

сообщения
Объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

P13-93-423

В.В.Калиниченко

ВЫБОР СРЕДСТВ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБРАЗЦАХ
ПРИ ИСПЫТАНИИ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

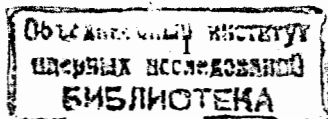
1993

Измерение магнитных характеристик материалов в постоянных магнитных полях (в частности, относительной магнитной проницаемости материалов) осуществляется на практике как на образцах замкнутой формы (тороиды), так и на образцах разомкнутой формы (цилиндры, полосы и т.д.).

Образцы тороидальной формы удобны для измерения тем, что напряженности поля для них можно определять расчетным путем с высокой точностью. Их основной недостаток — необходимость индивидуального выполнения двух обмоток (измерительной и намагничивающей) на каждом образце, что связано с большими затратами времени. При использовании тороидальных образцов погрешность измерения (определения) относительной магнитной проницаемости μ_r составляет порядка 1%, причем такое качество измерений достигается с помощью относительно простых средств.

Испытание образцов разомкнутой формы производится, в частности, с помощью пермеаметров различных типов, в которых испытуемые образцы включаются в искусственно создаваемые замкнутые магнитные цепи. При использовании пермеаметров исключается основной недостаток испытаний тороидальных образцов: здесь не требуется выполнять индивидуальные обмотки на каждом образце. Однако точность измерения величины относительной магнитной проницаемости с помощью пермеаметров существенно хуже, чем для тороидальных образцов: погрешность измерения μ_r составляет в среднем порядка $\pm 3\%$ (и более). При этом снижение точности измерения μ_r обусловлено, в основном, более низкой точностью определения напряженности магнитного поля в образцах разомкнутой формы.

Определение напряженности магнитного поля в исследуемом образце с помощью измерительных катушек, датчиков и потенциалометров основано на неизменности тангенциальной составляющей напряженности поля на границе двух сред [1]. Таким образом, напряженность магнитного поля в образце может быть определена посредством измерения напряженности поля на его поверхности. Довольно обширный набор средств для измерения напряженности магнитного поля в образцах описан в [1], здесь приведены их основные характеристики. Средства для измерения напряженности H магнитного поля работают в пермеаметрах в специфических условиях: измерения H должны производиться на поверхности или вблизи поверхности образца, из-за неоднородности магнитной индукции в образце напря-



женность H на его поверхности также неоднородна. Эти обстоятельства затрудняют выбор средств для измерения H в пермеаметрах.

В ЛЯП ОИЯИ было исследовано распределение магнитного поля вблизи поверхности цилиндрического образца. Для выполнения измерений напряженности поля вблизи поверхности образца была изготовлена специальная измерительная головка с датчиком Холла. Цилиндрический образец устанавливался в намагничивающее устройство пермеаметра, описанного в [2] (конструктивная схема намагничивающего устройства этого пермеаметра приведена на рис.1 в работе [3]). Измерения H производились следующим образом. Датчик Холла в процессе измерений перемещался в медианной плоскости (плоскости XZ , при $Y = 0$) вокруг цилиндрического образца (по окружности) в пределах от 0° до 360° ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$). Диаметр образца — 23 мм, рабочая длина образца (расстояние между полюсами намагничивающего устройства) — 50 мм, расстояние между центром датчика Холла и поверхностью образца составляло $\sim 1,15$ мм, размер рабочей зоны датчика Холла — $0,45 \times 0,15$ мм. Датчик Холла ориентирован таким образом, чтобы обеспечить измерение продольной составляющей (т.е. Y -составляющей) напряженности поля в месте расположения датчика вблизи поверхности образца. Ввиду малых размеров рабочей зоны датчика Холла обеспечиваются практически точечные измерения $H(\alpha)$. Измерения $H(\alpha)$ были выполнены для трех значений индукции в образце: $B_1 = 1,7$ Тл, $B_2 = 1,8$ Тл и $B_3 = 1,87$ Тл.

