

Л. В. КИРЕНСКИЙ и М. К. САВЧЕНКО

## КОНФИГУРАЦИЯ ДОМЕНОВ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Одновременным изучением порошковых фигур с помощью двух микроскопов на противоположных сторонах ферромагнитных кристаллов удалось проследить за ходом границ между доменами внутри кристаллов и сделать заключение о форме доменов. Экспериментально установлено вращение междоменных границ под действием напряжений и характер смещения границ у различных структур доменов под действием магнитного поля.

Теоретические представления о магнитной структуре ферромагнетиков приводят к целому ряду конкретных схем распределения доменов в ферромагнитных кристаллах [1-3]. Согласно этим моделям, домены кристалла, который подразумевается идеальным, представляют собою плоско-параллельные слои, проходящие через весь кристалл от одной его стороны до противоположной, с наличием около некоторых поверхностей доменов замыкающего типа.

В реальных кристаллах из-за неоднородностей состава, местных внутренних напряжений и других причин всегда возможны отступления от теоретических моделей. Существует ряд экспериментальных данных, объяснение которых на основе указанных моделей крайне затруднительно. Укажем, в частности, на следующие опытные факты: а) при исследовании динамики порошковых фигур на плоскости (110) кристаллов кремнистого железа с увеличением растягивающих нагрузок вдоль направлений [001] и [111] могут исчезать некоторые границы или возникать новые [4]. Объяснить появление или исчезновение этих линий при сквозном простреле слоистыми доменами всего кристалла можно, лишь предположив, что возможна внезапная инверсия большой группы областей без смещения границ; б) авторами в свое время было обнаружено, что замыкающие призматические домены могут наблюдаться не только на границах кристаллов, но и внутри них [5]; это, очевидно, в ряде случаев может привести к несквозной доменной структуре; в) при наложении упругих напряжений на кристалл ферромагнетика со слоистой доменной структурой наблюдаются случаи раздвоения междоменных границ.

Отмеченные факты указывают на более сложную структуру доменов в реальных кристаллах по сравнению с теоретическими моделями. В связи с этим представляет значительный интерес иметь данные о структуре доменов внутри кристаллов.

Как известно, в настоящее время таких методов, которые позволяли бы непосредственно проследить характер доменов внутри кристалла, не существует. Тем не менее некоторые косвенные наблюдения могут дать ряд сведений по этому вопросу.

В настоящей работе было проведено одновременное наблюдение доменных структур на различных поверхностях кристаллов с помощью двух микроскопов и сделан ряд заключений о характере доменной структуры внутри кристалла и ее динамике под действием поля и напряжений.

## Экспериментальная часть

Для наблюдения порошковых фигур была собрана специальная установка, состоящая из двух металлографических микроскопов МИМ-6, укрепленных на одной станине и установленных так, что их оптические

оси, идущие вертикально, совпадали, а объективы были обращены друг к другу (рис. 1). На приводимых ниже фотографиях видны взаимно-перпендикулярные линии (крест нитей), которые были натянуты перед фотокамерами микроскопов. Оптические оси микроскопов проходят через указанные точки пересечения нитей. Такая установка позволяла производить одновременное наблюдение и фотографирование порошковых фигур на противоположных поверхностях кристалла. Очевидно, что в случае сквозного прохождения доменов через весь кристалл порошковые фигуры на обеих поверхностях должны быть одинаковыми.

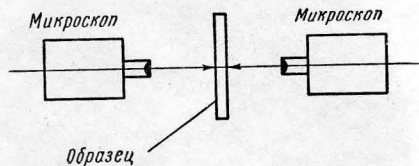


Рис. 1.

Исследуемые образцы вырезались из листов трансформаторной стали (3% кремния) и имели вид полосок длиной 30—40 мм, шириной 6 мм и толщиной 0,4 мм и меньше. Образцы тщательно шлифовались, подвергались электрополировке и отжигались в вакууме при 1000—1100°С в течение 3 час. с последующим медленным охлаждением. Наблюдения производились на кристаллах, плоскости (110) или (100) которых совпадали с поверхностью. Образцы-пластинки, плоскость (110) которых совпадала с поверхностью длинной своей стороной, вырезались вдоль направления легкого намагничивания [001], лежащего на поверхности.

