

Лекция 17. Магнитные материалы

Общая характеристика

К магнитным материалам относятся вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью при температуре ниже температуры магнитного упорядочения. Это ферромагнетики, у которых магнитные моменты спонтанно, т.е. в отсутствие внешнего магнитного поля, ориентированы параллельно; и ферримагнетики, у которых ориентация различных по величине суммарных моментов магнитных подрешеток антипараллельна (рис. 4.1). Ответственным за магнитное упорядочение является так называемое обменное взаимодействие, стремящееся установить магнитные моменты (спины) соседних атомов параллельно друг другу, или антипараллельно для ферримагнетиков. В антиферромагнитных материалах в отличие от ферримагнетиков суммарный магнитный момент равен нулю, поскольку антипараллельные магнитные моменты уравнивают друг друга.

При переходе в магнитоупорядоченное состояние магнетики разбиваются на ряд макроскопических областей, отличающихся направлением намагниченности, которые называются магнитными доменами. Возникновение доменных магнитных структур определяется минимумом полной внутренней энергии магнетика, включающей энергию обменного взаимодействия между магнитными моментами, энергию магнитной анизотропии, магнитостатическую и магнитоупругую энергии (рис. 4.2). Обменное взаимодействие выстраивает элементарные магнитные моменты параллельно друг другу. Под действием постоянного магнитного поля магнитная доменная структура перестраивается и при достаточно больших значениях поля H она полностью исчезает. Вещество становится монодоменным.

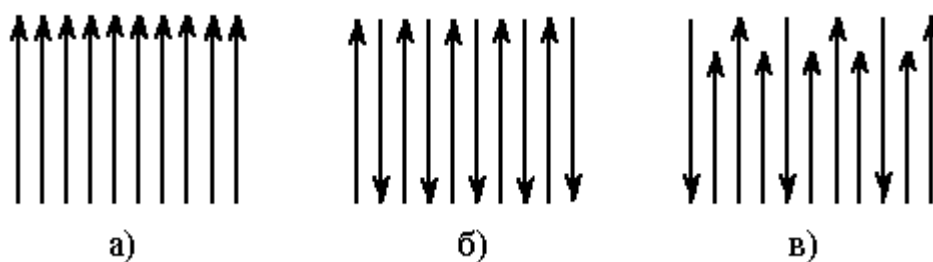


Рис. 4.1. Структура магнитных моментов в различных магнетиках: а) ферромагнетик; б) антиферромагнетик; в) ферримагнетик

Магнитные материалы можно классифицировать и по величине электропроводности на магнитные металлы, магнитные полупроводники и магнитные диэлектрики, аморфные магнетики и магнитные стекла

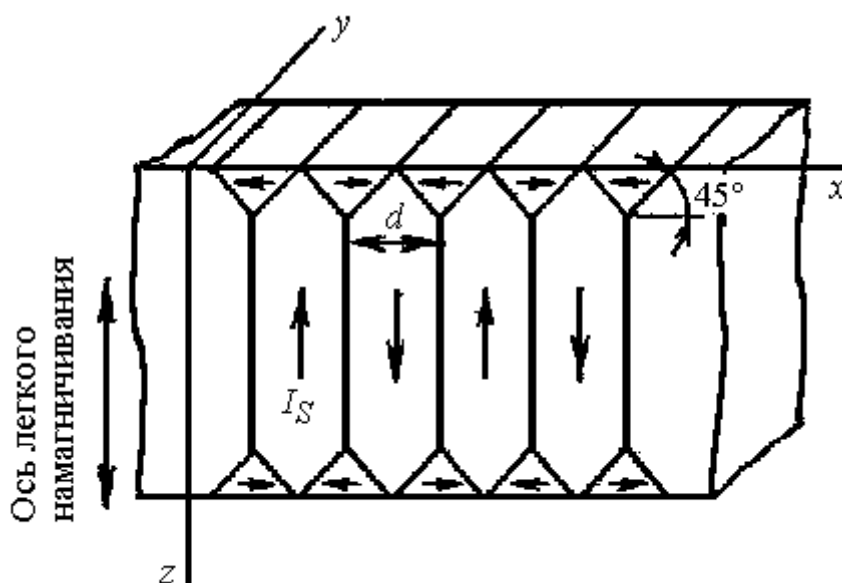


Рис. 4.2. Структура магнитных доменов: d – размер домена, M_s – направление намагниченности

К магнитным металлам относятся металлы группы железа (Fe, Co, Ni), редких земель (Gd, Di), а также их сплавы и соединения.

