

Вопрос 34 Классификация веществ по магнитным свойствам.

По реакции на внешнее магнитное поле и характеру внутреннего магнитного упорядочения все вещества в природе можно подразделить на пять групп: *диамагнетики*, *парамагнетики*, *ферромагнетики*, *антиферромагнетики* и *ферримагнетики*.

К **диамагнетикам** относят вещества, ослабляющие магнитное поле, у которых магнитная восприимчивость отрицательна, а магнитная проницаемость μ меньше 1. Диамагнитный эффект обусловлен небольшим уменьшением скорости вращения электронов при внесении атома в магнитное поле. Это уменьшение оказывает размагничивающее действие и проявляется во всех веществах, однако в большинстве случаев диамагнитный эффект маскируется другими более сильными магнитными эффектами.

Диамагнетиками являются инертные газы, водород, азот, многие жидкости (вода, нефть и нефтепродукты), большинство полупроводников (кремний, германий, соединения III и V, II и VI главных подгрупп таблицы Менделеева) и органических соединений, щелочно-галогидные кристаллы, неорганические стекла, а также ряд металлов (медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и др.). Магнитная проницаемость μ этих веществ незначительно (на 10^{-6} – 10^{-7}) меньше единицы и почти не зависит от температуры.

Ослабляя магнитное поле, диамагнетики выталкиваются из него. Вещества в сверхпроводящем состоянии совсем не пускают внутрь себя магнитное поле ($\mu = 0$) и являются идеальными диамагнетиками.

К **парамагнетикам** относят вещества с малой положительной магнитной восприимчивостью, слегка усиливающие магнитное поле (μ немного большей 1). Атомы парамагнетиков обладают небольшими собственными магнитными моментами. В отсутствие внешнего поля, из-за теплового движения, эти магнитные моменты распределены хаотично, так что в целом намагниченность вещества равна нулю. Под действием внешнего поля магнитные моменты атомов, поворачиваясь в том же направлении, усиливают его на доли процента. Тепловое движение противодействует магнитной упорядоченности, поэтому магнитная проницаемость парамагнетиков заметно зависит от температуры.

Парамагнетиками являются кислород, окись азота, щелочные и щелочноземельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов. Усиливая магнитное поле, парамагнетики втягиваются в него.

К **ферромагнетикам** относят вещества с очень большой положительной магнитной восприимчивостью. Значение магнитной проницаемости μ некоторых ферромагнетиков может превышать миллион и сильно зависит от напряжённости поля и температуры.

Свойства ферромагнетиков проявляют железо, никель, кобальт и некоторые редкоземельные металлы, атомы которых отличаются очень сильным собственным магнитным моментом. На внешнем электронном уровне этих элементов оказалось несколько электронов, которые определяют их свойства, как металлов. Однако внутренние оболочки этих элементов остались незаполненными и магнитные моменты электронов этих оболочек – некомпенсированными. В 3-й электронной оболочке атома железа 4 электрона имеют некомпенсированные магнитные моменты, в результате сложения которых атом железа представляет собой самый сильный из элементарных магнитов. Соседние атомы ферромагнетика спонтанно (самопроизвольно) ориентируют свои магнитные моменты в одном из направлений лёгкого намагничивания кристаллов в пределах области, называемой **доменом**. Магнитные моменты соседних доменов направлены по-разному, так что в общем объёме вещества они компенсируют друг друга, результирующая намагниченность равна нулю и вещество имеет минимум энергии. Однако под воздействием внешних магнитных полей магнитные моменты доменов легко изменяют своё направление, усиливая эти поля в сотни, тысячи, миллионы раз.

Атомы **антиферромагнетиков** также являются элементарными магнитами, однако их магнитные моменты направлены антипараллельно (встречно) и компенсируют друг друга. Магнитная проницаемость μ немного больше 1 и сильно зависит от температуры. При нагревании антиферромагнетик переходит в парамагнитное состояние. Температура такого перехода, при которой исчезает магнитная упорядоченность, получила название точки Нееля.

