ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

ТОМ III 1956 ВЫП. 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В КРИСТАЛЛАХ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КИНОСЪЕМКИ

Л. В. Киренский и В. Д. Дылгеров

В 1931—32 гг. Акуловым и Дехтярем [1] и Биттером [2] был разработан оригинальный метод экспериментального исследования магнитной структуры ферромагнитных кристаллов с помощью магнитных порошков.

Использование порошкового метода дало ценные результаты для понимания характера распределений, формы и размеров доменов в различных кристаллах ферромагнетиков. Сам метод получил значительное развитие в смысле его усовершенствования [3, 5].

Следует отметить, что успехи, достигнутые при изучении доменной структуры методом порошковых фигур, относятся к исследованиям неизменяющихся структур, то есть дело обычно сводилось к анализу порошковых фигур, сфотографированных при определенных значениях величины напряженности магнитного поля или деформирующих сил. Что касается изучения динамики порошковых фигур, то в литературе имеются лишь описания результатов ее визуальных наблюдений [4, 5] или публикуются отдельные фотоснимки, полученные при определенных значениях напряженности магнитного поля [4, 5, 6] или внешних деформаций [5, 7, 8]. Естественно, что такие методы не могут дать полной картины динамики доменной структуры.

В настоящей работе впервые применен метод киносъемки для исследования динамики доменной структуры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве основного исследуемого объекта бралась прямоугольная полоска, вырезанная химическим травлением из листа трансформаторной стали, содержащей кремния 3,42%. Полоска состояла из нескольких крупных кристаллов приблизительно одинаковой ориентации [9] и вырезалась так, что ее длинная сторона совпадала с направлением прокатки листовой стали.

Длина полоски равнялась 92 мм, ширина — 3,0 мм, толщина — 0,21 мм. Подготовка поверхности образца и изготовление магнитной суспензии производились согласно методам, описанным в работах [5, 10].

В качестве намагничивающего приспособления использовался электромагнит с замкнутым прямоугольным магнитопроводом. На одной паре противоположных сторон магнитопровода, наматывались обмотки с одинаковым числом витков одинакового сопротивления. Обмотки подключались к источнику постоянного тока так, чтобы магнитные потоки, создаваемые ими, были направлены противоположно. Такое соединение обмоток обеспечивало в полости магнитопровода магнитное поле высокой однородности. Для создания упругих натяжений на образцах электромагнит был снабжен специальным растягивающим механизмом. Киносъемка динамики порошковых фигур производилась киносъемочным аппаратом типа КСА-16 через вертикальный металлографический микроскоп типа МИМ-5. Особые меры предосторожности принимались для устранения сотрясений, мешающих киносъемке.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Предварительно наблюдались и снимались на кинопленку изменения порошковых фигур на недеформированном кристалле, вырезанном в виде тонкого диска диаметром 10 мм и толщиной 0,20 мм.

В отсутствии внешнего магнитного поля порошковые фигуры представляли систему клинообразных полос, ориентированных вдоль оси легкого намагничивания, ближайшей к плоскости образца, которая близка к кристаллографической плоскости типа (110). Киносъемка велась при

намагничивании вдоль осей [100] и [110]. Ввиду сложности порошковых фигур, изменение последних при намагничивании происходит очень сложным образом.

На этой стадии исследования удалось установить следующее:

1. При намагничивании вдоль оси [100] фигуры преобразуются и в области насыщения исчезают, а коллоидальный осадок распределяется в виде системы неоднородных по длине и ширине полос, ориентированных перпендикулярно к направлению намагничивающего поля (фигуры насыщения) [5].

2. В случае намагничивания вдоль оси [110] наблюдаются три разновидности порошковых фигур: а) фигуры, наблюдаемые в нулевом и слабых полях; они представляют собой систему клинообразных полос, ориентированных вдоль оси легкого намагничивания; б) фигуры, наблюдаемые в полях от 40 эрст. и почти до насыщения. Эти фигуры представля-

Рис. 1. Порошковые фигуры на кристалле до наложения деформирующих сил. Направление силы совпадает с одной из осей легчайшего намагничивания; ×63.

Рис. 2. Порошковые фигуры на кристалле трансформаторной стали после наложения деформирующих сил. Плоскость (110); ×63.

ют собой систему извилистых линий, ориентированных вдоль направления намагничивающего поля. Причем в средних полях число линий незначительно. По мере роста величины напряженности магнитного поля количество линий возрастает путем расщепления каждой из них на две. Вновь появившиеся линии также расщепляются на две новые и т. д.; в) в высоких полях линии внезапно исчезают и уступают место фигурам насыщения. Процесс дробления линий не находит объяснения с точки зрения существующих моделей магнитной структуры.

