

*Л. В. КИРЕНСКИЙ, М. К. САВЧЕНКО*

## О ПРОСТРАНСТВЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Современные теоретические представления о магнитной структуре ферромагнетиков приводят к целому ряду конкретных схем распределения доменов в ферромагнитных кристаллах.

Согласно этим схемам, домены кристалла, который подразумевается идеальным, представляют собой плоско-параллельные слои, проходящие через весь кристалл от одной стороны до противоположной. Около некоторых поверхностей имеются домены замыкающего типа. Известный опыт Вильямса и Шокли [1] с монокристалльной рамкой, казалось, подтверждает справедливость этих схем.

Однако в случае реальных кристаллов существует целый ряд экспериментальных данных, объяснение которых на основе указанных моделей крайне затруднительно. Укажем, в частности, на следующие опытные факты:

1) При исследовании динамики порошковых фигур на плоскости (110) кристалла кремнистого железа с увеличением растягивающих нагрузок вдоль направлений  $[001]$  и  $[111]$  могут возникать новые границы или исчезать старые. 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 [2].

2) При вращении монокристаллического диска в магнитном поле, близком к насыщению, в направлении легкого намагничивания не получается ожидаемого периодического изменения ширины доменов, которое должно было бы наблюдаться, если бы домены представляли собой плоско-параллельные слои, проходящие через весь кристалл. Опыт дает значительно более сложную картину (см. ст. И. Ф. Дегтярева и В. Д. Дылгера в настоящем сборнике).

Кроме того, авторами в свое время было обнаружено, что на поверхности кристалла могут наблюдаться замыкающие треугольные домены не на границах кристаллитов, а внутри их [3]. Совершенно естественно предположить о наличии таких замыкающих доменов внутри кристаллов, и тогда структура, состоящая из плоскопараллельных доменов, проходящих через всю толщу кристалла, не будет представлена как единственно возможная.

Наличие внутри кристалла структуры, отличной от структуры на поверхности, должно привести к тому, что порошковые фигуры на противоположных поверхностях кристаллита окажутся не одинаковыми.

В настоящей работе проведено одновременное исследование порошковых фигур на различных поверхностях ферромагнитного кристаллита.

### Экспериментальная часть

Исследуемые образцы вырезались из листов трансформаторной стали (3% кремния) и имели вид полосок длиной 30—40 мм, шириной 6 мм и толщиной до 0,4 мм и меньше. Изучение доменной структуры проводилось методом порошковых фигур. Перед наблюдением порошковых фигур образцы тщательно шлифовались, подвергались электрополировке и отжигались при 1000—1100°C в течение 3 часов с последующим медленным охлаждением в вакууме.

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).

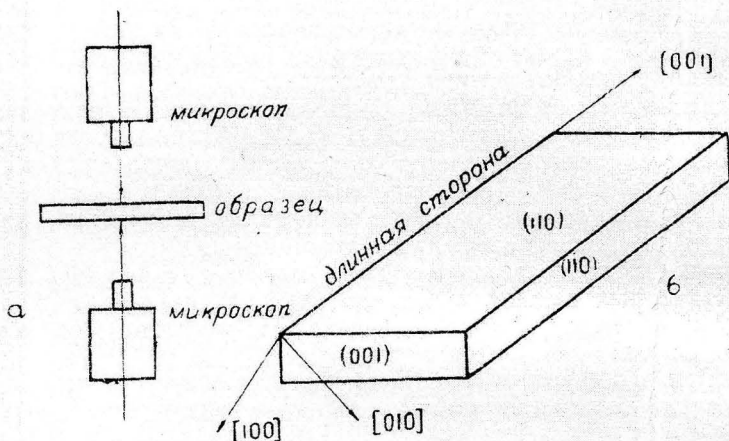


Рис. 1.

а — схема экспериментальной установки для наблюдения порошковых фигур;  
б — поверхности наблюдения на кристаллах.

На приводимых ниже фотографиях видны взаимно-перпендикулярные линии (крест нитей), которые были натянуты перед фотокамерами микроскопов. Оптические оси микроскопов проходят через точки пересечения указанных нитей.

В результате такой установки оказалось возможным производить одновременное наблюдение и фотографирование порошковых фигур на противоположных сторонах кристалла. Очевидно, что в случае сквозного прохождения доменов через весь кристалл, порошковые фигуры на обеих поверхностях должны быть одинаковыми.