Результаты измерений $H(\alpha)$ представлены в таблице в относительных величинах $H(\alpha)/H_0$, где H_0 — значение $H(\alpha)$ при $\alpha = 0$. На рис.1 представлена зависимость $H(\alpha)/H_0$ в функции угла α при индукции в образце $B_2 = 1,8$ Тл (эта зависимость построена по данным таблицы; кривые для B_1 и B_3 не построены на рис.1, так как практически совпадают с кривой для

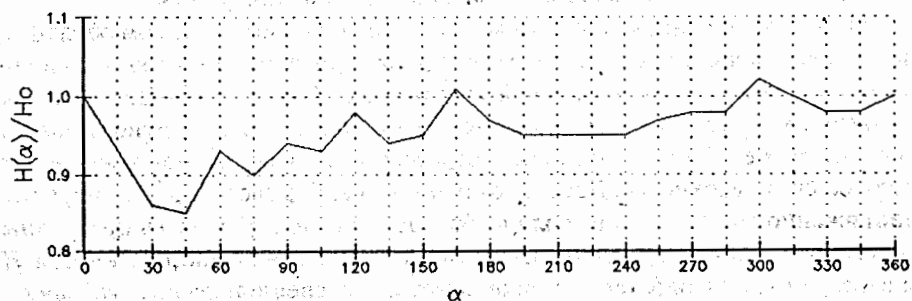


Рис.1. Зависимость $H(\alpha)/H_0 = f(\alpha)$ при индукции в образце $B_2 = 1,8$ Тл, α — в градусах

Таблица

α , град	$H(\alpha)/H_0$		
	B_1	B_2	B_3
0	1,00	1,00	1,00
15	0,92	0,93	0,93
30	0,84	0,86	0,86
45	0,83	0,85	0,85
60	0,93	0,93	0,93
75	0,88	0,90	0,91
90	0,93	0,94	0,92
105	0,93	0,93	0,93
120	0,97	0,98	0,98
135	0,94	0,94	0,95
150	0,93	0,95	0,94
165	1,00	1,01	0,99
180	0,97	0,97	0,98
195	0,93	0,95	0,94
210	0,95	0,95	0,95
225	0,95	0,95	0,96
240	0,94	0,95	0,95
255	0,94	0,97	0,96
270	0,98	0,98	0,97
285	0,97	0,98	0,98
300	1,02	1,02	1,01
315	1,00	1,00	0,99
330	0,97	0,98	0,97
345	0,98	0,98	0,98

B_2 и поэтому не дают дополнительной информации). Рис.1 дает наглядное представление о характере распределения напряженности поля на поверхности образца.

Отметим, что определение относительной магнитной проницаемости с помощью пермеаметров производится посредством измерения продольной составляющей магнитной индукции B в образце и продольной составляющей напряженности магнитного поля H на поверхности (или вблизи поверхности) образца. При этом измеренные значения B и H должны соответствовать основной кривой индукции, что достигается применением метода коммутирования для измерения B и H . Практически все методы определения индукции в образцах основаны на законе электромагнитной индукции. При этом индукция рассчитывается как отношение магнитного потока, возбуждаемого в образце (и проходящего через сечение измерительной катушки), к сечению образца, то есть определяется некоторое среднее значение индукции.

Как видно из рис.1, величина напряженности магнитного поля вблизи поверхности образца изменяется от точки к точке. Поэтому измеренное среднее значение индукции в образце в общем случае не соответствует измеряемой в точке на поверхности (или вблизи поверхности) образца напряженности магнитного поля, что приводит к появлению существенной ошибки при определении μ_r . Поэтому в пермеаметрах с целью снижения погрешности определения μ_r используемый метод измерения напряженности магнитного поля H на поверхности (или вблизи поверхности) образца должен обеспечивать опре-

деление среднего значения напряженности H (а не значение H в какой-либо точке). При этом указанные измерения средних значений B и H должны производиться на одном и том же участке образца.

