



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

Практикум

«Исследование свойств ферромагнетиков»

по дисциплине

«Физика»

Авторы

Шкиль Т.В.,
Беликова Т.С.,
Мардасова И.В.

Ростов-на-Дону, 2018

Аннотация

Работа содержит краткую теорию по разделу физики «Магнитные свойства вещества», описание рабочей установки и методику эксперимента.

Предназначена для студентов инженерных направлений подготовки всех форм обучения, в программу учебного курса которых входит выполнение лабораторных работ по физике (раздел «Электромагнетизм»).

Авторы

к.ф.-м.н., доцент Шкиль Т. В.,
к.ф.-м.н., доцент Беликова Т. С.,
к.ф.-м.н., доцент Мардасова И. В.

Оглавление

Лабораторная работа Э-25	4
Исследование свойств ферромагнетиков	4
Краткая теория	4
Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы	9
Порядок выполнения работы	10
Контрольные вопросы	13

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА Э-25

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Цель работы: исследование зависимости магнитной индукции и магнитной проницаемости ферромагнетика от величины напряженности внешнего магнитного поля.

Оборудование: ферромагнитный образец, две катушки, источник постоянного тока, реостат, соединительные провода, базовая установка «Кобра 3», персональный компьютер.

Краткая теория

Все вещества в природе обладают магнитными свойствами. При помещении в магнитное поле с индукцией \vec{B}_0 любое вещество намагничивается, в самом веществе возникает его собственное внутреннее магнитное поле \vec{B}' . Вектор магнитной индукции \vec{B} результирующего поля в веществе представляет собой сумму векторов магнитных индукций внешнего \vec{B}_0 и внутреннего \vec{B}' полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' . \quad (1)$$

Относительная магнитная проницаемость вещества μ показывает, во сколько раз изменяется (увеличивается или уменьшается) магнитная индукция в данном веществе по сравнению с вакуумом. Это безразмерная величина.

$$\mu = \frac{B}{B_0} .$$

Намагничивание вещества принято характеризовать намагниченностью \vec{J} – магнитным моментом единицы объёма.

Наряду с вектором магнитной индукции \vec{B} существует другая характеристика магнитного поля – напряженность \vec{H} , не зависящая от магнитных свойств среды. Напряженность магнитного поля имеет в магнетике такое же значение, что и в вакууме,

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} , \quad (2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma\text{Н}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная.

Вещества по своим магнитным свойствам подразделяются на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Магнитные свойства вещества определяются магнитными свойствами составляющих их атомов и молекул.

К диамагнетикам относятся вещества (инертные газы, висмут, цинк, золото, медь), которые намагничиваются противоположно внешнему полю, поэтому магнитная индукция B в таких веществах уменьшается по сравнению с вакуумом,

$$B = B_0 - B', \text{ т. е. } \mu < 1.$$

Парамагнетиками являются вещества (кислород, алюминий, платина, редкоземельные элементы), которые намагничиваются вдоль внешнего поля, поэтому в этих веществах магнитная индукция B увеличивается по сравнению с вакуумом,

$$B = B_0 + B', \mu > 1.$$

Все диа- и парамагнетики – это вещества, намагничивающиеся весьма слабо, их магнитная проницаемость близка к единице и не зависит от напряженности магнитного поля H . Наряду с диа- и парамагнетиками имеются вещества, способные сильно намагничиваться. Они называются ферромагнетиками.

Ферромагнетики или ферромагнитные материалы получили свое название от латинского наименования основного представителя этих веществ – железа (ferrum). К ферромагнетикам, кроме железа, относятся кобальт, никель, гадолиний, многие сплавы и химические соединения. *Ферромагнетики* – это вещества, способные очень сильно намагничиваться, в которых внутреннее (собственное) магнитное поле может в сотни и тысячи раз превышать вызвавшее его внешнее магнитное поле.

Свойства ферромагнетиков

1. Способность сильно намагничиваться

Значение относительной магнитной проницаемости μ в некоторых ферромагнетиках достигает величины 10^6 .