Наблюдения производились на поверхностях кристаллов, указанных на рис. 1, б, т. е. на больших поверхностях (110) — сверху и снизу, (110) — сбоку и (001) — на торце спереди.

### Результаты наблюдений

а) Наблюдения на широких поверхностях образцов. На рис. 2 представлены характерные порошковые фигуры в одних

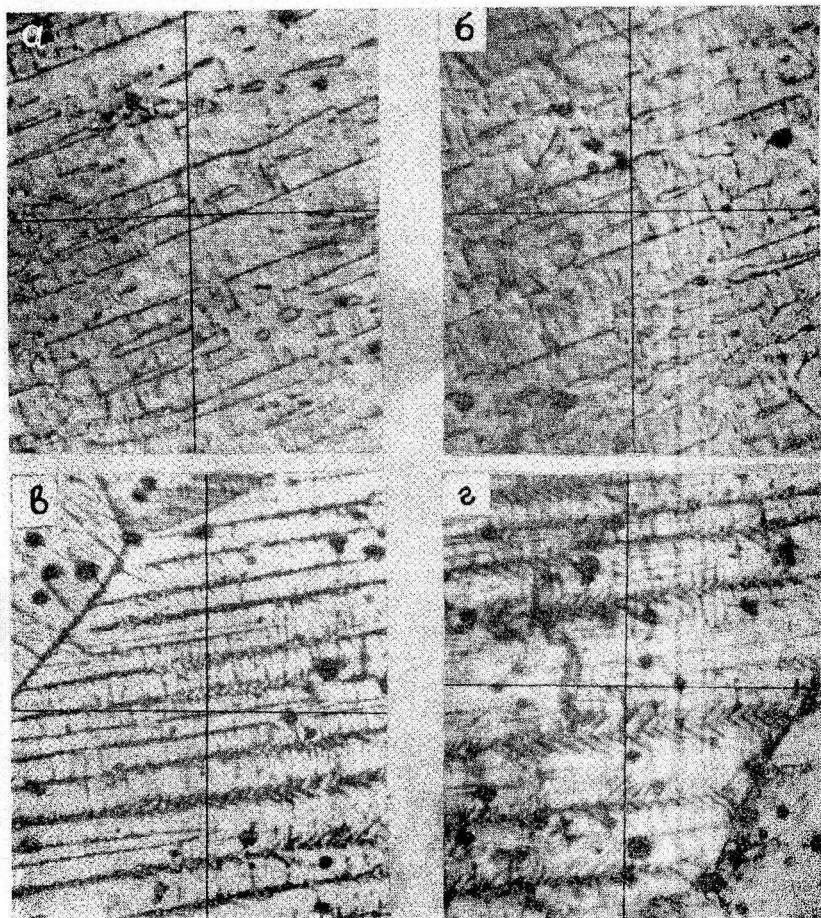


Рис. 2. Фигуры с «клиньями» (а, б) и с «елочками» (в, г) на противоположных поверхностях кристаллов (увелич.  $90\times$ )

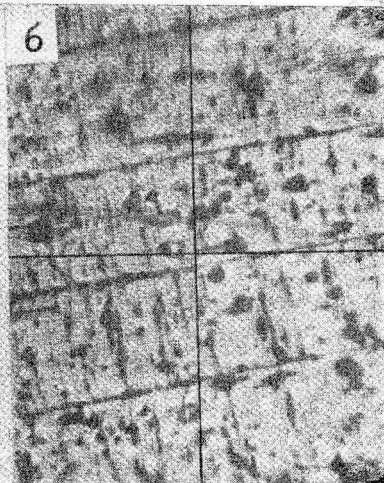


Рис. 3. Порошковые фигуры на противоположных поверхностях кристалла, незначительно растянутого по горизонтали (увелич. 90 $\times$ ).

