

Лекция 15. Магнитные свойства вещества. Магнетики

Содержание

1. Намагниченность. Магнитное поле в веществе
2. Основные типы магнетиков. Природа диа- и парамагнетизма
3. Ферромагнетики и их свойства
4. Природа ферромагнетизма
5. Магнитные цепи

1. Намагниченность. Магнитное поле в веществе
магнитный поле ферромагнетизм цепь

До сих пор мы рассматривали магнитное поле в вакууме. Если проводники с токами находятся не в вакууме, а в другой среде, то магнитное поле изменяется. Это говорит о том, что различные вещества в магнитном поле намагничиваются, т.е. становятся источниками магнитного поля. Результирующее поле в среде является суммой полей создаваемых проводниками с током и намагничивающейся средой, и поэтому оно не равно полю в вакууме, т.е.

, 15.1

где

15.2

индукция магнитного поля в вакууме, - индукция магнитного поля, создаваемого намагничивающейся средой. Вещества, способные намагничиваться, называются магнетиками. Для описания намагничения вещества введем вектор \vec{M} , где M - магнитный момент атома. Тогда для количественной оценки намагничения вещества можно ввести вектор

15.3

называемый вектором намагничения и имеющий смысл намагничения единицы объема вещества. Если среда намагничена неоднородно, то вектор намагничения определяется для физически малого объема, т.е.

.

Вектор намагничения является основной величиной, характеризующей магнитное состояние вещества. Зная вектор намагничения в каждой точке тела, можно определить и магнитное поле, создаваемое этим намагниченным телом. Задача значительно упрощается, если вектор намагничения одинаков во всех точках магнетика (однородное намагничение). Для определения индукции магнитного поля в магнетике возьмем образец в виде цилиндра, длиной l и площадью поперечного сечения S . В этом случае поверхностные токи можно рассматривать как ток в катушке и для индукции поля, создаваемого этим током можно использовать выражение

, т.е.

, 15.4

где - число витков на единицу длины образца, - сила поверхностного тока. Тогда

. 15.5

Магнитный момент поверхностного тока определяется по формуле

, 15.6

но с другой стороны, по 15.3

. 15.7

Из равенства правых частей выражений 15.6 и 15.7 следует, что

15.8

и выражение 15.5 принимает вид

. 15.9

Подставляя 15.2 и 15.9 в 15.1, для индукции магнитного поля в среде получим:

15.10

или

. 15.11

Опыт показывает, что для большинства однородных и изотропных магнетиков (исключение - ферромагнетики) вектор намагничения прямо пропорционален напряженности магнитного поля, т.е.

, 15.12

где - магнитная восприимчивость вещества, величина безразмерная и составляет величину порядка .

Подставляя 15.12 в 15.11, получим:

. 15.13

Безразмерная величина

15.14

называется магнитной проницаемостью вещества. В отличие от диэлектрической восприимчивости, которая принимает только положительные значения, магнитная восприимчивость может быть как положительной, так и отрицательной. Поэтому магнитная проницаемость вещества может быть как больше единицы, так и меньше единицы. Подставив 15.14 в 15.13, для индукции магнитного поля в веществе получим выражение

15.15 которое совпадает с выражением 5.3 которое мы вводили эмпирически.

Магнетики у которых получили название диамагнетиков, а вещества с - парамагнетиков. Так как магнитная восприимчивость для диа- и парамагнетиков очень мала, то для них магнитная проницаемость незначительно отличается от единицы и поэтому, они относятся к слабомагнитным веществам.

2. Основные типы магнетиков. Природа диа- и парамагнетизма

Магнетики подразделяются на слабомагнитные и сильномагнитные вещества. К слабомагнитным относятся парамагнетики и диамагнетики, к сильномагнитным - ферромагнетики.

Не все вещества одинаково проводят силовые линии магнитного поля. Так,

например, через железо магнитные силовые линии проходят во много раз легче, чем через воздух. Другими словами способность железа проводить магнитный поток больше, чем окружающего воздуха, поэтому индукция магнитного поля в железе больше, чем в воздухе.

Величина, характеризующая магнитные свойства среды, в которой действует магнитное поле, называется магнитной проницаемостью (μ). Она показывает, во сколько раз магнитная индукция B в однородной изотропной среде больше (или меньше), чем в вакууме:

15.16

Для вакуума .

Диамагнитные свойства наблюдаются у веществ атомы, которых имеют магнитный момент ; равный нулю (неполярные диэлектрики), например, Bi, Ag, Cu , большинство органических соединений, углекислый газ.

