

## ФИЗИКА СКАЧКОВ БАРКГАУЗЕНА ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ

Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И.

Институт физики металлов им.М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия  
[drago@imp.uran.ru](mailto:drago@imp.uran.ru); [pudov@imp.uran.ru](mailto:pudov@imp.uran.ru)

Энергосбережение, эффективная работа электротехнических устройств и их миниатюризация в современной технике требуют улучшения физических свойств магнитных материалов, используемых в качестве магнитопроводов в переменных магнитных полях. Одним из путей снижения магнитных потерь, изменения магнитострикции и повышения магнитной проницаемости магнитомягких сплавов, в частности анизотропных электротехнических сталей (АЭС), является формирование оптимальных параметров магнитных доменов и высокой подвижности их границ. Во внешнем переменном магнитном поле движение границ зарождающихся и растущих доменов обеспечивает намагничивание и перемагничивание материала, а характер этого движения определяет уровень его гистерезисных магнитных свойств.

Ленты АЭС состава Fe-3мас.%Si с ребровой (110)[001] или кубической (100)[001] текстурами при стандартных толщинах 0,08 – 0,80 мм состоят из зёрен ~ 10-20 мм. Их доменная структура включает 180° основные полосовые (1,2) и замыкающие клиновидные (3,4) домены (рис.1), намагниченные по оси [001], а также каплевидные и ветвистые комплексы, содержащие области, намагниченные по поперечным направлениям [010] и [100]. При использовании метода рентгеновской дифракционной топографии, высоковольтного электронного микроскопа и установки изучения доменов одновременно с двух противоположных поверхностей ленты показано, что при ширине ~ 0.5–1.0 мм домены обычно являются сквозными [1].

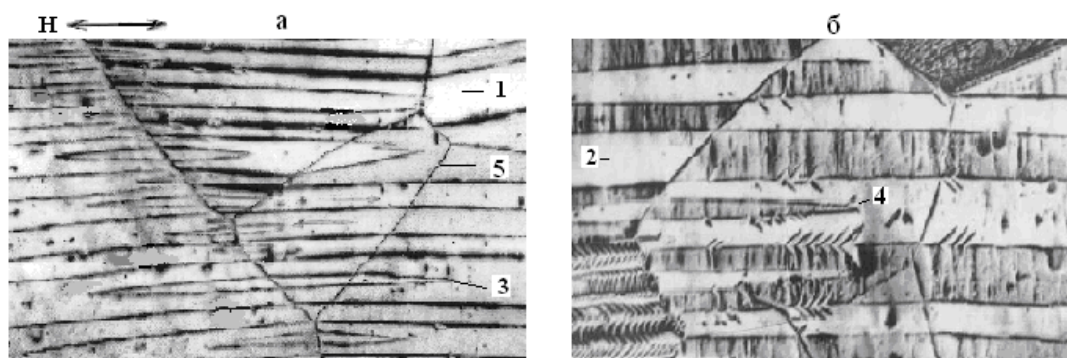


Рисунок 1- Основные полосовые (1,2) и замыкающие клиновидные (3,4) домены поликристаллов Fe-3%Si. а-(110), б-(100). → направление намагниченности доменов. Зерно (5). x10

В магнитном поле рост доменов, намагниченных близко к направлению действующего поля, сопровождается соответственным уменьшением объёма смежных доменов с «обратной» намагниченностью. При этом плавное изменение магнитного поля вызывает, как известно, скачкообразное изменение намагниченности ферромагнетика (эффект Баркгаузена). К этому приводит скачкообразное движение доменных границ или их участков из-за наличия неоднородностей структуры в виде зон внутренних напряжений или включений. Появление скачков намагниченности (СН) обнаружено и при деформировании, нагреве, облучении, изменении кристаллической и магнитной анизотропии в аморфных, тонкоплёночных магнетиках, в ферритах, сегнетоэлектриках, а также «запаздывающие» СН. В работах по изучению этого эффекта обсуждаются методики фиксирования СН, их размерные характеристики, число и распределение по величине поля и времени процесса [2], а тесная связь параметров СН с состоянием структуры ферромагнетиков служит основой метода неразрушающей магнитной структуроскопии металлов и сплавов.