### Результаты наблюдений и их анализ

**1. Конфигурация доменов в отсутствие поля и напряжений.** Характерные порошковые фигуры на обеих поверхностях кристалла в одном и том же месте представлены на рис. 2, а. Как видно из рисунка, на верхнюю и нижнюю поверхности выходят домены неодинаковой ширины. Просчет общего числа границ, выходящих на поверхность, также дает неодинаковое их число. Это говорит о том, что доменная структура не является одинаковой по всей толщине кристалла и что происходит замыкание доменов каким-то образом внутри кристаллов.

Особенно характерным является случай, часто встречающийся среди кристаллов, большие поверхности которых ограничены плоскостями, близкими к (100). На рис. 2, б представлены порошковые фигуры, отображающие доменную структуру на противоположных поверхностях одного из таких кристаллов. Как видно из приведенного рисунка, фигуры не только не являются идентичными, но идут даже во взаимноперпендикулярных направлениях легкого намагничивания. Очевидно, что доменная структура внутри кристалла полностью перестраивается относительно легких осей при переходе от одной поверхности к другой.

Естественно ожидать, что с уменьшением толщины кристалла при достижении некоторого критического значения толщины доменная структура станет «сквозной» и по обеим сторонам кристалла будет иметь одинаковый вид. Для проверки этого предположения наблюдались порошковые фигуры на одном и том же месте кристалла при различной его толщине, которая уменьшалась электрополировкой.

Порошковые фигуры, полученные на одном и том же месте кристалла при различной его толщине, показаны на рис. 3. Как видно из этих фотографий, с уменьшением толщины доменная структура «выравнивается» и при толщине 0,08 мм порошковые фигуры на обеих поверхностях точно совпадают. Для различных кристаллов толщина, при которой порошковые фигуры имеют одинаковый вид на противоположных поверхностях, различна и зависит от исходного состояния кристалла.

Анализ порошковых фигур в листах трансформаторной стали толщиной 0,5—0,2 мм показывает, что домены могут иметь вид не только плоских слоев, но и клиньев, трапеций и т. д., как это схематически показа-

