

Л. В. КИРЕНСКИЙ, М. К. САВЧЕНКО и А. М. РОДИЧЕВ

## ДИНАМИКА ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В КРИСТАЛЛАХ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СТАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАПРЯЖЕНИЙ

При помощи порошковых фигур Агулова — Биттера [1] исследовалось влияние упругих растяжений на доменную структуру кристаллов холоднокатаного трансформаторного железа (3,4% Si). Показано, что при растяжениях доменная структура существенно изменяется, причем характер этих изменений зависит от направления прилагаемой нагрузки. Изменения доменной структуры наблюдались также путем регистрации скачков Баркгаузена.

### I. Проведение эксперимента

Для наблюдений выбирались кристаллы, поверхность которых совпадала с плоскостью типа (110). Образцы вырезались в виде полосок  $0,5 \times 4 \times 60$  мм. Образцы отжигались в вакууме при  $1000^\circ$  в течение 3—4 час и затем электролитически полировались. Растяжение производилось механизмом, в котором один конец образца зажимался неподвижно, а другой — через салазки, и динамометр тянулся мотором. Наблюдение и фотографирование фигур производилось при помощи микроскопа МИМ-5. Регистрация скачков Баркгаузена осуществлялась искательной катушкой, надетой на образец, и пересчетными схемами ПС-64 с разрешающей способностью 6400 импульсов в секунду.

### II. Результаты наблюдений

На поверхностях кристаллов, совпадающих с плоскостью (110), порошковые фигуры имеют вид параллельных линий, идущих в направлении оси легкого намагничивания, ближайшей к поверхности. Такой вид порошковых фигур говорит за то, что доменная структура состоит из плоскопараллельных слоистых доменов, расположенных в направлении порошковых линий и в этом же направлении намагниченных. Наиболее существенные изменения, происходящие с порошковыми фигурами, а значит, и с самими доменами, включают в следующем.

#### 1. Растяжение вдоль направления [001]

Плоскопараллельные слоистые домены в одном и том же образце никогда не бывают равными по ширине, что является следствием остаточных напряжений, все же присутствующих в образцах, несмотря на длительный отжиг. Наложение растяжения на образец выравнивает общие напряжения на образце, и вследствие этого выравнивается и доменная структура.

При растяжении часто наблюдается деление слоистых доменов пополам вновь образующимися границами (рис. 1). Появление новых границ внутри доменов указывает на то, что намагниченность изменяет свое направление на обратное в отдельных участках кристалла, именно полностью перемагничивается объем кристалла, заключенный между вновь образовавшимися границами. Деление доменов вновь образующимися границами является следствием более общего явления сокращения доменов по ширине в результате увеличения при растяжении эффективной константы магнитной кристаллографической анизотропии. Очевидно, что такое

сокращение возможно только путем деления части доменов вновь образующимися границами. Следует заметить, что перемагничивание ряда доменов осуществляется не смещением границы, а, по-видимому, внезапной инверсией целых доменов.

## 2. Растяжение вдоль направления [110]

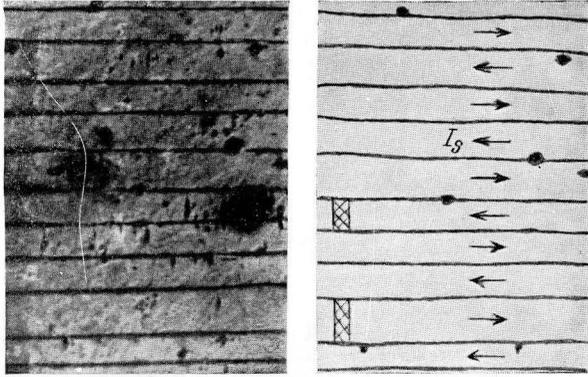
Напряжения, направленные в кристалле вдоль оси [110], полностью перестраивают первоначальную структуру доменов (рис. 2), и при достаточной величине натяжений появляются два новых типа фигур: горизонтальные и вертикальные полосы, которые назовем соответственно фигурами типа 1 и типа 2, причем вертикальные полосы состоят в свою очередь из мелкой мозаичной структуры. Оба типа фигур образуют между собой сложную замкнутую систему. При увеличении нагрузки фигуры типа 2 растут за счет сокращения объема фигур типа 1. Это говорит за то, что намагниченность в обоих типах фигур направлена перпендикулярно ходу полос. Промеры ширины полос фигур типа 1 показывают, что ширина этих полос линейно уменьшается с ростом логарифма напряжений. Ввиду такого исключительно характерного вида по данным фигурам можно определять напряжения в металле, и не только качественно, но и количественно.