2. Магнитное насыщение

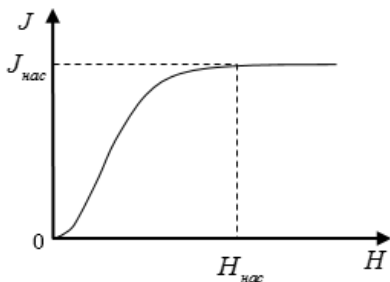


Рис. 1

На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость намагниченности \vec{J} от напряженности внешнего магнитного поля \vec{H} . Как видно из рис. 1, с некоторо-

го значения $H_{нас}$ численное значение намагниченности ферромагнетиков практически остается постоянным и равным $H_{нас}$.

3. Нелинейные зависимости $B(H)$ и $\mu(H)$

С ростом напряженности индукция сначала увеличивается, но по мере намагничивания магнетика ее нарастание замедляется, и в сильных полях \vec{B} растет с увеличением \vec{H} по линейному закону (рис. 2).

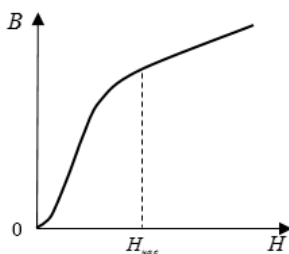


Рис. 2

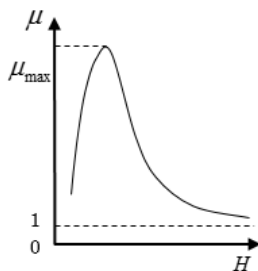


Рис. 3

Вследствие нелинейной зависимости $B(H)$, магнитная проницаемость μ , в соответствии с формулой

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (3)$$

сложным образом зависит от напряженности магнитного поля \vec{H} (рис. 3). Вначале, с увеличением напряженности поля μ возрастает от начального значения до некоторой максимальной величины, а затем уменьшается и асимптотически стремится к единице.

4. Магнитный гистерезис

Другой отличительной особенностью ферромагнетиков является их способность сохранять намагничение после снятия намагничивающего поля.

При изменении напряженности внешнего магнитного поля \vec{H} от нуля в сторону положительных значений индукция \vec{B} возрастает (рис. 4, участок $0a$).

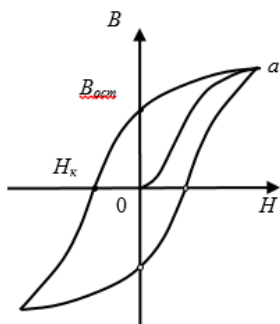


Рис. 4

При уменьшении \vec{H} до нуля магнитная индукция \vec{B} запаздывает в уменьшении и при значении \vec{H} , равным нулю, оказывается равной $\vec{B}_{ост}$ (остаточная индукция), т.е. при снятии внешнего поля ферромагнетик остается намагниченным и представляет собой постоянный магнит. Для полного размагничивания образца необходимо приложить магнитное поле обратного направления – $\vec{H}_к$. Величина напряженности магнитного поля $H_к$, которую надо приложить к ферромагнетику для его полного размагничивания, называется *коэрцитивной силой*.

Явление отставания изменения магнитной индукции B в ферромагнетике от изменения напряженности H переменного по величине и направлению внешнего намагничивающего поля называется магнитным гистерезисом.

При этом зависимость B от H будет изображаться петлеобразной кривой, носящей название *петли гистерезиса*, изображенной на рис. 4.

5. Наличие температуры (точки) Кюри

Точка Кюри – это характерная для данного ферромагнетика температура, при которой полностью исчезают ферромагнитные свойства.

