

51. Измерение магнитных характеристик ферромагнитных материалов

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

4 июля 2013 г.

В работе используются: источник питания, двойное Ш-образное ярмо, набор образцов из ферромагнитных материалов, баллистический гальванометр, осветитель со шкалой, потенциометр, ключи, милливеберметр, вариак, катушка для размагничивания образцов.

Экспериментальная установка для исследования магнитных свойств ферромагнетиков с помощью двойного ярма представлена на рис. 2.

Ярмо прибора состоит из двух Ш-образных частей, на которые надеты две пары намагничивающих катушек с одинаковым числом витков, причём все четыре катушки включаются последовательно и создают поле, направление которого показано на рисунке. Средняя перемычка ярма имеет зазор, в котором помещена подвижная рамка, связанная через потенциометр Π с баллистическим гальванометром. Величина крайних зазоров может изменяться, позволяя проводить измерения на образцах различной длины. Принцип работы прибора аналогичен принципу работы электрического моста.

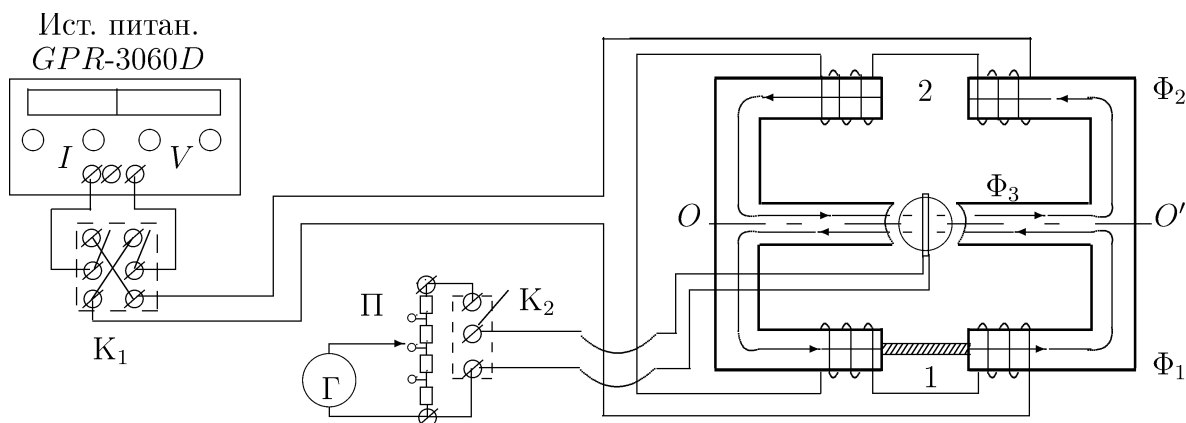


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Если части ярма, расположенные по обе стороны от плоскости OO' , совершенно одинаковы, то при включении тока в намагничивающие катушки магнитный поток в средней перемычке ярма отсутствует.

Если же в один из зазоров 1 или 2 вставить испытуемый образец, то баланс нарушается, и в перемычке создаётся магнитный поток, связанный простым соотношением с потоком в образце.

Выберем направления магнитных потоков так, как это показано на рис. 2. Тогда

$$\Phi_3 = \Phi_1 - \Phi_2, \quad (5)$$

где Φ_1 — поток в зазоре 1, Φ_2 — поток в зазоре 2, Φ_3 — поток в перемычке. (Наличие потоков рассеяния приводит к тому, что потоки, проходящие через зазор 2 и через вторую половину ярма, оказываются не равными друг другу. Существенно, однако, что потоки рассеяния слабо зависят от внесения

образца и поэтому всегда с хорошей точностью совпадают в зазорах 1 и 2. Формула (5) при этом выполняется очень точно.) Если образец помещается в зазоре 1, то

$$\Phi_1 = H_1(S_0 - \sigma) + B_1\sigma, \quad \Phi_2 = H_2S_0, \quad (6)$$

где B_1 — индукция в образце. Из (5) и (6) следует

$$\Phi_3 = (B_1 - H_1)\sigma + (H_1 - H_2)S_0. \quad (7)$$

В области, далёкой от насыщения, для ферромагнетиков справедливо неравенство $B_1 \gg H_1$, поэтому членом $H_1\sigma$ можно пренебречь по сравнению с $B_1\sigma$.