Описанные изменения порошковых фигур связаны с перестройкой доменной структуры вследствие перераспределения легких осей в кристалле под действием напряжений. Первоначальная легкая ось [001] составляет с направлением растяжения угол  $90^\circ$ , а потому при наложении напряжений она заменяется осью [100] либо осью [010], которые хотя и не лежат в плоскости кристалла, но все же составляют с направлением растяжения угол, в два раза меньший.

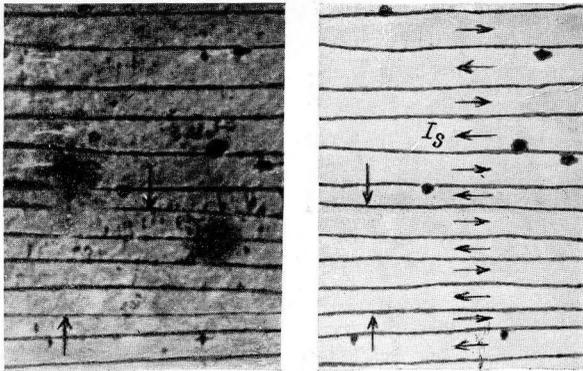
**Мелкозернистые образцы.** До сих пор речь шла о таких кристаллах, каждый из которых составлял целый образец. Для сравнения были проведены такие же наблюдения и на образцах мелкокристаллических, с линейным размером зерен 1—1,5 мм. Ранее такая работа была выполнена Дикстра и Мартиусом [2], однако некоторые детали ими не были замечены. На малых кристаллах фигуры типа 2 появляются сначала на границах зерен, так как там большие по сравнению со всем зерном напряжения. В большинстве случаев появлению фигур типа 2 способствуют образующиеся на границах доменов типа 1 «капли» (рис. 2, б), причем объем этих капель с увеличением нагрузки увеличивается. При некотором напряжении капли настолько разбухают, что становятся неустойчивыми, с краев начинают раскрываться и «тянут» за собой мозаику, т. е. фигуры типа 2. Таким образом и увеличивается площадь, занимаемая этими фигурами на кристалле. Относительно намагниченности капель можно сказать, что они намагничены вдоль своей длинной стороны, т. е. так же, как и фигуры типа 2, причем на одной границе намагниченность всех капель направлена в одну и ту же сторону. Это подтверждается увеличением их размеров при продольном растяжении и отсутствием резких границ между ними и фигурами типа 2.

Кроме «капель», на границах между доменами типа 1 может образоваться еще один вид фигур — так называемые «цепочки». Они появляются при намагничивании кристалла полем, направленным вдоль этих границ. При этом при одном направлении поля цепочки образуются на одной половине всех границ (через одну), при повороте поля на  $180^\circ$  цепочки образуются на другой части границ. Намагниченность цепочек, как и капель, также направлена вдоль поля. Вид этих фигур показан на рис. 2, в. Появление этих фигур связано, по-видимому, с выходом на поверхность внутренних ферромагнитных областей, в то время как области типа 1 являются поверхностными.