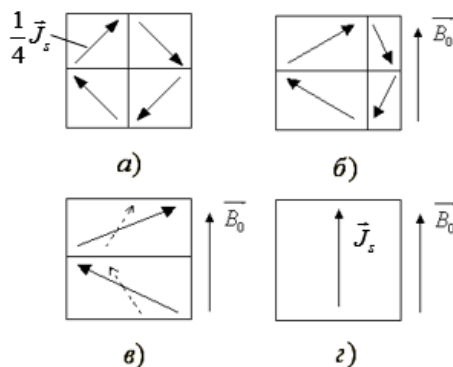
При нагревании образца выше точки Кюри ферромагнетик превращается в обычный парамагнетик. При охлаждении ниже точки Кюри он восстанавливает свои ферромагнитные свойства. Для различных веществ эта температура различна (для Fe – 770°C, для Ni – 260°C).

6. *Магнитострикция* – явление деформации ферромагнетиков при намагничивании. Величина и знак магнитострикции зависят от напряженности намагничивающего поля и природы ферромагнетика.

Согласно современным представлениям, магнитные свойства ферромагнетиков определяются спиновыми магнитными моментами (спинами) электронов; ферромагнетиками могут быть только кристаллические вещества, в атомах которых имеются недостроенные внутренние электронные оболочки с нескомпенсированными спинами. При этом возникают силы, вынуждающие спиновые магнитные моменты электронов ориентироваться параллельно друг другу. Эти силы называются силами обменного взаимодействия, они имеют квантовую природу и обусловлены волновыми свойствами электронов.

Под действием этих сил в отсутствие внешнего поля ферромагнетик разбивается на большое число микроскопических областей - доменов, размеры которых порядка 10^{-2} - 10^{-4} см. Внутри каждого домена спины электронов ориентированы параллельно друг другу, так что весь домен намагничен до насыщения, но направления намагничивания в отдельных доменах различны, так что полный (суммарный) магнитный момент всего ферромагнетика равен нулю. Как известно, любая система стремится находиться в состоянии, при котором ее энергия минимальна. Разбиение ферромагнетика на домены происходит потому, что при образовании доменной структуры энергия ферромагнетика уменьшается. Точка Кюри оказывается той температурой, при которой происходит разрушение доменов, и ферромагнетик утрачивает свои ферромагнитные свойства.

Одной из основных задач теории ферромагнетизма является объяснение зависимости $B(H)$ (рис. 2). Попробуем сделать это. Мы знаем, что в отсутствие внешнего поля ферромагнетик разбивается на домены, так что его полный магнитный момент равен нулю. Это схематически показано на рис. 5а, где изображен ферромагнетик, состоящий из четырех доменов одинакового объема, намагниченных до насыщения. При включении внешнего поля энергии отдельных доменов делаются неодинаковыми: энергия меньше для тех доменов, в которых вектор намагничивания образует с направлением поля острый угол, и больше в том случае, если этот угол тупой.



\vec{J}_s - намагниченность всего магнетика в состоянии насыщения.

Рис. 5

Поскольку, как известно, всякая система стремится к минимуму энергии, возникает процесс смещения границ доменов, при котором объем доменов с меньшей энергией возрастает, а с большей энергией уменьшается (рис. 5б). На рис. 6 процесс смещения границ доменов соотнесён с кривой зависимости $B = f(H)$. В случае очень слабых полей смещения границ обратимы и точно следуют за изменениями поля (если поле выключить, намагниченность снова будет равна нулю). Этот процесс соответствует участку $0a$ кривой $B(H)$ (рис. 6). При увеличении

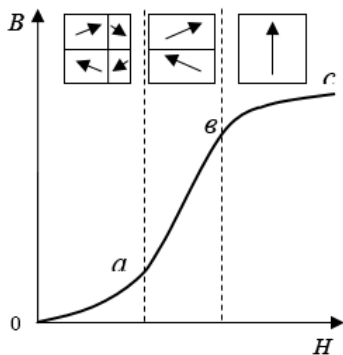


Рис. 6

поля смещения границ доменов делаются необратимыми.

При достаточной величине намагничивающего поля энергетически невыгодные домены исчезают (рис. 5в, т.е. участок ab рис. 6). Если поле увеличивается еще больше, происходит доворачивание магнитных моментов доменов по полю, так что весь образец превращается в один большой домен (рис. 5г, т.е. участок bc рис. 6).