При этом один из важных вопросов теории процессов намагничивания до сих пор оставался не ясным – природа и количественные характеристики обратных скачков намагниченности (ОСН), т. е. скачков, соответствующих изменению намагниченности, противоположной приложенному полю, обнаруженных впервые в [3]. Это новое явление в процессах намагничивания магнетиков считалось вначале ошибкой измерительной аппаратуры, поскольку её чувствительность была мала, а в известном механизме взаимодействия движущейся  $180^\circ$  границы основного домена с локальным дефектом обратных изменений намагниченности не предполагалось [4]. О конкретной причине нового явления были высказаны ранее лишь самые общие предположения, такие как «влияние токов Фуко в данной части магнетика при перемагничивании в соседних доменах» или «из-за взаимодействия  $180^\circ$  и  $90^\circ$  доменных границ» [5].

Ответить на этот вопрос оказалось возможным при изучении непосредственно динамики магнитных доменов на двух противоположных поверхностях ленты [1]. На рис.2 А и А' показана доменная структура одного и того же участка ленты Fe-Si одновременно на верхней (левый ряд фото) и нижней (справа) поверхностях. Она содержит  $180^\circ$  основные полосовые и дополнительные каплевидные домены. Замыкающие магнитный поток на поверхностях кристалла каплевидные домены намагничены противоположно основному домену и возникают для снижения энергии его размагничивающих полей, вызванных отклонением оси текстуры [001] и намагниченности от поверхности ленты на некоторый угол ( $\beta \sim 4^\circ$  на рис. 2).

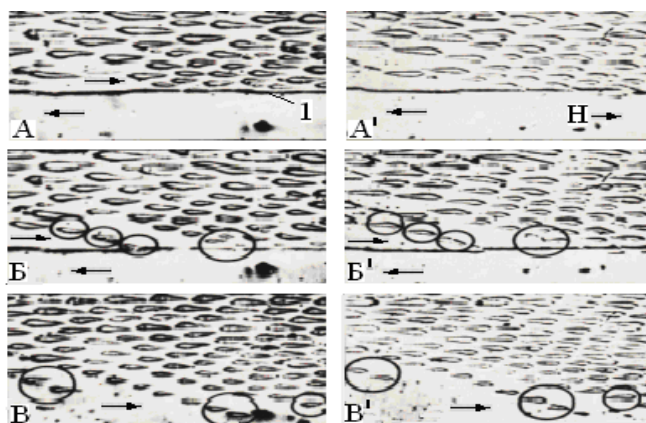


Рисунок 2 - Движение основной  $180^\circ$  доменной границы (1) при намагничивании Fe-3%Si кристалла на верхней (А-В) и нижней (А'-В') его поверхностях. Н→ направление поля.

Окружностями выделены новые замыкающие домены с «обратной» ориентацией намагниченности на поверхностях верхнего растущего основного домена

При намагничивании кристалла увеличивается объём основного домена (верхнего), намагниченность которого близка к направлению поля. Это происходит за счёт перемещения его междоменной границы (1) в сторону соседнего (нижнего) полосового домена, намагниченность которого противоположна (рис.1 А,Б,В, А',Б',В'). При этом движении границы (вниз) увеличивается площадь растущего (вверх) домена и намагниченность образца в целом. А возникающие скачком на его дополнительной площади каплевидные замыкающие домены с обратной ориентацией намагниченности и создают обратные скачки Баркгаузена (домены, отмеченные окружностями на рис.2). Аналогичным образом исчезновение замыкающих доменов (намагниченных вдоль поля) в сужающемся основном домене при подходе  $180^\circ$  доменной границы, также вызывает обратные скачки намагниченности.