В случае малых кристаллов, так же как и в случае больших, наблюдается, что ширина доменов типа 1 с ростом натяжения уменьшается.



a



б

Рис. 1. Расщепление доменов вновь образующимися границами (отмечены стрелками). Направление растяжения горизонтальное. Увеличение  $50\times$ . Схема (справа) дает распределение намагниченности  $I_s$  в доменах. Напряжения  $\sigma$  в  $\text{кг мм}^{-2}$ : а — 10, б — 15

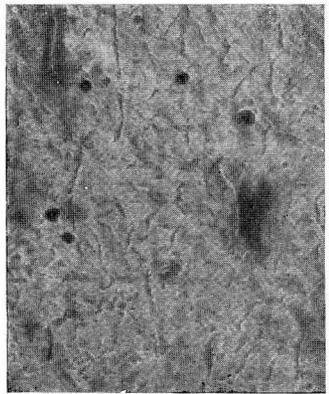
a



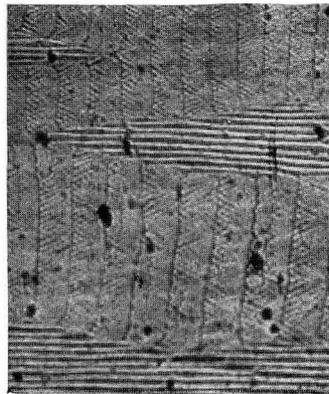
$\sigma=0$



$\sigma=1,8$

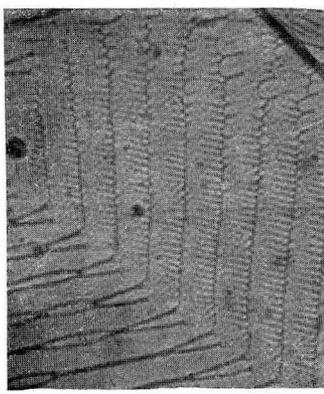


$\sigma=9$

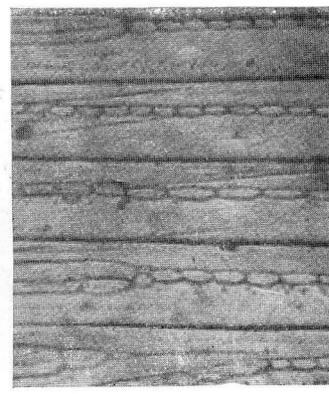


$\sigma=20$

b

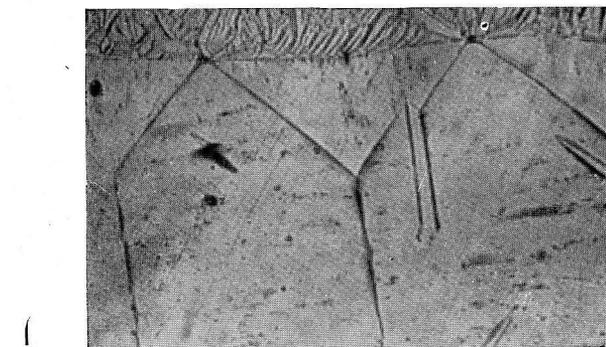


$\sigma=12$



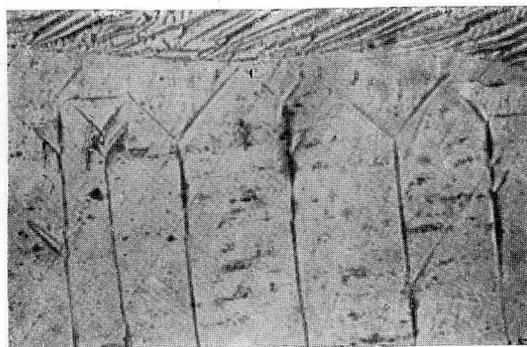
$\sigma=16$ ; поле  $H=200$  Oe

Рис. 2. Порошковые фигуры при растяжении вдоль оси [110] (напряжение  $\sigma$  в  $\text{кг мм}^{-2}$ ); направление растяжения горизонтальное; *a* — перестройка структуры, увеличение  $60\times$ ; *b* и *c* — капли и цепочки на границах между доменами типа 1. Увеличение  $150\times$