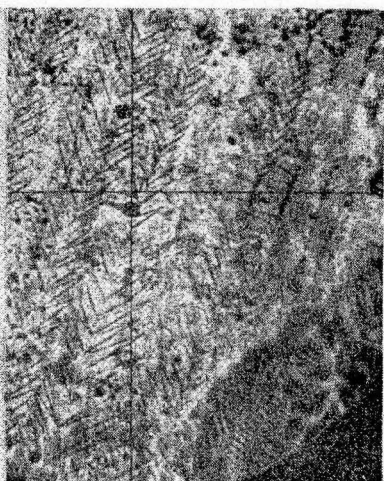
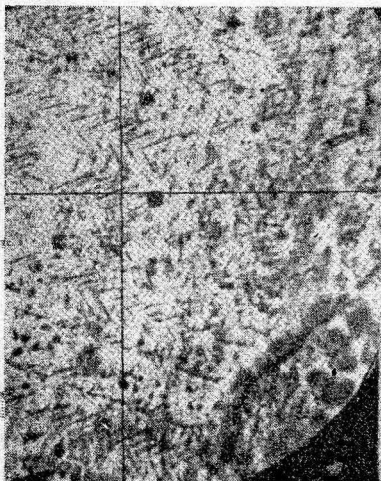


Рис. 4. Взаимно-перпендикулярное расположение фигур типа «елочек» на противоположных поверхностях кристалла (увелич. 90 $\times$ ).



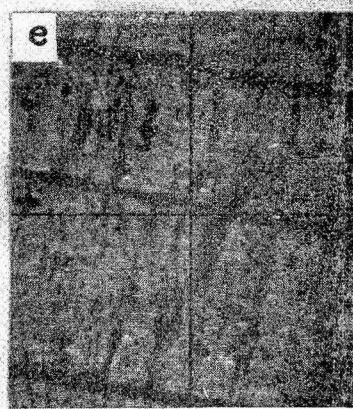
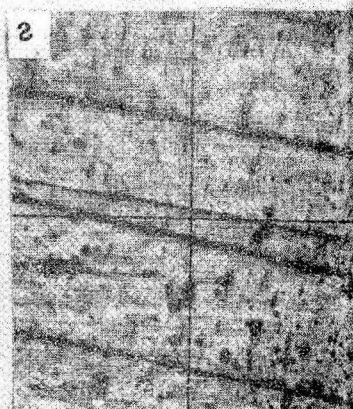
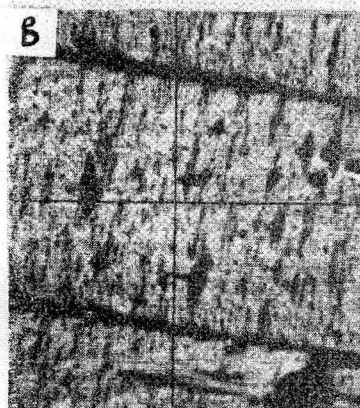
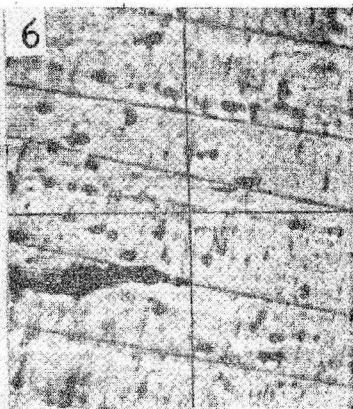


Рис. 5. Изменение доменной структуры при уменьшении толщины кристалла.  
 а, б — 0,33 мм, в, г — 0,17 мм, д, е — 0,08 мм (увелич. 90 ×).

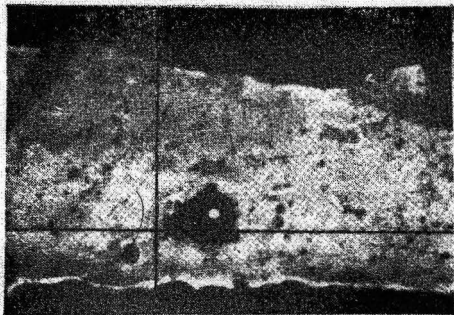


Рис. 6. Вид порошковых фигур на торце [плоскость (001)] тонкой пластинки (увел. 90  $\times$ ).

и тех же местах противоположных поверхностей в отсутствии магнитного поля и растягивающих напряжений. Как видно из этих рисунков, вид доменной структуры на верхней и нижней поверхностях не является одинаковым. Видно также, что поверхностные домены («клинья») на плоскости, близкой к (110), и домены («елочки») на плоскости, близкой к (100), на противоположных сторонах кристалла имеют обратные направления. Обратное расположение поверхностных доменов является следствием «обратного» наклона плоскостей (110) и (100) по отношению к наблюдаемым поверхностям и является подтверждением работ, проведенных ранее [4, 5].