Антиферромагнетизм обнаружен у хрома, марганца и ряда редкоземельных элементов (Ce, Nd, Sm, Tm и др.). Типичными антиферромагнетиками являются простейшие химические соединения на основе переходных металлов.

В **ферримагнетиках** магнитные моменты также направлены антипараллельно, но это магнитные моменты разных атомов либо ионов, поэтому они не скомпенсированы. Ферримагнетики обладают высокой магнитной проницаемостью (до десятков тысяч), которая, как и у ферромагнетиков, зависит от напряжённости магнитного поля и температуры. Свойствами ферримагнетиков обладают некоторые упорядоченные металлические сплавы, но, главным образом, – различные оксидные соединения, среди которых наибольший практический интерес представляют ферриты.

Диа-, пара- и антиферромагнетики можно объединить в группу слабомагнитных (немагнитных) веществ, тогда как ферро- и ферримагнетики представляют собой сильномагнитные (магнитные) материалы.

Вопрос 35 Петли гистерезиса и магнитные характеристики материала.

Если ферромагнетик намагнитить до насыщения B_s , а затем отключить внешнее поле, то индукция в нуль не обратится, а примет некоторое значение B_r , называемое **остаточной индукцией** (рисунок 16). Магнитный гистерезис (от греч. *hysteresis* – отставание) обусловлен процессами ступенчатого изменения намагниченности.

Значение остаточной индукции характеризует способность материала сохранять намагниченное состояние в отсутствии внешних намагничивающих сил. Чтобы скомпенсировать остаточную намагниченность, необходимо приложить внешнее магнитное поле с напряжённостью противоположного направления.

Коэрцитивной (сдерживающей) силой называют напряжённость размагничивающего поля H_c , при которой индукция в ферромагнетике, предварительно намагниченном до насыщения, обращается в нуль. Знак «-» показывает, что напряжённость внешнего поля направлена навстречу остаточной намагниченности. Увеличение напряжённости поля до значений, больших H_c , вызывает перемагничивание ферромагнетика в обратном направлении вплоть до насыщения – B_s . При снятии внешнего поля индукция уменьшится до $-B_r$. Прикладывая внешнее поле с напряжённостью H_c и более, можно намагнитить материал до насыщения B_s . При перемагничивании ферромагнетика от B_s до $-B_s$ и снова до B_s получают **предельную петлю гистерезиса**. Перемагничивание материала не обязательно происходит до насыщения. При различных амплитудных значениях напряжённости внешнего поля получим петли, вершины которых образуют **основную кривую намагничивания** материала, изображённую пунктиром на рисунке 16.

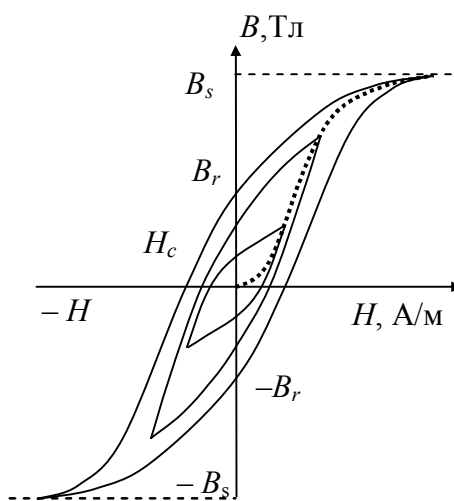
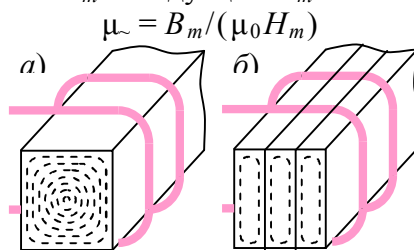


Рисунок 16 – Петли гистерезиса
и основная кривая намагничивания

Индукция насыщения B_s , остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c , вид и площадь петли гистерезиса являются основными параметрами материала, характеризующими возможности применения его для той или иной цели. Материалы с широкой петлёй гистерезиса (**магнитотвердые**)

используют для постоянных магнитов; узкой – для *магнитомягких* сердечников, работающих на промышленной и звуковых частотах; линейной – на ультразвуковых и радиочастотах, прямоугольной – для сердечников импульсных трансформаторов и хранения информации.

