## 6.5 Материалы для постоянных и низкочастотных магнитных полей

Условно магнитомягкими считают материалы, у которых коэрцитивная сила *Н*с << 800 А/м. Необходимо, однако, отметить, что у лучших магнитомягких материалов коэрцитивная сила может составлять менее 1 А/м. Основным компонентом большинства магнитных материалов является **железо**. Магнитные свойства различных видов чистого железа и железных сплавов приведены в таблице 6.1.

Среди элементарных ферромагнетиков железо обладает наибольшей индукцией насыщения (около 2,2 Тл). Магнитная проницаемость железа существенно зависит от содержания примесей и при очистке многократно возрастает с одновременным уменьшением коэрцитивной силы.

*Технически чистое*железо (армко-железо) изготавливают рафинированием (очисткой) чугуна в мартеновских печах или конвертерах, где примеси «выгорают» – окисляются и улетучиваются. Суммарное содержание примесей углерода, серы, марганца, кремния и других элементов в технически чистом железе не превышает 0,08–0,1 %. Вследствие низкого удельного сопротивления технически чистое железо используют в основном для изготовления магнитопроводов постоянного магнитного потока.

*Электролитическое железо*, содержащее менее 0,05 % примесей, получают путём электролиза раствора сернокислого или хлористого железа. При этом анод из технически чистого железа постепенно растворяется, а осаждённое на катоде железо (толщина слоя 4–6 мм) после тщательной промывки снимают, измельчают в порошок в шаровых мельницах и подвергают вакуумному отжигу или переплавляют в вакууме.

Особо чистое *карбонильное* железо получают посредством термического разложения пентакарбонила железа согласно уравнению

Fe(CO)5 = Fe + 5CO ↑.

Пентакарбонил железа представляет собой жидкость – продукт воздействия монооксида углерода на железо при температуре около 200 °С и давлении примерно 15 МПа.

Карбонильное железо имеет вид тонкого порошка, что удобно для изготовления прессованных магнитных сердечников. В карбонильном железе нет кремния, фосфора и серы, но есть углерод.

Свойства железа зависят не только от содержания примесей, но и от структуры материала, размера зёрен, наличия механических напряжений. Из таблицы 6.1 видно, что магнитные свойства даже очищенного железа далеки от свойств чистейшего монокристалла.

*Кремнистая электротехническая сталь* является основным магнитомягким материалом массового потребления. Введением в состав этой стали кремния, достигается повышение удельного сопротивления, что вызывает снижение потерь на вихревые токи. Легирование кремнием приводит также к увеличению значений начальной μн и максимальной μм магнитной проницаемости, уменьшению коэрцитивной силы *Н*с; снижению потерь на гистерезис, уменьшению магнитной анизотропии и магнитострикции. Кроме того, кремний способствует выделению углерода в виде графита и раскислению стали за счёт образования SiO2, который выделяется в виде шлака.

*Таблица 6.1 –* **Некоторые свойства магнитомягких материалов**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | Магнитная  проницаемость | | Коэрцитивная сила,  А/м | Индукция насыщения, Тл | Удельное сопротивление, нОм·м |
| началь-ная | макси-мальная |
| Технически чистое  железо | 250–400 | 3500–4500 | 50–100 | 2,18 | 100 |
| Электролитическое  железо | 600 | 15000 | 30 | 2,18 | 98 |
| Карбонильное  железо | 2–3  тыс. | > 20  тыс. | 6,4 | 2,18 | 98 |
| Монокристалл  чистейшего железа | > 20  тыс. | До 1,5  млн | 0,8 | – | 97 |
| Электротехническая сталь | 200–600 | 3–8  тыс. | 10–65 | 1,95–  2,02 | 200–  600 |
| Низконикелевый  пермаллой | 1,5–4  тыс. | 15–60  тыс. | 5–32 | 1,0–  1,6 | 450–  900 |
| Высоконикелевый  пермаллой | 7–100  тыс. | 50–300  тыс. | 0,65–5 | 0,65–  1,05 | 160–  850 |
| Супермаллой, 79 % Ni; 5 % Mo; 15 % Fe; 0,5 % Mn | 100  тыс. | До 1,5  млн | 0,3 | 0,8 | 600 |
| Альсифер 5,6 % Al;  9,5 % Si остальное Fe | До 35  тыс. | 117  тыс. | 1,8 | – | 800 |

Свойства электротехнической стали значительно улучшаются при текстурировании – холодной прокатке с последующим отжигом. При прокатке рёбра кубических кристаллов железа ориентируются преимущественно вдоль направления движения ленты. Отжиг в водороде при температуре 900–1000 °С снимает внутренние механические напряжения, а также вызывает рекристаллизацию (укрупнение зёрен). Вдоль направления прокатки магнитная проницаемость существенно больше, а потери на гистерезис меньше. Эффективное использование текстурованных сталей возможно лишь при такой конструкции магнитопровода, когда магнитный поток целиком проходит вдоль направления лёгкого намагничивания. Легче всего это условие выполняется при использовании ленточных сердечников. Применение ленточных сердечников из текстурованной стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и габаритные размеры на 20–25 %, а в радиотрансформаторах – на 40 %.