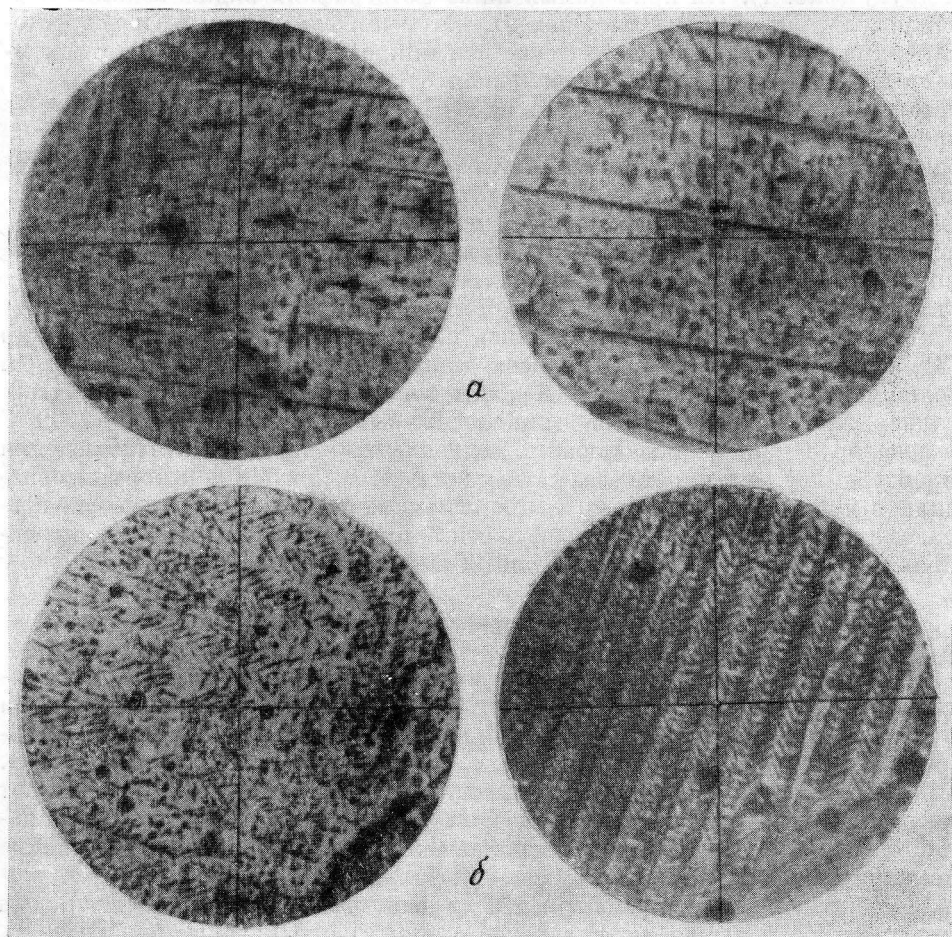


Рис. 2. Порошковые фигуры на противоположных плоскостях кристаллов.

*a* — фигуры на плоскостях (110), *б* — фигуры на плоскостях, близких к (100).  $\times 90$ .

но на рис. 4. Кристаллы указанных толщин, в которых наблюдаются только слоистые домены, хотя и встречаются, но редко.

**2. Ход границ внутри кристаллов и влияние напряжений.** В последнее время появилась работа Грехема и Ньюрата [6], в которой был теоретически рассмотрен ход граничных слоев внутри кристаллов трансформаторной стали (3,25% кремния) в виде полосок. По их данным, для листов, поверхностью которых является плоскость (110), в свободном состоянии границы идут под углом  $\pm 32^\circ$  к нормали к поверхности пластинки, т. е. отклоняются от направления легкого намагничивания, составляющего с плоскостью поверхности кристалла угол в  $45^\circ$ , при котором энергия единицы площади границы минимальна. Ими было также показано, что при наличии растягивающих напряжений, направленных вдоль легкой оси, лежащей на поверхности, границы должны испытывать поворот в направлении нормали к поверхности. Каких-либо более или менее надежных экспериментов в подтверждение своих выводов авторы не приводят. С помощью описанного выше метода сдвоенных микроскопов показано, что теоретические выводы Грехема и Ньюрата в основном находят свое подтверждение.

Из наблюдений, проведенных над многими кристаллами, вытекает, что каждый из них обладает своими особенностями, обусловленными, по-видимому, их внутренним состоянием. В свободном от внешних напряжений состоянии границы идут под углами от 30 до нескольких градусов к нормали к поверхности. При растяжении вдоль направления легкого намагничивания они действительно испытывают вращение в сторону нормали и при некоторой величине нагрузки становятся нормально к по-

