

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ФАКУЛЬТЕТ ОБЩЕЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

Лабораторная работа № 3.4.4
Петля гистерезиса (статический метод)

Серебренников Даниил
Группа Б02-826

Долгопрудный, 2019 г.

Цель работы: исследование кривых намагничивания ферромагнетиков с помощью баллистического гальванометра.

В работе используются: генератор токов намагничивания (ГТН), тороид, соленоид, баллистический гальванометр с осветителем и шкалой, мультиметр-амперметр, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), разделительный трансформатор, ключи, переключатели.

1 Теоретическая часть

К ферромагнетикам принадлежат железо, никель, кобальт, гадолиний, их многочисленные сплавы с другими металлами. К ним примыкают ферриты – диэлектрики со структурой антиферромагнетика.

Ферромагнетики – вещества, которые при определенной температуре обладают самопроизвольной намагниченностью \mathbf{M} в отсутствие внешнего магнитного поля. В ферромагнетиках образуются отдельные намагниченные области – домены (от 10^{-2} до 10^{-6} см³), магнитные моменты в которых ориентируются параллельно.

Зависимость вектора магнитной индукции \mathbf{B} ферромагнетика от вектора напряженности магнитного поля \mathbf{H} нелинейна. В системе СИ эта связь имеет вид

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (1)$$

При циклическом перемагничивании зависимость (1) изображается замкнутой кривой - симметричной петлей гистерезиса (рис. 1), где $\pm H_c$ – значение напряженности магнитного поля, необходимое для полного размагничивания ферромагнетика (коэрцитивная сила); $\pm B_r$ – магнитная индукция, которую имеет ферромагнетик при напряженности внешнего магнитного поля, равную нулю (остаточная намагниченность); $\pm B_s$ – значение магнитной индукции, при которой материал достигает насыщения (намагниченность насыщения)¹.

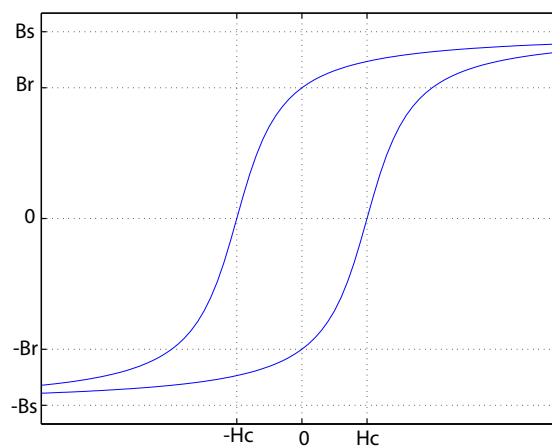


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика.

¹Кривая, изображающая зависимость $B(H)$, практически совпадает с зависимостью $M(H)$, поскольку второй член в выражении (1), в малых полях, существенно превосходит первый

2 Экспериментальная установка

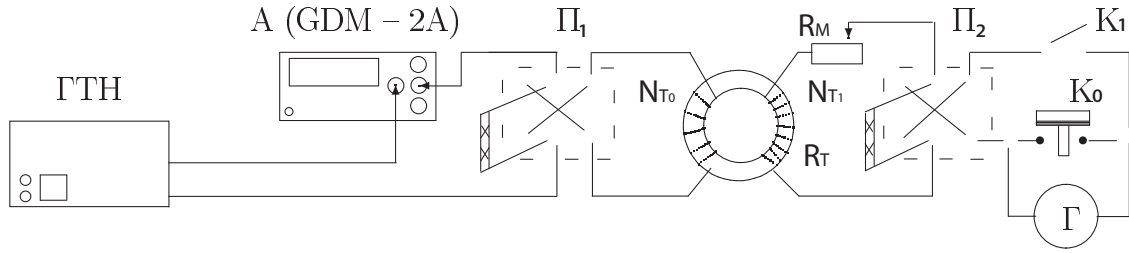


Рис. 2: Схема установки для исследования петли гистерезиса.

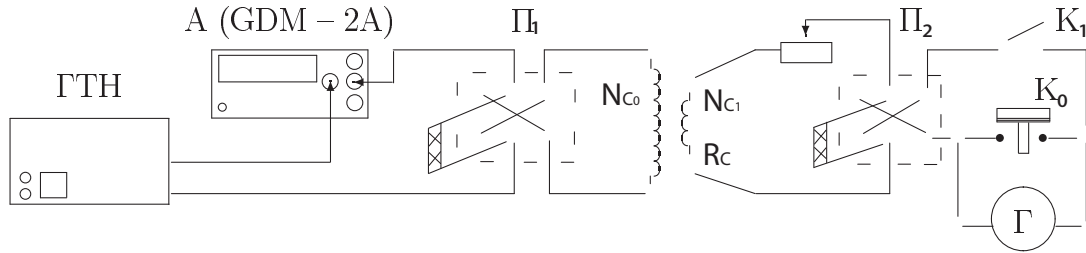


Рис. 3: Схема установки для калибровки гальванометра.