Работа магнитного материала в переменном поле характеризуется **динамической** магнитной проницаемостью $\mu_{\sim}$. Для её определения используют основную кривую намагничивания и амплитудные значения напряжённости H_m и индукции B_m магнитного поля:



**Рисунок17– Распределение
вихревых токов в сердечнике:**

a – сплошном; *б* – шихтованном

Перемагничивание ферромагнетиков в переменных полях сопровождается потерями энергии, вызывающими нагрев материала. Потери на перемагничивание складываются из потерь на гистерезис и на вихревые токи. Потеря энергии на гистерезис в единице объёма вещества (в джоулях на кубический метр) за один цикл перемагничивания равна площади статической петли гистерезиса (полученной при медленном изменении магнитного поля). Мощность потерь на гистерезис пропорциональна частоте.

Вихревые токи возникают в плоскости, расположенной перпендикулярно магнитному полю (рисунок 17, *a*) за счёт ЭДС самоиндукции, пропорциональной скорости изменения магнитного потока. Мощность потерь от вихревых токов пропорциональна квадрату частоты. Частотный диапазон применения материала ограничивается именно вихревыми токами. Для уменьшения потерь на вихревые токи необходимо использовать магнитный материал с повышенным удельным сопротивлением и собирать сердечник из тонких листов, изолированных друг от друга (рисунок 17, *б*).

Вихревые токи экранируют внутренние слои сердечника, оказывая на него размагничивающее действие. Так как центральные части сердечника охватываются наибольшим числом вихревых токов, значение магнитной индукции там минимально. Вытеснение магнитного поля на поверхность проявляется тем сильнее, чем больше частота его изменения, а также магнитная проницаемость и удельная проводимость намагничиваемой среды. Для оценки поверхностного эффекта используют понятие **глубины проникновения** Δ электромагнитного поля в вещество (например, для малоуглеродистой стали, глубина проникновения поля на частоте 50 Гц составляет 0,7 мм, а на частоте 10^6 Гц – всего лишь 0,005 мм).

Поскольку индукция неравномерно распределяется по сечению магнитопровода, для характеристики его свойств в переменных магнитных полях используют усреднённую характеристику – **эффективную магнитную проницаемость** $\mu_{эф}$. С ростом частоты размагничивающее влияние вихревых токов усиливается, а эффективная магнитная проницаемость уменьшается.

Затухание электромагнитной волны при её распространении в проводящей среде используют при создании электромагнитных экранов, служащих для защиты электронных схем и электроизмерительных приборов от внешних наводок, а также для защиты радиоэфира от помех, создаваемых генераторными устройствами. Для эффективной защиты толщина стенок экрана должна превышать, по крайней мере, глубину проникновения Δ электромагнитного поля в вещество. На радиочастотах практически непроницаемыми являются экраны из хорошо проводящих металлов – меди, латуни и алюминия. Однако на низких частотах такие экраны неэффективны, поскольку необходимы очень толстые стенки (например, на частоте 50 Гц у меди $\Delta = 1$ см). В этих случаях лучше использовать экраны из ферромагнитных материалов, особенно из пермаллоя или альсифера, обладающих весьма высокой магнитной проницаемостью.

Магнитострикция это изменение линейных размеров и формы ферромагнитного образца, вызванное искажениями кристаллической решётки под действием внешнего магнитного поля. Внутренние напряжения, возникающие при этом в материале, препятствуют смещению доменных границ и затрудняют намагничивание в слабых полях. Коэффициент магнитострикции $\lambda = \Delta l/l$ может быть положительным и отрицательным, т. е. размер образца вдоль намагничивающего поля может как увеличиваться, так и уменьшаться. Численное значение λ зависит от строения кристаллов, температуры и напряжённости магнитного поля. Большой коэффициент магнитострикции *никеля* используют в излучателях ультразвуковых колебаний. Сплав железа с никелем – *пермаллой* – отличается очень высокой магнитной проницаемостью в слабых полях, так как практически не деформируется при намагничивании, ввиду разных знаков коэффициентов магнитострикции Fe и Ni. Значение коэффициента магнитострикции λ_s , соответствующее магнитному насыщению, называют **константой магнитострикции**.

