

скорости удара. Эксперименты, проведенные в широком диапазоне углов встречи, показали, что разлетающаяся дисперсная фракция может вносить существенный вклад в изменение параметров газа в случае обтекания тела запыленным потоком.

Л и т е р а т у р а

- [1] Д у х о в с к и й И.А., К о в а л е в П.И., Л у н ь к и н Ю.П., П о д к л а д е н к о А.Н. В сб.: Турбулентные двухфазные течения и техника эксперимента. Таллин, 1985, с. 23-27.
- [2] Д у х о в с к и й И.А., К о в а л е в П.И., Р а з у м о в с к а я А.И., Ч е р н ы х В.Т. - Оптика и спектроскопия, 1987, т. 63, в. 5, с. 1105-1108.
- [3] Т а б а к о в В., М е й л э к М.Ф., Х а м е д А. Аэрокосмическая техника, 1987, № 12, с. 58-64.
- [4] A r m s t r o n g J.P., C o l l i n g s N. and S h a g l e r P.J. - AIAA Journal, 1984, v. 22, N 2, p. 214-218.
- [5] Д у х о в с к и й И.А., К о в а л е в П.И., Ш м и д т А.А. - Письма в ЖТФ, 1984, т. 10, в. 11.
- [6] С в и ф т Х.Ф. Механика соударения со сверхвысокими скоростями. - В сб.: Динамика удара, М., 1985, с. 173-197.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
27 июня 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 17

12 сентября 1988 г.

ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ 180° ДОМЕННОЙ ГРАНИЦЫ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ЖЕЛЕЗА ПРИ ПОВЫШЕНИИ ЧАСТОТЫ

В.Е. З у б о в, Г.С. К р и н ч и к, А.Д. К у д а к о в

Исследована частотная зависимость амплитуды и фазы колебаний 180° доменной границы (ДГ) на поверхности и в объеме нитевидных монокристаллов железа (вискеров) в переменном магнитном поле в диапазоне частот $f=20$ Гц-2 МГц. Установлено, что с ростом амплитуда колебаний ДГ на поверхности (Δ^{180}) убывает значительно быстрее, чем в объеме ($\Delta^{0\delta}$). Особенно быстрое падение Δ^{180} наблюдается в диапазоне частот до 15 кГц, в котором $\Delta^{0\delta}$ практически не меняется, а Δ^{180} уменьшается почти на порядок. На основании полученных экспериментальных данных качественно восстановлена форма ДГ, которая имеет сложный вид и изменяется с ростом f .

Вильямсом, Шокли и Киттелем [1] для случая одной ДГ было показано, что электромагнитные потери в ферромагнитных металлах определяются движением ДГ. Праем и Бином [2] эти результаты были обобщены на случай, когда в кристалле имеется большое число ДГ. В дальнейшем при исследовании поведения ДГ в переменных полях с использованием магнитооптических методов было показано, что 180° ДГ при своем движении изгибается таким образом, что амплитуда ее колебаний на поверхности оказывается больше, чем в объеме (обзор этих работ можно найти, например, в [3] и [4]). Это связано с тем, что плотность вихревых токов, образующихся при движении ДГ, имеет наибольшее значение в центре пластины и уменьшается на краях. Изгиб ДГ приводит к уменьшению мощности вихретоковых потерь по сравнению со случаем колебаний прямой границы. Численными методами расчет формы колеблющейся границы был проведен Бишопом [5]. В работах [3, 6] было показано, что степень изгиба ДГ возрастает при увеличении амплитуды ее колебаний, частоты, толщины образца (d) и величины L/d , где L — равновесная ширина доменов. Расчет величины вихретоковых потерь в модели изгибающейся ДГ [3] приводит к лучшему согласию с экспериментом, чем в модели плоских границ.

В недавних работах по исследованию колебаний ДГ в монокристаллах кремнистого железа [7, 8] показано, что Δ^{180° оказывается существенно меньше, чем предсказывается теорией Бишопа [4, 5]. Возможной причиной указанного расхождения может быть усложнение структуры 180° ДГ в приповерхностной области монокристаллов железа, которое теоретически было предсказано Хубертом [9] и магнитооптическим методом обнаружено Кринчиком и Бенидзе [10]. Усложнение структуры заключается в том, что при подходе к поверхности граница уширяется в несколько раз и имеет асимметричную форму, обусловленную появлением неелевской (перпендикулярной плоскости ДГ) компоненты намагниченности. Усложнение формы ДГ оказывает значительное влияние на ее динамические свойства. Например, скручивание ДГ на поверхности ортоферрита приводит к увеличению параметра затухания на два порядка [11]. С целью изучения влияния приповерхностной структуры границы на ее динамические свойства в настоящей работе проведено сравнительное исследование амплитудных и фазовых характеристик колебаний ДГ на поверхности и в объеме железных вискерев в широком диапазоне частот.

