

В. А. ЗАЙКОВА и Я. С. ШУР

О ЗАВИСИМОСТИ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ МЯГКИХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ТОЛЩИНЫ ЛИСТА

(Представлено академиком И. К. Кикоиным 30 XI 1953)

Экспериментально было обнаружено, что магнитные свойства некоторых листовых мягких магнитных материалов заметным образом изменяются в зависимости от толщины листа (см., например, (1, 2)). При этом чем тоньше листы, тем большую магнитную жесткость они приобретают: убывает проницаемость в слабых полях и возрастает коэрцитивная сила. Это свойство магнитных материалов специально не исследовалось, и никаких теоретических объяснений ему не дано.

Трудности теоретической интерпретации данного явления объясняются прежде всего отсутствием систематических экспериментальных исследований о зависимости магнитных свойств от толщины листа на различных материалах, отличающихся между собой по свойствам, влияющим на протекание процессов технического намагничивания. В связи с этим было предпринято настоящее исследование, в котором изучалась зависимость коэрцитивной силы H_c от толщины листа d для различных мягких магнитных материалов, имеющих различные по величине и знаку значения констант анизотропии и магнитострикции.

Измерения производились на образцах 12 мягких магнитных материалов: железа, никеля, железо-никелевых сплавов с содержанием никеля от 36 до 87%, железо-кремнистых сплавов с содержанием кремния от 1 до 4%. Исходным материалом для изготовления образцов служили листы толщиной порядка 0,5—1 мм, из которых путем холодной прокатки получались образцы различной толщины до 2—5 μ . При этом после холодных обжатий на 30—40% проводились промежуточные отжиги при температуре 900° в течение 2 час.

С целью предохранения тонких образцов от каких-либо деформаций в процессе измерений окончательно вырезанные образцы (длиной 110—120 мм и шириной 2 мм) монтировались в тонкие кварцевые трубки, в которых они оставались на все время исследования. Перед измерением магнитных свойств образцы, заправленные в кварцевые трубки, проходили отжиг при 1100° в течение 4 час. в вакууме.

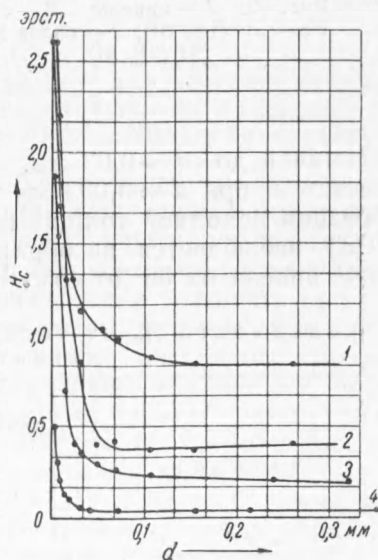


Рис. 1. 1 — электротехническое железо; 2 — сплав Fe—Ni (36% Ni); 3 — сплав Fe—Ni (49% Ni); 4 — сплав Fe—Ni (82% Ni)

Измерения H_c проводились на вертикальном аstaticком магнетометре с точностью до 3% (3).

Результаты измерений зависимости H_c от d , проведенных при комнатной температуре для различных ферромагнетиков, даны на рис. 1—3. Из кривых рис. 1 видно, что для железа при уменьшении d до 0,1 мм H_c изменяется очень мало. Дальнейшее уменьшение d приводит к заметному росту H_c , а начиная от толщины 0,03—0,01 мм наблюдается резкий рост H_c , причем H_c образцов с $d = 0,002$ мм в 3 раза больше, чем H_c образцов исходной толщины (0,57 мм). В случае пермаллоя (82% Ni) H_c остается практически постоянной

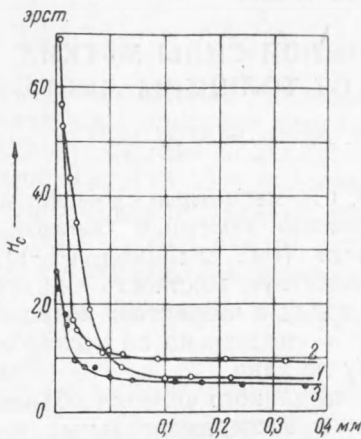


Рис. 2. 1—никель; 2—сплав Fe—Si (1% Si); 3—сплав Fe—Si (2% Si)

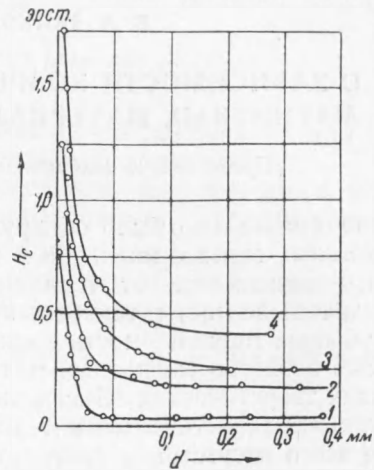


Рис. 3. 1—гиперм; 2—сплав Fe—Ni (56% Ni, 1% Mo); 3—сплав Fe—Ni (66% Ni), магнитоизотропный; 4—сплав Fe—Si (4% Si)

величиной до $d \sim 0,03$ мм. В более тонких образцах H_c резко возрастает, и при $d = 0,003$ мм она становится в 14 раз больше, чем H_c образцов исходной толщины (0,35 мм). Качественно аналогичный ход $H_c(d)$ наблюдается на образцах сплавов железо—никель с содержанием никеля от 36 до 45%.

