

О ПРОЦЕССАХ НАМАГНИЧИВАНИЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Л. В. Киренский, М. К. Савченко, И. Ф. Дегтярев

Методом порошковых фигур и методом магнитооптического эффекта Керра изучалась динамика доменной структуры при намагничивании в кристаллах кремнистого железа с 3% содержанием кремния. Показано, что намагничивание осуществляется, в общем случае, в виде процессов: смещения междоменных границ, перестройки доменной структуры, вращения вектора намагниченности в направлении поля и парапроцесса. Процесс вращения завершает техническое намагничивание, процесс смещения границ предшествует перестройке доменной структуры и завершает ее.

Введение

Согласно современным представлениям, в отсутствие магнитного поля ферромагнитный кристалл оказывается разбитым на отдельные области спонтанной намагниченности — домены. Домены друг от друга отделены граничным слоем толщиной $0,6-0,9 \mu$ [1]. Конфигурация доменов данного конкретного кристалла определяется из минимума его свободной энергии [2]. Выявление доменной структуры достаточно хорошо осуществляется методом порошковых фигур [3], причем конфигурация доменов, полученная на опыте, оказалась весьма близкой к той, которая исходит из требований теории.

Намагничивание ферромагнетика, согласно современным воззрениям [4], складывается из процесса смещения границ, процесса вращения и парапроцесса. Процесс смещения границ может быть как обратимым, так и необратимым. При необратимом смещении границ возникают скачкообразные изменения намагниченности — скачки Баркгаузена.

По завершении процесса смещения кристалл оказывается намагниченным до насыщения как единое целое вдоль одной из осей легкого намагничивания ближайшей к направлению поля, процесс же вращения считается завершенным, когда вектор намагниченности совпадает по направлению с вектором поля.

Процесс смещения границ и процесс вращения частично перекрываются на некотором, сравнительно небольшом участке технической части кривой намагничивания.

Наличие процессов смещения границ и вращения не вызывает никаких сомнений и может быть легко обнаружено при помощи киносъемки порошковых фигур [5]. Парапроцесс наблюдается в сильных полях и является полностью обратимым.

Если приведенная выше схема намагничивания действительно имеет место, то при исследовании эффекта Баркгаузена на монокристаллическом диске с положительной константой анизотропии, вырезанном в плоскости типа (110), должна получиться следующая картина.

Так как доменная структура такого кристалла состоит из плоскопараллельных доменов, намагниченных вдоль и против оси типа [001], лежащей в плоскости диска, то скачок Баркгаузена будет соответствовать лишь части ферромагнетика, магнитный момент которой совершает необратимый переброс на 180° .

Поэтому измерительная катушка, фиксирующая скачки Баркгаузена, зафиксирует такой скачок полностью, если ось катушки будет совпадать с направлением [001] и лишь частично при любом другом направлении.

Так как аппаратура, с помощью которой производятся исследования скачков Баркгаузена, фиксирует их, начиная лишь с некоторой величины, то максимальное число скачков должно быть зафиксировано в направлении легкой оси, тогда как расположенная нормально этой оси катушка никаких скачков вообще зафиксировать не должна.

Существенным является именно расположение фиксирующей катушки, а не направление намагничивающего поля. Для последнего важно, чтобы слагающая на ось легкого намагничивания была отличной от нуля.

Однако подробные исследования эффекта Баркгаузена приводят к результатам прямо противоположным [6]. Максимальное число скачков оказывается в направлении [110], перпендикулярном оси легкого намагничивания. В направлении же этой оси число скачков оказывается минимальным.

Приведенный выше опытный факт нельзя объяснить, принимая, что механизм скачка — необратимое смещение части границы, остановившейся где-то на магнитных неоднородностях в кристалле. Кроме того, максимальное количество скачков соответствует, примерно, максимальному значению магнитной проницаемости, которая должна зависеть при равномерном нарастании намагничивающего поля лишь от скорости смещения границ между доменами, ибо только в этих местах ферромагнитного монокристалла магнитная проницаемость существенно больше единицы, хотя где-то внутри доменов близка к ней.