Магнитные полупроводники - это вещества, сочетающие полупроводниковый тип электропроводности с различными видами магнитного упорядочения (ферромагнитным, антиферромагнитным).

В свою очередь, магнитные диэлектрики - это ферро-, ферри- и антиферромагнетики, обладающие очень низкой электропроводностью.

Аморфные магнетики - это материалы, сочетающие определенную магнитную структуру с аморфной атомной структурой в определенном температурном диапазоне.

Магнитные стекла, которые также называются металлическими стеклами, являются разновидностью аморфных металлов и характеризуются металлическим типом проводимости и отсутствием дальнего порядка в расположении атомов.

К основным характеристикам магнитных материалов относятся:

1. Температура магнитного упорядочения: точка Кюри T_C – для ферромагнетиков и точка Нееля T_N для антиферромагнетиков. Выше точки магнитного упорядочения вещества становятся парамагнитными. В парамагнитном состоянии упорядоченность в расположении магнитных моментов нарушается за счет тепловых колебаний атомов.

2. Намагниченность – характеристика магнитного состояния вещества, определяемая как суммарный магнитный момент единицы объема магнетика M . Намагниченность вещества зависит от величины внешнего магнитного поля H и температуры $M(H, T)$. Связь между намагниченностью и магнитным полем описывается посредством магнитной восприимчивости χ

$$M = \chi H \quad (4.1)$$

Магнитное поле в веществе характеризуется магнитной индукцией \vec{B} . В вакууме имеет место связь между \vec{B} и \vec{H}

$$B = \mu_0 H, \quad (4.2)$$

Где μ_0 – магнитная постоянная : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Магнитная индукция в магнетиках и напряженность внешнего магнитного поля связаны соотношением

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (\vec{H} + \chi \vec{H}) = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (4.3)$$

где μ - магнитная проницаемость среды. $\mu = 1 + \chi$.

В ферромагнетиках и ферримагнетиках из-за наличия спонтанной намагниченности M магнитная индукция отлична от нуля, согласно (4.3) даже в отсутствие магнитного поля.

3. Намагниченность насыщения M_S - предельное значение намагниченности в приложенном магнитном поле. В ферромагнетиках намагничивание из состояния с нулевой индукцией изображается кривой намагничивания (рис.4.3). Намагниченность с ростом поля H достигает предела M_S . При перемагничивании зависимость $B(H)$ или $M(H)$ образует характерную S - образную кривую - петлю гистерезиса. Точки пересечения петли гистерезиса с осью ординат дают значения остаточной индукции или остаточной намагниченности M_R , а точку пересечения с осью абсцисс определяют значения коэрцитивного поля.

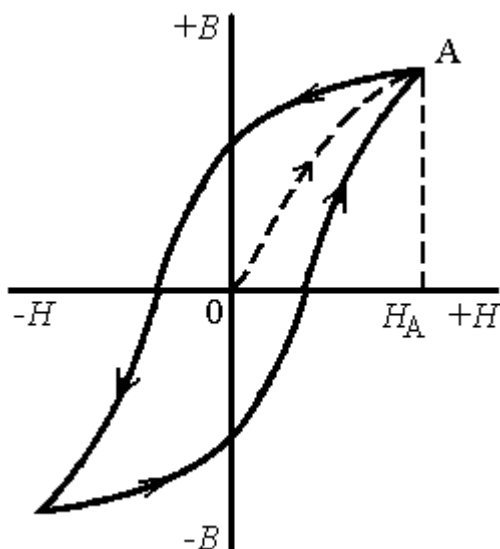


Рис. 4.3. Магнитная петля гистерезиса

В ферромагнитных и ферримагнитных материалах процесс намагничивания происходит в основном за счет двух механизмов : смещению границ между доменами и ориентации векторов магнитных моментов в направлении внешнего поля. Вначале под влиянием магнитного поля происходит увеличение размеров тех доменов, магнитные моменты которых имеют наименьший угол с направлением поля, за счет соседних доменов. После завершения процессов смещения в каждом кристалле остается всего лишь один домен, намагниченность которого ориентирована вдоль какой-либо оси легкого намагничивания. Затем происходит процесс ориентации всех магнитных моментов вдоль приложенного поля. При завершении этих процессов достигается техническое магнитное насыщение.

Остаточная намагниченность M_r зависит от магнитных свойств материала, его магнитной предистории, количества циклов перемагничивания, термомагнитной обработки и и других воздействий, температуры, вибраций.