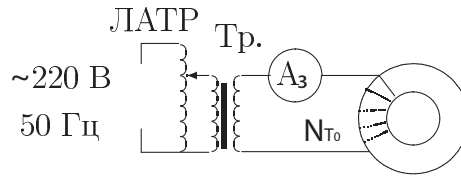


Рис. 4: Схема установки для размагничивания образца.

- Напряженность магнитного поля H в тороиде зависит от тока, текущего в намагничивающей обмотке:

$$H = \frac{N_{T_0}}{\pi D} I; \quad (2)$$

- Связь между отклонением зайчика баллистического гальванометра в делениях Δx и изменением магнитной индукции ΔB в сердечнике тороида:

$$\Delta B = \mu_0 \left(\frac{d_C}{d_T} \right)^2 \frac{N_{C_0}}{N_{T_1}} \frac{N_{C_1}}{l_C} \Delta I_1 \frac{\Delta x}{\Delta x_1}. \quad (3)$$

3 Экспериментальные данные

Таблица 1: Параметры установки.

N_{T_0}	N_{T_1}	N_{C_0}	N_{C_1}	D , м	d_C , см	d_T , см	l_C , м
1750	300	940	500	0,1	7	1	0,8

Таблица 2: Некоторые измеряемые величины и их погрешность.

	I , мА	Δx , мм
Величина	100	100
Погрешность	2	1,0
ε , %	2	1

Таблица 3: Калибровка гальванометра.

ΔI_1 , мА	Δx_1
1706	171

Таблица 4: Данные предельной петли.

I , мА	Δx , мм	H , А/м	ΔB , Тл	B , Тл
1705	66	9498	0,079	-
1206	60	6718	0,072	1,30
869	62	4841	0,075	1,23
622	61	3465	0,073	1,15
434	32	2418	0,039	1,08
350	20	1950	0,024	1,04
303	12	1688	0,014	1,02
275	9	1532	0,011	1,00
253	9	1409	0,011	0,99
233	9	1298	0,011	0,98
213	10	1187	0,012	0,97
192	10	1070	0,012	0,96
171	29	953	0,035	0,95
121	38	674	0,046	0,91
60	45	334	0,054	0,87
0	59	0	0,071	0,81
-60	110	-334	0,132	0,74
-121	71	-674	0,085	0,61
-172	46	-958	0,055	0,52
-193	64	-1075	0,077	0,47
-214	71	-1192	0,085	0,39
-234	88	-1303	0,106	0,31
-254	107	-1415	0,129	0,20
-276	147	-1537	0,177	0,07
-304	255	-1693	0,307	-0,11
-350	280	-1950	0,337	-0,41
-434	243	-2418	0,292	-0,75
-621	95	-3459	0,114	-1,04
-868	103	-4835	0,124	-1,16
-1205	84	-6712	0,101	-1,28
-1705	-60	-9498	-0,072	-1,38
-1205	-60	-6712	-0,072	-1,31
-868	-61	-4835	-0,073	-1,24
-621	-61	-3459	-0,073	-1,16

-434	-32	-2418	-0,039	-1,09
-350	-19	-1950	-0,023	-1,05
-303	-12	-1688	-0,014	-1,03
-275	-10	-1532	-0,012	-1,01
-254	-9	-1415	-0,011	-1,00
-233	-9	-1298	-0,011	-0,99
-213	-9	-1187	-0,011	-0,98
-192	-10	-1070	-0,012	-0,97
-172	-28	-958	-0,034	-0,96
-121	-38	-674	-0,046	-0,92
-60	-45	-334	-0,054	-0,88
0	-60	0	-0,072	-0,82
60	-113	334	-0,136	-0,75
121	-69	674	-0,083	-0,62
171	-48	953	-0,058	-0,53
192	-62	1070	-0,075	-0,47
213	-72	1187	-0,087	-0,40
233	-90	1298	-0,108	-0,31
254	-108	1415	-0,130	-0,21
275	-144	1532	-0,173	-0,08
303	-265	1688	-0,319	0,10
350	-267	1950	-0,321	0,42
434	-247	2418	-0,297	0,74
621	-94	3459	-0,113	1,04
868	-102	4835	-0,123	1,15
1205	-84	6712	-0,101	1,27
1705	-	9498	-	1,37

Таблица 5: Данные начальной кривой намагничивания.