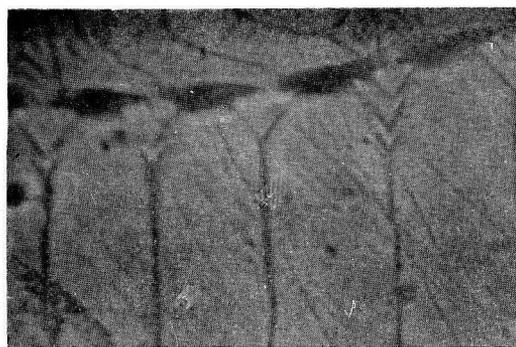


$\sigma=4$

a }



$\sigma=11$



$\sigma=12$

b

Рис. 3. Перестройка доменов при растяжении (напряжение  $\sigma$  в  $\text{кг мм}^{-2}$ ): *a* — дробление замыкающих и основных доменов, направление растяжений горизонтальное; *b* — образование полюсов, направление растяжений вертикальное. Увеличение  $150\times$

Однако какой-либо более или менее простой закономерности между шириной и величиной напряжений установить не удалось. Объясняется это, по-видимому, тем, что благодаря близости границ зерен к различным участкам зерна различные части его имеют различные напряжения. Кроме того, под действием напряжений, в результате перестройки доменной структуры, на границах кристаллов образуются магнитные поля рассеяния, которые также накладывают свой отпечаток на доменную структуру.

### 3. Растяжение вдоль направления [111]

При растяжении кристаллов вдоль направления трудного намагничивания доменная структура, как показывают наблюдения, изменяется аналогично случаю растяжения вдоль оси легкого намагничивания. Впрочем, надо отметить, что при больших натяжениях, так же как и в случае растяжения вдоль среднего направления, наблюдается поворот всей структуры на  $90^\circ$ . Более подробного исследования получающейся структуры провести не удастся, так как порошковые фигуры в этом случае остаются еще слабо выраженными вплоть до предела упругости материала.

### 4. Порошковые фигуры на плоскости (100)

На кристаллах, поверхность которых совпадала с плоскостью типа (100), при растяжении исследовалось изменение доменов замыкающего типа. Исследования проводились на образцах с линейным размером зерен 1—1,5 мм. При совпадении направлений растяжений и намагниченности в призматических замыкающих доменах, последние растут. Однако их рост наблюдается только до некоторого предела, после которого они начинают дробиться на более мелкие домены, и соответственно уже новым призматическим доменам перестраивается и основная плоскопараллельная слоистая структура (рис. 3). При этом перемагничивание осуществляется не путем смещения границ, а, как уже указывалось выше, внезапным перемагничиванием значительных участков кристалла.

Если направление намагниченности в призматических доменах составляет с растяжением угол около  $90^\circ$ , то при растяжении домены сокращаются и вследствие этого на краях кристаллов образуются магнитные поля рассеяния. На рис. 3, б такие поля видны по скоплению магнитного порошка в промежутках между замыкающими доменами.

Приведенные фотографии фигур показывают, что плоскопараллельная слоистая структура ферромагнитных областей должна иметь замыкающие области, чтобы не могли возникнуть свободные поля рассеяния. В большинстве же случаев у мелкозернистых образцов на границах кристаллов нет замыкающих доменов (то же и в случае отсутствия напряжений в материале). Ферромагнитные области отдельных кристаллов устраиваются таким образом, что магнитные потоки из одного кристалла переходят в другой и т. д. Можно сказать, что доменная структура стремится распространиться через границу зерна. Это возможно, если соседние зерна имеют одинаковую или близкую кристаллографическую ориентацию. Небольшие поля рассеяния, возникающие вследствие не совсем точной одинаковости ориентировок, уменьшаются путем образования на границах «клиньев» или каких-либо других областей. На кристаллах, поверхность которых совпадает с плоскостью (100), замыкающие области образуются только в тех случаях, когда значительно отличается ориентировка соседних зерен.

