

УДК 539.213.27

© 1990

МАГНИТОУПРУГОЕ ЗАТУХАНИЕ И ΔE -ЭФФЕКТ В АМОРФНОМ СПЛАВЕ $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$

И. В. Золотухин, Ю. Е. Калинин, В. А. Кондусов

Исследованы внутреннее трение и ΔE -эффект в аморфном сплаве $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$ толщиной 5—120 мкм, полученном методом ионно-плазменного напыления. Измерения проведены при комнатной температуре в диапазоне частот 0.15—1.5 МГц. На частотной зависимости внутреннего трения обнаружен максимум, высота и положение которого зависят от толщины образца: с увеличением толщины максимум возрастает и смещается к меньшим частотам, что объясняется доминирующим вкладом вихревых токов в затухание упругих колебаний. ΔE -эффект с увеличением частоты колебаний уменьшается для всех исследуемых толщин. Уменьшение толщины материала способствует увеличению ΔE -эффекта вследствие более эффективного перематгничивания материала по всей толщине.

Вопрос о вкладе вихревых токов в затухание упругих колебаний в кристаллических ферромагнетиках рассматривался во многих работах и приведен в сжатой форме в монографиях [1-2]. Из приведенного в [1-2] анализа следует, что затухание, связанное с вихревыми токами, существенно зависит от частоты колебаний и удельного сопротивления материала. Поскольку удельное сопротивление аморфных ферромагнетиков при комнатной температуре в 2—3 раза выше соответствующих кристаллических аналогов [3], то затухание, связанное с вихревыми токами, должно быть существенно ниже. Интерес к затуханию, обусловленному вихревыми токами, вызван также тем, что аморфные ферромагнетики являются перспективными материалами для широкого практического применения на высоких частотах. Кроме того, в магнитострикционных ферромагнетиках с аморфной структурой наблюдается «гигантский» ΔE -эффект [4], частотная зависимость которого практически не исследована. В связи с вышесказанным нами была поставлена задача выяснения особенностей затухания упругих колебаний и ΔE -эффекта, связанных с вихревыми токами, в аморфных магнитострикционных ферромагнетиках в интервале частот 0.15—1.5 МГц.

Аморфные сплавы $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$ в виде фольг толщиной 5—120 мкм были приготовлены методом ионно-плазменного напыления на охлаждаемую до комнатных температур подложку. Аморфность образцов контролировалась рентгенографически. Из напыленных фольг вырезались образцы размером 1×12 мм таким образом, чтобы ось легкого намагничивания располагалась перпендикулярно продольной оси образца, вдоль которой возбуждались упругие волны. Внутреннее трение (ВТ) и ΔE -эффект измерялись методом резонанса—антирезонанса [5] и вычислялись по формулам

$$Q^{-1} = \Delta f / f, \quad \Delta E / E = (f_H^2 - f_0^2) / f_0^2, \quad (1), (2)$$

где Δf — полоса пропускания частот на уровне 0.7 от f_H ; f_H и f_0 — резонансные частоты колебаний образца, измеренные в магнитном поле напряженностью H и нулевом поле. Амплитуда деформации не превышала 10^{-7} . Погрешность при измерении ВТ и ΔE -эффекта не превышала 5 и 0.05 % соответственно.

На рис. 1 представлены зависимости $Q^{-1}(H)$ и $\Delta E/E_1$ для аморфного сплава $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$ толщиной $h \sim 120$ мкм. При напряженности внешнего магнитного поля $H \approx 4.4 \cdot 10^3$ А/м (частота механических колебаний $f \approx 0.17$ МГц) наблюдается максимум ВТ (кривая 1), высота и положение которого зависят как от толщины образца, так и от частоты механических колебаний (рис. 2). Зависимость ΔE -эффекта от величины внешнего маг-

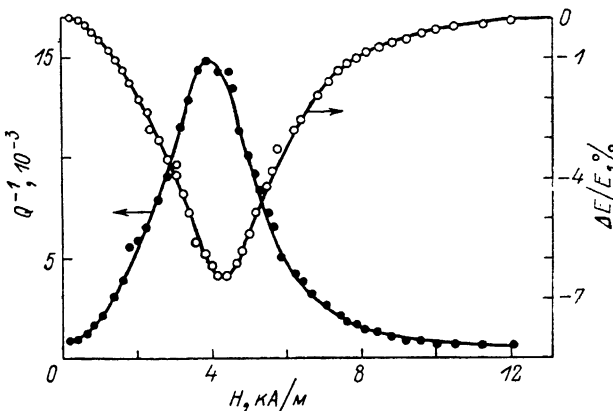


Рис. 1. Зависимость $Q^{-1}(H)$ и $\Delta E/E_1$ для аморфного сплава $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$ толщиной $h \approx 120$ мкм.