I , мА	Δx , мм	H , А/м	ΔB , Тл	B , Тл
0	26	0,0	0,031	0
61	50	339,8	0,060	0,03
123	55	685,2	0,066	0,09
174	14	969,3	0,017	0,16
195	44	1086,2	0,053	0,17
216	33	1203,2	0,040	0,23
236	46	1314,6	0,055	0,27
257	48	1431,6	0,058	0,32
278	62	1548,6	0,075	0,38
306	104	1704,5	0,125	0,45
361	206	2010,9	0,248	0,58
436	188	2428,7	0,226	0,83
623	106	3470,4	0,128	1,05
865	104	4818,4	0,125	1,18
1205	86	6712,4	0,103	1,31
1705	-	9497,6	-	1,41

4 Обработка результатов

Используя формулы (2) и (3) рассчитаем $H = f_1(I)$ и $\Delta B = f_2(\Delta x)$ для начальной и предельной петель гистерезиса. По полученным данным (табл.4-5) построим петлю гистерезиса $B = f(H)$. Стоит отметить, что для выполнения естественного условия $f(0) = 0$, к нашим результатам была прибавлена величина $B_0 = 1,38$ Тл.

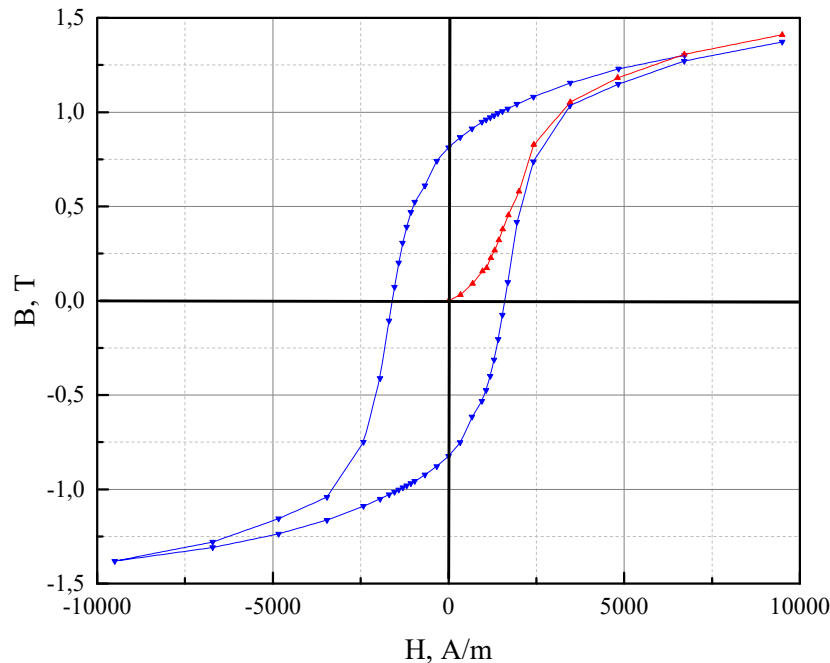


Рис. 5: Зависимость $B = f(I)$.

По графику найдём коэрцитивную силу H_c , индукцию насыщения B_s и остаточную индукцию B_r . Более того, можно вычислить максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости μ для начальной кривой намагничивания.

Таблица 6: Анализ петли гистерезиса.

H_c , А/м	B_s , Тл	B_r , Тл	μ
1600 ± 11	$1,410 \pm 0,010$	$0,810 \pm 0,010$	470 ± 20

5 Обсуждение результатов

В ходе данной лабораторной работы мы исследовали кривую намагничивания стали с помощью баллистического гальванометра. Стоит отметить, что тороид во время эксперимента достаточно сильно нагревался, что могло спровоцировать переход материала в парамагнитное состояние при достижении точки Кюри. Однако для различных сплавов стали критическая температура довольно высока $T_c \approx 500$ К и не может быть достигнута вследствие рассеивания тепла, выделяемого токами в витках. Построенный график (рис. 5) представляет собой симметричную петлю гистерезиса, что соответствует теории ферромагнетизма.

Анализ петли гистерезиса стали показал, что коэрцитивная сила H_c равна 1600 А/м с точностью в 0,8%. Обратившись к техническо-инженерным справочникам, можно предположить, что наш образец состоит примерно на 2-6% из Cr, на 0,6% из C, на 4-8% из W и на 40-42% из Co – такой сплав стали называется высококобальтовым.

Для него характерна высокая остаточная индукция – 1,10 Тл, что на 26% больше нашего результата в 0,81 Тл. В связи с сильной зависимостью магнитных свойств сплава от его компонент вполне возможно, что наш образец имеет коэрцитивную силу, равную 1600 А/м, но при этом не является высококобальтовым.

6 Выводы

1. Вычислили коэрцитивную силу $H_c = (1600 \pm 11)$ А/м;
2. Определили остаточную индукцию: $B_r = (0,81 \pm 0,01)$ Тл и индукцию насыщения $B_s = (1,41 \pm 0,01)$ Тл;
3. Рассчитали максимальную дифференциальную магнитную проницаемость для начальной кривой намагничивания: $\mu = 470 \pm 20$;
4. Состав сплава стали определить не удалось.