Электротехническая сталь выпускается в виде рулонов, листов и ленты толщиной 0,05…1 мм с изоляционным покрытием или без него. С уменьшением толщины листов уменьшаются потери на вихревые токи. Однако в очень тонких листах наблюдается резкое увеличение коэрцитивной силы и потерь на гистерезис.

Тонколистовую электротехническую сталь маркируют 4 цифрами:

– первая (по виду прокатки): 1 – горячекатанная изотропная; 2 – холоднокатанная изотропная; 3 – холоднокатанная анизотропная;

– вторая (по содержанию кремния) – от 0 до 5 % (таблица 6.2);

– третья (по основной нормируемой характеристике) – от 0 до 7;

– четвёртая – порядковый номер стали.

*Таблица 6.2* – **Удельное сопротивление электротехнической ст**а**ли**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вторая цифра марки стали | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Содержание кремния, % | До 0,4 | От 0,4 до 0,8 | От 0,8 до 1,8 | От 1,8 до 2,8 | От 2,8 до 3,8 | От 3,8 до 4,8 |
| Удельное сопротивление, нОм·м | 140 | 170 | 250 | 400 | 500 | 600 |

Из электротехнической стали разных марок изготавливают магнитные сердечники трансформаторов, измерительных приборов, электрических машин и т. п. Листы тонкого проката предназначены для использования в полях повышенной частоты (до 1 кГц).

*Пермаллои* — железоникелевые сплавы, обладающие весьма большой магнитной проницаемостью в области слабых полей и очень маленькой коэрцитивной силой. Пермаллои подразделяют на: высоко- и низконикелевые. Высоконикелевые пермаллои содержат от 72 до 80 % никеля, а низконикелевые – от 40 до 50 %. Высоконикелевые пермаллои дороже низконикелевых, у них меньшие значения удельного сопротивления и индукции насыщения, однако магнитная проницаемость значительно выше, чем у низконикелевых.

Наибольшая начальная и максимальная магнитные проницаемости получаются у сплава, содержащего 78,5 % Ni. Очень лёгкое намагничивание этого сплава в слабых полях вызвано практическим отсутствием у него анизотропии и магнитострикции. Для улучшения магнитных свойств сердечники из высоконикелевого пермаллоя отжигают с последующим медленным остыванием. При ударах и других механических воздействиях свойства сердечников ухудшаются. С целью механической защиты кольцеобразные ленточные сердечники из отожжённого высоконикелевого пермаллоя помещают в немагнитные защитные каркасы из пластмассы или алюминия.

Для придания пермаллоям необходимых свойств в их состав вводят ряд добавок – молибден, хром, медь, кремний, марганец.

Молибден и хром повышают магнитную проницаемость и удельное сопротивление пермаллоев, уменьшают чувствительность к механическим деформациям. Однако одновременно с этим снижается индукция насыщения. Медь увеличивает постоянство μ при изменении напряжённости магнитного поля, повышает температурную стабильность и удельное сопротивление, а также улучшает способность к механической обработке. Кремний и марганец увеличивают удельное сопротивление.

Пермаллои применяют для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, трансформаторов звуковых и высоких частот, импульсных трансформаторов, дросселей, реле, магнитных усилителей и бесконтактных магнитных реле, а также для магнитных экранов.

Диапазон параметров промышленных марок пермаллоев указан в таблице 6.1. Особо интересен сплав супермаллой с уникально высокой магнитной проницаемостью.

*Альсиферы* – тройные сплавы железа с кремнием и алюминием. Оптимальный состав альсифера: 9,5 % Si, 5,6 % Аl, остальное – Fe.

По значениям основных параметров μн = 35400; μм = 117000; *H*с = =1,8 А/м; ρ = 0,8 мкОм·м) альсиферы близки к высоконикелевым пермаллоям. 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. Сплав дешёвый, однако хрупкий, из-за чего изделия из альсифера – магнитные экраны, корпуса приборов и т. п. – изготавливают методом литья с толщиной стенок не менее 2–3 мм.