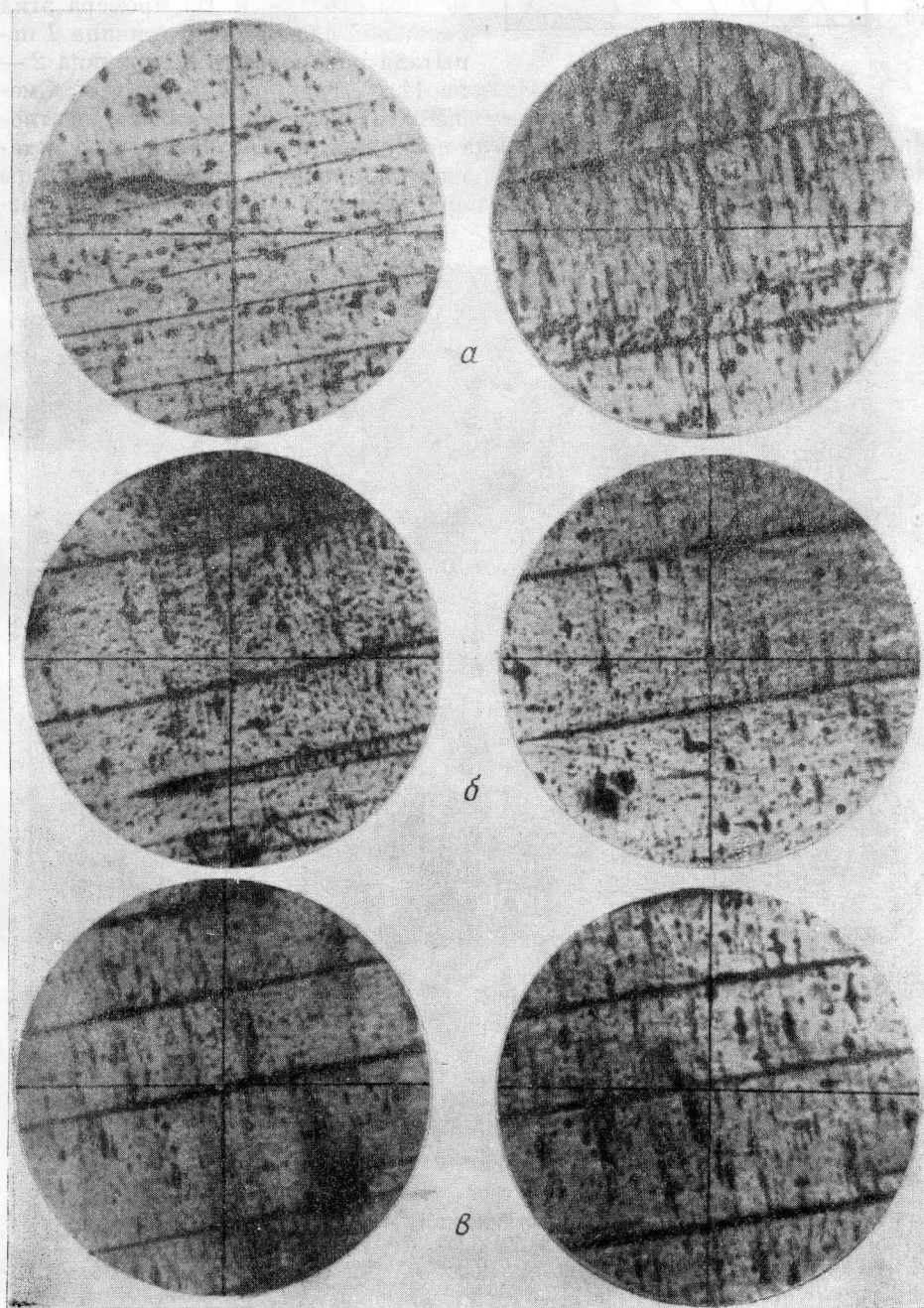


Рис. 3. Изменение доменной структуры при уменьшении толщины кристалла.

*а* — 0,33 мм, *б* — 0,17 мм, *в* — 0,08 мм.  $\times 90$ .

верхности. На рис. 5 показано такое вращение на одном из кристаллов толщиной 0,28 мм при растягивающем напряжении от 0 до 15 кг/мм<sup>2</sup>. Этот кристалл обладал сквозной доменной слоистой структурой, и поэтому могли быть отмечены одни и те же границы на обеих поверхностях пластинки. Вращение подсчитывалось по величине смещения границ.

