

Лабораторная работа №338

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

**Приборы и принадлежности:** электрические печи с ферромагнитными образцами, автотрансформатор РНШ (регулятор напряжения школьный), амперметр, термомпара, два милливольтметра.

**Введение.** Основные особенности ферромагнитного состояния вещества заключаются в следующем.

1. Эти вещества могут быть сильно намагничены даже в слабом магнитном поле.

2. Магнитная восприимчивость, определяемая как отношение намагниченности к напряженности действующего на вещество магнитного поля, изменяется с изменением самого поля (она является его функцией).

3. Намагниченность не является однозначной функцией поля, а зависит от магнитной предыстории ферромагнетика, т.е. от тех магнитных полей, действию которых данное вещество подвергалось ранее.

4. При циклическом изменении поля, действующего на вещество, намагниченность изменяется по так называемой кривой гистерезиса.

5. Ферромагнитные тела сохраняют намагниченность после того, как внешнее магнитное поле уменьшено до нуля (состояние остаточного намагничения).

6. Каждому ферромагнитному веществу соответствует некоторая определенная температура, выше которой перечисленные особенности ферромагнитного состояния исчезают и оно обретает парамагнитные свойства. Такая температура называется *температурой* или *точкой Кюри*. Иногда температура Кюри лежит в *узкой* температурной области.

По современным представлениям любой ферромагнетик состоит из большого числа областей самопроизвольного (или спонтанного) намагничивания – *доменов*, в каждой из которых магнитные моменты электронов устанавливаются в одном направлении (поэтому каждый домен намагничен до насыщения), обычно отличающемся от направления намагниченности в соседних областях. Причина образования *доменов* объясняется существованием в ферромагнетике особого рода связи между спинами электронов. В каждом образце ферромагнетика устанавливается такое разбиение на домены, которое удовлетворяет условию минимума свободной энергии кристалла, состоящей в основном из трех слагаемых: энергии обменного взаимодействия, магнитной энергии и энергии магнитной анизотропии. Физические предпосылки, обуславливающие разбиение

ферромагнетика на области самопроизвольного намагничения, были выявлены Я.И.Френкелем, Я.Г.Дорфманом, Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшицем и др.

Так как в кристаллическом образце в отсутствие магнитного поля существует хаотическое распределение векторов намагничения доменов, поэтому весь образец оказывается ненамагниченным. Но при наложении слабого магнитного поля начинается перераспределение магнитных моментов доменов; происходит рост объема доменов с энергетически выгодным направлением магнитного момента по отношению к полю за счет соседних доменов, в которых магнитный момент занимает менее выгодное направление (процесс *смещения границ*). В более сильных полях за смещением границ следует процесс поворота магнитных моментов доменов в направлении поля (процесс *вращения*).

Величина спонтанного намагничения зависит от температуры. При повышении температуры намагниченность насыщения убывает сначала медленно, а по мере приближения к точке Кюри изменение становится более быстрым.

Если ферромагнетик находится в магнитном поле, постоянном по величине, то зависимость его намагниченности от температуры может быть различной для различных полей. При достаточно большом магнитном поле повышение температуры ферромагнетика приводит к непрерывно ускоряющемуся снижению намагниченности, она резко снижается вблизи точки Кюри почти до нуля. Эти изменения намагниченности обратимы: при понижении температуры изменение намагниченности идет по той же кривой в обратном направлении. В слабом поле намагниченность (а также и магнитная проницаемость) сначала возрастает с повышением температуры, а после прохождения через максимум падает до низких значений вблизи точки Кюри.

Таким образом, при температуре ниже точки Кюри ферромагнитные тела характеризуются наличием доменов. При температуре Кюри средняя энергия теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его спонтанной намагниченности, вследствие чего ферромагнетик превращается в парамагнетик. Точка Кюри – температура фазового перехода второго рода, связанного с исчезновением атомного упорядочения.

**Целью** данной работы является определение *температуры Кюри* образцов железа и никеля.

**Метод измерения.** Существует несколько методов определения температуры Кюри ферромагнетиков [1]. Большинство из них сводится к тому, чтобы, нагревая ферромагнитный образец, зафиксировать температуру, при которой происходит резкое уменьшение намагниченности при постоянной величине магнитного поля. Разнообразие заключается в способах измерения намагниченности или, по крайней мере, способах наблюдения за ее поведением.

