

## АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЫ В АМОРФНОМ ФЕРРОМАГНЕТИКЕ

В.Е.Зубов, А.Д.Кудаков<sup>1)</sup>, Т.С.Федулова

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова  
119899 Москва, Россия

Поступила в редакцию 1 декабря 1999 г.

В магнитомягких аморфных образцах наблюдался эффект быстрого уменьшения амплитуды колебаний 180-градусной доменной границы (ДГ) на поверхности по сравнению с объемом при возрастании частоты намагничивающего поля. Исследование динамики ДГ на поверхности проводилось магнитооптическим, а в объеме – индукционным методом. Поведение ДГ расходится с результатами теории, учитывающей влияние вихревых токов и предсказывающей более медленное спадание амплитуды колебаний ДГ на поверхности по сравнению с объемом при увеличении частоты. Наблюдаемый эффект объяснен взаимодействием ДГ с макродефектами на поверхности образца и возникновением вследствие этого нестационарного хаотического движения приповерхностной части ДГ, увеличивающего на несколько порядков эффективный поверхностный параметр затухания в уравнении Ландау – Лифшица.

PACS: 75.60.Ch

Согласно теории, развитой в работах ряда авторов (см. например [1]), влияние вихревых токов должно приводить к изменению формы движущейся доменной границы (ДГ) в ферромагнитных металлах. Плотность вихревых токов, обусловленных движением ДГ, вблизи поверхности ниже, чем в объеме образца, поэтому тормозящее действие вихревых токов на ДГ в объеме выше, чем на поверхности. Таким образом, амплитуда колебаний ДГ на поверхности образца в переменном магнитном поле должна быть выше, чем в объеме, причем различие в амплитудах колебаний ДГ на поверхности и в объеме увеличивается при возрастании частоты магнитного поля. Этот эффект подтвержден экспериментально в образцах кремнистого железа [2,3].

При исследовании колебаний 180-градусной ДГ в нитевидных монокристаллах железа – материалах, отличающихся наиболее совершенной известной кристаллической структурой в объеме и на поверхности образцов, был получен другой результат [4]. Оказалось, что амплитуда колебаний ДГ в нитевидных монокристаллах железа спадает с ростом частоты значительно быстрее, чем в объеме. Эксперимент показал, что причиной такого аномального поведения ДГ является физическая адсорбция молекул, содержащихся в воздухе, на поверхности кристалла железа [4]. В результате адсорбции повышается плотность магнитных дефектов и растет эффективное торможение ДГ на поверхности.

В настоящей работе исследованы колебания 180-градусной ДГ в объеме и на поверхности образцов аморфного ферромагнетика, то есть материала, характеризующегося максимально разупорядоченной структурой. Образцы аморфного ферромагнетика состава FeCuNbSiB получены методом спиннингования. Перед аморфизацией расплав проходил специальную термовременную обработку с целью получения однородного, равновесного распределения легирующих элементов и, вследствие этого,

<sup>1)</sup> e-mail: kudakov@adk.phys.msu.su

улучшения магнитомягких свойств сплава [5]. Образцы имели толщину 25–30 мкм ширину 0,55 мм и длину 15–20 мм. В дальнейшем для описания образцов и результатов эксперимента мы используем систему координат, оси  $x$  и  $y$  которой направлены вдоль длинной и средней сторон, а ось  $z$  – вдоль короткой стороны образца. В центре вдоль длинной стороны образцов в плоскости  $yz$  располагалась 180-градусная ДГ, разбивавшая образцы на два домена с намагниченностью коллинеарной оси  $y$ . Эффективная ширина ДГ на поверхности и коэрцитивная сила ДГ были определены с помощью магнитооптической методики и составили 7 мкм и 0,01 Э, соответственно.

Поверхностные свойства ДГ изучались магнитооптическим методом с помощью экваториального эффекта Керра (ЭЭК). Исследование колебаний ДГ на поверхности проводилось путем измерения ЭЭК, обусловленного изменением намагниченности участка образца при движении ДГ. Щель ФЭУ сканировала поверхность в направлении оси  $x$  перпендикулярно ДГ. Магнитооптический сигнал наблюдается только в той области, где колеблется ДГ. Для определения амплитуды колебаний ДГ в объеме использовался индукционный метод. При смещении ДГ изменяется суммарный магнитный поток в образце, причем изменение потока пропорционально смещению ДГ. Для получения сигнала, пропорционального амплитуде колебаний ДГ в объеме, на образец надевалась небольшая измерительная катушка, которая помещалась вблизи того места на образце, где проводились магнитооптические измерения. Сигнал в измерительной катушке, обусловленный внешним магнитным полем, компенсировался с помощью дополнительной катушки.

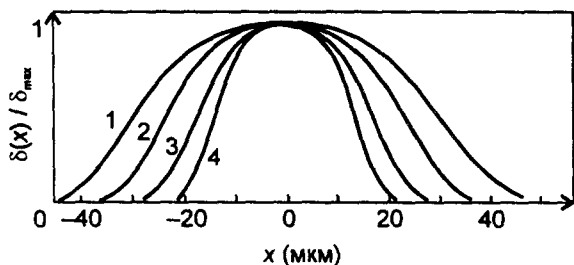


Рис.1. Кривые распределения ЭЭК  $\delta(x)/\delta_{max}$ , обусловленного колебаниями 180-градусной ДГ в образце, в переменном магнитном поле с амплитудой 0,6 Э. Кривой 1 соответствует  $f = 20$  Гц, 2 –  $f = 2$  кГц, 3 –  $f = 10$  кГц, 4 –  $f = 15$  кГц

