

## Динамика движения доменных границ в ферромагнетике

И.А. Тимофеев, г. Чебоксары, ЧГУ

Систематические исследования показывают, что свойства магнитномягких материалов являются чрезвычайно структурно-чувствительными. Эти свойства значительно изменяются при небольших изменениях кристаллической структуры магнитных материалов. Дислокации, вакансии и их группировки возникают в процессе кристаллизации и механической обработки, при больших скоростях нагрева и охлаждения, а также при ядерном облучении магнитных материалов.

Дислокации не оказывают существенного влияния на магнитную индукцию насыщения, но значительно влияют на начальную и максимальную магнитную проницаемость, коэрцитивную силу. Магнитная индукция насыщения - это основной магнитный параметр материала, который целиком и полностью зависит от химического состава материала и не зависит от технологических режимов обработки. Если начальная магнитная проницаемость не имеет большого значения для практического применения в технике, то максимальная магнитная проницаемость и коэрцитивная сила имеют определяющее значение.

На рисунке в логарифмических координатах представлены результаты измерения максимальной магнитной проницаемости в зависимости от плотности дислокаций для различных магнитных материалов. Из рисунка видно, что с увеличением плотности дислокаций с  $4 \cdot 10^{10}$  до  $7 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$  максимальная магнитная проницаемость уменьшается в следующих пределах: для железного образца с 3680 до 370, для образца из сплава Fe-1,9% Si с 6900 до 530, для образца из сплава Fe-4% Si с 14600 до 910, а для образца из сплава Fe-6,5% Si с 47700 до 2170. Эксперименты показали, что максимальная магнитная проницаемость увеличивается с повышением содержания кремния. Чем меньше плотность дислокаций и чем выше

содержание кремния в сплаве, тем выше максимальная магнитная проницаемость.

Для определения коэрцитивной силы автором предложена аналитическая зависимость коэрцитивной силы от концентрации доменов и плотности дислокаций:

$$H_c = 1,5 \frac{k \cdot \delta \cdot N^\varepsilon}{\mu_0 \cdot I_s \cdot D \cdot n^q},$$

где  $k$  – константа магнитной анизотропии;

$\delta$  – толщина доменной стенки;

$N$  – плотность дислокаций;

$\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость;

$I_s$  – самопроизвольная намагниченность;

$D$  – диаметр кристаллита;

$n$  – число доменов в единице объема;

$\varepsilon$  – показатель степени плотности дислокаций;

$q$  – показатель степени числа доменов.

Откуда видно, что коэрцитивная сила уменьшается с увеличением концентрации доменов и уменьшением плотности дислокаций.

Для плотности дислокаций  $N=7 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2}$  и числа доменов  $n=650$  показатели степени равны  $\varepsilon=0,08$  и  $q=0,04$ , а для плотности дислокаций  $N=2 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$  и числа доменов  $n=650$  -  $\varepsilon=0,2$  и  $q=0,16$ .

Домен со своими стенками является совокупным материальным макроскопическим объектом, для которого можно применить формулу кинетической энергии:

$$E = mV^2/2$$

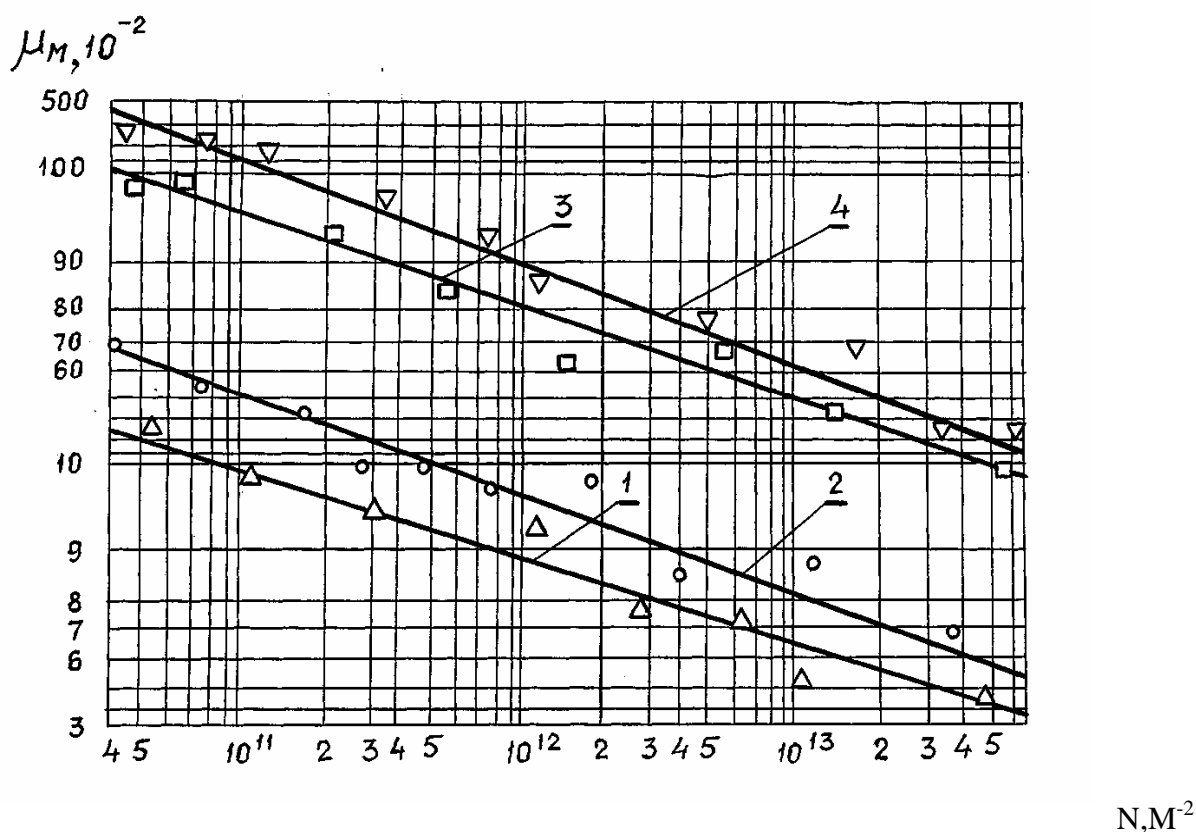
Из этой формулы можно примерно оценить скорость движения ДГ:

$$V = \sqrt{2E / m},$$

где  $E$  – энергия доменной границы (для железа  $E \approx 5,35 \cdot 10^{-16}$  Дж);

$m$  – эффективная масса  $180^\circ$  доменной границы (для железа  $m \approx 3,7 \cdot 10^{-20}$  кг).

Результаты измерения показали, что с увеличением плотности дислокаций от  $4 \cdot 10^{10}$  до  $7 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2}$  скорость движения ДГ уменьшается в следующих пределах: для железного образца с 172,5 до 9,9 м/с, для образца из сплава Fe-1,9% Si с 216,2 до 26,3 м/с, для образца из сплава Fe-4% Si с 257,6 до 43,4 м/с, а для образца Fe-6,5% Si с 293,7 до 58,8 м/с.



Зависимость максимальной магнитной проницаемости от плотности дислокаций для различных магнитных материалов: 1 - Fe; 2 - Fe-Si (1,9% Si); 3- Fe-Si (4% Si); 4 - Fe-Si (6,5% Si).

### Выводы

1. Для образцов из сплава Fe-Si определено, что при уменьшении плотности дислокаций максимальная магнитная проницаемость

увеличивается и тем в большей мере, чем выше содержание кремния в сплаве.

2. Автором предложена аналитическая формула

$$H_c = 1,5 \frac{k \cdot \delta \cdot N^\varepsilon}{\mu_0 \cdot I_s \cdot D \cdot n^q},$$
 устанавливающая зависимость коэрцитивной силы

от плотности дислокаций и числа доменов для низкомагнитострикционных образцов.

3. Установлено, что скорость движения доменных границ с увеличением плотности дислокаций уменьшается и тем больше, чем меньше содержание кремния в Fe-Si сплаве.

### Список литературы

1. Tebble R.S. Ferromagnetic Domains. Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1969, p. 98.
2. Кандаурова Г.С. Оноприенко Л.Г. Доменная структура магнетиков. г. Свердловск, 1988.
3. Träuble H. Magnetisierungskurve und magnetische Hysterese ferromagnetischer Einkristall. Berlin-Heidelberg-New-York, Springer, 1966, p. 318.
4. Vicena F. On the influence of dislocations on the coercive field of ferromagnetic / - «Chechosl. I. Phys.», 1955. V. 5, p. 480.
5. Ichiyama T. Structure and Control of Magnetic Domain in Grain-oriented Silicon Steel. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 1983, v. 69, № 8, p. 895-902.
6. Nozawa T., Yamamoto T., Matsuo Y. and Ohya Y. IEEE Trans. Magne., MAG-14 (1978), p. 252-257.
7. Драгошанский Ю.Н. и др. Влияние совершенства кристаллографической текстуры (110) [001] на величину электромагнитных потерь в трансформаторной стали // ФММ. 1978. Т. 45. № 45. № 4. С. 723-728.

