле, направленное навстречу внешнему полю. Во-вторых, в пределах малой частицы энергетически невыгодно образование многодоменной структуры. Поэтому слабо выражен механизм намагничивания за счет смещения

доменных границ, определяющий значение магнитной проницаемости.

Прессованные сердечники применяют в индуктивных катушках фильтров, генераторов, частотомеров, контуров радиоприемников и т. д. Такие катушки имеют малый объем при высокой индуктивности и обладают большой добротностью. Введение сердечника в катушку увеличивает ее индуктивность, в связи с чем, добротность катушки повышается. Индуктивные катушки с сердечником из магнитодиэлектрика могут обладать переменной индуктивностью, обеспечивающей возможность настройки контуров посредством перемещения подвижных сердечников (подстроечников).

Сердечники из карбонильного железа отличаются высокой стабильностью, малыми потерями, положительным температурным коэффициентом магнитной проницаемости и могут быть использованы в широком диапазоне частот.

Альсифер, помимо хороших магнитных свойств, отличается невысокой стоимостью и недефицитностью сырья. Важная особенность альсифера заключается в том, что в зависимости от содержания кремния и алюминия его температурный коэффициент магнитной проницаемости может быть положительным, отрицательным или равным нулю.

Магнитодиэлектрики на основе молибденового пермаллоя имеют наибольшую начальную магнитную проницаемость; потери на гистерезис и вихревые токи для этих магнитодиэлектриков меньше, чем у альсиферных сердечников, а стабильность параметров выше.

7.4. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

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

Материалы с ППГ обеспечивают малое время перемагничивания, большую температурную стабильность магнитных характеристик, и, следовательно, высокую температуру Кюри.

Ферриты с ППГ более распространены, чем металлические тонкие ленты, поскольку технология изготовления таких сердечников наиболее проста и экономична. 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 специальной обработки материала, приводящей к образованию текстуры (например, механических воздействий или обработки в сильном магнитном поле).

Из ферритов с ППГ широкое применение нашли магниймарганцевые и литиевые сплавы. 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. Такими неоднородностями могут быть вакансии и связанные с ними комплексы, междоузельные атомы и др. Например, в магниймарганцевых ферритах спонтанная прямоугольность петли гистерезиса обусловлена тетрагональными искажениями кристаллической решетки за счет ионов магния, образующихся при синтезе.

7.4.2. Ферриты для устройств СВЧ.

Диапазон СВЧ соответствует длинам волн от 1 м до 1 мм. В аппаратуре и приборах, где используют электромагнитные волны этого диапазона, необходимо управлять колебаниями: переключать поток энергии с одного направления на другое, изменять фазу колебаний, поворачивать плоскость поляризации волны, частично или полностью поглощать мощность потока.

Поскольку электромагнитные волны могут распространяться в пространстве, заполненном диэлектриком, а от металлов они почти полностью отражаются, то металлические поверхности используют для направления волн, их концентрации или рассеяния. Электромагнитная энергия передается по волноводам, представляющим собой полые или частично заполненные твердыми материалами металлические трубы. В качестве твердых материалов для управления потоком энергии в волноводах используют ферриты СВЧ и некоторые немагнитные активные диэлектрики. Магнитными характеристиками первых можно управлять с

помощью внешнего магнитного поля, электрическими свойствами вторых – за счет внешнего электрического поля.

Практическое применение ферритов СВЧ основано на: а) магнитооптическом эффекте Фарадея; б) эффекте ферромагнитного резонанса; в) изменении внешним магнитным полем значения магнитной проницаемости феррита.

Магнитооптический эффект Фарадея заключается в повороте плоскости поляризации высокочастотных колебаний в намагниченном за счет внешнего поля феррите. При этом могут быть получены разные углы поворота плоскости поляризации, и, следовательно, и коммутирование энергии в разные каналы.