Благодаря хрупкости альсифер можно размалывать в порошок и использовать в составе высокочастотных сердечников.

## 6.6 Высокочастотные магнитомягкие материалы

Под высокочастотными понимают магнитомягкие материалы, которые можно использовать при частотах свыше килогерца.

По диапазону применения различают материалы для звуковых и ультразвуковых частот, низких и высоких радиочастот и для СВЧ.

По физической природе и строению высокочастотные магнитомягкие материалы подразделяют на магнитодиэлектрики и ферриты.

Кроме них при звуковых, ультразвуковых и низких радиочастотах можно использовать тонколистовые рулонные холоднокатаные электротехнические стали толщиной 25–30 мкм и пермаллои толщиной до 2–3 мкм, однако они имеют несколько повышенную коэрцитивную силу и высокую стоимость, а технология сборки магнитных цепей из них весьма сложна.

*Магнитодиэлектрики* получают путём прессования порошка карбонильного железа, альсифера или молибденового пермаллоя со связкой, образующей между зёрнами сплошную электроизоляционную плёнку. В качестве связки применяют формальдегидные смолы, полистирол, стекло и другие диэлектрики. Магнитодиэлектрики отличаются стабильностью магнитной проницаемости во времени и при колебаниях температуры, малыми потерями на гистерезис и вихревые токи, а также имеют линейную зависимость индукции от напряжённости, однако значение их магнитной проницаемости невелико (10–250).

Из магнитодиэлектриков изготавливают сердечники для индуктивных катушек фильтров, генераторов, контуров радиоприёмников и трансформаторов звуковых и ультразвуковых частот. Сердечники на основе карбонильного железа отличаются достаточно высокой стабильностью, малыми потерями на гистерезис и вихревые токи, и используются в широком диапазоне частот. Альсиферовые магнитодиэлектрики самые дешёвые. Магнитодиэлектрики из молибденового пермаллоя имеют наибольшую магнитную проницаемость и наименьшие потери на гистерезис и вихревые токи.

Высокая стабильность магнитных свойств и линейность характеристики намагничивания являются преимуществами магнитодиэлектриков перед другими магнитомягкими материалами.

*Ферриты* представляют собой соединения оксида железа Fe2O3 с оксидами переходных металлов (магнитных и немагнитных) в виде керамики и монокристаллов. По типу кристаллической решётки различают феррошпинели, феррогранаты, гексаферриты и ортоферриты. Магнитные свойства ферритов обусловлены нескомпенсированным антиферромагнетизмом элементов, составляющих решётку. Их широко применяют в радиоэлектронных изделиях благодаря большому (до 107 Ом·м) удельному сопротивлению. Для ферритов характерна относительно большая диэлектрическая проницаемость ε, зависящая от состава (у марганец-цинковых ферритов значение ε может достигать 1000). С повышением частоты диэлектрическая проницаемость всех марок ферритов уменьшается.

При изготовлении *ферритовой керамики* исходную смесь оксидов подвергают тщательному измельчению и перемешиванию в шаровых или вибрационных мельницах тонкого помола. Из полученной массы прессуют брикеты или гранулы, которые затем обжигают с целью ферритизации – образования кристаллитов. Ферритизованный продукт вновь измельчают. Полученный таким образом ферритовый порошок пластифицируют поливиниловым спиртом или парафином и формуют из него изделия методом прессования в стальных прессформах. Отформованные изделия спекают при температуре 1100–1400 °С. В процессе спекания завершаются химические реакции образования кристаллитов, происходит их укрупнение, устраняется пористость, фиксируется форма изделий. Стоимость ферритовой керамики невелика.

*Монокристаллы ферритов* выращивают газоплазменным методом Вернейля.

*Монокристаллы феррогранатов* обычно получают кристаллизацией из раствора-расплава с применением оксифторида свинца РbО+PbF2 в качестве растворителя.

Ферриты являются твёрдыми и хрупкими материалами, допускающими только шлифовку и полировку абразивными инструментами из порошка карбида кремния или синтетических алмазов.