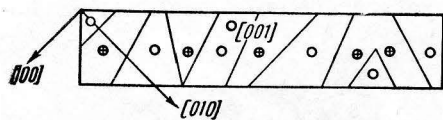
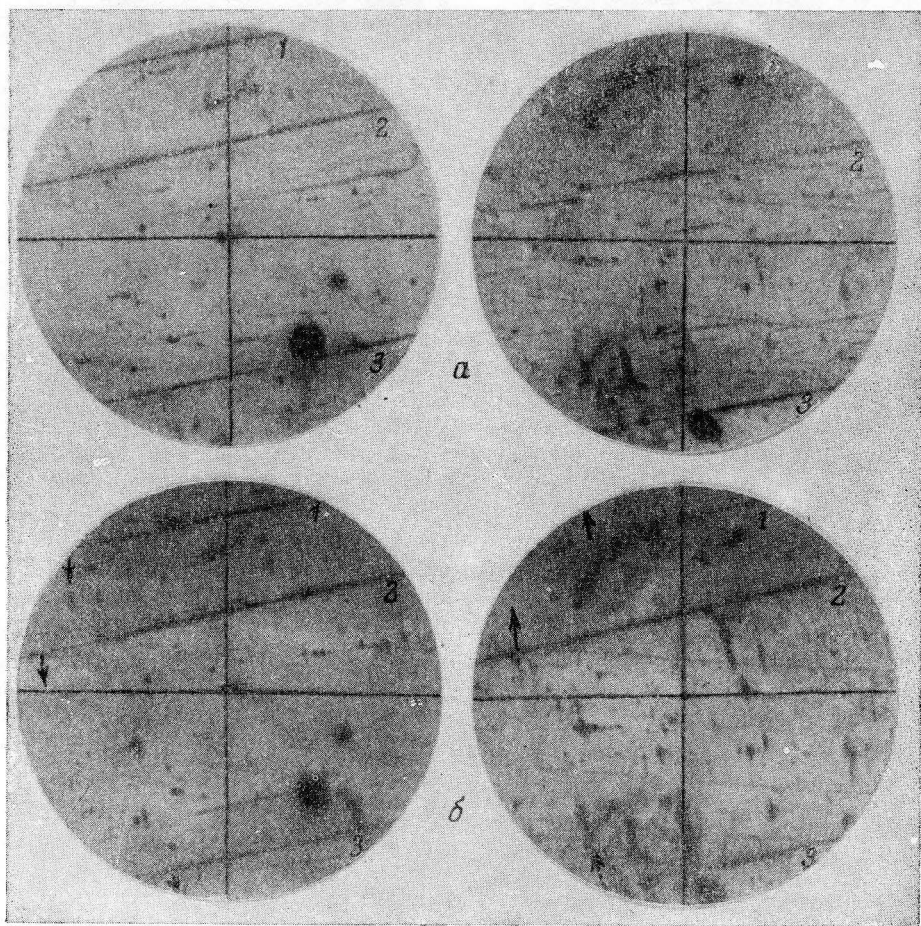


Рис. 4.

Смещения на противоположных поверхностях направлены в противоположные стороны и на рисунках отмечены стрелками. Из промера этих смещений следует, что граница 1 испытала поворот на 8,8°, граница 2 — на 11,7°, граница 3 — на 10,3°. Смещение границ определялось по отношению к пятнам электрополировки на поверхности образца, которые остаются неподвижными. При растягивающем напряжении 15 кг/мм<sup>2</sup> границы между доменами устанавливаются перпендикулярно поверхности образ-

Рис. 5. Смещение границ при растяжении от 0 (а) до 15 кг/мм<sup>2</sup> (б). × 100.

ца, что можно видеть, налагая рис. 5,б на рис. 5,а так, чтобы совместились перекрестья на фигурах — тогда совмещаются между собой и одноименные границы.

Вращение границ под действием напряжений дает возможность понять некоторые экспериментальные факты, о которых упоминалось во введе-

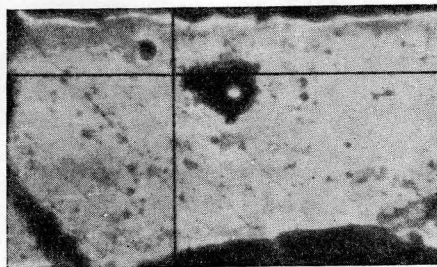


Рис. 6. Вид порошковых фигур на торце пластинки.

Плоскость (001).  $\times 90$ .