Ферромагнитный резонанс наблюдают при совпадении частоты внешнего возбуждающего поля с собственной частотой прецессии спинов электронов. Собственная частота прецессии зависит от магнитного состояния образца, а потому ее можно изменять с помощью постоянного подмагничивающего (управляющего) поля. При резонансе резко возрастает поглощение энергии электромагнитной волны, распространяющейся в волноводе в обратном направлении; для волны прямого направления поглощение значительно меньше. В результате получается высокочастотный вентиль. Рассмотренный эффект проявляется, если напряженности переменного возбуждающего и постоянного подмагничивающего полей взаимно перпендикулярны.

Если частоту внешнего поля поддерживать постоянной, а изменять напряженность подмагничивающего поля, то вентильные свойства феррита проявляются в узком интервале напряженностей постоянного поля, называемом *шириной линии ферромагнитного резонанса*. Чем меньше значение ширины линии ферромагнитного резонанса, тем сильнее поглощение электромагнитной энергии, что сказывается на характеристиках ряда СВЧ-устройств (антенные переключатели и циркуляторы, служащие для распределения энергии между отдельными волноводами; фазовращатели; фильтры; модуляторы, ограничителя мощности и др.).

Помимо достижения узкой линии резонанса к ферритам СВЧ предъявляют ряд требований: 1) высокая чувствительность материала к управляющему полю (возможность управления относительно слабым внешним полем); 2) высокое удельное объемное сопротивление ($10^6 - 10^8$ Ом·м) и малый тангенс угла диэлектрических потерь ($10^{-3} - 10^{-4}$), а также незначительные магнитные потери вне области резонанса, обеспечивающие малое затухание в феррите; 3) температурная стабильность свойств и высокое значение точки Кюри.

Большинство требований выполняется при использовании магниймарганцевых ферритов с большим содержанием оксида магния. Для некоторых целей применяют литийцинковые и никель-цинковые ферриты, и ферриты сложного состава (полиферриты).

Конфигурация и размеры ферритового изделия, с одной стороны, определяются принципом действия прибора, а с другой, зависят от свойств самого материала. В различных приборах СВЧ, применяемые ферритовые вкладыши имеют форму прямоугольной пластины, равностороннего треугольника, кольца, диска или сферы. Определенная геометрия вкладыша обеспечивает наилучшее согласование с волноводом, т. е. минимальное отражение электромагнитной волны от феррита. Для изготовления вкладышей используют как поликристаллические материалы, так и монокристаллы ферритов. Последние характеризуются более узкой шириной линии ферромагнитного резонанса.

Особое место среди материалов для СВЧ занимают феррогранаты иттрия с частичным замещением ионов иттрия и железа другими ионами. Они характеризуются низкими диэлектрическими и магнитными потерями, слабой анизотропией, наиболее узкой резонансной кривой.

7.4.3. Магнитострикционные материалы.

Магнитострикционными называют магнитные материалы, применение которых основано на явлении магнитострикции и магнитоупругом эффекте, т. е. изменении размеров тела в магнитном поле и изменении магнитных свойств материала под влиянием механических воздействий. Среди магнитострикционных материалов есть как чистые металлы, так и сплавы, и ферриты. Ферриты являются магнитострикционными материалами для высоких частот.

При эксплуатации магнитное состояние сердечника магнитострикционного преобразователя определяется одновременным воздействием переменного и постоянного подмагничивающего полей. Магнитострикционные колебания небольшой амплитуды в намагниченной среде по своему внешнему проявлению аналогичны пьезоэлектрическим. Поэтому их иногда называют *пьезомагнитными*.

Ранее широко применяемым магнитострикционным материалом являлся никель. Частично он сохраняет свое значение и в настоящее время, хотя вытесняется другими магнитострикционными материалами и пьезоэлектрической керамикой. Ценными свойствами никеля являются высокая стойкость к коррозии и малый

температурный коэффициент модуля упругости.