Один из методов, *метод электромагнитной индукции*, заключается в измерении ЭДС индукции в катушке, которая обвивает исследуемый образец,

находящийся в переменном магнитном поле постоянной амплитуды. С повышением температуры магнитный поток в образце уменьшается за счет снижения намагниченности, а вблизи точки Кюри резко падает, что вызывает резкий спад измеряемой ЭДС индукции.

Таким образом, для определения точки Кюри нужно снять кривую зависимости ЭДС индукции (или величины ей пропорциональной – индукционного тока) от температуры.

Температура образца измеряется с помощью термопары. Ее действие основано на явлении *термоэлектричества* и заключается в следующем: при тесном контакте двух (пары) *разнородных* металлических проводников некоторые электроны могут переходить из одного металла в другой вследствие различия в *уровнях Ферми*. Металл, в котором образуется избыток электронов, заряжается отрицательно, а его «партнер», из которого электроны «ушли», – положительно. На границе металлов возникает контактная разность потенциалов, которая называется *внутренней*. Если из двух разнородных металлов составить цепь и места соединения поддерживать при различной температуре  $t_1$  и  $t_2$ , то в цепи возникнет электродвижущая сила, называемая *термоэлектродвижущей* (рис.1).

Термо-ЭДС вызывается двумя причинами.

1. Уровень Ферми металлов  $A$  и  $B$  зависит от температуры, поэтому контактная разность потенциалов для спаев, находящихся при различной температуре, не одинакова и сумма скачков потенциала в замкнутой цепи отлична от нуля.

2. Вдоль каждого проводника, даже однородного, возникает градиент концентрации электронов, если он нагрет неоднородно, что приводит к диффузии электронов в сторону более холодного конца проводника.

Учет влияния обоих эффектов приводит к следующему выражению для ЭДС термопары:

$$\varepsilon = C(t_2 - t_1),$$

где  $C$  – постоянная, численно равная ЭДС, возникающей в термопаре при разности температур спаев 1К. Таким образом, ЭДС термопары пропорциональна разности температур ее спаев. Практика, однако, показывает, что линейная зависимость хорошо выполняется лишь в небольшом интервале температур. При большой их разности эта зависимость отличается от линейной, т.е. коэффициент  $C$  не остается постоянным. Поэтому термопары нуждаются в градуировке.

Термопары изготавливаются из различных пар металлов. В данной работе для измерения температуры железного образца применяется хромель-

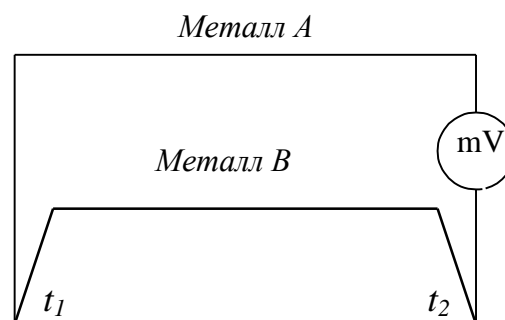


Рис.1

алюмелевая термопара, а для измерения температуры никелевого образца – медь-константановая.\*

Милливольтметр с термопарой образуют термоэлектрический пирометр (пирометр – термометр для измерения температур значительно выше комнатной, от греческих слов *πυρ* – огонь и *μετρεω* – измеряю). Градуировочные графики для пирометра приводятся для случая, когда температура одного из спаев равна 0°C. Если при измерении температура этого спаев выше нуля (комнатная, например), то прибор покажет несколько меньшую, по сравнению с действительной, температуру. В этом случае нужно ввести поправку, прибавив к показаниям пирометра температуру свободного (холодного) спаев – комнатную.