Электрон, движущийся по круговой орбите, подобен волчку. Под действием магнитного поля, индукция B которого составляет угол θ с осью орбиты электрона, возникает прецессия электронной орбиты, при которой вектор магнитного момента атома , сохраняя постоянным угол θ , вращается вокруг направления вектора магнитной индукции с некоторой частотой называемой Ларморовой частотой. Она не зависит от угла наклона θ и одинакова для всех электронов. Это движение электрона эквивалентно круговому току. Поскольку этот ток индуцирован магнитным полем, то по правилу Ленца, у атома появляется составляющая магнитного поля, направленная против внешнего магнитного поля. Эта составляющая существует у всех атомов и обуславливает собственное магнитное поле вещества, ослабляющее внешнее магнитное поле, поэтому у диамагнетиков . Парамагнитные свойства наблюдаются у веществ, атомы которых имеют отличный от нуля магнитный момент (полярные диэлектрики). В отсутствие внешнего магнитного поля, вследствие теплового движения, магнитные моменты атомов разориентированы и поэтому магнитный момент вещества равен нулю. При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле магнитные моменты атомов ориентируются по полю (полной ориентации препятствует хаотическое тепловое движение). Таким образом, парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, направленное по внешнему полю и усиливает его и, следовательно, . В парамагнетиках наблюдается и диамагнитный эффект, но он значительно слабее парамагнитного и им можно пренебречь.

Обобщая выше сказанное можно сказать, что в случае, когда магнитный момент атома велик, то преобладают парамагнитные свойства, если мал, то диамагнитные.

3. Ферромагнетики и их свойства

Ферромагнетики помимо способности сильно намагничиваться обладают еще и другими свойствами, существенно отличающими их от диа - и парамагнетиков. Наряду с этим свойством, для ферромагнетиков характерно: 1) кристаллическое строение; 2) большие положительные значения магнитной проницаемости (до сотен тысяч: для железа - 5000, для сплава супермаллоя - 800000), а также нелинейная её зависимость от напряженности H магнитного поля и температуры; 3) способность

намагничиваться до насыщения при обычных температурах уже в слабых полях; 4) гистерезис - зависимость магнитных свойств от предшествующего магнитного состояния ("магнитной истории"); 5) точка Кюри, т. е. температура, выше которой материал теряет ферромагнитные свойства, превращаясь в обычный парамагнетик. На рис. 15.2 показана зависимость индукции магнитного поля B от напряженности H , намагниченности J и магнитной проницаемости от H для мягкого железа.

а)б)в)

Рис. 15.2. Зависимость а) индукции магнитного поля B от напряженности H , б) намагниченности J от напряженности H ; в) магнитной проницаемости от напряженности H для мягкого железа.

На рисунке видно, что B и J растут вначале быстро с увеличением напряженности намагничивающего поля, затем их рост замедляется, а, начиная с некоторого значения, намагниченность достигает практически предельного значения. Это состояние Столетов назвал магнитным насыщением. Индукция после достижения магнитного насыщения растет пропорционально H .

В связи с неоднозначностью зависимости B от H понятие магнитной проницаемости применяется лишь к основной кривой намагничивания. Для некоторой точки кривой (рис. 15.2) магнитная проницаемость определяется как тангенс угла наклона прямой, проведенной из начала координат к рассматриваемой точке кривой, т. е. . Как следует из рис. 15.3, при увеличении H угол наклона (α значит и μ) сначала растет, в точке C (прямая OC является касательной к кривой) достигает максимума, а затем убывает.

Рис. 15.3. Петля гистерезиса

При циклическом перемагничивании кривая намагничивания образует гистерезисную петлю (рис. 15.3).

Если довести намагничение до насыщения (точка 2 на рис. 15.3), а затем уменьшать магнитное поле, то индукция B следует не по первоначальной кривой 1-2, а изменяется в соответствии с кривой 2-3.

В результате, когда напряженность внешнего поля станет равной нулю (точка 3), намагничение не исчезает и характеризуется величиной $B_{ост}$ которая называется остаточной индукцией.

Её можно изменить, создав внешнее поле H , имеющее направление, противоположное полю, вызвавшему намагничение. Поле напряженностью H_c , при которой остаточная индукция исчезает, называется коэрцитивной силой. При дальнейшем увеличении противоположно направленного поля ферромагнетик намагничивается до насыщения (кривая 4-5). Затем ферромагнетик можно снова размагнитить (кривая 5-6-7) и снова намагнитить до насыщения. Гистерезис приводит к тому, что намагничение ферромагнетика не является однозначной функцией напряженности, т.е. одному и тому же значению соответствуют различные значения намагничивания.

Ферромагнетики с малой (до 1-2) коэрцитивной силой (узкой петлей гистерезиса) называются магнитомягкими, а с большой (до нескольких тысяч) - магнитотвердыми. Величины H_c , $B_{ост}$ определяют область применения ферромагнетиков.

Процесс намагничивания ферромагнетика приводит к изменению его линейных размеров и объема. Это явление получило название магнитострикции. В настоящее время большое значение приобрели полупроводниковые ферромагнетики - ферриты, химические соединения типа $M_2O \cdot nH_2O$, где M - ион двухвалентного металла. Они отличаются заметными ферромагнитными свойствами и большим удельным сопротивлением (в миллиарды раз больше, чем у металлов). Ферриты применяются для изготовления постоянных магнитов, сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, ферритовых антенн и т.д.