Однако непосредственный промер скорости перемещения границы при равномерном нарастании поля показывает, что максимальная скорость перемещения границы соответствует начальному участку кривой намагничивания [5], что, как правило, не соответствует максимальной магнитной проницаемости.

Приведенные выше несоответствия некоторых экспериментальных данных теоретической схеме намагничивания требуют постановки опытов, с помощью которых можно было бы уточнить механизм процесса намагничивания в ферромагнетиках.

Постановка эксперимента

Исследование производилось на кристаллах кремнистого железа с 3% содержания кремния. Образцы вырезались в форме пластинок 30×6 мм² или дисков диаметром 20 мм. Толщина образцов была от 0,3 мм и меньше. Поверхность образцов совпадала с плоскостью типа (110) или была близка к ней. В пластинках длинная сторона совпадала с направлением [001]. Образцы отжигались в вакууме в течение 2—3 час при температуре 1000° С с последующим медленным охлаждением в печи и затем подвергались электрополировке.

Изменение доменной структуры образца в магнитном поле нарастающей напряженности изучалось методом порошковых фигур и методом меридионального магнитооптического эффекта Керра [7]. Для визуальных наблюдений и фотографирования доменной структуры магнитооптическим методом исследуемые образцы покрывались равномерным слоем окиси железа [7]. Доменная структура изучалась порошковым методом одновременно на противоположных поверхностях образца. Наблюдение велось при помощи двух микроскопов МИМ-6, установленных вертикально объективами друг к другу таким образом, чтобы оптические оси микроскопов точно совпадали.

Результаты наблюдений и их анализ

Магнитооптические наблюдения. На образце в форме диска диаметром 20 мм и толщиной 0,3 мм проведено наблюдение динамики доменной структуры при намагничивании по различным направлениям, лежащим в плоскости образца. При намагничивании в легком направлении наблюдалось только смещение 180-градусных границ. На рис. 1 показано

изменение доменной структуры при намагничивании того же образца под углом 55° к легкой оси. В отсутствие поля исходные фигуры состоят из параллельных темных и светлых полос, которые соответствуют доменам, намагниченных вдоль и против оси $[001]$ (рис. 1, кадр 1). Кроме основных фигур видны мелкие клинья, указывающие на то, что поверхность образца имеет небольшой наклон к кристаллографической плоскости типа (110) . В полях, не превышающих 100 Ое, в основном наблюдается расширение светлых полос (рис. 1, кадры 2—5). В полях от 100 до 200 Ое происходит перестройка доменной структуры (рис. 1, кадры 6—10). При визуальном наблюдении этой перестройки виден ее ярко выраженный скачкообразный характер.

С дальнейшим ростом поля до 300 Ое наблюдаются процессы смещения междоменных границ вновь возникающей структуры (рис. 1, кадры 11—14).

В полях выше 300 Ое никаких фигур не наблюдается, так как достигнуто техническое насыщение. При уменьшении напряженности поля процесс протекает в обратном порядке (рис. 1, кадры 15—20). В конце наблюдения границы между доменами имеют значительные искривления (рис. 1, кадр 20). После размагничивания переменным полем доменная структура вновь возвращается к исходной.

Подобные изменения доменной структуры наблюдались при намагничивании и под другими различными углами к легкой оси, превышающими 30° . Характерной особенностью фигур, возникающих в результате перестройки, является то, что направление темных и светлых полос в них перпендикулярно трудной оси, ближайшей к вектору магнитного поля. Таким образом при изменении угла между вектором \mathbf{H} и направлением $[001]$ от 0 до 360° можно наблюдать новые фигуры только с двумя направлениями полос, перпендикулярными двум осям трудного намагничивания, лежащим в плоскости образца.

Значительно более сложная перестройка доменной структуры наблюдается при намагничивании под углом 90° к легкой оси, т. е. вдоль направления типа $[110]$. Результаты этих наблюдений представлены на рис. 2.