нитного поля (кривая 2 на рис. 1) представляет зеркальное отображение кривой $Q^{-1}(H)$. Характерной особенностью данной зависимости является отрицательный ΔE -эффект при всех значениях напряженности внешнего магнитного поля, наблюдаемый и для других сплавов с аналогичной доменной структурой [5].

Экспериментальные значения Q^{-1} , измеренные при различных частотах для трех толщин (1 — 10, 2 — 40, 3 — 120 мкм), представлены на

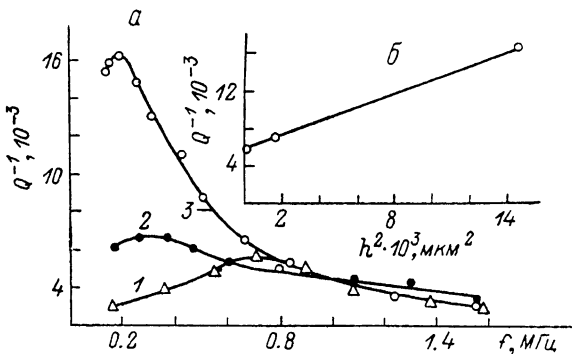


Рис. 2. Частотная зависимость ВТ в аморфном сплаве $Fe_{45}Co_{45}Zr_{10}$ для образцов различной толщины (а) и зависимость максимума ВТ от квадрата толщины образца (б).

рис. 2, а. На частотной зависимости ВТ имеется максимум, высота и положение которого зависят от толщины образца. Если $h=10$ мкм, то пик ВТ наблюдается при $f \approx 0.73$ МГц (кривая 1), $h \approx 40$ мкм — $f \approx 0.33$ МГц (кривая 2) и $h \approx 120$ мкм — $f \approx 0.2$ МГц (кривая 3, на которой в исследуемом диапазоне частот выявляется только правая часть максимума). Необходимо отметить, что уровень затухания существенно зависит от частоты: высота максимума ВТ пропорциональна квадрату толщины (рис. 2, б).

На рис. 3 приведены результаты измерения частотных зависимостей ΔE -эффекта в исследуемых аморфных сплавах разной толщины: 1 — 10, 2 — 40, 3 — 120 мкм. Величина ΔE -эффекта, так же как и ВТ, существенно зависит от толщины образца и частоты механических колебаний. С уве-

лением толщины образца, а также частоты механических колебаний ΔE -эффект уменьшается.

На частотах исследуемого диапазона затухание упругих колебаний может быть обусловлено магнитомеханическим гистерезисом или вихревыми токами. Затухание вследствие необратимого смещения границ доменов (магнитомеханический гистерезис) обычно не зависит от частоты вплоть до $f \approx 500$ кГц, но изменяется с увеличением амплитуды колебаний. Исследования амплитудной зависимости ВТ в изучаемом сплаве на частотах ~ 200 Гц показали, что внутреннее трение, обусловленное магнито-

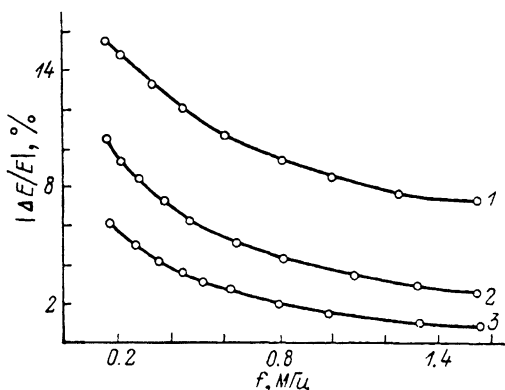


Рис. 3. Частотная зависимость ΔE -эффекта аморфного сплава $\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10}$ для образцов различных толщин.

механическим гистерезисом, невелико ($Q^{-1} \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$) и, следовательно, не является доминирующим при частотах 0.15—1.5 МГц. Как известно [2], в случае доминирующего вклада макровихревых токов в затухание ВТ

$$Q^{-1} \sim \omega h^2 / D_m, \quad (3)$$

где ω — круговая частота, h — толщина образца, D_m — коэффициент диффузии. Экспериментальные данные величины ВТ, пропорциональные квадрату толщины (рис. 2, а), свидетельствуют о том, что основной вклад

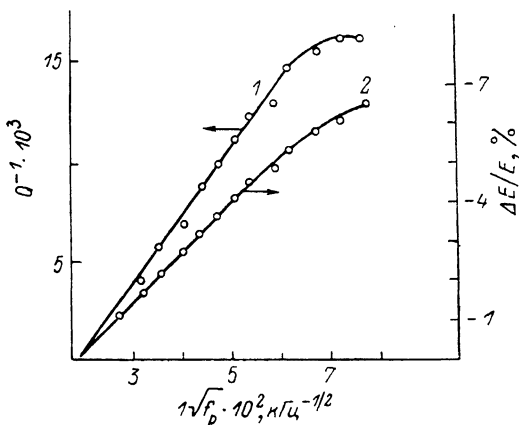


Рис. 4. Частотные зависимости ВТ (1) и ΔE -эффекта (2) для аморфного сплава $\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10}$ толщиной $h \approx 120$ мкм.