*Магнитомягкими ферритами* являются марганец-цинковые, никель-цинковые, литий-цинковые, магниевые и некоторые другие ферриты, а также иттриевые ферриты – феррогранаты. Маркировка магнитомягких ферритов содержит численное значение начальной магнитной проницаемости μн, затем буквы НМ (низкая частота, марганец-цинковый), НН (низкая частота, никель-цинковый), либо буквы ВЧ (высокая частота) с цифрой, если это феррит СВЧ. Область применения различных марок ферритов зависит от магнитной проницаемости и рабочей частоты. Марганец-цинковые ферриты имеют наибольшие значения магнитной проницаемости (начальной μн – до 15 тысяч, максимальной μм – до 35 тысяч), а также индукции насыщения и температуры Кюри, но значения удельного сопротивления и рабочих частот невелики. Никель-цинковые ферриты отличаются более высоким удельным сопротивлением и лучшими частотными свойствами, но их магнитная проницаемость меньше (для марок НН μн достигает 800, μм – до 1500; для марок ВЧ μн – до 220, μм – до 360). У сверхвысокочастотных ферритов магнитная проницаемость ещё меньше.

*Применение ферритов.* Магнитомягкие ферриты широко применяются в качестве сердечников контурных катушек постоянной и переменной индуктивности; 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 и узлы электронной аппаратуры. Частотный диапазон применения различных марок ферритов определяется значениями критической *f*кр и граничной *f*гp частот.

На частотах до 106 Гц применяют марганец-цинковые ферриты (НМ), а на частотах от 105 до 108 Гц – никель-цинковые (НН и ВЧ). На сверхвысоких частотах применяют магний-марганцевые ферриты с большим содержанием оксида магния, литий-цинковые ферриты и ферриты сложного состава (полиферриты), а в инфракрасном диапазоне – феррогранаты иттрия (Y3Fe5O12) с частичным замещением ионов иттрия и железа ионами лантанидов и других металлов.

Марганец-цинковые ферриты с начальной магнитной проницаемостью 5000–15000 в слабых полях во многих случаях эффективно заменяют листовые ферромагнитные материалы – пермаллои и электротехническую сталь. В средних и сильных магнитных полях замена листовых ферромагнетиков ферритами нецелесообразна, поскольку у ферритов меньше индукция насыщения.

Монокристаллы магнитомягких ферритов нашли широкое применение при изготовлении магнитных головок для записи, воспроизведения и стирания аудио- и видеосигналов в магнитофонах. По сравнению с металлическими, ферритовые головки обладают большим удельным сопротивлением (что важно для уменьшения потерь) и большей твёрдостью.

## 6.7 Магнитные материалы с прямоугольной петлёй гистерезиса и магнитострикционные

Магнитные материалыс прямоугольной петлёй гистерезиса **(**ППГ) широко применяются в устройствах автоматики, вычислительной техники и связи. Прямоугольной петлёй гистерезиса обладают магний-марганцевые и литиевые ферриты со структурой шпинели, а также пермаллои с добавками марганца, содержащие в обозначении марки букву П. Сердечники импульсных трансформаторов с ППГ позволяют сформировать импульс тока из синусоидально изменяющегося напряжения или импульс напряжения из синусоидально изменяющегося тока. В случае передачи импульса через такой трансформатор прямоугольная петля гистерезиса сердечника способствует увеличению крутизны его фронтов. Сердечники из материала с ППГ имеют два устойчивых магнитных состояния, соответствующих различным направлениям остаточной магнитной индукции. Именно благодаря этой особенности их использовали в качестве элементов для хранения и переработки двоичной информации.

Основным параметром материала с ППГ является коэффициент прямоугольности петли *К*пу, представляющий собой отношение остаточной индукции *Вr* к максимальной *Вm*, измеренной при *H* = 5*Hc*. Желательно, чтобы *К*пу был возможно ближе к единице. Для обеспечения быстрого перемагничивания сердечников они должны также иметь небольшой коэффициент переключения *Sq*, 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 и возможно большую температурную стабильность магнитных характеристик.

*Ферриты с ППГ* в практике распространены шире, чем тонкие металлические ленты. Это объясняется тем, что технология изготовления ферритовых сердечников наиболее проста и экономична. Ферриты, предназначенные для коммутационных и логических элементов, имеют малое значение коэрцитивной силы (10–20 А/м), а используемые для хранения дискретной информации – повышенное (100–300 А/м). Прямоугольность петли гистерезиса феррита достигается путём выбора химического состава и условий спекания. При использовании ферритов следует учитывать изменение их свойств от температуры. При возрастании температуры от минус 20 до плюс 60 °С коэрцитивная сила у ферритов различных марок уменьшается в 1,5–2 раза, остаточная индукция – на 15–30 %, коэффициент прямоугольности – на 5–35 %. В микроминиатюрных электронных приборах используют плёнки из ферритов с ППГ, наносимые на подложки методом напыления в вакууме.