При наложении магнитного поля процесс смещения границ практически не наблюдается (рис. 2, кадры 1—4). В полях от 90 до 200 Ое идет перестройка доменной структуры. Возникают фигуры, состоящие из ломаных полос (рис. 2, кадры 5—10). В этом случае одновременно выявляются оба направления, характерные для фигур этого типа. С дальнейшим ростом напряженности поля происходит дробление на более мелкие домены и фигуры принимают вид мелких извилистых полос с преимущественным направлением вдоль оси $[110]$, т. е. по полю (рис. 2, кадры 11—19). С уменьшением напряженности поля процесс происходит в обратном порядке, но характерные направления выражены менее четко (рис. 2, кадры 20—28). Как видно из этого рисунка, а также из визуальных наблюдений, в течение всего процесса намагничивания в полях до 400 Ое смещения границ не наблюдается, а происходящая перестройка фигур идет в виде скачков, при которых перемагничиваются отдельные объемы образца.

Очевидно, что такое резкое изменение фигур обусловлено существенным изменением доменной структуры внутри кристалла.

Подобные изменения доменной структуры магнитооптическим методом наблюдались на нескольких образцах. На образцах толщиной 200—400 μ , как правило, наблюдалась описанная перестройка доменной структуры. На образцах толщиной от 100 μ и меньше столь сложного изменения фигур часто не наблюдалось, а главным образом происходил процесс смещения границ исходных фигур, и только при намагничивании в направлении, близком к оси типа $[110]$, возникали новые фигуры в виде мелких извилистых линий, ориентированных вдоль той же оси $[110]$ ¹.

¹ Наиболее отчетливо описанные изменения доменной структуры наблюдаются при просмотре кинофильма, снятого в процессе данной работы магнитооптическим методом.

К статье Л. В. Киренского, М. К. Савченко, И. Ф. Дегтярева
«О процессах намагничивания в ферромагнетиках»

