

РАБОТА 2.06

Гистерезис ферромагнетика

Цель работы

1. Получить на экране осциллографа предельную петлю гистерезиса ферромагнетика в переменном магнитном поле. Измерить основные параметры ферромагнитного материала: индукцию насыщения B_m , остаточную индукцию B_0 , коэрцитивную силу H_c , предельную магнитную проницаемость μ_m .
2. Снять основную кривую намагничивания ферромагнетика.

Введение

Ферромагнетиками называют вещества, состоящие из спонтанно (самопроизвольно) намагниченных областей - доменов. Основными специфическими свойствами ферромагнетиков являются аномально большие значения магнитной проницаемости μ (до 10^4 и выше) и нелинейная неоднозначная зависимость намагниченности J от напряженности магнитного поля H . Напомним, что помимо ферромагнетиков существуют еще два типа магнетиков: диамагнетики и парамагнетики, о которых сказано в теоретическом введении к данной главе. Согласно формуле (39) магнитная индукция

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}) \quad (6.1)$$

и следовательно, нелинейной и неоднозначной является также зависимость $B(H)$. Для однородного и изотропного магнетика согласно(42)

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}. \quad (6.2)$$

Простота соотношения (6.2) побуждает использовать его и для ферромагнетиков; при этом вся сложность процесса намагничивания ферромагнетика переносится на зависимость $\mu(H)$.

Согласно формуле (43), магнитная проницаемость μ показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в ферромагнетике больше, чем в вакууме (или в любом неферромагнитном веществе, например в воздухе) – при неизменных внешних макроточках, возбуждающих магнитное поле.

К ферромагнетикам принадлежат железо, никель, кобальт, гадолиний, их сплавы и сплавы их с другими металлами. Ферромагнитными свойствами обладают некоторые сплавы элементов, которые порознь не являются

ферромагнитными (например, сплав мели и марганца), и ряд не металлических веществ, называемых ферритами.

Ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков являются собственные (спиновые) магнитные моменты электронов. Хотя наиболее известные ферромагнетики - железо, кобальт, никель - металлы, за ферромагнетизм ответственны не свободные электроны, а электроны, принадлежащие ионам кристаллической решетки и находящиеся на незаполненных оболочках. Как показывают наблюдения, у всех ферромагнитных элементов в недостроенной оболочке имеются нескомпенсированные спины электронов, например, у железа их 4, а у кобальта - 3. Однако, наличие нескомпенсированных спинов не всегда приводит к возникновению ферромагнетизма. Действительно, марганец имеет 5 нескомпенсированных спинов, а хром - 4 и оба они не ферромагнитны. Поэтому, помимо необходимого условия наличия нескомпенсированных спинов в недостроенных оболочках атомов, есть еще одно необходимое условие ферромагнетизма, которое связано с особенностью кристаллической решетки ферромагнетиков. Подчеркнем, что ферромагнетизм присущ только кристаллическим телам. При образовании атомами ферромагнетика кристаллической решетки их валентные электроны "обобществляются", в том смысле, что волновые функции электронов недостроенных оболочек соседних атомов перекрываются. Это приводит к значительному возрастанию обменного взаимодействия электронов, локализованных в узлах кристаллической решетки. Энергия этого взаимодействия зависит от отношения параметра кристаллической решетки к диаметру незаполненной электронной оболочки атома. Если энергетически выгодна параллельная ориентация спинов взаимодействующих электронов, то у образца появляются ферромагнитные свойства. Это происходит, если параметр кристаллической решетки превышает диаметр незаполненной электронной оболочки атома примерно в полтора раза, что и будет вторым условием возникновения ферромагнетизма. Данное правило не выполняется, например, для хрома и марганца, поэтому они и не ферромагнитны, однако, уже у ряда сплавов, включающих хром или марганец, параметр кристаллической решетки оказывается измененным так, что приведенное выше условие выполняется и эти сплавы обладают ферромагнитными свойствами, например, сплав Гейслера (Cu_2MnAl).