Более простая картина динамики порошковых фигур наблюдается для упруго растянутого кристалла. На рис. 1 и 2 даны два фотоснимка, полученные на одном из кристаллов образца-полоски до и после наложения упругой деформации растяжения вдоль направления прокатки, приблизительно совпадающей с одной из осей легкого намагничивания. В результате деформации, как это видно из структуры порошковых фигур, доменная структура подвергается сильным изменениям, преобразуясь в структуру, соответствующую магнитно-одноосному кристаллу. Схема доменной структуры растянутого кристалла представлена на рис. 3. Здесь стрелками указаны векторы $\vec{I}_s$ намагничения в плоскопараллельных доменах. Последние наклонены к плоскости кристалла под некоторым углом β и параллельны кристаллографической плоскости (100).

Очевидно, наблюдаемые линии на фигурах рис. 2 можно отождествить с линиями пересечения междоменных перегородок с поверхностью наблюдения (линии пересечения на рис. 3 показаны как линии, между которыми расположены стрелки, указывающие векторы $\vec{I}_s$), то есть порошковые линии являются 180° границами между доменами. В пользу такого предположения говорит следующее.

а. Коллоидальный осадок между порошковыми линиями представляет собой пятна, вытянутые перпендикулярно к порошковым линиям (фигуры насыщения). Это значит, что часть кристалла, заключенная между порошковыми линиями, намагничена до насыщения вдоль порошковых линий, то есть представляет домен с вектором намагничения, ориентированным вдоль порошковых линий.

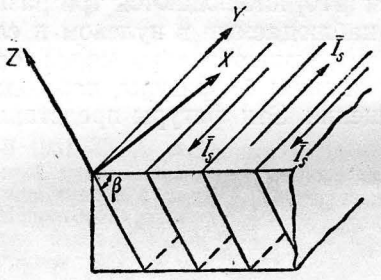

Рис. 3. Схема доменной структуры кристалла трансформаторной стали, растянутого вдоль оси легчайшего намагничивания.

б. При намагничивании кристалла вдоль направления растяжения линии порошковых фигур попарно смещаются навстречу друг другу (см. рис. 4—7).

Смещения порошковых линий были сняты на кинопленку при скоростях нарастания напряженности внешнего магнитного поля, равных: 0,20; 0,26; 0,31; 0,35; 0,40; 0,45; 0,49; 0,54; 0,59; 0,64; 0,68; 0,72 эрст./сек.

Напряженность поля возрастала в каждом случае от 0 до 11. На рис. 4—7 представлены кадры фильма, снятого при $\frac{dH}{dt} = 072$ эрст./сек. Приведенные кадры показывают, что намагничивание упруго деформированного образца происходит действительно путем смещения границ между доменами. С кинопленок, на которые были сняты смещения границ между доменами при скоростях нарастания намагничивающего поля 0,20; 0,59 и 0,72 эрст./сек., снимались кривые зависимости $x(H)$ и $x(t)$, где x величина расстояний между навстречу смещающимися линиями, H — величина напряженности внешнего магнитного поля, t — время нарастания поля, измеренное в секундах. Величина x измерялась на экране с помощью линейки и приводилась к истинному значению с помощью масштабной сетки, снятой на пленку перед съемкой порошковых фигур. Для каждого кадра фильма H определяется произведением скорости $\frac{dH}{dt}$ его нарастания на время t, причем $\frac{dH}{dt} = \text{const}$.

Данные расчета для скоростей 0,20; 0,59 и 0,72 эрст./сек. приведены в табл. 1, 2 и 3, соответственно. В таблицах при x стоят цифровые индексы, которые означают, например, что x_{23} есть расстояние между 2 и 3 порошковыми линиями на экране слева. Согласно данным этих таблиц строились кривые зависимости $x(H)$ и $x(t)$. На рис. 8 приводится кривая $x(H)$ для скорости 0,20 эрст./сек., характер кривых для скоростей 0,59 и 0,72 эрст./сек. идентичен с характером кривой, приведенной на рис. 8. Кривая $x(H)$ представляет собою кривую намагничивания, так как, согласно данным Вильямса и Шокли [6], между x и величиной намагничения I существует прямая пропорциональность. (Следует отметить, что кривая $x(H)$ рис. 8 оказалась нисходящей вследствие того, что за x взяты расстояния между сближающимися порошковыми линиями).