Ленточные микронные сердечники из **пермаллоев с ППГ** имеют лучшие магнитные свойства и более высокую температурную стабильность по сравнению с ферритовыми. В интервале температур от минус 20 до плюс 60 °С их свойства практически не изменяются. Однако технология изготовления сердечников из ленты (прокатка до микронной толщины и термообработка, требующая вакуума или атмосферы инертного газа) значительно сложнее, чем спекание их из ферритов.

*Магнитострикционные материалы.* Магнитострикционными называют магнитные материалы, применение которых основано на явлении магнитострикции и магнитоупругом эффекте, т. е. изменении размеров тела в магнитном поле и магнитных свойств материала под влиянием механических воздействий.

В качестве магнитострикционных материалов применяют чистые металлы, сплавы и различные ферриты. До начала 1960-х годов наиболее широко применяемым материалом для ультразвуковых излучателей являлся никель (константа магнитострикции около –3·10–5); частично он сохраняет свое значение и в настоящее время, хотя постепенно вытесняется другими магнитострикционными материалами, а также пьезоэлектрической керамикой.

Ценными свойствами никеля являются высокая стойкость к коррозии и малый температурный коэффициент модуля упругости.

Большой константой магнитострикции (более 10–4) обладает сплав платины с железом, однако он очень дорогой. У железокобальтовых (50 % Fe*,* 50 % Co) и железоалюминиевых (13 % Al, 87 % Fe , альфер) сплавов значения константы магнитострикции меньше (соответственно, 7·10–5 и 4·10–5). Их недостатками являются хрупкость, затрудняющая механическую обработку, а также низкая антикоррозионная устойчивость, препятствующая использованию таких преобразователей в водной среде. Ферриты кобальта CoO·Fe2O3, железаFeO·Fe2O3 и никеля NiO·Fe2O3имеют следующие значения констант магнитострикции: –2·10–4, 4·10–5 и –2·10–5. Они очень устойчивы к коррозии, а благодаря высокому удельному сопротивлению являются высокочастотными материалами; их используют в виде монокристаллов либо в виде керамики. Наиболее широкое применение нашла магнитострикционная керамика на основе феррита никеля.

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

## 6.8 Материалы для постоянных магнитов

Постоянные магниты изготавливают из магнитотвёрдых материалов с широкой петлёй гистерезиса. Условно считают магнитотвёрдыми материалы с коэрцитивной силой *Н*с > 4 кА/м, однако, у лучших магнитотвёрдых материалов её значение достигает тысяч килоампер на метр. Свойства магнитотвёрдых материалов характеризуются кривой размагничивания, которая представляет собой «спинку» предельной петли гистерезиса – участок кривой между точками, соответствующими значениям остаточной индукции *B*r и коэрцитивной силы *H*с (см. рисунок 6.5). Наилучшее использование магнита получается в той точке, для которой произведение индукции *B* на напряжённость *H* магнитного поля максимально. Разделив произведение *BHmax* на два, получим максимальное значение энергии, которую можетзапасти единица объёма намагниченного материала

*Wmax = BHmax**/*2.

Максимальное значение удельной запасаемой энергии *Wmax* выражается в килоджоулях на кубический метр и является наиболее важной характеристикой качества материалов, используемых для изготовления постоянных магнитов. Часто в справочниках указывается не *Wmax*, а максимальное произведение *BHmax* , кДж/м3.

Для первых постоянных магнитов использовали стали, закаливаемые на мартенсит (углеродистые, легированные Сr, W, Со). Они обладают малыми *Hс*(4–12 кА/м) и *Wmax* (0,6–1,4 кДж/м3).

*Литые магниты* из высококоэрцитивных сплавов Fe-Ni-Аl (альни) и Fe-Ni-Co-Al (альнико) имеют хорошие магнитные свойства и недороги. В тройной системе Fe+Ni+Al наибольшей удельной магнитной энергией обладает сплав, содержащий около 28 % Ni и 14 % Al (по массе), что соответствует интерметаллическому соединению Fe2NiAl. Для улучшения в него добавляют кобальт, медь, титан и ниобий, а также подвергают текстурированию. Кристаллографическое текстурирование заключается в создании столбчатой макроструктуры путём направленной кристаллизации сплава за счёт особых условий теплоотвода. Магнитная текстура создается за счёт кристаллизации в сильном магнитном поле, при этом оси лёгкого намагничивания кристаллов ориентируются в направлении поля. Магнитное текстурирование эффективно лишь для сплавов с высоким содержанием кобальта. Сочетание кристаллографической и магнитной текстур в литых магнитотвёрдых магнитах Fe+Ni+Co+Al позволяет поднять значение запасаемой энергии до 42 кДж/м3, коэрцитивной силы до 145 кА/м, а остаточной индукции до 1,4 Тл. Недостатком литых магнитов из высококоэрцитивных сплавов типа Fe+Ni+Al и Fe+Ni+Co+Al является трудность изготовления изделий точных размеров. Вследствие хрупкости и высокой твёрдости; из всех видов механической обработки они допускают обработку только путём шлифования.