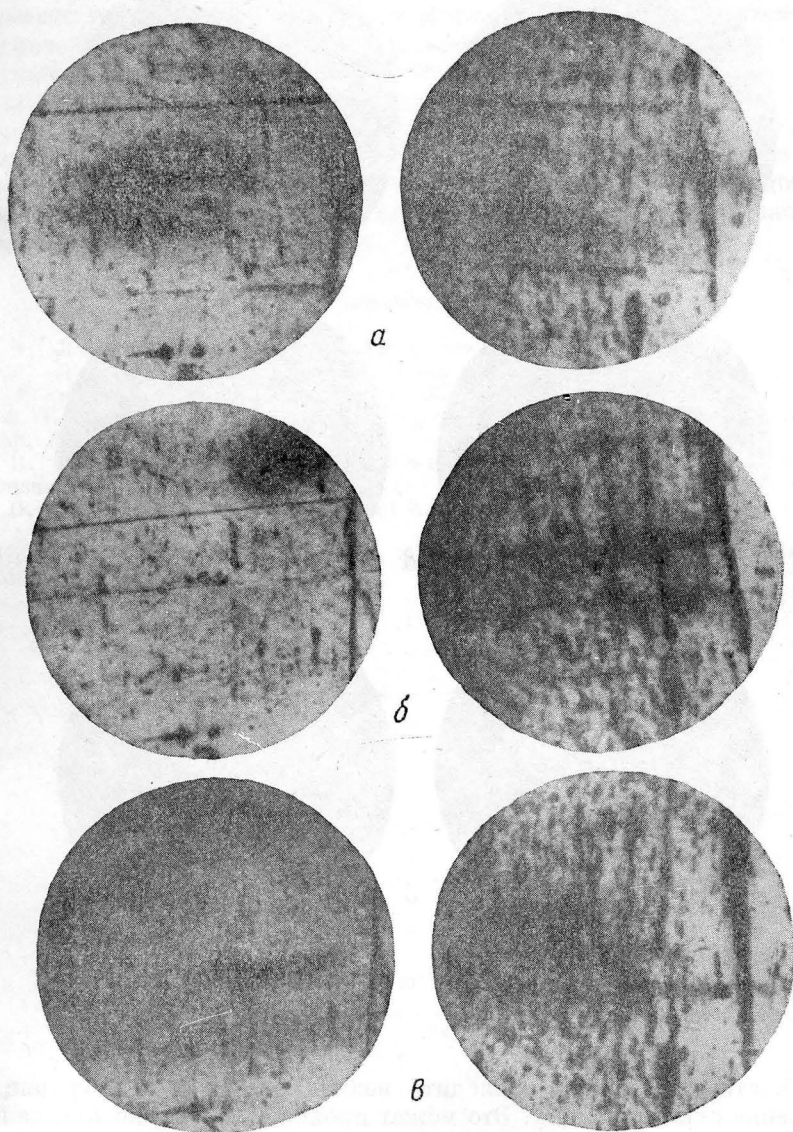


Рис. 7. Смещение границ при сквозной структуре доменов.

а — без поля, б — 7 э, в — 15 э; направление поля горизонтальное  $\times 90$ .