С учетом отмеченных факторов представляется целесообразным испытание магнитных материалов в пермеаметрах производить на образцах, выполненных в виде прутков круглого сечения (цилиндров), а для измерения H в образцах использовать датчик, содержащий две цилиндрические катушки. Катушки располагаются коаксиально друг относительно друга на жестком каркасе, в который вставляется образец (коаксиально относительно катушек). При этом витки первой катушки должны как можно ближе примыкать к поверхности образца. Длина второй катушки должна быть равна длине первой катушки. Количество витков во второй катушке должно быть равно количеству витков в первой. Толщина намотки катушек должна быть как можно меньше. При выполнении этих условий можно считать, что вторая катушка в таком датчике охватывает первую.

Можно показать (в общем виде), что при последовательно-встречном соединении первой и второй катушек обеспечивается (с помощью интегратора и других необходимых узлов) измерение напряженности магнитного поля в объеме между двумя катушками, т.е. такой датчик позволяет измерять напряженность магнитного поля вблизи поверхности образца, причем обеспечивается измерение именно среднего значения напряженности H на том участке испытуемого образца, который примыкает к этому датчику (охвачен этим датчиком). При использовании только первой катушки (вторая катушка отключена) датчик обеспечивает измерение индукции магнитного поля (его среднего значения) на том же участке испытуемого образца.

На рис.2 представлена упрощенная блок-схема участка пермеаметра, на которой показаны элементы и узлы, обеспечивающие съем и преобразование сигналов с датчика. Здесь приняты следующие обозначения: 1 — датчик, содержащий первую $W1$ и вторую $W2$ катушки, 2 — коммутатор, содержащий ключи $S1—S4$, 3 — интегратор канала измерения напряженности магнитного поля H (канала H), 4 — интегратор канала измерения магнитной индукции B (канала B), 5 — коммутатор каналов H и B , 6 — цифровой вольтметр. На блок-схеме рис.2 необходимость подачи соответствующих управляющих сигналов на конкретные узлы показана стрелками.

Для включения канала B на коммутаторы 2 и 5 подаются соответствующие управляющие сигналы. При этом обеспечивается отключение входа интегратора 3 от соответствующего выхода датчика 1 (путем размыкания ключей $S1$ и $S2$) и подключение входа интегратора 4 к другому выходу датчика 1 (путем замыкания ключей $S3$ и $S4$), а также подключение входа цифрового вольтметра 6 к выходу интегратора 4. Заметим, что в этом режиме первая катушка $W1$ датчика 1 подключается ко входу интегратора 4.

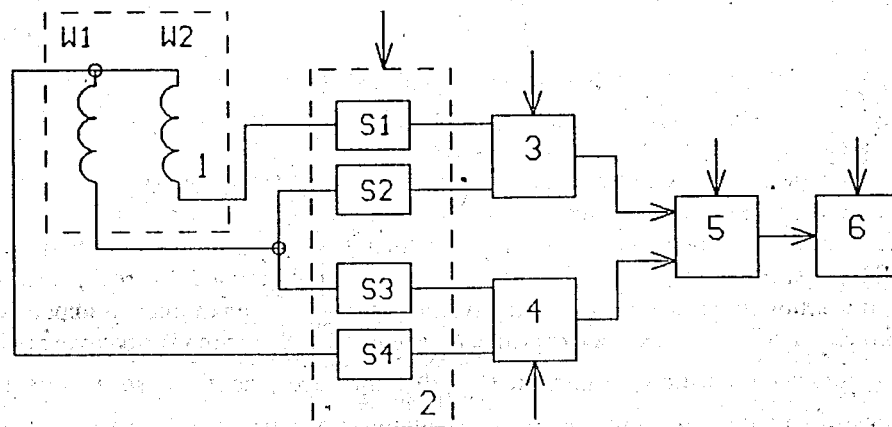


Рис.2. Упрощенная блок-схема участка пермеаметра

Величина изменения $\Delta\Phi$ магнитного потока Φ , проходящего через сечение первой катушки, определяется (на основании закона электромагнитной индукции $e = -W \frac{d\Phi}{dt}$) как

$$\Delta\Phi = -\frac{1}{W} \int_{t_1}^{t_2} e dt, \quad (1)$$

где W — число витков измерительной катушки (в нашем случае первой измерительной катушки $W1$), e — э.д.с., возбуждаемая в измерительной катушке, t_1 и t_2 — соответственно начальный и конечный временные пределы интегрирования.