Как уже говорилось выше, отличительной чертой ферромагнетиков является наличие у них устойчивой доменной структуры. Объяснить эту особенность можно исходя из принципа, согласно которому устойчивое состояние - это состояние, соответствующее минимуму свободной энергии. Ясно, что однодоменный ферромагнитный кристалл является постоянным магнитом, который создает внешнее магнитное поле, обладающее определенной энергией. В случае, если этот же кристалл двухдоменный с противоположной ориентацией спинов, то внешнее магнитное поле обладает меньшей энергией, у четырехдоменного - еще меньшей и т.д. Действительно, силовые линии магнитного поля, выходя из одного домена, входят в соседний, а не замыкаются через бесконечность на другом конце образца, что и приводит к уменьшению "рассеяния" силовых линий. Поэтому магнитное поле достаточно быстро убывает при удалении от поверхности, обеспечивая уменьшение энергии магнитного поля вокруг образца, разбитого на домены, по сравнению с намагниченным образцом. Однако процесс дробления на домены имеет определенный предел. Дробление кристалла на домены связано с образованием новых граничных слоев между доменами, а на это нужно затратить некоторую энергию. Понятно, что процесс деления доменов останавливается, когда энергия, идущая на образование новых граничных слоев между доменами, оказывается сравнимой с выигрышем энергии за счет уменьшения энергии внешнего магнитного поля ферромагнетика.

В ненамагниченном ферромагнетике домены хаотично ориентированы в пространстве, и намагниченность равна нулю. Во внешнем магнитном поле намагниченность J и, следовательно, индукция B увеличивается с напряженностью H (кривая 1 на рис. 6.1): на участке OA - за счет роста доменов, ориентированных по полю, на участке AC - за счет их поворота; участок CE характеризует насыщение намагниченности J (в соответствии с (6.1) кривая $B(H)$ не выходит на насыщение, а переходит в прямую с небольшим наклоном к оси H). Кривую 1 называют основной кривой намагничивания ферромагнетика, Точке C на кривой намагничивания, т.е. условию достижения насыщения намагниченности, соответствует индукция насыщения B_m .

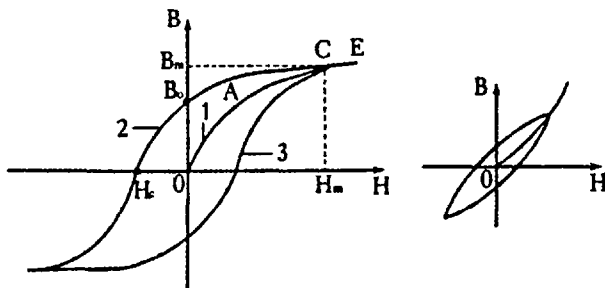


Рис. 6.1. Петля гистерезиса ферромагнетика

При уменьшении напряженности магнитного поля H индукция B начинает уменьшаться (кривая 2 на рис. 6.1). При $H=0$ остаточная индукция B_0 не равна 0. Для ее компенсации к ферромагнетнику нужно приложить магнитное поле с напряженностью H_c в направлении, противоположном начальному, (магнитная коэрцитивная сила). Если продолжать увеличивать напряженность этого “обратного” поля, то опять наступит насыщение намагниченности. Последующее изменение напряженности снова в “прямом” направлении сопровождается изменением индукции B по кривой 3. Таким образом, график зависимости $B(H)$ имеет вид петли, которую называют предельной петлей гистерезиса. Петля гистерезиса - важная характеристика ферромагнетика.

Если внести ферромагнетик в слабое переменное магнитное поле, не способное довести его до насыщения намагниченности, то зависимость $B(H)$ имеет вид петли, изображенной в нижнем правом углу рис.6.1. Ее называют частной петлей гистерезиса. Линия, проведенная через вершины частных петель, практически совпадает с основной кривой намагничивания, которую получают при первоначальном намагничивании образца.