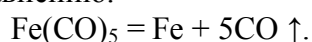
Вопрос 36 Материалы для постоянных и низкочастотных магнитных полей

Условно магнитомягкими считают материалы, у которых коэрцитивная сила $H_c \ll 800$ 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**. 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:



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

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 μ_n и максимальной μ_m магнитной проницаемости, уменьшению коэрцитивной силы H_c ; снижению потерь на гистерезис, уменьшению магнитной анизотропии и магнитострикции. Кроме того, кремний способствует выделению углерода в виде графита и раскислению стали за счёт образования SiO_2 , который выделяется в виде шлака.

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 легкого 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.

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. 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. 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 % Al, остальное – Fe.

По значениям основных параметров 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.

Вопрос 37 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 пермаллой 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 пленку. 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 Fe_2O_3 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 10^7 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 $\text{PbO}+\text{PbF}_2$ 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 и магниевые и некоторые другие ферриты, а также иттриевые ферриты – феррогранаты. Маркировка магнитомягких ферритов содержит численное значение начальной магнитной проницаемости μ_n , 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 μ_n – до 15 тысяч, максимальной μ_m – 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 μ_n достигает 800, μ_m – до 1500; для марок ВЧ μ_n – до 220, μ_m – 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.

На сверхвысоких частотах применяют магний-марганцевые ферриты с большим содержанием окиси магния, литий-цинковые ферриты и ферриты сложного состава (полиферриты), а в инфракрасном диапазоне – феррогранаты иттрия ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) 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.

Вопрос 38 Магнитные материалы с прямоугольной петлёй гистерезиса и магнотриксционные

Магнитные материалы с **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 $K_{\text{пу}}$, представляющий собой отношение остаточной индукции B_r к максимальной B_m , измеренной при $H = 5H_c$. Желательно, чтобы $K_{\text{пу}}$ был возможно ближе к единице. Для обеспечения быстрого перемагничивания сердечников они должны также иметь небольшой коэффициент переключения S_q , 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.

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*; 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 *железобальтовых* (50 % Fe, 50 % Co) и *железоалюминиевых* (13 % Al, 87 % Fe, альфер) сплавов значения константы магнитострикции меньше (соответственно, $7 \cdot 10^{-5}$ и $4 \cdot 10^{-5}$). Их недостатками являются хрупкость, затрудняющая механическую обработку, а также низкая антикоррозионная устойчивость, препятствующая использованию таких преобразователей в водной среде. Ферриты кобальта $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, железа $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и никеля $\text{NiO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 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.

Вопрос 39 Материалы для постоянных магнитов

Постоянные магниты изготавливают из *магнитотвёрдых* материалов с широкой петлёй гистерезиса. Условно считают магнитотвёрдыми материалы с коэрцитивной силой $H_c > 4$ 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_c (см. рисунок 16). Наилучшее использование магнита получается в той точке, для которой произведение индукции B на напряжённость H магнитного поля максимально. Разделив произведение $BH_{\max}$ на два, получим максимальное значение энергии, которую может запасти единица объёма намагниченного материала:

$$W_{\max} = BH_{\max} / 2.$$

Максимальное значение удельной запасаемой энергии $W_{\max}$ выражается в килоджоулях на кубический метр и является наиболее важной характеристикой качества материалов, используемых для изготовления постоянных магнитов. Часто в справочниках указывается не $W_{\max}$, а максимальное произведение $BH_{\max}$, кДж/м³.

Литые магниты из высококоэрцитивных сплавов Fe-Ni-Al (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). 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 легкого намагничивания кристаллов ориентируются в направлении поля. Магнитное текстурирование эффективно лишь для сплавов с высоким содержанием кобальта. 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, стронциевые и кобальтовые*. Они характеризуются сравнительно низкими значениями B_r (0,19–0,42 Тл), весьма высокими H_c (130–350 кА/м) и W_{max} (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 $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ (*ферроксдюр*).