Заметим, кроме того, что напряжённости поля в зазорах 1 и 2 с большой точностью равны друг другу. В этом можно убедиться, рассматривая циркуляции вектора H по контурам Φ_1 и Φ_2 . Составляющие циркуляции H , взятые по пути, проходящему по ярму, пренебрежимо малы. Токи в катушках и число витков в них для обоих путей интегрирования одинаковы. Одинаковы, следовательно, и напряжённости поля в обоих зазорах, поэтому

$$\Phi_3 \cong B_1\sigma. \quad (8)$$

Поток, проходящий через перемычку, равен, таким образом, потоку, пронизывающему образец; поток, проходящий через рамку, пропорционален поэтому искомому потоку. При повороте рамки на 90° через присоединённый к ней гальванометр проходит ток. Отброс стрелки баллистического гальванометра α пропорционален изменению магнитного потока в рамке и, следовательно, искомому потоку, проходящему через образец

$$B_1\sigma = A\alpha. \quad (9)$$

Коэффициент пропорциональности A характеризует чувствительность прибора и подлежит определению. Формула (9) позволяет, таким образом, находить индукцию образца по отбросу стрелки гальванометра. Напряжённость магнитного поля в образце определяется по величине намагничивающего тока.

Величина индукции ферромагнитного тела, помещённого во внешнее магнитное поле, зависит не только от материала образца, но и от формы. Образец, помещённый во внешнее магнитное поле, намагничивается. На его поверхностях образуются магнитные полюсы, расположенные таким образом, что создаваемое ими поле H_p направлено навстречу полю H_1 (рис. 3). Эффективное поле H_i , действующее внутри образца, будет

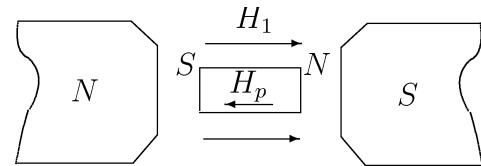


Рис. 3

$$H_i = H_1 - H_p. \quad (10)$$

Магнитная индукция ферромагнетика

$$B = H_i + 4\pi J. \quad (11)$$

Размагничивающее поле H_p пропорционально намагниченности вещества

$$H_p = N_p J. \quad (12)$$

Таким образом, для достижения величины магнитной индукции, равной B , в теле, характеризующимся размагничивающим фактором N_p , необходимо приложить внешнее поле

$$H_1 = H_i + H_p = H_i + N_p J = H_i + \frac{N_p}{4\pi}(B - H_i). \quad (13)$$

Теоретический расчёт коэффициента размагничивания N_p очень сложен и может быть выполнен только для эллипсоида вращения. Например, для шара $N_p/4\pi = 1/3$, для тонкого диска, когда H перпендикулярно плоскости диска $N_p/4\pi = 1$, для бесконечно длинного цилиндра, когда H перпендикулярно оси цилиндра $N_p/4\pi = 1/2$, а когда H параллельно оси цилиндра $N_p/4\pi = 0$. В остальных случаях, коэффициент размагничивания определяется экспериментально.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается: определить константу A в формуле (9), чтобы прокалибровать отклонения гальванометра в единицах магнитной индукции B ; снять начальную кривую намагничивания и предельную петлю гистерезиса для образца из углеродистой стали, чтобы определить индукцию насыщения, коэрцитивную силу и максимальную магнитную проницаемость материала; определить размагничивающий фактор образца.

I. Подготовка приборов к работе

Не включайте приборы в сеть без предварительной настройки.

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой, изображённой на рис. 2.
2. Ознакомьтесь с назначением и расположением ручек управления источника питания GPR (см. в конце папки).

Подключите установку к сети (тумблер в левом углу фронтальной доски стола).

Разомкните ключи K_1 и K_2 , установите все четыре ручки регулировки источника питания в нулевое положение и включите прибор в сеть.