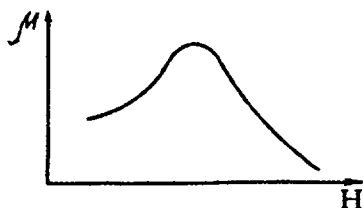


Рис. 6.2. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности H

Зависимость магнитной проницаемости μ от H может быть построена по основной кривой намагничивания с помощью формулы (6.2). Она имеет вид, показанный на рис. 6.2 (кривая Столетова). При росте H значение μ достигает максимума, а затем при насыщении намагниченности быстро падает. Значение μ в максимуме - предельную магнитную проницаемость μ_m - можно оценить по формуле (6.2), подставив в нее значения H_m и B_m (см. рис. 6.1).

Экспериментальная установка

Исследуемый образец представляет собой кольцевой ферритовый сердечник прямоугольного поперечного сечения площадью S . На сердечнике размещены две обмотки: первичная намагничивающая обмотка с числом витков n_1 и вторичная измерительная обмотка с числом витков n_2 . Первичная обмотка и последовательно с ней соединенный резистор R_1 подключены к генератору G (рис. 6.3). Ток i_1 в первичной обмотке возбуждает в сердечнике магнитное поле напряженностью

$$H = \frac{n_1}{l} i_1, \quad (6.3)$$

где $l = 2\pi r$ - длина окружности сердечника по средней линии.

С резистора R_1 на вход X осциллографа подается переменное напряжение $u_1 = R_1 i_1$. С другой стороны, $u_1 = a_x x$, где a_x - коэффициент горизонтального отклонения луча (в В/дел). Используя эти формулы для u_1 , преобразуем (6.3) к виду:

$$H = m_x x, \quad (6.4)$$

где

$$m_x = \frac{n_1 a_x}{2\pi r R_1} \quad (6.5)$$

есть масштаб оси X , который позволяет по измеренному горизонтальному отклонению луча x найти соответствующее ему значение напряженности магнитного поля H .

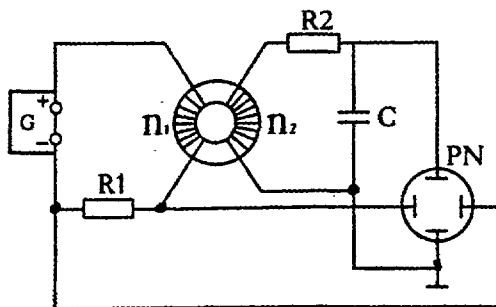


Рис. 6.3. Схема электрической цепи установки

Если напряжение на входе Y осциллографа отсутствует, то на экране будет видна горизонтальная линия, длина которой $2x_0$ соответствует удвоенной амплитуде напряженности $2H_0$.

Во вторичной обмотке индуцируется ЭДС (в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея):

$$E = n_2 \frac{d\Phi}{dt} = n_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (6.6)$$

где $\Phi = BS$ - магнитный поток через каждый виток.

В цепь вторичной обмотки включены последовательно резистор R_2 и конденсатор C , что позволяет получить на конденсаторе напряжение, пропорциональное B , и подать его на вход Y осциллографа. Действительно, индуцированная ЭДС обуславливает во вторичной цепи ток $i_2 = E/R_2$ (если пренебречь индуктивным сопротивлением обмотки и емкостным сопротивлением конденсатора, которые много меньше сопротивления R_2). Ток i_2 создает на конденсаторе напряжение:

$$u_c = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{n_2 S}{R_2 C} B. \quad (6.7)$$

Учитывая, что $u_y = u_c = a_y u$, где a_y - коэффициент вертикального отклонения луча, преобразуем (6.7) к виду:

$$B = m_y u, \quad (6.8)$$

где

$$m_y = \frac{R_2 C a_y}{S n_2} \quad (6.9)$$

масштаб оси Y , который позволяет по измеренному отклонению луча y найти соответствующее значение индукции магнитного поля B .