Выходное напряжение U_i интегратора 4, на вход которого подается э.д.с. e , равно

$$U_i = -\frac{1}{\tau} \int e dt, \quad (2)$$

где τ — постоянная времени интегратора 4. Из соотношений (1) и (2) получаем

$$\Delta\Phi = \tau U_i / W. \quad (3)$$

Если принять, что площади сечений образца S_s и первой катушки S_1 пренебрежимо мало отличаются друг от друга ($S_s \approx S_1$), а также учесть, что при использовании метода коммутирования $\Delta\Phi = 2\Phi$, то из соотношения (3) получим

$$B = \tau U_i / 2WS_1$$

или

$$B = 0,5C_B U_i, \quad (4)$$

где C_B — постоянная канала измерения индукции, $C_B = \tau / WS_s$. Соотношение (4) подтверждает, что с помощью первой катушки W1 датчика I обеспечивается измерение индукции B в образце.

Рассмотрим режим измерения напряженности магнитного поля. В этом режиме соединенные последовательно-встречно первая и вторая катушки датчика I подключены ко входу интегратора 3 (через замкнутые ключи S1 и S2), при этом вход интегратора 4 отключен от датчика I (путем размыкания ключей S3 и S4), а к выходу интегратора I подключен цифровой вольтметр 6. Через сечения катушек S_1 (первой) и S_2 (второй) проходят соответственно магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , при этом количество витков в каждой из катушек равно W . При изменении потоков Φ_1 и Φ_2 в катушках датчика I возбуждаются соответственно э.д.с. e_1 и e_2 . В силу встречного включения обмоток на входе интегратора 3 действует их разность $e_2 - e_1$. Выходное напряжение U_i интегратора 3 равно

$$U_i = -\frac{1}{\tau} \int (e_2 - e_1) dt, \quad (5)$$

где τ — постоянная времени интегратора 3.

Величины изменений $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 определяются соответственно как

$$\Delta\Phi_1 = -\frac{1}{W} \int_{t_1}^{t_2} e_1 dt$$

и

$$\Delta\Phi_2 = -\frac{1}{W} \int_{t_1}^{t_2} e_2 dt,$$

откуда

$$\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1 = -\frac{1}{W} \int_{t_1}^{t_2} (e_2 - e_1) dt. \quad (6)$$

Если считать, как и ранее, что площади сечений образца S_s и первой катушки S_1 пренебрежимо мало отличаются друг от друга, то $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ можно представить как

$$\Delta\Phi_1 = \mu_r \mu_0 \Delta H S_1$$

и

$$\Delta\Phi_2 = \mu_r \mu_0 \Delta H S_1 + \mu_0 \Delta H (S_2 - S_1), \quad (7)$$

где ΔH — изменение напряженности магнитного поля, μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Здесь член $\mu_0 \Delta H (S_2 - S_1)$ представляет изменение магнитного потока в воздушном зазоре между катушками датчика I. Из соотношений (5) — (7), а также с учетом того, что при использовании метода коммутирования $\Delta H = 2H$, получаем

$$H = \tau U_i / 2W(S_2 - S_1) \mu_0$$

или

$$H = 0,5C_H U_i, \quad (8)$$

где C_H — постоянная канала измерения напряженности магнитного поля, $C_H = \tau / \mu_0 W(S_2 - S_1)$. Соотношение (8) подтверждает, что с помощью датчика I с двумя катушками обеспечивается измерение напряженности магнитного поля (ее среднего значения) вблизи поверхности образца.

Напомним, что для точного определения напряженности магнитного поля в образце необходимо измерять напряженность непосредственно на его поверхности. Использование для определения μ_r значений напряженности магнитного поля, измеренных вблизи поверхности образца, приведет к появлению дополнительной погрешности в определении μ_r . Для уменьшения указанной дополнительной погрешности необходимо по измеренным вблизи поверхности образца значениям напряженности магнитного поля определить соответствующие им значения напряженности на самой поверхности. Поправочные коэффициенты, устанавливающие связь между величинами напряженности поля на поверхности образца и вблизи его поверхности, могут быть найдены с помощью численных расчетов распределения поля в элементах намагничивающего устройства и в образце [3, 4].