4. Природа ферромагнетизма

К ферромагнетикам относятся железо, кобальт, никель, гадолиний и ряд других металлов их сплавы и соединения, а также некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия и др. Ранее мы уже указывали, что объяснить намагничение железа орбитальным движением электронов невозможно (опыты Эйнштейна - де-Хааса, Барнетта). По современным представлениям ферромагнетизм обусловлен спиновыми магнитными моментами атомов с незавершенными электронными оболочками, например, для железа, никеля, и кобальта и в случае редкоземельных металлов. Однако не все элементы с незавершенными электронными оболочками являются ферромагнетиками. Для возникновения ферромагнетизма необходимо наличие сильного обменного взаимодействия между спинами соседних атомов. Это взаимодействие заставляет спиновые моменты незавершенных электронных оболочек выстраиваться параллельно друг другу. В результате этого атом намагничивается до насыщения. Природа обменных сил была выяснена в квантовой механике. В ферромагнетизме задача сводится к вычислению некоторого интеграла, обозначаемого A и называемого обменным. Этот интеграл должен иметь положительное значение. Только в этом случае обменные силы могут ориентировать спины. Было найдено простое условие, определяющее возможность возникновения ферромагнетизма: отношение параметра кристаллической решетки d к диаметру электронной орбиты должно быть равным или превышать 1,5, т.е. $d \geq 1,5 r$. Сильная ориентировка спинов электронов вызываемая силами обменного взаимодействия, которая возникает в ферромагнетике независимо от наличия внешнего магнитного поля, приводит к тому, что ферромагнетик намагничен до насыщения. Наличие такого спонтанного (самопроизвольного) намагничивания является характерным свойством ферромагнетиков при температурах ниже точки Кюри. Это находится в кажущемся противоречии с общеизвестным фактом отсутствия намагниченности у ферромагнетика не подвергавшемуся воздействию внешних магнитных полей. Это противоречие устраняется, если принять, что каждый микрокристаллик ферромагнетика при возникновении спонтанной намагниченности оказывается разделенным на множество очень малых, вплоть до 10^{-6} см, объемов, называемых доменами, намагниченными по разным направлениям легкого намагничивания, так, что результирующее намагничение такого микро кристаллика в отсутствии внешнего магнитного поля равно нулю. Впервые эти представления были высказаны в работах Б.Л. Розинга (1892 г.) и вновь были выдвинуты Вейсом в 1907 году. Вейс высказал гипотезу о том, что ферромагнетик разбивается на большое число малых

(но макроскопических) областей - доменов. Каждый домен намагничен до насыщения (при температурах ниже точки Кюри), но намагниченность различных доменов ориентирована хаотически, так, что результирующая намагниченность равна нулю (рис. 15.5). Существование доменов в ферромагнетиках можно доказать с помощью порошковых фигур (Биттер, Акулов Н.С., Дегтярь М.В.). Если на хорошо отполированную поверхность ферромагнетика поместить слой жидкости, в которой взвешены мельчайшие частицы ферромагнитного порошка, то эти частицы будут оседать в основном на те места, вблизи которых магнитное поле однородно. Но как раз вблизи границ доменов возникают неоднородности поля, и, поэтому, осевший порошок обрисует границы доменов. Причиной возникновения доменов является, хорошо известно еще из механики, положение о том, что наиболее устойчивым является такое состояние системы, при котором ее потенциальная энергия минимальна. Если бы кристалл не был разбит на домены, намагниченные в различных направлениях, то он представлял бы собой магнит с двумя полюсами, создающий магнитное поле. В этом поле была сосредоточена энергия. При образовании доменов магнитный поток замыкается внутри кристалла, почти не выходя наружу, поэтому энергия кристалла значительно меньше, чем при наличии полюсов. Следовательно, образование доменов дает более устойчивую систему, к которой кристалл всегда приходит, если нет внешнего воздействия и интенсивность теплового движения недостаточна для нарушения параллельной ориентации спинов. Процесс разбиения кристалла на домены закончится тогда, когда выигрыш в магнитостатической энергии за счет образования более мелких доменов станет меньше, чем энергия, необходимая для образования новых доменных границ. Намагничение ферромагнетика состоит в переориентации векторов намагничения доменов в направлении приложенного магнитного поля и включает процессы смещения и вращения. В слабых магнитных полях происходит упругое смещение границ доменов. При этом домены с энергетически выгодной ориентацией вектора намагничения растут за счет доменов с энергетически невыгодной ориентацией намагниченности (рис. 15.5. б). Процесс вращения состоит в повороте векторов намагничения доменов в направлении вектора (рис. 15.5.в). При полном совпадении вектора намагничения с направлением вектора достигается так называемое техническое насыщение ферромагнетика при заданной температуре.

5. Магнитные цепи

Магнитные потоки широко используются в современной электротехнике. Действие электромагнитов, мощных генераторов, трансформаторов, электродвигателей и многих измерительных приборов основано на существовании в них магнитного потока. Для усиления магнитного потока всегда применяются ферромагнитные материалы. Изготавливая из них тела различной формы и размеров, оказывается возможным создавать магнитные потоки нужной величины и направлять их в нужном направлении. Совокупность тел, внутри которых проходят замкнутые линии магнитной индукции, называется магнитной цепью.

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Магнитные цепи
2. Магнитное поле Земли...