Если сигнал на вход X не подан, на экране осциллографа будет видна вертикальная линия, длина которой $2y_0$ соответствует удвоенной амплитуде магнитной индукции $2B_0$.

При одновременной подаче переменных напряжений $u_1 \approx H$ и $u_c \approx B$ на входы X и Y осциллограмма примет вид динамической зависимости $B(H)$, т.е. петли гистерезиса.

Проведение эксперимента

1. Ознакомьтесь с правилами техники безопасности. Выполните указанные в них рекомендации.
2. Проверьте правильность сборки электрической цепи согласно рис. 6.3. Включите осциллограф. На экране должна появиться светящаяся точка. Ручками горизонтального и вертикального смещения луча выведите ее в центр сетки экрана.
3. Включите генератор. Выставьте одну из рекомендованных частот. Плавно увеличивайте напряжение на выходе генератора, наблюдая при этом за изображением петли гистерезиса, пока на верхнем и нижнем концах петли не появятся участки насыщения (предельная петля гистерезиса). Если расстояние между ее вершинами по горизонтали $2x$ или по вертикали $2y$ меньше половины экрана, увеличьте размеры изображения, увеличив коэффициенты отклонения a_x или a_y каналов X или Y . Запишите в протокол установленные значения a_x и a_y . Результат согласуйте с преподавателем.
4. На осях, проходящих через центр петли, измерьте координаты точек x_c и y_0 (в делениях сетки, равных обычно 1 см), соответствующих значениям коэрцитивной силы H_c и остаточной индукции B_0 . Качество измерений можно улучшить, если измерять расстояния $2x_c$ и $2y_0$, соответствующие значениям $2H_c$ и $2B_0$. Измерьте также координаты x_m и y_m точки, соответствующей магнитной индукции насыщения B_m (см. рис 6.1, точка C).
5. Основную кривую намагничивания снимайте, начиная с предельной петли, ступенями уменьшая напряженность магнитного поля в образце (ток в

первичной обмотке). Целесообразно измерять расстояния $2x$ и $2y$ между вершинами петель. Результаты заносите в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Основная кривая намагничивания ферромагнетика

№ опыта	$2x$, дел	$2y$, дел	H , А/м	B , Т

Обработка результатов

1. По формулам (6.5) и (6.9) вычислите значения масштабов m_x и m_y (во избежание ошибок расчет масштабов выполните на занятии в лаборатории и результат согласуйте с преподавателем).
2. По измеренным значениям координат x_0, y_0, x_m, y_m и формулам (6.4) и (6.8) вычислите значения параметров H_c, B_0 и B_m, H_m .
3. Вычислите значения H и B , соответствующие координатам вершин частных петель гистерезиса из табл. 6.1. Результаты занесите в ту же таблицу. Постройте график $B(H)$ - основную кривую намагничивания.
4. Вычислите по формуле (6.2) предельную магнитную проницаемость μ_m .
5. Вычислите по формуле (6.2) магнитную проницаемость μ ферромагнетика во всех измеренных точках основной кривой намагничивания из табл. 6.1. Постройте график зависимости $\mu(H)$ - изменения магнитной проницаемости при намагничивании ферромагнетика.

Контрольные вопросы

1. Как зависят намагниченность J и индукция B ферромагнетика от напряженности магнитного поля H ?
2. Что такое магнитная проницаемость вещества? Как изменяется магнитная проницаемость при намагничивании ферромагнетика?
3. Как получить на экране осциллографа петлю гистерезиса? Какую роль играет RC -цепочка (последовательно соединенные резистор и конденсатор) во вторичной цепи?
4. Как отличить предельную петлю гистерезиса от частных петель? Какие параметры характеризуют предельную петлю гистерезиса ферромагнетика?
5. Опишите процедуру снятия основной кривой намагничивания ферромагнетика.