Рабочая температура литых магнитов – до 550 °С.

*Ферритовые магниты.* Для постоянных магнитов используют бариевые и стронциевые ферриты с гексагональной кристаллической решеткой и кобальтовый феррит со структурой шпинели. Они характеризуются сравнительно низкими значениями *Вr* (0,19–0,42 Тл), весьма высокими *Hc* (130–350 кА/м) и *Wmax* (3–18 кДж/м3) и высоким удельным электрическим сопротивлением, что позволяет применять их при высоких частотах переменного поля. Основные недостатки ферритовых магнитов – высокая твердость, хрупкость и ограниченный температурный диапазон использования.

Наибольшее применение нашёл бариевый феррит BaO·6Fe2O3 (ферроксдюр).

Пpомышленность выпускает два вида бариевых магнитов: марок БИ (бариевые изотропные) и марок БА (бариевые анизотропные). Технология производства магнитотвёрдых ферритов в общих чертах подобна технологии производства магнитомягких ферритов. Однако, чтобы получить мелкокристаллическую структуру, помол выполняют очень тонко (как правило, в водной среде), а спекают при относительно невысоких температурах (во избежание процесса рекристаллизации). Для изготовления анизотропных магнитов порошок бариевого феррита текстурируют. При этом изделие формуется из массы сметанообразной консистенции в сильном магнитном поле (с напряжённостью 650–800 кА/м). Отключение поля производится только после полного удаления из прессуемого порошка влаги и достижения необходимого давления в пресс-форме.

Магниты из феррита бария имеют коэрцитивную силу, достигающую 240 кА/м, что выше, чем у литых магнитов (145 кА/м), однако по остаточной индукции (0,38 Тл) и запасённой магнитной энергии (12,4 кДж/м3) они уступают высококоэрцитивным сплавам (1,4 Тл и 40 кДж/м3). Бариевые магниты удобно изготавливать в виде шайб и тонких дисков, они отличаются высокой стабильностью по отношению к воздействию внешних магнитных полей и не боятся тряски и ударов. Плотность бариевого феррита 4,4–4,9 Мг/м3, что примерно в 1,5–1,8 раза меньше, чем плотность у литых сплавов (~7,3–7,8 Мг/м3); магниты получаются лёгкими. Удельное сопротивление бариевого феррита 104–107 Ом·м, его можно использовать при высоких частотах. По стоимости бариевые магниты дешевле литых почти в 10 раз. K недостаткам бариевых магнитов следует отнести низкую механическую прочность, большую хрупкость, сильную зависимость магнитных свойств от температуры. Кроме того, они обнаруживают необратимое изменение магнитных свойств после охлаждения до низких температур (–60 °С).

Кобальтовые магниты характеризуются большей температурной стабильностью по сравнению с бариевыми, однако стоят дороже.

Лучшими характеристиками обладают стронциевые магниты – запасённая энергия до 21 кДж/м3, остаточная индукция – до 0,45 Тл, коэрцитивная сила – до 400 кА/м.

*Металлокерамические магниты* получают путём прессования порошка, состоящего из измельчённых тонкодисперсных магнитотвёрдых сплавов, и дальнейшим спеканием при высоких температурах в присутствии жидкой фазы по аналогии с процессами обжига керамики. Для этих целей широко применяются интерметаллические соединения металлов группы железа с редкоземельными металлами. Распространены бинарные сплавы "редкая земля – кобальт", например SmCo5 и квазибинарные соединения "2–17" типа R2(CoFe)17, где R означает РЗМ. На основе таких сплавов разработаны самариевые и ниобиевы**е** магниты с высокими значениями *Hс* (640–1300 кА/м) и *Wmax* (55–80 кДж/м3) при достаточно высоких *Вr* (0,77–1,0 Тл) и удовлетворительных характеристиках температурной стабильности. Магниты на основе SmCo5 спекают при температуре порядка 1100 °С; жидкая фаза образуется за счёт сплава Sm+Co, добавляемого в определенных пропорциях в состав порошковой смеси. Мелкие детали при такой технологии получаются достаточно точных размеров и не требуют дальнейшей обработки. Недостатки этих материалов – высокая твёрдость, хрупкость, дороговизна. Применяют их в основном там, где важно снижение массы и габаритных размеров магнитов.