**Описание установки.** В электрическую печь, нагреваемую спиралью 1, помещается исследуемый образец 3 (рис.2). Нагревательная спираль является

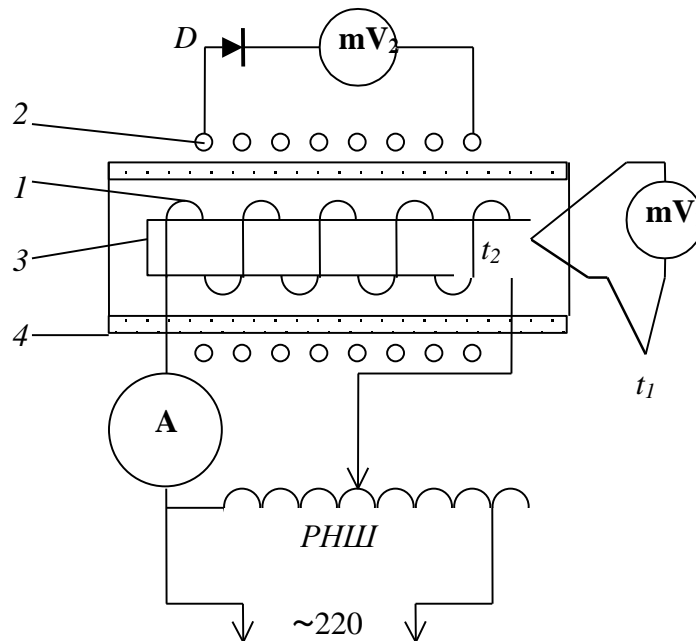


Рис.2

одновременно намагничивающей обмоткой. Измерительная (вторичная) катушка 2 замкнута на вольтметр mV<sub>2</sub>. Таким образом, эти обмотки представляют собой трансформатор с ферромагнитным сердечником, роль которого выполняет исследуемый образец.

Переменный ток  $I_1$ , протекающий по спирали (первичной катушке), создает в ней магнитный поток

$$\Phi_1 = L_1 I_1, \quad (1)$$

где  $L_1$  – индуктивность первичной катушки.

Индуктивность катушки зависит от ее объема  $V$ , числа витков на единицу длины  $n_1$  и магнитной проницаемости вещества  $\mu$ , в данном случае – испытуемого образца, и определяется формулой

$$L_1 = \mu_0 \mu n_1^2 V. \quad (2)$$

Магнитный поток  $\Phi_1$  пронизывает и вторичную катушку 2 с числом витков  $N_2$ .

При изменении тока  $I_1$  меняется магнитный поток, и во вторичной катушке 2 наводится ЭДС индукции

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_1}{dt} N_2 = L_1 N_2 \frac{dI_1}{dt}. \quad (3)$$

Первичная обмотка (спираль электрической печи) отделена от вторичной слоем теплоизолирующего материала 4. Разность температур образца и комнатной измеряется термопарой, один спай которой находится в образце, помещенном в печь, а другой – снаружи, в термостате, при комнатной температуре.

Когда температура испытуемого образца достигает точки Кюри, его магнитная проницаемость  $\mu$  от большого значения падает до единицы. Индуктивность  $L_1$ , а вместе с ней и ЭДС индукции во вторичной катушке  $\varepsilon_2$  резко уменьшается (см. формулы (2) и (3)). При этом ток  $I_2$  во вторичной катушке также уменьшается, что и регистрирует экспериментатор.

В данной работе предлагается измерить температуру Кюри железного и никелевого образцов. Образцы находятся в двух разных печах, укрепленных на лабораторной панели.

С помощью двух тумблеров, также расположенных на панели и имеющих два положения «железо» – «никель», измерительные приборы из установки с железным образцом переключаются на установку с никелевым.

**Измерения.** 1. Электрическая цепь лабораторной установки полностью собрана и следует лишь проверить наличие всех приборов, указанных на схеме (см. рис.2).

2. Поставьте тумблеры-переключатели в положение «железо».

3. Включите автотрансформатор *РНШ* в сеть 220 В и установите ток **1,6 А (для железа)**.

4. По мере нагревания печки следите за показаниями термопарного милливольтметра  $mV_1$  и через каждые два деления его шкалы записывайте показания обоих милливольтметров  $mV_1$  и  $mV_2$  в таблицу.

Когда ток во вторичной обмотке и, следовательно, показания милливольтметра  $mV_2$  начнут уменьшаться, показания следует снимать через одно деление шкалы термопарного милливольтметра.