Кривая $x(H)$ сначала быстро убывает, но к концу намагничивания

Таблица 1

t, сек.	H, эрст.	x_{67}, микрон	t, сек.	H, эрст.	x_{67}, микрон
0	0,00	49	17	3,40	15
1	0,20	45	18	3,60	14
2	0,40	42	19	3,80	15
3	0,60	39	20	4,00	12
4	0,80	38	21	4,20	13
5	1,00	37	22	4,40	12
6	1,20	34	23	4,60	11
7	1,40	32	24	4,80	9
8	1,60	30	25	5,00	9
9	1,80	27	26	5,20	8
10	2,00	25	27	5,40	—
11	2,20	24	28	5,60	9
12	2,40	22	29	5,80	—
13	2,60	21	30	6,00	8
14	2,80	20	31	6,20	7
15	3,00	19	32	6,40	6
16	3,20	17	—	—	—

Таблица 2

t, сек.	H, эрст.	x_{23}, микрон	t, сек.	H, эрст.	x_{23}, микрон
0	0,0	54	6	4,1	24
1	0,6	50	7	4,7	23
2	1,7	42	8	5,3	20
3	4,3	38	9	5,9	18
4	2,9	35	10	6,5	17
5	3,5	31	11	7,1	16

Таблица 3

t, сек.	H, эрст.	x_{89}, микрон	t, сек.	H, эрст.	x_{89}, микрон
0	0,0	50	6	4,3	14
1	0,7	42	7	5,0	13
2	1,4	35	8	5,7	8
3	2,2	29	9	6,5	7
4	2,9	22	—	—	—
5	3,6	19	—	—	—

спад замедляется и, по всей вероятности, кривая ассимптотически приближается к нулю. Медленное приближение кривой $x(H)$ к нулю, с одной стороны, соответствует действительному ходу кривой намагничивания при подходе к насыщению; с другой стороны, из фильма видно, что порошковые линии сблизившись, сливаются в одну общую полосу, ширина которой, несмотря на продолжающийся рост величины напряженности внешнего поля с прежней скоростью, длительное время остается почти без изменения и только в полях около 9—11 эрст. сами полосы распадаются на отдельные пятна, ориентированные перпендикулярно направлению магнитного поля (фигуры насыщения). Эта длительная «жизнь» порошковых полос и сказывается на ходе кривой при подходе к насыщению.

Повидимому, устойчивость этих полос свидетельствует о некоторой устойчивости граничных слоев, которые разрушаются ценой относительно больших затрат энергии магнитного поля.

Можно предположить, что длительная «жизнь» полос в какой-то мере связана с широбоковским процессом «рассасывания» граничных слоев [11].

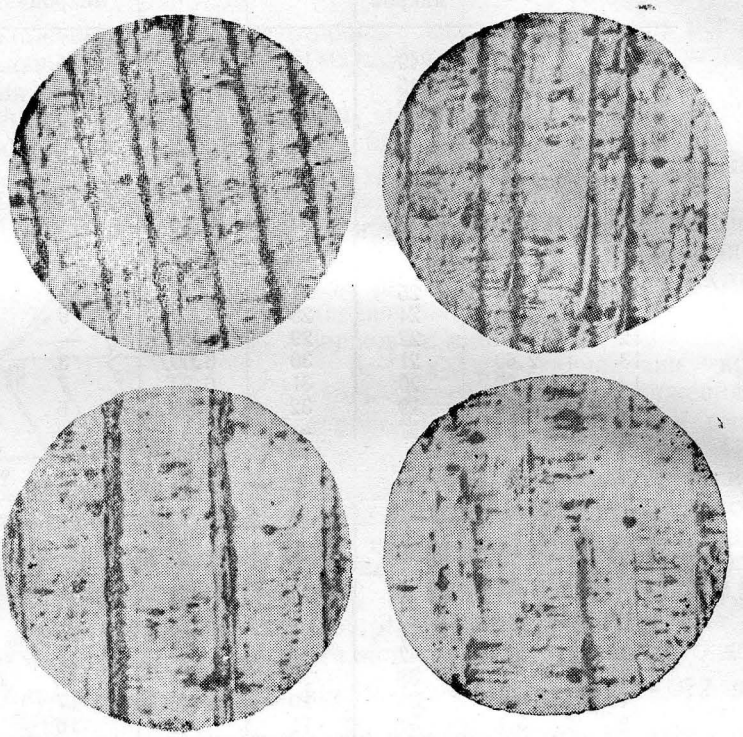

Рис. 4—7. Кадры из кинофильма изменения порошковых фигур с ростом напряженности магнитного поля на кристалле трансформаторной стали, растянутом вдоль одной из осей легчайшего намагничивания. Значения полей: 0; 1,88; 4,76; 11,00 эрст.; ×150.