### 5. Одновременное наблюдение порошковых фигур и регистрация скачков Баркгаузена при растяжении кристаллов

Несмотря на большие возможности метода порошковых фигур, изучение с его помощью доменной структуры обладает и некоторыми существенными недостатками. К числу их относятся: довольно значительная инерцион-

ность, возможность наблюдать только за поверхностью материала, малая поверхность наблюдения, а также малая применимость при исследованиях, связанных с изменениями температуры. Поэтому дальнейшее изучение доменной структуры магнитных материалов может быть плодотворным при

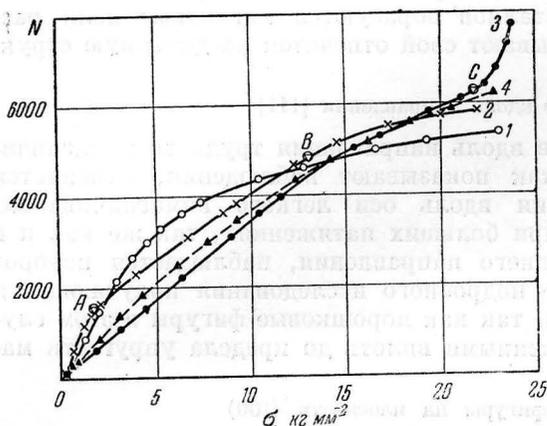


Рис. 4. Зависимость числа скачков Баркгаузена  $N$  от приложенных напряжений в направлениях  $[001]$  (кривая 1),  $[110]$  (кривая 2) и  $[111]$  (кривая 3) для монокристалла; приведена также кривая 4 для поликристаллического образца

сочетании метода порошковых фигур с каким-либо другим методом. В настоящей работе одновременно с наблюдением фигур была проведена и регистрация скачков Баркгаузена при растяжении монокристаллов вдоль различных кристаллографических направлений. Результаты показаны на рис. 4, где приведены кривые для зависимости числа скачков в  $1 \text{ мм}^3$  от величины нагрузки для четырех образцов. Ход кривых показывает следующее.

А. Р а с т я ж е н и е в д о л ь  $[001]$ . Начальный крутой подъем кривой связан с устранением поверхностных доменов и интенсивным смещением границ между основными доменами в процессе выравнивания их ширины. В дальнейшем наблюдаются только незначительные смещения границ.

Б. Р а с т я ж е н и е в д о л ь  $[110]$ . Начальный участок кривой связан с разрушением первоначальной структуры под действием напряжений. Этот процесс заканчивается около точки А. После точки А кривая испытывает излом (изгиб) и в дальнейшем идет прямолинейно до точки В. Участок АВ, в соответствии с видом порошковых фигур на рис. 2, отвечает периоду, когда в кристалле отсутствует резко выраженная доменная структура (переходный период от полного устранения первоначальной структуры до появления доменов типа 1 и 2). В дальнейшем скачки дают домены типа 1 и 2.

В. Р а с т я ж е н и е в д о л ь  $[111]$ . Ход кривой почти линейный до нагрузок порядка  $22 \text{ кг мм}^{-2}$  (точка С). Доменная структура в этот период не испытывает каких-либо изменений, кроме параллельного перемещения границ и устранения поверхностных доменов. Резкий подъем кривой после точки С связан с перестройкой всей структуры.

На графике показана также кривая для поликристалла (нетекстурованное горячекатанное трансформаторное железо с линейным размером зерен  $1-1,5 \text{ мм}$ ), которая не дает и не должна давать никаких резких изгибов, так как все направления равновероятны и число скачков определяется их суммой по всем направлениям. Приведенные кривые распределения скачков Баркгаузена показывают, что они отражают все изменения, происходящие с доменной структурой. Поэтому этот метод может быть особенно ценным при исследованиях в области низких и высоких температур, где применение порошкового метода затруднительно или совсем непригодно.

#### Цитированная литература

1. Акулов Н. С., Дехтяр М., Ann. Phys., 15, 750 (1932); Bitter F., Phys. Rev., 38, 1903 (1931); 41, 507 (1932).
2. Dijkstra L. J., Martius U. M., Rev. Mod. Phys., 23, 146 (1953).