Ввиду того, что поверхностные домены «затушевывают» вид основной структуры на поверхности, в последующем образцы растягивались нагрузкой  $5-6 \text{ кг/мм}^2$  вдоль порошковых линий, направления которых совпадают с направлением легкого намагничивания. В этом случае поверхностные домены исчезают и порошковые фигуры отображают основную доменную структуру ферромагнитного кристалла.

На рис. 3 показан характерный случай порошковых фигур на противоположных сторонах кристалла в плоскости, близкой к (110), при растяжении. Как видно из рисунка, на верхнюю и нижнюю поверхности выходят домены неодинаковой ширины. Общее число границ, выходящих на противоположные поверхности, неодинаково. Это говорит о том, что доменная структура не пронизывает всю толщу кристалла, а замыкание основных доменов происходит каким-то образом внутри кристалла.

Особенно характерной является структура (рис. 4), часто встречающаяся среди кристаллов, большие поверхности которых ограничены плоскостями, близкими к (100). Как видно из рисунка, порошковые фигуры, отображающие доменную структуру на противоположных сторонах кристалла, не только не являются идентичными, но даже идут во взаимно-перпендикулярных направлениях. 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 в одних и тех же местах противоположных поверхностей кристалла при различной его толщине. Толщина кристалла уменьшалась путем электрополировки. Порошковые фигуры, полученные на одном и том же месте кристалла при различной его толщине, показаны на рис. 5.

Как видно из этих рисунков, с уменьшением толщины доменная структура выравнивается и при толщине  $0,08 \text{ мм}$  порошковые фигуры на обеих поверхностях точно совпадают. Этот факт говорит также о том, что границы между доменами проходят нормально поверхностям.

Для различных кристаллитов толщина, при которой порошковые фигуры имеют одинаковый вид на противоположных поверхностях, различна и зависит от исходных состояний кристаллитов.

б) Наблюдения на узких сторонах пластинок. Производились наблюдения порошковых фигур на узких сторонах пластинок (рис. 1), соответствующих плоскостям (110) и (001). На плоскости (110), как правило, никаких фигур не наблюдается. Иногда бывают заметны поверхностные домены в виде «клиньев». Отсутствие фигур на этой стороне пластинки вполне понятно, так как поверхность очень узкая и длинной стороной ориентирована вдоль направления легкого на-

магничивания — направления, вдоль которого на широких сторонах пластинки и идут порошковые фигуры.

На плоскости (001) порошковые фигуры идут вдоль одной из осей легкого намагничивания, причем границы между доменами проходят через всю поверхность кристалла (рис. 6).

Однако эти домены распространяются, по-видимому, в направлении [001] на небольшую глубину, так как иначе на больших поверхностях порошковые фигуры имели бы одинаковый вид.

## Выводы

В реальных ферромагнитных кристаллах доменная структура, как правило, не представляет собою плоскопараллельных слоев, пронизывающих всю толщу кристалла.

В кристаллах, имеющих форму пластин, большие поверхности которых совпадают с плоскостью (110), доменная структура состоит из параллельных слоев, направленных вдоль оси [001], но не пронизывающих всю толщу кристалла. На противоположных сторонах пластины порошковые фигуры, как правило, различны.

В кристаллах, имеющих форму пластин, большие поверхности которых совпадают с плоскостью (100), доменная структура состоит из слоев, направленных вдоль одной из осей намагничивания. Эти слои обычно не пронизывают всю толщу кристалла и на противоположных сторонах кристалла могут идти перпендикулярно друг другу.

С уменьшением толщины кристалла его структура меняется. При толщине около 80 мк слоистая структура доменов пронизывает всю толщу кристалла, а граничные слои идут нормально поверхностям пластин, от одной поверхности до другой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. H. J. Williams, W. Shockley. Phys. Rev., 75, 178, 1949.
2. Л. В. Киренский, М. К. Савченко. Изв. АН СССР, сер. физ., 8, 1168, 1957.
3. Л. В. Киренский, М. К. Савченко. Изв. вузов МВО СССР, Физика, 1, 39, 1958.
4. H. J. Williams, R. M. Bozorth, W. Shockley. Phys. Rev., 75, 155, 1949.
5. М. К. Савченко. Дисс., педагогический ин-т, Красноярск, 1958.

*Институт физики СО АН СССР  
г. Красноярск*