Приведем некоторые конструктивные параметры одного из вариантов выполнения датчика I. Первая и вторая катушки содержат по 460 витков провода ПЭВ-2 диаметром 0,1 мм. Намотка выполнена в четыре слоя (в каждой катушке), длина намотки составляет 15 мм, толщина намотки каждой катушки — 0,6 мм. Средние диаметры первой и второй катушек составляют соответственно 24,8 и 27 мм (расчетные значения). Выводы первой катушки свиваются (начало и конец) и далее витой парой проводников подключаются к соответствующим входам коммутатора 2. Аналогично выполняется подключение второй катушки (на блок-схеме рис.2 эти особенности подключения датчика I к коммутатору 2 не показаны).

Определение C_B (постоянной канала измерения индукции B , см. соотношение (4)) производится с помощью образцовой катушки взаимной индуктивности по стандартной методике [1]. В ЛЯП ОИЯИ для этих испы-

таний используется мера взаимной индуктивности типа P5009 ($M = 0,01$ Гн). Измерение выходного напряжения интегратора осуществляется при этом с помощью цифрового вольтметра типа В7-34.

Определение постоянной C_H (постоянной канала измерения напряженности магнитного поля H , см. соотношение (8)) может быть произведено по стандартной методике [1] в соленоиде с известной постоянной. В ЛЯП ОИЯИ имеются другие возможности для выполнения измерения C_H с высокой точностью. В частности, для этой цели датчик I помещается в зазор электромагнита (в зону с высокой однородностью поля). Путем изменения величины постоянного тока возбуждения электромагнита изменяется индукция в зазоре от значения B_1 до значения B_2 (изменение индукции составляет $\Delta B = B_1 - B_2$) и с помощью цифрового вольтметра измеряется напряжение на выходе интегратора канала H . Очевидно, что изменение напряженности поля ΔH при этом равно

$$\Delta H = \Delta B / \mu_0.$$

Значения индукций B_1 и B_2 измеряются с помощью ЯМР-магнитометра [5].

В заключение отметим, что для одного из вариантов выполнения сборки (датчик I , интеграторы 3 и 4) постоянная $C_B = 0,5198$ Тл/В, а $C_H = 0,863 \cdot 10^6$ (А/м)/В. Настоящая работа выполнена по программе «Фундаментальная метрология». Исследования по этой программе ведутся в ОИЯИ при поддержке Министерства науки и технической политики Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кифер И.И. — Испытания ферромагнитных материалов. М.: Энергия, 1969.
2. Казакова Г.Г. и др. — Сообщение ОИЯИ P13-93-268, Дубна, 1993.
3. Ворожцов С.Б. и др. — Сообщение ОИЯИ P13-93-149, Дубна, 1993.
4. Vorozhtsov S.B. et al. — SDC-93-486, April 3, 1993.
5. Ивашкевич С.А. — Сообщение ОИЯИ 13-80-130, Дубна, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 ноября 1993 года.

Калиниченко В.В.

P13-93-423

Выбор средств для измерения напряженности магнитного поля в образцах при испытании ферромагнитных материалов

В ряде случаев для измерения напряженности магнитного поля в образцах при испытании ферромагнитных материалов в пермеаметрах целесообразно использовать двухкатушечные датчики. Ряд вопросов, связанных с использованием таких датчиков, обсуждается в данной работе.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1993

Перевод М.И.Потапова

Kalinichenko V.V.

P13-93-423

Choice of Means for Measuring Magnetic Field Strength in Samples During Tests of Ferromagnetic Materials

In some cases it is reasonable to use two-coil transducers for measuring magnetic field strength in samples when ferromagnetic materials are tested with a permeameter. A number of issues related to the use of these transducers are discussed in this paper.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1993