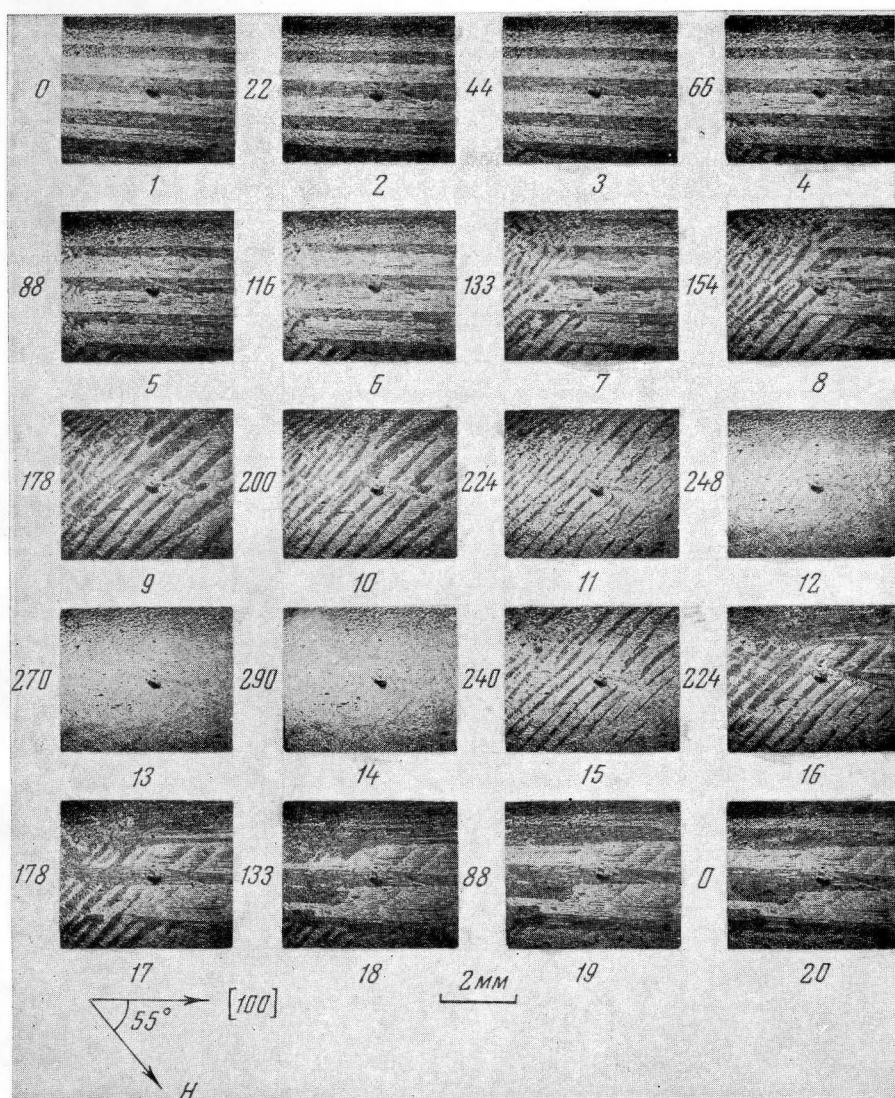


Рис. 1. Динамика доменной структуры в магнитном поле изменяющейся напряженности, направленном под углом 55° к оси легкого намагничивания. Числа слева — значения напряженности внешнего магнитного поля в Ое; цифры под кадрами — порядковые номера