Процесс смещения ДГ внутри образцов исследовался динамическим компенсационным методом, с помощью которого измерялась переменная составляющая намагниченности, усредненная по объему вискерев. При изучении динамики ДГ на поверхности использовался высокочастотный фазочувствительный магнитооптический микромагнетометр [12]. Вискеры представляли собой квадратные в поперечном сечении стержни длиной ~ 10 мм и поперечными размерами $\sim 0.05 \times 0.05$ мм² с естественными оптически совершенными гранями типа (001). Ребра вискерев совпадали с направлениями

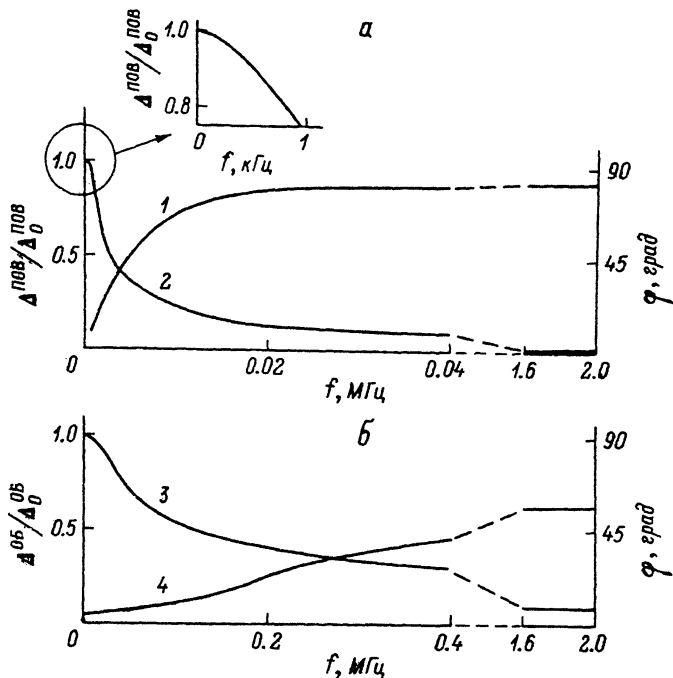


Рис. 1. Частотные зависимости амплитуды (1, 3) и сдвига фазы колебаний ДГ (2, 4) (по отношению к фазе внешнего поля) на поверхности (а) и в объеме (б) вискера. $\Delta_{\text{пов}}^{\text{пов}}$, $\Delta_{\text{об}}^{\text{об}}$ - амплитуды колебаний ДГ при $f \rightarrow 0$ на поверхности и в объеме соответственно.

типа $[001]$. Образцы содержали 180° ДГ, расположенную в центре вдоль оси вискеро́в и параллельную боковым граням.

На рис. 1 представлены зависимости $\Delta_{\text{пов}}^{\text{пов}}(f)$, $\Delta_{\text{об}}^{\text{об}}(f)$, а также $\varphi_{\text{пов}}^{\text{пов}}(f)$ и $\varphi_{\text{об}}^{\text{об}}(f)$ ($\varphi_{\text{пов}}^{\text{пов}}$ и $\varphi_{\text{об}}^{\text{об}}$ - величины, определяющие разность фаз переменного магнитного поля и колебаний ДГ на поверхности и в объеме соответственно). Из рис. 1 видно, что при $f \gg 20$ кГц $\Delta_{\text{пов}}^{\text{пов}} \ll \Delta_{\text{об}}^{\text{об}}$ и граница на поверхности в этой области частот практически закреплена. Отставание фазы колебаний ДГ на поверхности от фазы поля при $f \sim 20$ кГц приближается к своему максимальному значению $\varphi_{\text{пов}}^{\text{пов}} = 80-85^\circ$. Уменьшение $\Delta_{\text{об}}^{\text{об}}$ с ростом f

обусловлено главным образом влиянием вихревых токов, поскольку вклад приповерхностной области образца в это спадание, как видно из рис. 1, незначителен. Отсюда можно сделать вывод о том, что вблизи поверхности не перемагничивается очень тонкий слой. Результаты исследования процессов намагниченности вискеро́в