Описание экспериментальной установки и методики выполнения работы

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 7.

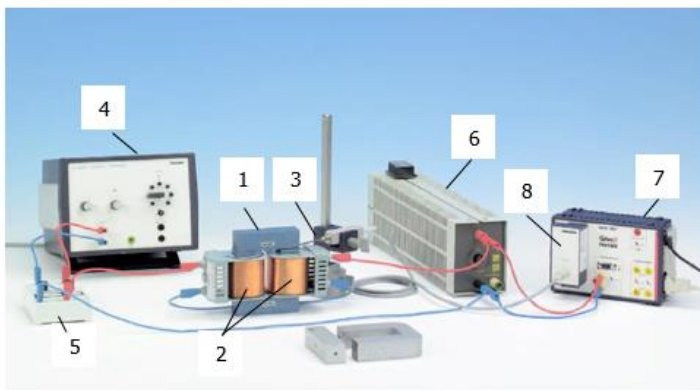


Рис. 7

Иследуемый ферромагнитный образец представляет собой металлический сердечник 1, который помещён внутри двух намагничивающих катушек 2. При пропускании тока через катушки сердечник намагничивается, величину магнитной индукции поля в сердечнике измеряют с помощью датчика Холла 3. Питание осуществляется от универсального источника тока 4; переключатель 5 позволяет изменять направление тока на противоположное. К катушкам подключён реостат 6 сопротивлением 10 Ом, сигнал с которого подаётся на аналоговый вход базовой установки «Кобра 3» 7, подключённой к персональному компьютеру.

Кабель датчика Холла соединён с измерительным модулем «Сила/Тесла» 8, а сам модуль подключён к модульному порту базовой установки. Установка «Кобра 3» должна быть размещена как можно дальше от катушек во избежание помех под влиянием сильных магнитных полей при передаче данных.

Поскольку интерфейс «Кобра 3» измеряет падение напряжения на реостате U , сила тока в цепи реостата и катушек рассчитывается по формуле

$$I = \frac{U}{R},$$

где $R = 10 \text{ Ом}$ – сопротивление реостата.

Напряжённость магнитного поля внутри сердечника определяется формулой

$$H = \frac{N}{\ell_{cp}} = n \cdot I, \quad (4)$$

где $N = 1200$ – число витков в обеих катушках;

$\ell_{cp} = 0,344 \text{ м}$ – длина средней линии сердечника;

$n = \frac{N}{\ell_{cp}} = 3488 \text{ м}^{-1}$ – плотность витков, т.е. их число, приходящееся на единицу длины средней линии.

Индукция B магнитного поля измеряется с помощью датчика Холла, помещённого под верхнюю пластину сердечника. Значение индукции внутри сердечника и в воздушном зазоре, куда помещён датчик, одинаково.

Порядок выполнения работы

1. Поместить датчик Холла под верхнюю пластину сердечника.

Внимание! В штативе датчик Холла должен быть

установлен маркировкой вверх; сам датчик должен быть расположен над правой намагничивающей катушкой.

2. Подключить персональный компьютер (ПК) к «Кобре 3»; подключить ПК, «Кобру 3» и универсальный источник питания к сети; включить ПК.

3. Запустить программу Measure; на рабочем столе выбрать на панели инструментов «Прибор», в появившемся меню выбрать «Сила/Тесла». После этого открывается окно установки параметров измерений. Проверить параметры измерений в соответствии с приложением к работе. **Команда «Ручной ввод» не должна быть выделена синей полосой!** Нажать «Далее». На экране появляется окно результатов измерений тока I и магнитной индукции B .

4. Включить источник питания в режиме напряжения V ; переключатель «Power» – на отметке 4.

5. Перед началом эксперимента необходимо убедиться в том, что ферромагнетик полностью размагничен, т. е. при $I = 0$ $B = 0$. Размагничивание производится перед началом работы техническим персоналом лаборатории следующим образом.

Если на экране B и I имеют одинаковые знаки, переключателем поменять направление тока. При этом в катушках будет возникать магнитное поле, обратное к остаточной намагниченности.