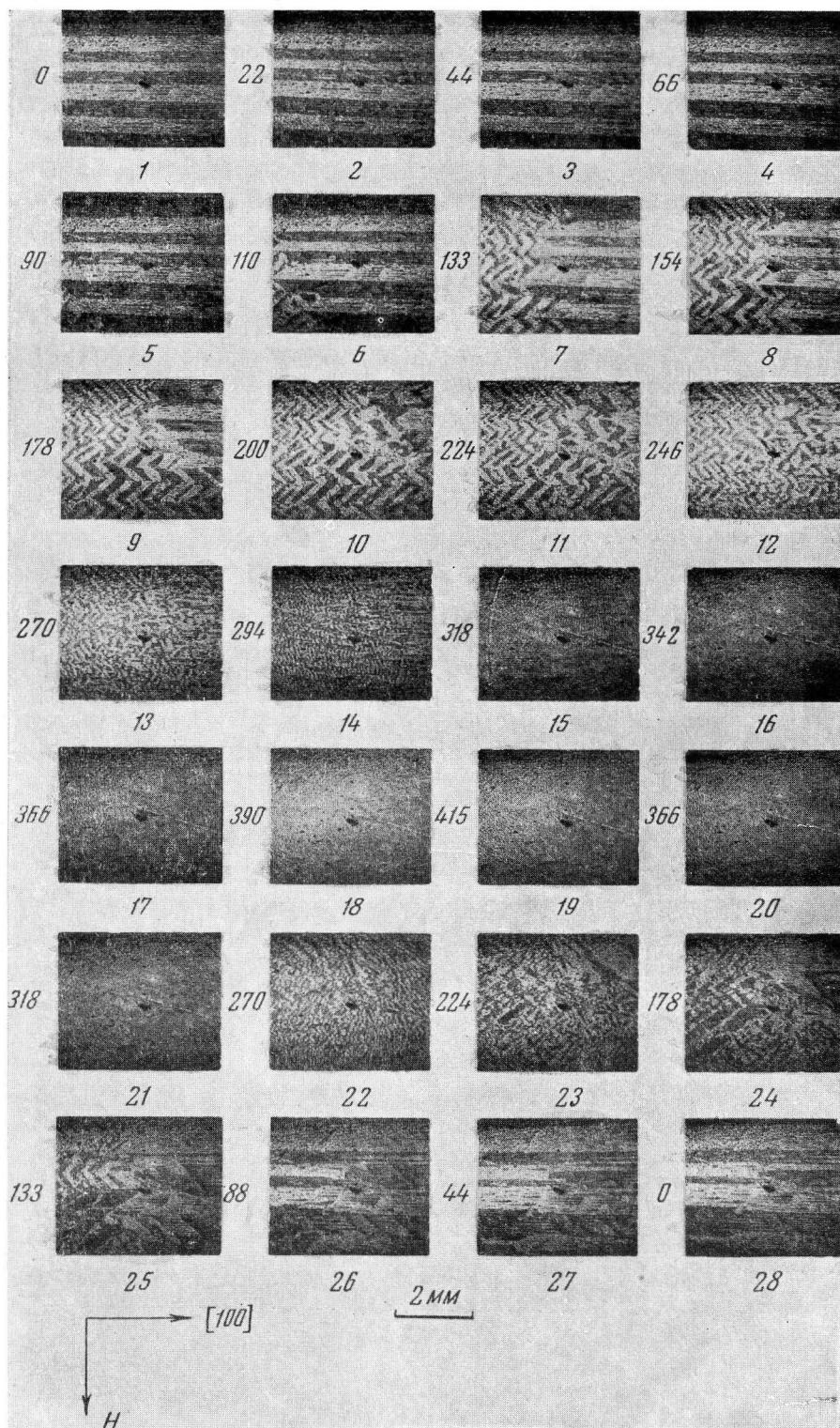


Рис. 2. Динамика доменной структуры в магнитном поле изменяющейся напряженности, направленном вдоль оси типа $[110]$ перпендикулярно оси легкого намагничивания. Числа слева — значения напряженности внешнего магнитного поля в Ое; цифры под кадрами — порядковые номера