На рис.1 приведены кривые распределения ЭЭК  $\delta(x)/\delta_{max}$ , обусловленного намагниченностью в доменах и наблюдающегося благодаря колебательному движению ДГ, в зависимости от координаты  $x$  на поверхности образца в переменном магнитном поле с амплитудой 0,6 Э для различных частот в диапазоне 20 Гц–15 кГц. Удвоенная амплитуда колебаний ДГ на поверхности определяется как ширина кривой ЭЭК у основания за вычетом ширины ДГ [4]. На рис.2 представлена зависимость  $\Delta s/\Delta s^0$  от частоты (линия 1), где  $\Delta s$  – амплитуда колебаний ДГ, а  $\Delta s^0 = \Delta s$  при  $f \rightarrow 0$ . Из рисунка следует, что релаксационная частота ( $f_r$ ), определяемая как частота, при которой амплитуда колебаний ДГ уменьшается на 30% по сравнению с  $\Delta s^0$ , составляет примерно  $\sim 6$  кГц (см. рис.2). Измерения показали, что в диапазоне частот 20 Гц – 15 кГц амплитуда колебаний ДГ в объеме ( $\Delta_v$ ) не изменяется.

Полученные результаты расходятся с предсказанием теории, основанной на учете влияния вихревых токов, и указывают на то, что эффективное тормозящее действие, которое при своем движении испытывает ДГ в приповерхностной области, существенно больше, чем в объеме.

Зависимости амплитуды колебаний 180-градусной ДГ на поверхности и в объеме образцов аморфного магнетика качественно согласуются с аналогичными зависимостями в нитевидных монокристаллах железа, в которых повышенное торможение ДГ на поверхности обусловлено образованием поверхностных дефектов из-за адсорбции молекул воздуха. Поэтому естественно предположить, что повышенное поверхностное торможение ДГ в аморфных образцах также обусловлено какими-то поверхностными дефектами. Быстрое охлаждение расплава в процессе приготовления аморфных образцов приводит к тому, что их поверхность имеет микрорельеф, а также и макрорельеф, наблюдаемый визуально. Другой особенностью образцов является то, что ширина ДГ в аморфных образцах на порядок больше, чем в железе, и имеет макроскопические размеры. Известно, что наиболее сильное взаимодействие ДГ испытывает с дефектами кристалла, размеры которых близки к ширине ДГ [6]. Поэтому повышенное поверхностное торможение ДГ в аморфных образцах может быть объяснено взаимодействием ДГ с макроскопическими дефектами поверхности.

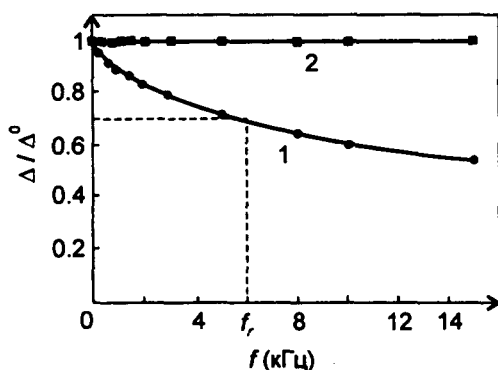


Рис.2. Частотные зависимости амплитуды колебаний ДГ на поверхности (кривая 1) и в объеме (кривая 2) образца;  $f_r$  — релаксационная частота колебаний ДГ на поверхности

Расхождение результатов, полученных в настоящей работе, с предсказанием теории (см.[1]) может быть объяснено при учете механизма аномально больших потерь энергии движущейся ДГ в приповерхностной области, предложенного в работе [7]. Это механизм нестационарного хаотического движения приповерхностной области ДГ, которое инициируется поверхностными дефектами образца. Эффективный поверхностный параметр затухания в уравнении Ландау – Лифшица, определяемый на основе развитой теории, оказывается на несколько порядков больше, чем объемный, что и объясняет повышенное торможение ДГ на поверхности. Нестационарное хаотическое движение ДГ увеличивает плотность вихревых токов в приповерхностной области, что дополнительно усиливает поверхностное торможение ДГ. На основе механизма нестационарного движения ДГ на поверхности могут быть также объяснены результаты, полученные в образцах кремнистого железа в работах [2,3]. В пользу данного объяснения указывает то, что в работе [3] амплитуда колебаний ДГ на поверхности была значительно меньше, чем предсказывает теория, основанная на учете вихревых токов, а в работе [2] динамический изгиб ДГ зависел от степени дефектности образцов. Кроме того, в [2, 3] наблюдалось нестационарное движение ДГ на поверхности.

Приносим благодарность В.С.Цепелеву за предоставленные образцы аморфных магнетиков.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 97-03-32409а) и гранта Министерства образования РФ (Санкт-Петербургский конкурсный центр).

---

1. Б.Н.Филиппов, А.П.Танкеев, *Динамические эффекты в ферромагнетиках с доменной структурой*, М.: Наука, 1987.
2. Н.К.Есина, В.Ф.Тиунов, В.А.Зайкова, *ФММ* **53**, 281 (1982).
3. M.Celasco, A.Masoero, P.Mazzetti, and A.Stepanescu, *IEEE Trans. Magn.* **MAG-22**, 502 (1986).
4. V.E.Zubov, A.D.Kudakov, N.L.Levshin, and V.V.Pilipenko, *J. Magn. Magn. Mater.* **140-144**, 1895 (1995).
5. Ю.Н.Стародубцев, Л.Д.Сон, В.С.Цепелев и др., *Расплавы* **4**, 76 (1992).
6. Г.С.Кринчик, *Физика магнитных явлений*, Изд-во Московского университета, 1985.
7. V.E.Zubov, A.D.Kudakov, N.L.Levshin, and P.A.Polyakov. *Proc. of Moscow Intern. Symposium on Magnetism, Moscow 20-24 June 1999, Part 1*, М.: Faculty of Physics M.V.Lomonosov MSU, p.61.