Дифференциальная магнитная восприимчивость dM/dH с увеличением магнитного поля достигает максимума, а затем уменьшается (кривая Столетова).

4. Магнитная анизотропия, т.е. зависимость магнитных свойств магнетика от выделенного направления в образце. Особенно сильно анизотропия наблюдается в монокристаллах. Зависимость намагниченности от ее направления относительно кристаллографических осей в кристаллах называется естественной кристаллографической магнитной анизотропией. Кроме того, магнитная анизотропия может возникать вследствие магнитоупругих деформаций (наведенная магнитная анизотропия). Магнитная анизотропия существенно влияет на процессы намагничивания, образование доменной структуры и другие свойства магнетиков. Поскольку магнитная анизотропия зависит от симметрии кристалла, то намагниченность будет также зависеть от ориентации поля относительно кристаллографических осей. В кристаллах выделяют направления легкого намагничивания, вдоль которого расположен вектор спонтанного намагничивания в отсутствие внешнего магнитного поля, и направление трудного намагничивания. Во внешнем поле вектор спонтанного намагничивания M_S поворачивается, приближаясь к направлению магнитного поля с возрастанием его величины. Критическое значение магнитного поля, при котором вектор M_S устанавливается вдоль поля H при намагничивании в трудном направлении, называется полем анизотропии.

Мерой магнитной анизотропии является также работа намагничивания, необходимая для поворота вектора M из положения легкого намагничивания в новое положение - вдоль поля H . Эта работа определяет плотность свободной энергии магнитной анизотропии E_a (Дж/м³).

$$E_a = \sum_{p,q,r} k_{pqr} \alpha_x^p \alpha_y^q \alpha_z^r \quad (4.4)$$

$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ - направляющие косинусы вектора спонтанной намагниченности, k_{pqr} - константа магнитной анизотропии.

5. Магнитная проницаемость μ характеризует реакцию среды на воздействие внешнего магнитного поля. Она, с точки зрения законов электродинамики, аналогична диэлектрической проницаемости ϵ . В анизотропной среде магнитная проницаемость анизотропна и описывается тензором. Магнитная проницаемость в магнетиках зависит от напряженности поля H , поскольку намагниченность M в этом случае является нелинейной функцией H . Магнитную проницаемость μ называют начальной при $H \approx 0$, а максимальное значение μ называется максимальной магнитной проницаемостью. Также введено понятие дифференциальной магнитной проницаемости μ_d

$$\mu_d = dB/dH \quad (4.5)$$

В магнитном поле функция $\mu(H)$ сначала растет, достигая максимума при коэрцитивной силе H_c , а затем уменьшается. Зависимость $\mu(H)$ может быть обратимой, например, в магнитомягких материалах, или необратимой, что характерно для магнитотвердых материалов.

В переменном магнитном поле с угловой частотой $\omega = 2\pi f$ магнитная проницаемость так же как и диэлектрическая проницаемость, обладает дисперсией и представляется в комплексной форме

$$\mu(\omega, \vec{k}) = \mu' + i\mu'' \quad (4.6)$$

Мнимая часть μ'' описывает поглощение, т.е. потери электромагнитной энергии в веществе. Существуют несколько факторов, обуславливающих потери и приводящие в конечном итоге к нагреву материала. В материалах с большой проводимостью существенную роль играют вихревые токи, индуцируемые в массе ферромагнетика. В высокоомных материалах потери вызваны релаксационными процессами, связанными с отставанием намагниченности от изменения напряженности внешнего поля. Этот эффект также называется потерями на гистерезис. Теряемая за один полный цикл перемагничивания энергия равна интегралу $\int H dM$, определяющему площадь петли гистерезиса. Мощность, расходуемая на гистерезис, определяется эмпирической формулой

$$W_\eta = \eta f B_{\max}^n \quad (4.7)$$

где η - коэффициент, зависящий от состава материала, B - максимальная индукция, n - эмпирический коэффициент.

6. Магнитострикция- изменение размеров и формы магнитного тела при его намагничивании. Магнитострикция наиболее эффективно проявляется в сильно магнитных веществах - ферро-, ферри- и антиферромагнетиках.

Различают объемную магнитострикцию, характеризуемую относительным изменением объема тела ($\Delta V/V$), и анизотропную магнитострикцию, характеризуемую относительным изменением размеров тела ($\Delta L/L$) почти без изменения объемов тела.

По характеру использования магнитных материалов в различных областях техники, а также из совокупности магнитных свойств они подразделяются на магнитно-мягкие, магнитно-твердые.