Сплав платины с железом обладает большой константой магнитоstriction, однако он дорогой и поэтому имеет весьма ограниченное применение. Недостатком железокобальтовых и железоалюминиевых сплавов являются низкая пластичность, затрудняющая механическую обработку, и низкая антикоррозионная устойчивость, препятствующая использованию таких преобразователей в водной среде.

Широкое применение находит ферритовая керамика. По сравнению с никелем и металлическими сплавами магнитоstrictionные ферриты имеют ряд преимуществ. Благодаря высокому удельному сопротивлению в них малы потери на вихревые токи, поэтому отпадает необходимость расслаивать материал на отдельные пластины. В отличие от металлических сплавов ферриты не подвержены действию химически агрессивных сред. С помощью керамической технологии можно изготовить преобразователи практически любых форм и размеров.

Из магнитоstrictionных материалов изготавливают сердечники электромеханических преобразователей (излучателей и приемников) для электроакустики и ультразвуковой техники, сердечники электромеханических и магнитоstrictionных фильтров и резонаторов, линий задержки. Их используют также в качестве чувствительных элементов магнитоупругих преобразователей, применяемых в устройствах автоматики и измерительной техники.

7.5. МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

По применению магнитотвердые материалы подразделяют на материалы для постоянных магнитов и материалы для записи и длительного хранения звука, изображения и т. п.

Магнитные цепи с постоянными магнитами должны быть разомкнутыми, т. е. иметь рабочий воздушный зазор. Магнитный поток в зазоре возникает после предварительного намагничивания материала в сильном магнитном поле. При наличии зазора за счет свободных полюсов создается внутреннее размагничивающее поле, которое уменьшает индукцию внутри магнита.

Для получения высокой коэрцитивной силы в магнитном материале необходимо затруднить процесс перемагничивания. Это можно осуществить двумя путями: либо воспрепятствовать смещению доменных границ, либо вообще исключить эти границы, уменьшая размер кристаллических зерен. Препятствиями к легкому смещению доменных границ под действием внешнего магнитного поля являются внутренние механические напряжения, посторонние включения или высокая магнитоstriction. Большая коэрцитивная сила возникает в материале, состоящем из однодоменных частиц, у которых велика энергия магнитной кристаллографической анизотропии или анизотропии формы.

7.5.1. Литые высококоэрцитивные сплавы.

К этой группе относят сплавы систем Fe – Ni – Al – Al и Fe – Ni – Co – Al. Высококоэрцитивное состояние этих сплавов обусловлено их *дисперсионным распадом* на две фазы при охлаждении до определенной температуры. В системе Fe – Ni – Al одна из фаз, образующихся в результате распада твердого раствора, по составу близка к чистому железу и является сильномагнитной; имеет форму пластинок или стержней однодоменной толщины. Другая фаза состоит из никеля и алюминия и оказывается слабомагнитной. Таким образом, получается композиция из немагнитной матрицы и однодоменных магнитных включений. Материалы, имеющие такую структуру, намагничиваются в основном за счет процессов вращения магнитных моментов доменов. В тройной системе Fe – Ni – Al наибольшей удельной магнитной энергией обладают сплавы, содержащие около 28% никеля и 14% алюминия (по массе), что приблизительно соответствует соединению Fe₂NiAl. Однако без легирующих элементов эти сплавы практически не применяют. Помимо кобальта распространенными легирующими добавками являются медь, титан и ниобий. Добавки не только улучшают магнитные свойства, но и обеспечивают лучшую повторяемость характеристик, т. е. ослабляют зависимость магнитных свойств от химического состава, наличия примесей и отклонений от заданного режима термообработки.

Магнитные свойства магнитотвердых материалов зависят от кристаллографической и магнитной текстур. *Магнитная текстура* высококоэрцитивных сплавов создается путем их охлаждения в сильном магнитном поле. При этом достигается упорядоченное расположение пластинчатых элементов сильномагнитной фазы, которые своими осями легкого намагничивания ориентируются в направлении поля. Такое магнитное текстурирование эффективно лишь для сплавов с высоким содержанием кобальта. Текстурированный материал магнитоанизотропен. Наилучшие свойства у него обнаруживаются в том направлении, в котором при охлаждении на него действовало магнитное поле.