Таблица 1

Зависимость H_c от толщины листа исследованных мягких магнитных материалов

М а т е р и а л	Толщина образцов в мм		H_c в эрст.		Критич. толщина d' в мм	H_c конечн.	H_c началн.	Константа анизотропии K эрг. $\cdot 10^{-4}$ в см^3	Магнитоострикция насыщения $\lambda_s \cdot 10^4$
	исходн.	конечн.	исходн.	конечн.					
Никель	1,1	0,003	0,38	5,0	0,06	13	—	3,44	—32
Пермаллой (82% Ni)	0,35	0,003	0,035	0,5	0,03	14	—	0,05	6,0
Гиперм (87% Ni)	0,37	0,002	0,027	0,77	0,03	28	—	0,35	1,8
Гайперник (52% Ni)	0,52	0,003	0,16	1,25	0,04	8	—	2,6	25,4
Гайперник (49% Ni)	0,33	0,003	0,19	1,9	0,04	10	—	3,3	26,0
Инвар (36% Ni)	0,38	0,002	0,41	2,05	0,07	5	—	—	22
Пермаллой (65% Ni)	0,32	0,008	0,29	0,79	0,05	3	—	1,35	14,0
Железо	0,57	0,002	0,86	2,9	0,04	3	—	53	—3,0
Fe—Si (1% Si)	0,47	0,007	0,89	5,7	0,04	6	—	47	—0,8
Fe—Si (2% Si)	0,5	0,002	0,59	2,7	0,04	4	—	42	2,2
Fe—Si (3% Si)	0,275	0,005	0,42	1,8	0,05	4	—	37	7,8
Fe—Si (4% Si)	0,5	0,018	0,19	0,86	—	4	—	32	5,8

Кривые, приведенные на рис. 2—3, показывают, что подобная зависимость $H_c(d)$ имеет место также для никеля, железо-кремнистых сплавов и других мягких магнитных материалов.

В табл. 1 приведены основные данные, характеризующие изменение H_c в зависимости от d всех исследованных материалов. Из данных таблицы следует, что чем меньше H_c образцов исходной толщины, тем при меньших толщинах начинается ее рост. Это отчетливо видно на образцах сплавов системы железо — никель. Так например, у сплава инвар (36% никеля) в образцах исходной толщины $H_c = 0,41$ эрст. и «критическая» толщина $d' \sim 0,07$ мм. В сплаве гиперм H_c массивного образца равна 0,027 эрст. и $d' \sim 0,03$ мм. У сплава 65-пермаллой H_c массивного образца равна 0,29 эрст., $d' \sim 0,05$ мм. Из таблицы также следует, что относительный рост H_c наибольший у материалов с минимальными константами анизотропии и магнитострикции (гиперм, 82-пермаллой).

На рис. 4 приведена зависимость относительной коэрцитивной силы (отношение H_c образца данной толщины к H_c образца исходной толщины) от толщины для всех измеренных нами образцов железо-никелевых сплавов. Из рис. 4 видно, что для всех сплавов имеет место однотипная зависимость $H_c(d)$, лишь в области начала крутого подъема кривой (область «критической» толщины) наблюдается небольшой разброс значений H_c , относящихся к различным материалам.

На основании полученных экспериментальных данных может быть сделан следующий общий вывод: зависимость коэрцитивной силы от толщины листа имеет универсальный характер для всех мягких магнитных материалов и состоит в том, что при уменьшении толщины листа от 0,1—0,07 мм коэрцитивная сила изменяется незначительно и ее значение почти совпадает со значением H_c массивного образца; дальнейшее утоньшение листа приводит сперва к плавному росту H_c , а при некоторой критической толщине этот рост H_c резко усиливается; при толщине листа порядка 10^{-3} мм H_c такого образца в несколько раз превышает H_c массивного образца; начало излома на кривой $H_c(d)$ может несколько смещаться в область больших или меньших толщин в зависимости от значений массивных образцов, а именно, чем меньше H_c образцов исходной толщины, тем при меньших толщинах достигается «критическая» толщина.

Можно предположить, что наблюдаемая зависимость $H_c(d)$ обусловлена тем, что при утоньшении листов ниже определенной величины изменяется сама магнитная структура ферромагнетика, при которой возрастает роль поверхностных доменов.

Институт физики металлов
Уральского филиала Академии наук СССР

Поступило
9 XI 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Я. П. Селицкий, Электричество, № 12 (1948). ² А. С. Займовский, В. В. Усов, Металлы и сплавы в электротехнике, 1949, стр. 121. ³ Я. С. Шур, В. И. Дрожжина, ЖЭТФ, 17, 607 (1947).

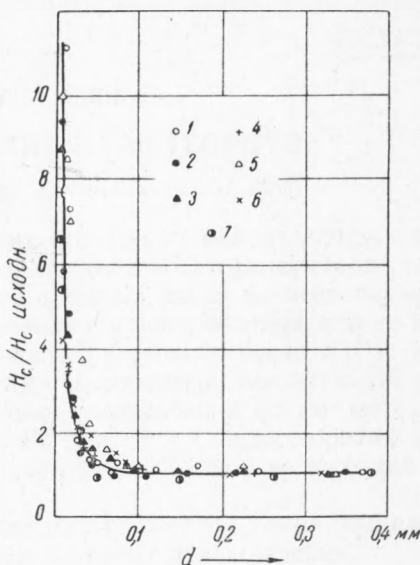


Рис. 4. 1 — гиперм; 2 — Fe — Ni (78,5% Ni); 3 — Fe — Ni (56% Ni, 1% Mo); 4 — Fe — Ni (45% Ni); 5 — никель; 6 — Fe — Ni (66% Ni); 7 — Fe — Ni (36% Ni)