Промышленность 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 примерно в 1,5–1,8 раза меньше, чем плотность у литых сплавов, поэтому магниты получаются лёгкими. По стоимости бариевые магниты дешевле литых почти в 10 раз. К 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 $SmCo_5$ и квазибинарные соединения "2–17" типа $R_2(CoFe)_{17}$, где R означает РЗМ. На основе таких сплавов разработаны **самариевые и ниобиевые** магниты с высокими значениями H_c (640–1300 кА/м) и W_{max} (55–80 кДж/м³) при удовлетворительной температурной стабильности. Магниты на основе $SmCo_5$ 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 получают достаточно точных размеров и не требуют дальнейшей обработки. Недостатки этих материалов – высокая твердость, хрупкость, дороговизна. Применяют их в основном там, где важно снижение массы и габаритных размеров магнитов.

Более перспективными являются составы типа "редкая земля – железо – бор", например $Nd_2Fe_{14}B$, $(YEr)_2Fe_{14}B$. Такие магнитные материалы не только обладают высокими значениями максимальной запасаемой энергии, но и значительно дешевле, чем $SmCo_5$. Спеченные магниты из сплавов неодим – железо – бор имеют W_{max} от 85 до 180 кДж/м³, B_r от 1 до 1,4 Тл, H_c от 880 до 2700 кА/м и верхний предел рабочей температуры от 80 до 240 °С.

Металлопластические 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 жесткого наполнителя при прессовке необходимы высокие давления, достигающие 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+Cu (кунифе), Co+Ni+Cu (кунико), Fe+Co+V (викалло), 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.

Для наноманитов разработаны композиты SmCo_5+Fe , представляют важный класс материалов для постоянных магнитов высокой мощности. SmCo_5 обеспечивает высокие коэрцитивную силу и температуру Кюри, а железо – большую намагниченность.

Вопрос 40 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 легкого 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.

Магнитные ленты изготавливают нанесением магнитного лака на тонкую плёнку полимера. Подавляющее большинство 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 плёнку 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 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематита) коричневого цвета с мелкими однодоменными частицами. Его получают окислением магнетита Fe_3O_4 при нагревании на воздухе до температуры около 250 °С. Добавка магнетита Fe_3O_4 к порошку $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 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 CrO_2 (чёрного цвета). Это соединение также обладает свойствами ферромагнетика и позволяет получать магнитоактивные слои с более высокой, чем у γ -

Fe_2O_3 , коэрцитивной силой и повышенной чувствительностью к высоким частотам. Преимуществом лент из диоксида хрома является также малая электризуемость рабочего слоя.

Плётка с двойным магнитным слоем, состоящим из чередующихся окислов $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и CrO_2 , сочетает высокочастотные свойства, присущие диоксиду хрома, с хорошим воспроизведением низкочастотного спектра, что свойственно лучшим плёткам с $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. 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 $\text{R}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и ортоферритов RFeO_3 .

Наилучшими магнитными свойствами, необходимыми для записи и воспроизведения информации, обладают плётки 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. 3.8, наиболее перспективным считается сплав железа с платиной.

В настоящее время считывание информации с магнитной плёнки происходит за счёт эффекта GMR (гигантского магнитного сопротивления). 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 BiFeO_3 , называемого также BFO.

Исследуются перспективы записи информации на магнитные плётки путём воздействия электрического поля. Здесь перспективны композиции феррита висмута BiFeO_3 и ферромагнитного сплава $\text{Co}_{0,9}\text{Fe}_{0,1}$.

Для включения (и выключения) сварочного трансформатора в сеть служат специальные устройства - контакторы с так называемыми управляемыми вентилями - игнитронами и тиристорами. Игнитрон - газоразрядный (ионный) прибор, способный пропускать большие токи при подаче соответствующей электрической команды на управляющий электрод — поджигатель.