Кристаллическую текстуру создают методом направленной кристаллизации сплава, залитого в форму, используя особые условия теплоотвода. Недостатком является трудность изготовления изделий точных размеров вследствие хрупкости и высокой твердости. Из всех видов механической обработки допускается только обработка шлифованием.

7.5.2. Магниты из порошков.

Невозможность получить мелкие изделия со строго выдержанными размерами из литых железоникельалюминиевых сплавов обусловила использование методов порошковой металлургии для производства постоянных магнитов. При этом различают *металлокерамические* магниты и магниты из зерен порошка, скрепленных связующим веществом (*металлопластические* магниты).

Металлокерамические магниты получают путем прессования порошка, состоящего из измельченных тонкодисперсных магнитотвердых сплавов, и дальнейшим спеканием при высоких температурах по аналогии с процессами обжига керамики. Мелкие детали при такой технологии получают достаточно точных размеров и не требуют дальнейшей обработки.

Процесс изготовления металлопластических магнитов аналогичен процессу прессования деталей из пластмасс, только в порошке содержится наполнитель в виде зерен измельченного магнитотвердого сплава. Из-за жесткого наполнителя необходимы высокие удельные давления на материал, достигающие до 500 МПа. Металлопорошковые магниты экономически выгодны при массовом автоматизированном производстве, сложной конфигурации и небольших размерах магнитов. Металлопластическая технология позволяет получать магниты с арматурой.

7.5.3. Магнитотвердые ферриты.

Из магнитотвердых ферритов наиболее известен бариевый феррит $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ферроксдюр). В отличие от магнитомягких ферритов он имеет не кубическую, а гексагональную кристаллическую решетку с одноосной анизотропией.

Высокая коэрцитивная сила у этих материалов обусловлена малым размером кристаллических зерен и сильной магнитной кристаллографической анизотропией. Технология производства магнитотвердых ферритов в общих чертах подобна технологии производства магнитомягких ферритов. Однако для получения мелкокристаллической структуры осуществляют очень тонкий помол (как правило, в водной среде), а спекание проводят при относительно невысоких температурах (во избежание процесса рекристаллизации).

Для придания анизотропии магнитных свойств материал текстурируют. *Текстура* создается путем формования массы сметанообразной консистенции в сильном магнитном поле (с напряженностью 650 – 800 кА/м). Отключение поля производится после полного удаления влаги из прессуемого порошка и достижения необходимого давления в пресс-форме.

Бариевые магниты изготавливают в виде шайб и тонких дисков: они отличаются высокой стабильностью по отношению к воздействию внешних магнитных полей и не боятся тряски и ударов.

К недостаткам бариевых магнитов следует отнести низкую механическую прочность, большую хрупкость, сильную зависимость магнитных свойств от температуры. Кроме того, имеется необратимое изменение магнитных свойств после охлаждения от комнатной до низких температур (-60°C) и нагревания до первоначальной температуры.

7.5.4. Сплавы на основе редкоземельных элементов.

Магнитотвердые материалы этой группы являются весьма перспективными, но еще недостаточно изученными и освоенными в технологическом отношении. Редкоземельные элементы, являющиеся металлами, образуют большое число бинарных соединений с металлами переходной группы. Эти соединения имеют гексагональную структуру, им присуща сильная магнитная кристаллографическая анизотропия и высокая температура Кюри, которая лишь на 200 – 400 $^\circ\text{C}$ ниже температуры Кюри чистого кобальта и мало зависит от вида редкоземельного элемента. Наиболее высокая намагниченность насыщения наблюдается у соединений кобальта с элементами первой половины ряда лантаноидов. При температуре ниже некоторого критического значения соединения метастабильны и распадаются на две фазы. Нарушения фазовой однородности являются одной из причин появления высокой коэрцитивной силы в материале.