Менять направление тока переключателем можно только при напряжении равном нулю!


Регулятором напряжения V на панели источника питания резко повысить и сбросить напряжение. Повторить эту процедуру несколько раз, постепенно уменьшая напряжение, пока намагниченность не станет равной нулю ($B = 0$). При этом на дисплее знаки B и I должны быть положительными. После этого нажать клавишу «Пробел», зафиксировав таким образом первую экспериментальную точку.

6. Регулятором напряжения медленно с шагом $0,05 A$ увеличивать силу тока до $1 A$; после каждого шага нажимать клавишу «Пробел».

7. Уменьшать силу тока с шагом $0,1 A$ до нуля. Переключателем поменять направление тока и с шагом $0,1 A$ увеличивать силу обратного тока до $-1 A$, затем уменьшать с тем же шагом до нуля.


8. Переключателем изменить направление тока и с шагом $0,1 A$ увеличивать силу тока до $1 A$; закончить измерения нажатием

кнопки «Зарыть». После этого уменьшить силу тока до нуля.

9. Результаты измерений представляются на экране в виде петли гистерезиса, по которой можно определить коэрцитивную силу $H_{\kappa} = n \cdot I_{\kappa}$ (I_{κ} – сила тока при $B = 0$) и остаточную индукцию $B_{ост}$ (при $I = 0$). Для этого на панели функций выбрать «Обзор» (пиктограмма ) , после чего на экране появятся две независимые системы координат 1 и 2. Начало первой надо курсором совместить с точкой петли гистерезиса, соответствующей I_{κ} , а начало второй – с $B_{ост}$. В правом верхнем углу экрана появятся координаты этих точек: $X_1 = I_{\kappa}$, $Y_1 = 0$; $X_2 = 0$, $Y_2 = B_{ост}$. Записать значения $H_{\kappa} = n \cdot I_{\kappa}$ и $B_{ост}$ в таблицу.

Таблица

$n = 3488 \text{ м}^{-1}$, $H_{\kappa} =$ $\frac{A}{\text{м}}$, $B_{ост} =$ Тл				
№	I, A	$H, \frac{A}{\text{м}}$	$B, \text{Тл}$	μ
1				
2				
...				
20				

10. Для выведения таблицы результатов измерений на экран на панели функций выбрать «Таблицу данных» (пиктограмма ); переписать экспериментальные данные для значений силы тока от 0 до 1 A , т.е. для значений B от нуля до максимального значения.

11. Закрывать программу, выключить аппаратуру.

12. По формуле (4) $H = n \cdot I$ рассчитать значения H , занести их в таблицу.

13. Рассчитать по формуле (3) значения μ и занести их в таблицу.

14. Построить график зависимости $\mu = f(H)$.

15. По данным таблицы построить график зависимости $B = f(H)$.

16. Построить петлю гистерезиса; для этого нанести на оси B и H точки, соответствующие H_{κ} , $B_{ост}$, $-H_{\kappa}$, $-B_{ост}$, точку с ко-

ординатами (H_{\max} , B_{\max}) и симметрично точку с координатами ($-H_{\max}$, $-B_{\max}$). Построить по этим точкам петлю гистерезиса в соответствии с рис. 4.

Контрольные вопросы

1. Какая связь существует между магнитной индукцией \vec{B} и напряженностью магнитного поля \vec{H} (привести формулу), в чем сходство и различие этих величин?
2. Что такое μ , μ_0 ?
3. Что происходит при помещении вещества в магнитное поле?
4. Какие вещества называются диамагнетиками? парамагнетиками? ферромагнетиками?
5. Что представляют собой домены?
6. Каковы характерные особенности ферромагнетиков?
7. Какова графическая зависимость $B = f(H)$ для ферромагнетиков?
8. Как изображается графически зависимость $\mu = f(H)$ для ферромагнетиков?
9. Что представляет собой явление магнитного гистерезиса? Изобразить графически.
10. Что такое остаточное намагничивание, коэрцитивная сила?