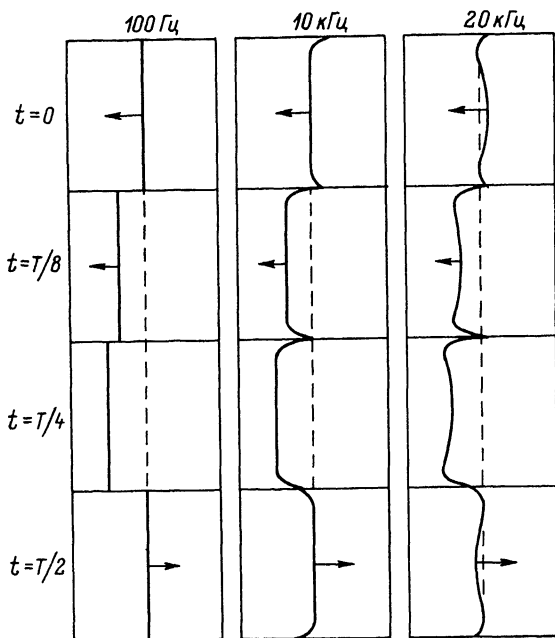


Рис. 2. Форма ДГ в различные моменты времени (t) при нескольких частотах перемагничивания. T – период внешнего поля, время $t=0$ соответствует началу периода внешнего поля. Пунктиром показано равновесное положение ДГ при отсутствии поля.

на поверхности и в объеме позволяют судить об изменении формы ДГ в кристалле с ростом частоты.

На рис. 2 приведено поперечное сечение вискера и показана примерная форма ДГ в этом сечении в различные моменты периода колебаний границы при нескольких частотах. Из рисунка видно, что форма ДГ внутри образца с повышением частоты усложняется. Отметим, что сложная форма границы обусловлена как непрерывным изменением амплитуды, так и фазы колебаний ДГ по глубине вискера. Спадание амплитуды колебаний в центре образца при возрастании f вызвано влиянием вихревых токов. Быстрое уменьшение $\Delta^{ПОВ}$ с ростом f обусловлено, по-видимому, асимметричным загибом ДГ вблизи поверхности. При повышении частоты влияние скин-эффекта усиливается, что приводит к закреплению ДГ и в центре образца. Границы области раскачки ДГ в сечении вискера при высоких частотах приобретают вид, напоминающий цифру 8.

Качественное отличие поведения ДГ на поверхности по сравнению с результатами более ранних работ [3, 7, 8] связано, видимо, с тем, что поперечные размеры вискеро́в ($d \sim 0.05$ мм) значительно меньше размеров образцов, исследованных раньше ($d = 0.2-0.6$ мм). Кроме того, величина L/d для вискеро́в составляла ~ 0.5 , а в указанных работах размеры доменов всегда были значительно больше толщины образцов. Значительное уменьшение степени изгиба ДГ

при уменьшении d и L/d наблюдалось экспериментально [6]. Быстрый рост плотности вихревых токов при увеличении d и L/d приводит, вероятно, к маскировке эффекта торможения ДГ в приповерхностной области.

В заключение можно сделать вывод, что обнаруженный эффект малой подвижности ДГ на поверхности монокристаллов железа по сравнению с объемом представляет с одной стороны интересный физический результат, с другой — этот эффект должен существенно влиять на величину вихретоковых потерь в достаточно тонких образцах.

Л и т е р а т у р а

- [1] W i l l i a m s H.J., S h o k l e y W., K i t t e l C. — Phys. Rev., 1950, v. 80, N 6, p. 1090–1094.
- [2] P r y R.H., B e a n C.P. — J. Appl. Phys, 1958, v. 29, p. 532–533.
- [3] Ф и л и п п о в Б.Н., З а й к о в а В.А., Ж а к о в С.В., Д р а г о ш а н с к и й Ю.Н. — Изв. АН СССР, сер. физич., 1978, т. 42, № 8, с. 1744–1752.
- [4] B i s h o p J.E.L. — IEEE Trans. Magn., 1980, v. MAG-16, N 1, p. 129–139
- [5] B i s h o p J.E.L. — J. Phys. D: Appl. Phys., 1973, v. 6, p. 97–115.
- [6] Х а н Е.Б., З а й к о в а В.А., Ш у р Я.С., Т и п у н о в В.Ф. — ФММ, 1972, т. 33, № 2, с. 289–294.
- [7] M i a h a r a T., T a k a h a s h i M. — J. Magn. and Magn. Mater., 1985, v. 51, p. 291–304.
- [8] C e l a s c o M., M a s o e r o A., M a z e t t i P., S t e p a n e s c u A. — IEEE Trans. Magn., 1986, v. MAG-22, N 5, p. 502–504.
- [9] H u b e r t A. — Z. Angew. Phys., 1971, v. 32, N 1, s. 58–63.
- [10] К р и н ч и к Г.С., Б е н и д з е О.М. — ЖЭТФ, 1974, т. 67, № 6, с. 2180–2194.
- [11] К р и н ч и к Г.С., Ч е п у р о в а Е.Е., Ш т а й н А.В. — ЖЭТФ, 1984, т. 87, с. 2014–2023.
- [12] З у б о в В.Е., К р и н ч и к Г.С., К у д а к о в А.Д. Деп. в ВИНТИ № 43-В88, М., 1987. 32 с.

Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова

Поступило в Редакцию
20 мая 1988 г.