Нагревание образца следует прекратить и печь отключить от сети, когда после крутого спада индукционный ток практически перестанет уменьшаться и остается почти на одном уровне.

5. Повторите все измерения с **никелевым** образцом (ток печи **1,0 А**).

| <i>Железо</i> |           | <i>Никель</i> |           |
|---------------|-----------|---------------|-----------|
| $U_1, мВ$     | $U_2, мВ$ | $U_1, мВ$     | $U_2, мВ$ |
|               |           |               |           |

**Обработка результатов измерений.** 1. По полученным данным, содержащимся в таблице, постройте графики зависимости напряжения  $U_2$  от напряжения термопары (т.е. фактически от температуры, в силу существующей между ними прямопропорциональной зависимости) для обоих ферромагнитных образцов. Графики выглядят примерно так, как показано на рис.3.

2. Чтобы определить температуру Кюри в условиях данного опыта, на графике проводят касательную к кривой в точке перегиба (точка  $A$ ) и

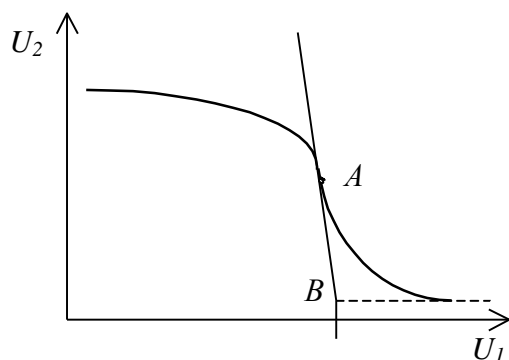


Рис.3

продолжают ее до пересечения с асимптотой, проведенной к конечной части графика (на рис.3 она проведена штриховой линией). Точку их пересечения (т.  $B$  на графике) спроецируйте на ось абсцисс. По полученному таким образом значению напряжения  $U_1$  и градуировочному графику соответствующей термопары найдите температуру образца относительно комнатной.

3. Истинное значение температуры Кюри получите, прибавив значение температуры в помещении лаборатории во время проведения эксперимента, так как холодный спай термопары находится в пассивном термостате именно в таких условиях.

4. Произведите оценку погрешностей графического определения температуры Кюри.

Контрольные вопросы

1. Сравните между собой диа-, пара- и ферромагнетики. Назовите основные свойства ферромагнетиков.
2. Что такое точка Кюри в ферромагнетике?
3. Как зависит намагниченность ферромагнетика от намагничивающего поля вдали от точки Кюри?
4. Как зависит намагниченность ферромагнетика от температуры в сильных и слабых полях?
5. Опишите метод определения точки Кюри в данной работе. Что показывает первый и что второй милливольтметры? Что является признаком того, что точка Кюри пройдена?
6. Чем измеряется температура ферромагнитного образца в ходе опыта? Объясните устройство и принцип действия данного пирометра.
7. Объясните на качественном уровне ход построенного Вами графика.

Список рекомендуемой литературы

1. Буравихин В.А., Шелковников В.Н., Карабанова В.П. Практикум по магнетизму. М.: Высшая школа, 1979. С. 103.
2. Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1977. §110, 119.
3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. С. 543-592.
4. Кортнев А.В., Рублев Ю.В., Куценко А.Н. Практикум по физике. М.: Высшая школа, 1963. С.313.
5. Савельев И.В. Курс общей физики: Электричество и магнетизм. М.: Наука, 1998. Кн.2. §7.9.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. М.: Наука, 1983. Т.3. §74, 79.

---

\* Одной из распространенных термопар является пара *хромель-копель*. Это связано с тем, что у данного спая самая большая термо-ЭДС ( $\mathcal{E}$  почти 70 мкВ/град) и широкий диапазон рабочих температур – от  $-50$  до  $600^\circ\text{C}$ .

Копель – сплав никеля с медью (около 57%). Он является отрицательным электродом в термопаре. Хромель – сплав никеля с хромом (9-10%) и кобальтом (около 1%). Хромель выполняет в термопаре роль положительного электрода.

Алюмель – сплав никеля (95%) с алюминием (2%), марганцем (2%), кремнием (1%).