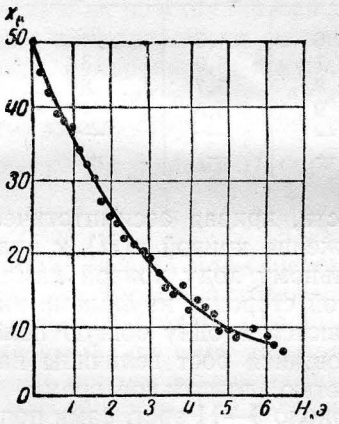

Рис. 8. Зависимость расстояния между двумя сближающимися междоменными перегородками от напряженности магнитного поля.

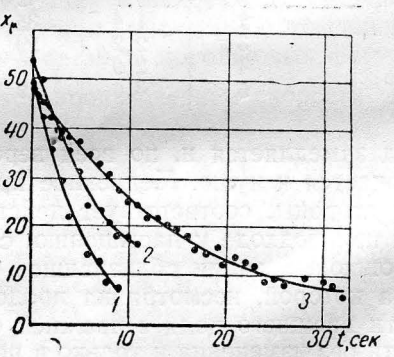

Рис. 9. Зависимость расстояния между двумя сближающимися междоменными перегородками от времени нарастания поля при скоростях: *1*—0,72 эрст./сек.; *2* — 0,59 эрст./сек.; *3*—0,20 эрст./сек.

На рис. 9 представлены кривые зависимости $x(t)$, снятые для скоростей 0,20; 0,59; 0,72 эрст./сек. Из рисунка видно, что кривая, соответствую-

щая скорость 0,59 эрст./сек. расположена между кривыми, соответствующими 0,20 и 0,72 эрст./сек.

Такой характер последовательного расположения кривых говорит о том, что с увеличением скорости нарастания намагничивающего поля происходит также и возрастание скорости смещения границ между доменами.

В заключение были сняты на кинопленку процессы смещения порошковых линий при перемагничивании исследуемого образца (ход по петле гистерезиса). На полученной кинопленке были измерены: а) расстояния между порошковыми линиями в размагниченном состоянии (размагничивание производилось переменным током с плавно уменьшающейся амплитудой); б) расстояния между теми же линиями после достижения максимального «положительного» значения напряженности намагничивающего поля и его сведения к нулю, то есть в состоянии «положительной» остаточной намагниченности $+I_R$; в) те же расстояния в состоянии «отрицательной» остаточной намагниченности $-I_R$.

Результаты этих измерений приведены в табл. 4. Как видно из этой таблицы, положения порошковых линий вполне соответствуют теоретическим ожиданиям.

Таблица 4

I	Расстояния, микроны					
	x_{12}	x_{23}	x_{34}	x_{45}	x_{56}	x_{67}
0	47	47	48	50	51	47
$+I_R$	60	41	55	46	57	37
$-I_R$	39	60	39	55	49	51

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Примененный впервые метод изучения порошковых фигур с помощью киносъемки позволяет непосредственно наблюдать динамику доменной структуры при изменении магнитного поля.

Поскольку количество кадров, снимаемых в секунду, известно, изучение динамики доменной структуры может быть не только качественным, но и количественным.

2. Указанный метод может быть применен не только при исследовании динамики доменной структуры в зависимости от поля, но и от других факторов (упругие натяжения, температура и т. д.).

Красноярский педагогический институт

Поступила в редакцию
10 мая 1955 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акулов Н. С. и Дехтяр М. В. Ann. d. Phys., 1932, 15, 750.
2. Bitter F. Phys. Rev., 1931, 38, 1903; 1932, 41, 507.
3. Elmore W. C. Appl. Phys., 1939, 10, 724.
4. Elmore W. C. Phys. Rev., 1938, 53, 757.
5. Williams H. J., Bozorth R. M. a. Shockley W. Phys. Rev., 1949, 75, 153.
6. Williams H. J. a. Shockley W. Phys. Rev., 1949, 75, 178.
7. Акулов Н. С. и Раевский С. Ann. d. Phys., 1934, 20, 113.
8. Soller T. Zs. f. Phys., 1937, 106, 485.
9. Дылгеров В. Д. Диссертация, Физфак. МГУ, 1955.
10. Elmore W. C. Phys. Rev., 1938, 54, 1092; 1942, 62, 486.
11. Широбоков М. Я. ЖЭТФ, 1941, 11, 554.