Наилучшими магнитными свойствами обладают составы типа "редкая земля – железо – бор", например Nd2Fe14B, (YEr)2Fe14B. Такие магнитные материалы не только обладают высокими значениями максимальной запасаемой энергии, но и значительно дешевле, чем SmCo5. Спеченные магниты из сплавов неодим – железо – бор имеют *W*max от 85 до 180 кДж/м3, *Вr* от 1 до 1,4 Тл, *Hс* от 880 до 2700 кA/м и верхний предел рабочей температуры от 80 до 240 °С.

**Металлоплаcтические магниты** прессуют из порошка в виде зёрен измельчённого магнитотвёрдого сплава, перемешанного со связующим веществом (магнитопласты). Если связующим является каучук, такие материалы называют магнитоэластами. Из-за жёсткого наполнителя при прессовке необходимы высокие давления, доходящие до 500 МПа. Магнитные свойства металлопластических магнитов довольно низкие. По сравнению с литыми и магнитокерамическими магнитами коэрцитивная сила ниже на 10–15 %, остаточная индукция – на 35–50 %, а значение запасаемой энергии – на 40–60 %, что объясняется большим содержанием (до 30 %) немагнитного связующего вещества. Их рабочая температура не превышает 150 °С.

Порошковые магниты экономически выгодны при массовом автоматизированном производстве, сложной конфигурации и небольших размерах магнитов. Металлопластическая технология позволяет изготавливать магниты с арматурой.

Магнитотвёрдыми являются сплавы Fe+Ni+Сu (кунифе), Co+Ni+Cu (кунико), Fe+Co+V (викаллой), Fe+Cr+Co, а также сплавы Co с благородными металлами (например Pt, Ir, Pd). Они отличаются пластичностью, из них можно прокатать тонкую ленту и вытянуть тонкую проволоку, что использовалось при первых способах магнитной записи информации. Из-за высокой стоимости их применяют только для изготовления сверхминиатюрных магнитов и тонких плёнок магнитных лент и дисков (подразд. 6.9).

Для наномагнитов разработаны композиты SmCo5+Fe, представляют важный класс материалов для постоянных магнитов высокой мощности. SmCo5 обеспечивает высокие коэрцитивную силу и температуру Кюри, а железо – большую намагниченность. Чтобы достичь высокой коэрцитивной силы в изотропных двухфазных системах размер магнитомягких зёрен железа Fe должен быть порядка 10 нм.

## 6.9 Магнитные плёнки для записи информации

Магнитные плёнки на лентах и дисках, используемых для записи звуковой, видео- и компьютерной информации, относятся к числу магнитотвёрдых материалов. Сохранению записанной информации способствует выпуклая, близкая к прямоугольной, форма кривой размагничивания. Доменные структуры в тонких магнитных плёнках имеют особенности. Если направление лёгкого намагничивания расположено в плоскости плёнки, в ней образуются плоские домены. Для очень тонких плёнок характерна однодоменная структура, для плёнок толщиной свыше 10–3–10–2 мм (у различных веществ) – многодоменная, состоящая из длинных узких доменов (шириной от долей микрометров до нескольких микрометров), намагниченных в противоположных направлениях. Под воздействием внешнего поля вся система полос может перемещаться и поворачиваться, и её используют как управляемую дифракционную решётку для света и ближайшего диапазона электромагнитных волн.

Особый интерес представляют плёнки материалов, кристаллы которых имеют лишь одну ось лёгкого намагничивания. Если эти оси перпендикулярны плоскости плёнки, то, в отсутствие внешнего поля, в ней возникает лабиринтная доменная структура. Внешнее поле, направленное поперёк плёнки легко изменяет форму и размер доменов. По мере увеличения напряжённости поля происходит разрыв лабиринтной структуры и образуются устойчивые цилиндрические магнитные домены (ЦМД), или «магнитные пузырьки». Впервые ЦМД были обнаружены в ортоферритах*,* обладающих орторомбической структурой и имеющих химический состав RFeO3, где R – трёхвалентный ион иттрия или другого редкоземельного элемента. В дальнейшем устойчивые цилиндрические магнитные домены были получены в ферритах со структурой граната, гексаферритах и некоторых металлических магнитных плёнках. Линейные размеры ЦМД в ортоферритах составляют десятки микрон, в плёнках феррогранатов – единицы микрон, в металлических плёнках – доли микрона.