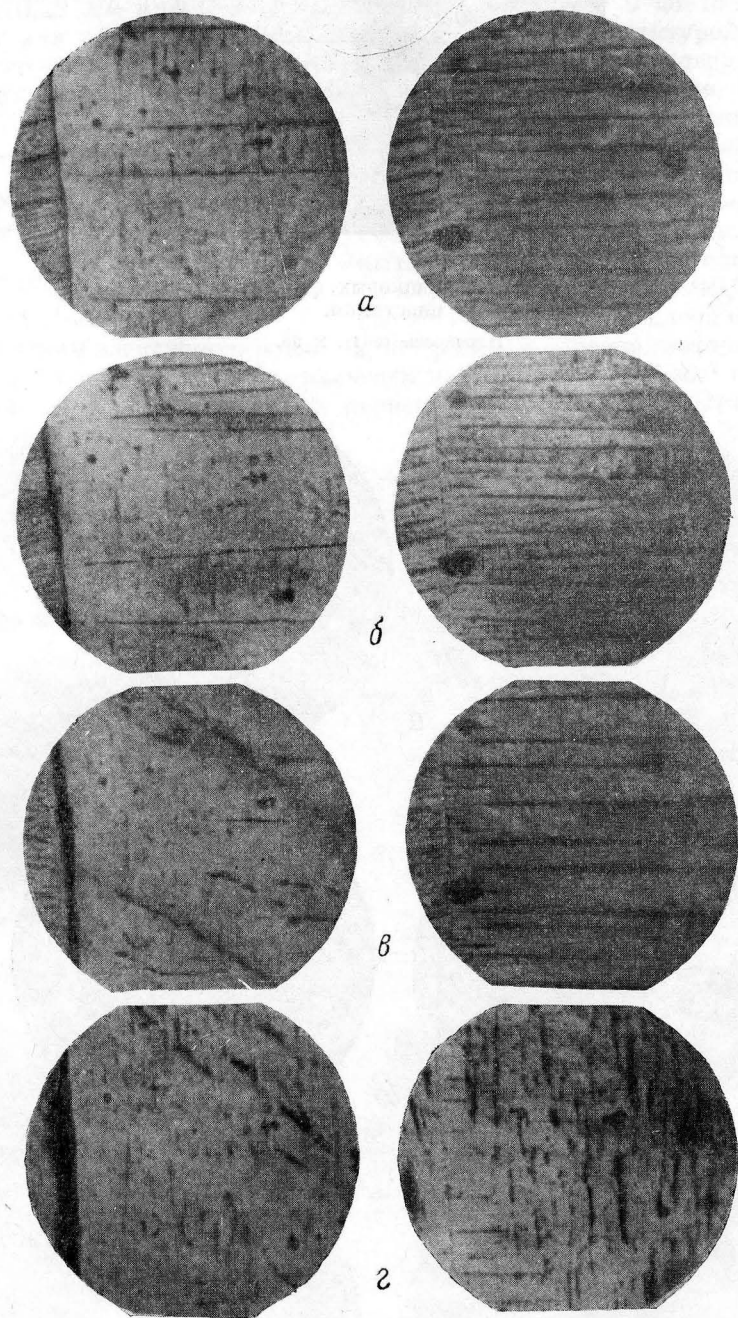


Рис. 8. Смещение границ при несквозной структуре доменов.  
 а — без поля, б — 20 э, в — 24 э, г — 65 э. Направление поля горизонтальное.  $\times 90$ .

нии. В частности, можно объяснить возникновение новых границ или исчезновение существующих. Это может происходить только при наличии в образце доменов клиновидной формы, когда стенки клиньев (границы клиновидных доменов) при растяжении сходятся или расходятся своими концами.

Следует заметить, что бывают случаи, когда граничный слой идет практически точно под углом  $45^\circ$  к поверхности. На рис. 6 показан вид доменов на торце образца-пластинки, перпендикулярном направлению легкого намагничивания, лежащего в плоскости поверхности кристалла. В этом случае рассматриваемая поверхность торца является плоскостью типа (001) с двумя направлениями легкого намагничивания. Как видно из рис. 6, границы идут через кристалл под углами почти точно в  $45^\circ$  к поверхности пластинки, т. е. в направлении легкого намагничивания [100].

**3. Наблюдение процессов намагничивания.** Процесс намагничивания в очень сильной степени зависит от того, имеет образец сквозную или несквозную структуру.

На рис. 7 показан процесс намагничивания образца, имеющего сквозную структуру доменов. Как видно из рисунков, намагничивание (процесс смещения) происходит равномерно по всему образцу и заканчивается в очень слабых полях. Рис. 8 показывает процесс намагничивания образца, имеющего не сквозную, а более сложную структуру. В этом случае намагниченность образца в разных местах оказывается неодинаковой: намагничивание идет быстрее в тех местах, где домены имеют больший объем, и медленнее там, где домены по величине меньше. Сравнение рис. 8, в и 8, г, на которых уже появились фигуры насыщения, показывает, что одинаковое состояние в случае крупных доменов достигается в полях, примерно в три раза меньших, чем в случае участков с малыми доменами. Из рис. 8 также следует, что в случае сквозной структуры насыщение достигается в более слабых полях.

#### Литература

1. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. *Sov. Phys.*, 8, 153, 1935.
2. Е. М. Лифшиц. *Ж. эксперим. и теор. физ.*, 15, 97, 1945.
3. L. Neel. *J. phys. et radium*, 5, 241, 265, 1944.
4. Л. В. Киренский, В. Д. Дылгеров, М. К. Савченко. *Изв. АН СССР. Сер. физ.*, 8, 1168, 1957.
5. Л. В. Киренский, М. К. Савченко. *Изв. высших учебных заведений. Физика*, 1, 39, 1958.
6. C. D. Graham, P. W. Neurath. *J. Appl. Phys.*, 8, 881, 1957.

Красноярский институт физики  
Сибирского отделения АН СССР

Поступила в редакцию  
31.III.1959