в затухание упругих колебаний в исследуемом материале вносят вихревые токи, возникающие при изменении намагниченности под действием внешних механических напряжений. Для времени релаксации τ , связанного с процессом затухания упругих колебаний за счет вихревых токов, получено выражение [6]

$$\tau = \frac{7\pi}{3} \left(\frac{\pi}{4} \right)^4 \frac{\sigma h^2}{c} \mu, \quad (4)$$

где σ — электропроводность; c — скорость света; μ — магнитная проницаемость. Принимая для аморфного сплава $\sigma = 5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, по частотному положению максимума затухания из условия $\omega\tau = 1$ с использованием

выражения (4) можно оценить значение магнитной проницаемости для различных толщин на частоте, соответствующей максимуму затухания. Так, для $h=10$ мкм, $\tau \sim 2.2 \cdot 10^{-7}$ с, $\mu \approx 14\ 000$; $h=40$ мкм, $\tau \sim 4.55 \times 10^{-7}$ с, $\mu \approx 1800$; $h \approx 120$ мкм, $\tau \sim 7.96 \cdot 10^{-7}$ с, $\mu \approx 360$. Как видно из расчетов, оценки μ дают приемлемый результат, характерный для многих аморфных сплавов в исследуемом частотном интервале. Причем с увеличением толщины образца магнитная проницаемость на частотах исследуемого диапазона существенно уменьшается вследствие увеличения вихревых токов, препятствующих изменению намагниченности. Уменьшение магнитной проницаемости с увеличением толщины образца характерно и для других аморфных сплавов [7].

В предельном случае высоких частот вихревое затухание определяется зависимостью глубины скин-слоя от частоты и пропорционально f^{-1} : [2]. Построенные нами экспериментальные данные (кривая 1 на рис. 4) из рис. 2 (для $h=120$ мкм) подтверждают этот вывод. Более того, если построить в этих координатах и зависимость ΔE -эффекта, то последний также пропорционален f^{-1} : (кривая 2 на рис. 4). В работе [7] для аморфного сплава $\text{Co}_{83}\text{Ta}_{11}\text{Zr}_6$ приведены экспериментальные данные по эффективной восприимчивости, которая также пропорциональна f^{-1} . Сравнивая изменение ΔE -эффекта и магнитную проницаемость в зависимости от частоты и толщины материала, мы видим, что между этими величинами при частотах выше 0.2 МГц существует связь, т. е. $\Delta E/E \sim \mu$. Полученные результаты свидетельствуют о том, что как ВТ, так и ΔE -эффект в значительной степени определяются глубиной скин-слоя, и, следовательно, для увеличения ΔE -эффекта на высоких частотах необходимо уменьшить толщину применяемого материала. Уменьшение толщины приводит к уменьшению потерь от вихревых токов и увеличению ΔE -эффекта при всех фиксированных частотах колебаний в исследуемом диапазоне частот.

Таким образом, затухание упругих колебаний в аморфном сплаве $\text{Fe}_{45}\text{Co}_{45}\text{Zr}_{10}$ в диапазоне частот 0.15—1.5 МГц определяется в основном вихревыми токами. Уменьшение толщины используемых материалов приводит к уменьшению вихревого затухания и увеличению ΔE -эффекта вследствие эффективного перемагничивания материала по всей толщине исследуемого сплава.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Постников В. С. Внутреннее трение в металлах. М.: Металлургия, 1974. 352 с.
- [2] Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М.: Атомиздат. 1975. 472 с.
- [3] Золотухин И. В. Физические свойства аморфных металлических материалов. М.: Металлургия, 1986. 176 с.
- [4] Кобелев Н. П., Соيفер Я. М., Штейнберг В. Г., Левин Ю. Б. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 5. С. 1564—1567.
- [5] Золотухин И. В., Калинин Ю. Е., Кондусов В. А. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 4. С. 339—342.
- [6] Минаков В. И., Федосов В. Н. // ФММ. 1985. Т. 60. № 2. С. 412—415.
- [7] Ochiai Y., Hayakawa M., Hayashi K., Aso K. // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. N 11. P. 5424—5426.

Воронежский политехнический институт
Воронеж

Поступило в Редакцию
8 августа 1989 г.