3. Отрегулируйте источник питания для калибровки гальванометра:
 - а) замкните ключ K_1 , установите обе ручки регулировки тока на максимум (поворотом по часовой стрелке до упора); ручку тонкой/FINE регулировки напряжения — на максимум, грубой/COARSE — на 5,5–5,7 В; при этом прибор показывает ток, текущий через катушки $I = 0,4$ А;

б) поставьте ручку грубой регулировки тока на 0, ручкой плавной регулировки тока установите предельный ток для этого упражнения — 0,35 А (при этом должен срабатывать индикатор стабилизации тока CC);

установите обе ручки регулировки V на 0 и в дальнейшем плавно увеличивайте ток, используя ТОЛЬКО регуляторы напряжения (при неизменном положении регуляторов тока);

в) проследите, как увеличивается ток при работе с регуляторами V : сначала ручкой V /ПЛАВНО увеличивайте ток шагами 0,02–0,03 А в диапазоне от 0 до 0,2 А, затем ручкой V /ГРУБО диапазоне от 0,2 до 0,35 А шагами по 0,05 А;

г) сначала ручкой V /ГРУБО, затем V /ПЛАВНО уменьшите ток до нуля.

II. Калибровка гальванометра

1. Для калибровки гальванометра [определения константы A в формуле (9)] необходимо снять кривую начального намагничивания образца, изготовленного из железа, имеющего форму тонкостенного цилиндра площадью сечения $\sigma = 0,58 \text{ см}^2$. Для удобства измерений железный образец надет на дюралевый цилиндр той же длины. Перед началом измерений образец необходимо размагнитить.

Установка для размагничивания размещена на отдельном столе (у окна). Поместите образец в соленоид и включите в сеть источник переменного тока (вариак). Амплитуду тока сначала следует увеличить до максимума, а затем медленно (за 5–10 с) уменьшить до нуля. Закончив, отключите вариак от сети.

2. Отключите катушки от источника питания (разомкните ключ K_1). Вставьте в один зазор ярма короткий дюралевый стержень, в другой — размагниченный исследуемый образец (образец должен быть в контакте с полюсами ярма) и замкните ключ K_1 .

3. Подключите измерительную рамку к гальванометру ключом K_2 (штырь потенциометра в среднем положении). Установите минимальный ток в намагничивающих катушках ($\simeq 0,02$ – $0,03$ А) и снимите отброс гальванометра Δx мм ($\sim \alpha$), возникающий при повороте измерительной рамки на 90° .

Плавно увеличивая ток до максимума в режиме, выбранном при настройке прибора ($\simeq 0,35$ А), определите для каждого тока отброс гальванометра Δx .

Если изменение тока ΔI окажется больше намеченного, нельзя уменьшать ΔI , т.к. это исказит ход кривой намагничивания; следует размагнитить образец и начать измерения заново с нулевого тока.

Закончив измерения, сначала ручкой V /ГРУБО, затем V /ПЛАВНО уменьшите ток до нуля; разомкните ключ K_1 и уберите цилиндры из зазоров.

III. Начальная кривая и петля гистерезиса для образца из углеродистой стали

1. Подготовьте источник питания в соответствии с п I.3а) задания, установив $V = 13 \text{ В}$, $I_{\max} = 0,9 \text{ А}$.

Поставьте ручку грубой регулировки тока на 0, ручкой плавной регулировки тока установите предельный ток для этого упражнения — 0,75 А,

Установите обе ручки регулировки V на 0 и подберите режим (шаг) плавного увеличения тока от 0 до 0,75 А (используя регуляторы V).

2. Вместо образца из железа вставьте в зазор ярма размагниченный образец из углеродистой стали с таким же ($0,58 \text{ см}^2$) сечением. Стальной образец, имеющий форму цилиндра, расположен в центре цилиндра из дюралаля.
3. Монотонно увеличивая ток от 0 до $I_{\max} = 0,75 \text{ А}$ (в выбранном режиме), снимите начальную кривую намагничивания стали $[\Delta x = f(I)]$ и переходите к предельной петле гистерезиса.

Для этого, дойдя до максимального тока, начинайте уменьшать ток в обратном порядке: сначала ручкой V /ГРУБО до 0,2 А, затем — ручкой V /ПЛАВНО до нуля.

При нулевом токе измените направление тока переключением двойного ключа и проведите измерения от 0 до $-I_{\max}$ и, наконец, от $-I_{\max}$ до I_{\max} с переключением направления тока в нуле (замкнутая петля).