*Магнитные ленты* изготавливают нанесением магнитного лака на тонкую плёнку полимера. Подавляющее большинстве магнитных лент изготавливают на основе полиэтилентерефталата (лавсана), обладающего высокой механической прочностью. Магнитный лак состоит из магнитного порошка, связующего вещества, летучего растворителя и различных добавок, способствующих смачиванию и разделению частиц порошка и уменьшению абразивности рабочего слоя. Содержание магнитного порошка в жидком лаке составляет около 30–40 % (по объёму).Частицы магнитного порошка имеют сильно вытянутую форму, средняя длина около 1 мкм при диаметре порядка 0,1 мкм. Для ориентации этих частиц вдоль направления, в котором они будут намагничиваться при записи, сразу после нанесения магнитного лака ленту помещают в сильное магнитное поле. Высушенную широкую пленку разрезают специальными дисковыми ножницами на ленты нужной ширины. Для устранения неровностей на поверхности рабочего слоя ленту подвергают каландрированию, т. е. пропускают её между нагретыми полированными металлическими вальцами – каландрами.

В качестве магнитного компонента наиболее часто используют порошок гамма-оксида железа γ-Fе2О3 (гематита) коричневого цвета с мелкими однодоменными частицами. Его получают окислением магнетита Fe3O4 при нагревании на воздухе до температуры около 250 °С. Добавка магнетита Fe3О4 к порошку γ-Fе2О3 позволяет получить материал с повышенной коэрцитивной силой (20–50 кА/м).

Качественный скачок в технике магнитной записи произошел в результате использования магнитных плёнок на основе диоксида хрома СrО2 (чёрного цвета). Это соединение также обладает свойствами ферримагнетика и позволяет получать магнитоактивные слои с более высокой, чем у γ-Fe2O3, коэрцитивной силой и повышенной чувствительностью к высоким частотам. Преимуществом лент из диоксида хрома является также малая электризуемость рабочего слоя.

Плёнка с двойным магнитным слоем, состоящим из чередующихся окислов γ-Fe2O3 и СrО2, сочетает высокочастотные свойства, присущие диоксиду хрома, с хорошим воспроизведением низкочастотного спектра, что свойственно лучшим плёнкам с γ-Fe2O3. Благодаря малой общей толщине рабочего слоя и полимерной подложке такие ленты удобны для применения в диктофонах и микрокассетных магнитофонах и дискетах. Ещё лучше магнитные плёнки с покрытием из феррит-гранатов R3Fe5O12 и ортоферритов RFeO3.

Наилучшими магнитными свойствами, необходимыми для записи и воспроизведения информации, обладают плёнки из мельчайших частиц химически чистого кобальта или ферромагнитных сплавов, однако они значительно дороже, чем феррооксидные материалы. Нанесение металлического слоя на лавсановую или иную подложку осуществляется методами химического восстановления, электроосаждения или испарением-конденсацией в вакууме. Кроме кобальта и пластичных магнитотвёрдых сплавов, перечисленных в подразд. 6.8, наиболее перспективным считается сплав железа с платиной.

В настоящее время считывание информации с магнитной пленки происходит за счёт эффекта GMR (гигантского магнитного сопротивления, Нобелевская премия 2007 г.). Материал считывающей головки – чередующиеся слои железа и хрома нанометровой толщины (до 50 слоёв). Перспективным направлением улучшения считывающих головок является применение магнитоэлектриков**,** у которых под действием магнитного поля происходит изменение электрической поляризации и возникает ЭДС. Гигантский магнитоэлектрический эффект открыт в тонких плёнках феррита висмута BiFeO3, называемого также BFO.

Исследуются перспективы записи информации на магнитные плёнки путём воздействия электрического поля. Здесь перспективны композиции феррита висмута BiFeO3 и ферромагнитного сплава Co0,9Fe0,1.

**Контрольные вопросы**

1 Что такое магнитная проницаемость?

2 Как классифицируют вещества по магнитным свойствам?

3 Какова роль доменов в процессе намагничивания материалов?

4 В чём разница между начальной и основной кривыми намагничивания?

5 В чём разница между статической и динамической магнитными проницаемостями?

6 Для чего магнитопроводы изготавливают из отдельных пластин?

7 Что такое магнитострикция? Назовите магнитострикционные материалы.

8 В чём особенности намагничивания ферритов?

9 Какие магнитные материалы применяют в постоянных и низкочастотных полях?

10 Назовите и охарактеризуйте высокочастотные магнитные материалы.

11 Для чего применяют материалы с ППГ?

12 Из чего изготавливают постоянные магниты?

13 Какие магнитные материалы используют для записи информации?