Другим источником ОСН являются клиновидные субдомены при достаточно крупных дефектах ферромагнитного кристалла, снижающих его магнитные поля рассеяния. После прохождения границы основного домена через дефект, возникающие возле него скачком субдомены создают обратные скачки намагниченности, снижая намагниченность образца в целом. Поэтому термообработка магнитного материала после его изготовления, приводящая к уменьшению дефектов и объёма субдоменов,

повышает магнитную проницаемость и снижает магнитные потери. Следовательно, к скачкам намагниченности приводит взаимодействие границы основного домена не только с малыми дефектами, размеры которых сравнимы с шириной доменной границы [6, с.130], но и с более крупными дефектами, образующими субдомены и зародыши перемагничивания в объеме ферромагнитного образца.

Существенный рост магнитной проницаемости и снижение магнитных потерь Fe-3%Si обеспечивает и повышение магнитной текстуры сплава, приводящее к уменьшению объема замыкающих доменов и ОСН. Например, уменьшение угла рассеяния осей [001] легкого намагничивания зерен от обычных  $\beta \sim 7-8^\circ$  относительно плоскости ленты до оптимального  $2^\circ$  вызывает снижение объема замыкающих доменов с обратной намагниченностью от 12–15 до 2–3% [7]. Это можно обеспечить изменением обычной технологии производства стали с двух стадийной деформацией и промежуточным отжигом на одностадийную силовую деформацию прокаткой (технология типа HI-B). При этом в ленте стали толщиной 0,30 мм достигается рост магнитной индукции  $B_{800}$  (в поле 800 А/м) от 1,86 до 1,94 Тл и снижение магнитных потерь на 20% [8,9].

Таким образом, выяснен физический механизм обратных скачков намагниченности, обусловленный минимизацией общей энергии растущей магнитной фазы при намагничивании ферромагнетика. Управление параметрами скачков намагниченности при совершенствовании структуры магнитных материалов обеспечивает в них значительное улучшение магнитных свойств.

*Работа выполнена по ГЗ, тема «Магнит» № АААА-А18-118020290129, «Диагностика» №АААА-А18-118020690196-3-5, и частично по проекту УрО РАН - 2019.*

#### Список литературы

1. Драгошанский, Ю.Н., Пудов В.И. Устройство для оптического мониторинга поверхностей твёрдых тел // Патент РФ № 174673. – Бюл. изобр. №30, 2017.
2. Горкунов, Э.С., Драгошанский Ю.Н. // Дефектоскопия. 1999. – № 6. – С. 3–23.
3. Ивлев, В.Ф., Рудяк В.М. // ДАН. - 1958. -Т. 120, № 3. – С. 359–363.
4. Родичев, А.М., Игнатченко В.А., Саланский Н.М. // Магнитная структура ферромагнетиков. Под ред. Л.В. Киренского. Новосиб.: СО АН СССР. 1960. – С. 113–121.
5. Дрокин, А.И., Ильюшенко В.Л., Червенчук Л.П. // Изв. Вузов. Сер. физ. -1984. - № 12. – С. 8–12.
6. Михеев, М.Н., Горкунов Э.С. // Магнитные методы структурного анализа. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
7. Драгошанский, Ю.Н., Есина Н.К., Зайкова В.А // ФММ. - 1978. - Т. 45, № 4. - С. 723–728
8. Nozawa, T., Mizogami M., Mogi H., Matsuo Y. // IEEE Trans. Magn. - 1996. -V. 32, № 2. – P. 572–589.
9. Драгошанский Ю.Н., Пудов В.И. Оптимизация деформационными воздействиями структуры и свойств Fe-Si сплавов с разной текстурой. Письма о материалах. - 2018. - Т.8, №1. - С. 66–70. DOI:10.22226/2410-3535-2018-1-66-70.