В случае нарушения плавного приращения тока при снятии начальной кривой следует размагнитить образец и начать измерения сначала, а при снятии петли достаточно начать измерения с максимального тока. Нельзя, вернувшись на один шаг, повторить измерения.

IV. Определение размагнивающего фактора

Влияние коэффициента размагничивания можно наблюдать при намагничивании образца, помещённого в зазор ярма, размер которого больше длины образца.

1. Подготовьте источник питания в соответствии с п I.3а) задания, установив $V = 25 \text{ В}$, $I_{\max} = 1,8 \text{ А}$.

Поставьте ручку плавной регулировки тока на 0, ручкой I /ГРУБО установите предельный ток для этого упражнения — 1,5 А (горит CC).

Обе ручки регулировки V установите на 0 и подберите с их помощью режим работы (шаг 0,02–0,03 А в диапазоне от 0 до 0,2 А и шаг 0,1 А в диапазоне от 0,2 до 1,5 А).

2. Размагнитьте железный образец, надетый на более длинный дюралевый стержень (симметрично относительно концов стержня). При разомкнутом ключе вставьте образец в один зазор ярма, а в другой — дюралевый стержень такой же длины.

Снимите начальную кривую намагничивания, изменяя рабочий ток шагом 0,1 сначала ручкой V /ПЛАВНО от нуля до 0,2 А, затем ручкой V /ГРУБО от 0,2 до 1,5 А.

3. Можно с помощью милливольтметра оценить коэффициенты пересчёта $H = f(I)$ и $B = f(\Delta x)$, если при токе $I = 1,5 \text{ А}$ измерить поле в зазоре.

V. Обработка результатов

1. Постройте на графике кривую начального намагничивания в координатах $(\Delta x, H)$. Для данного зазора ярма напряжённость поля в зазоре H (в эрстедах) связана с силой тока I (в амперах) соотношением $H = 530I$.

Затем на тот же график нанесите кривую намагничивания железа в координатах (B, H) , пользуясь данными таблицы 1.

Т а б л и ц а 1

Кривая намагничивания железа

H (Э)	2	4	6	8	10	15	25	35	50	75	100	125	150	200
B (кГс)	1	2,0	2,95	3,7	4,4	6,85	10	12,1	14,2	16	17,2	18	18,8	19,5

Изменяя относительный масштаб B и Δx , добейтесь наилучшего совпадения обеих кривых. Таким образом, величина отклонения гальванометра будет проградуирована величиной индукции B .

2. Для образца из углеродистой стали постройте начальную кривую и петлю гистерезиса в координатах (B, H) . В нескольких точках начальной кривой определите дифференциальную магнитную проницаемость ($\mu_{\text{диф}} = dB/dH$) и постройте график в координатах $(\mu_{\text{диф}}, H)$.

Определите по графикам индукцию насыщения, коэрцитивную силу и максимальную магнитную проницаемость стали. Оцените погрешности и сравните результат с табличным.

3. Используя калибровку гальванометра $B = f(\Delta x)$, постройте на одном графике кривые начального намагничивания $B = f(H)$ для двух образцов из железа. Для большего зазора ярма напряжённость поля H (в эрстедах) связана с силой тока I (в амперах) соотношением $H = 435I$.

Проведите на графике горизонтальную прямую вблизи индукции насыщения и определите соответствующие значения H_1 и H_2 .

Пусть H_1 — значение внешнего поля для случая, когда зазор ярма равен длине образца. В этом случае влиянием размагничивающего фактора можно пренебречь. Тогда внешнее поле H_1 равно внутреннему полю в образце и, следовательно, равно внутреннему полю в образце для второго случая, т.к. индукции в образцах равны. По формуле (13) можно записать

$$H_2 = H_1 + \frac{N_p}{4\pi}(B - H_1) \approx H_1 + \frac{N_p}{4\pi}B.$$

Тогда коэффициент размагничивания будет равен

$$\frac{N_p}{4\pi} \approx \frac{H_2 - H_1}{B}.$$

Рассчитайте размагничивающий фактор для нескольких значений B (нескольких горизонталей) и оцените среднее значение размагничивающего фактора.

Исправлено 4-VII-2013