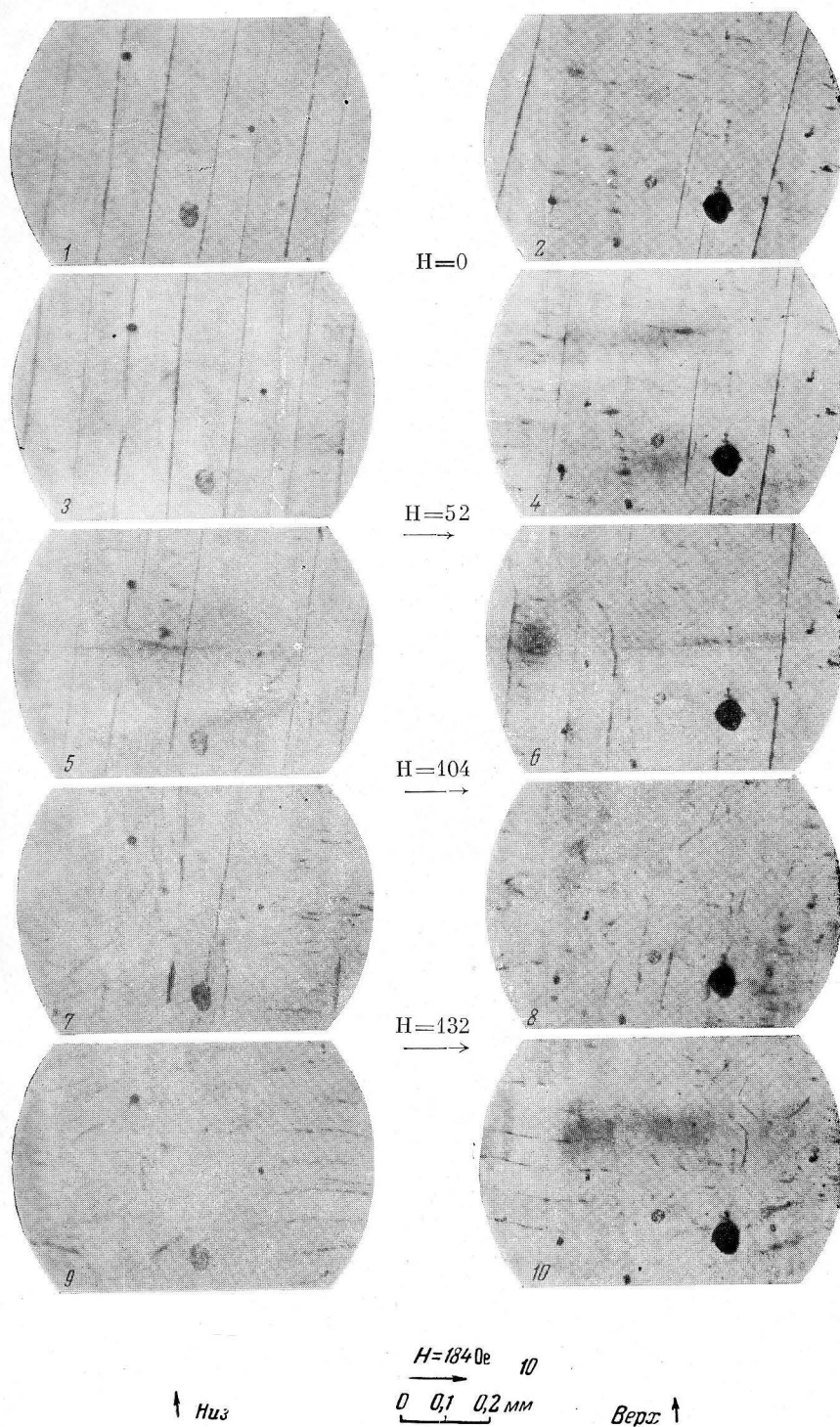


Рис. 3. Динамика доменной структуры на противоположных сторонах кристалла в нарастающем магнитном поле. Доменная структура «несквозная»

Наблюдения порошковых фигур. На рис. 3 представлены порошковые фигуры, снятые на противоположных сторонах одного и того же кристалла. Как видно из этого рисунка, доменная структура не является «сквозной», а претерпевает существенные изменения внутри кристалла. На верхней поверхности виден всего один целый по ширине домен и два частично, тогда как на нижней поверхности видно большое количество плоскопараллельных доменов примерно одинаковой толщины. При наложении возрастающего поля, направленного по горизонтали, изменение фигур происходит также по-разному. Структура на верхней поверхности почти не изменяется вплоть до полей 100 Ое, затем начинается разрушение доменной структуры и, наконец, в более сильных полях выявляется новая структура. На нижней поверхности более отчетливо наблюдается смещение границ, которое нарушается в дальнейшем перестройкой доменной структуры.

Интересно отметить, что те домены, которые сокращались с увеличением поля непосредственно перед перестройкой всей доменной структуры, несколько увеличиваются в объеме и затем разрушаются.

Таким образом намагничивание ферромагнитного кристалла не исчерпывается процессами смещения границ, вращения и парапроцесса. Значительную роль в процессах намагничивания играет процесс перестройки доменной структуры, сопровождающийся большим числом скачков Баркгаузена и соответствующий максимальной магнитной проницаемости.

Институт физики
Сибирского отделения
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
31 марта 1959 г.

Литература

- [1] Л. В. Киренский, В. В. Ветер. ЖЭТФ, 35, 819, 1958.
- [2] L. D. Landau, E. M. Lifschitz. Sow. Phys. 8, 153, 1935.
- [3] F. Bitter. Phys. Rev., 38, 1093, 1931; N. S. Akulov, M. V. Dehtjar. Ann d. phys., 750, 1932.
- [4] С. В. Вонсовский, Я. С. Шур. Ферромагнетизм, Гостехиздат, 1948, Р. Б о з о р т. Ферромагнетизм, ИИЛ, 1956.
- [5] Л. В. Киренский, В. Д. Дылгеров. ФММ, 3, 216, 1956; Л. В. Киренский, В. Д. Дылгеров, М. К. Савченко. Изв. АН СССР, серия физ., 8, 1168, 1957.
- [6] В. Ф. Ивлев, В. Л. Ильюшенко, Л. И. Асеева. Изв. АН СССР, серия физ., 9, 1250, 1957.
- [7] Л. В. Киренский, И. Ф. Дегтярев. ЖЭТФ, 35, 584, 1958.

MAGNETIZATION PROCESSES IN FERROMAGNETIC SUBSTANCES

L. V. Kirensky, M. K. Savchenko, I. F. Dekhtyaryov

The dynamics of the domain structure during magnetization of silicon iron crystals containing 3% of silicon was studied with aid of powder figures and the Kerr magnetooptical effect. It is shown that in general magnetization involves the following processes: shift of inter-domain boundaries, change in the domain structure and rotation of the magnetization vector in the direction of the field and finally the paraprocess. The rotation process is the termination of technical magnetization whereas the boundary displacement process precedes the change in the domain structure and completes it.