

05

## Магнитоупругие свойства аморфных ферромагнетиков, обработанных электрическим током

© А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, А.Ю. Моховиков

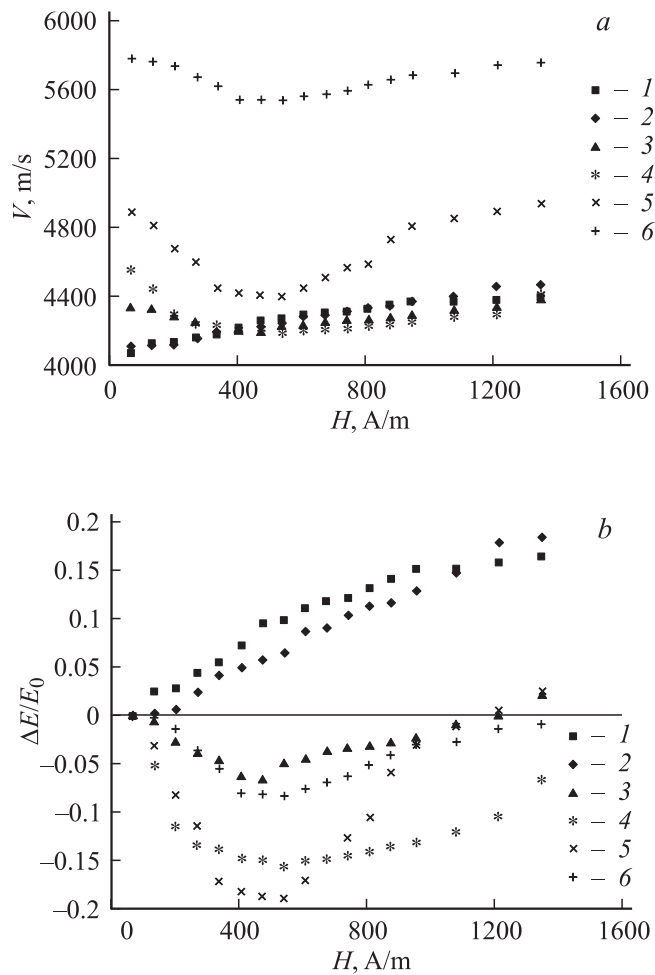
Иркутский государственный университет

E-mail: zubr@api.isu.ru

Поступило в Редакцию 8 ноября 2004 г.

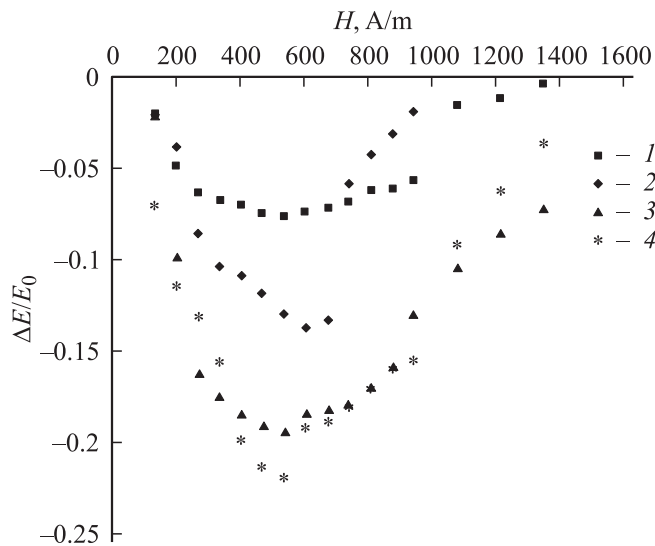
Исследованы зависимости скорости распространения магнитоупругих колебаний и  $\Delta E$ -эффекта от величины внешнего магнитного поля и плотности электрического тока обработки аморфного ферромагнитного сплава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$  в виде узких полосок различной длины. Показано, что обработка аморфных ферромагнетиков электрическим током является эффективным способом наведения в них одноосной анизотропии и получения у них высоких магнитоупругих характеристик.

В работе исследовано влияние обработки электрическим током на магнитоупругие свойства магнитострикционного аморфного ферромагнитного сплава состава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ , полученного быстрой закалкой из расплава, с величиной константы магнитострикции  $\lambda_S \approx (25 \div 30) \cdot 10^{-6}$ . Образцы в виде узких полосок длиной от 0.03 до 0.06 м, толщиной  $25 \mu\text{m}$  и шириной  $0.001 \div 0.0012 \text{ m}$ , вырезанные вдоль длины исходной ленты, подвергались обработке на воздухе постоянным электрическим током, протекающим вдоль длины полосок. Плотность электрического тока обработки  $j$  последовательно увеличивалась от  $j = 2 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$  до  $j = 7.3 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$  через  $0.63 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ . Время обработки образцов при заданном значении  $j$  составляло 2 min. Целью проведения обработки электрическим током являлось снятие в образцах внутренних закалочных напряжений и наведение в них одноосной анизотропии с осью легкого намагничивания, перпендикулярной длине образцов. Измерения скорости распространения магнитоупругих колебаний и величины  $\Delta E$ -эффекта проводились методом резонанса — антирезонанса [1,2]. Постоянное магнитное поле  $H$  и малое переменное магнитное поле  $h \approx 5 \text{ A/m}$ , возбуждающее в образцах магнитоупругие колебания, в процессе измерений прикладывались вдоль длины полосок.



**Рис. 1.** Графики зависимости скорости распространения магнитоупругих колебаний  $V_{m.e.}$  (a) и  $\Delta E$ -эффекта (b) от величины внешнего магнитного поля  $H$  при различных значениях плотности электрического тока обработки  $j$  исследованных образцов: 1 —  $j = 2 \cdot 10^7$  A/m<sup>2</sup>, 2 —  $j = 2.7 \cdot 10^7$  A/m<sup>2</sup>, 3 —  $j = 3.3 \cdot 10^7$  A/m<sup>2</sup>, 4 —  $j = 4.7 \cdot 10^7$  A/m<sup>2</sup>, 5 —  $j = 5.3 \cdot 10^7$  A/m<sup>2</sup>, 6 —  $j = 6.6 \cdot 10^7$  A/m<sup>2</sup>.

На рис. 1, *a* приведены графики зависимости скорости распространения магнитоупругих колебаний  $V_{m.e.}$  от  $H$  для образцов длиной 0.05 м, прошедших обработку при различных значениях  $j$ . При малых значениях  $j$  ( $j < 3.3 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ ) наблюдается монотонное увеличение  $V_{m.e.}$  с ростом  $H$ , что свидетельствует о преобладающей роли процесса смещения доменных границ в механизме перемагничивания образца [3]. Следовательно, при  $j < 3.3 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$  выраженной одноосной анизотропии в исследованных образцах не наводится. При дальнейшем росте  $j$  в интервале от  $3.3 \cdot 10^7$  до  $6.7 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$  на зависимости  $V_{m.e.}(H)$  наблюдается характерный минимум, величина которого определяется значением  $j$ . Появление минимума на зависимости  $V_{m.e.}(H)$  в магнестрикционных аморфных ферромагнитных сплавах в результате проведения обработки можно рассматривать как свидетельство наведения в них одноосной анизотропии с осью легкого намагничивания, перпендикулярной длине образцов [2,4]. Под действием  $H$ , приложенного вдоль длины образцов, в исследованных образцах осуществляется поворот намагниченности по направлению действия магнитного поля, что ведет к уменьшению  $V_{m.e.}$ . Дальнейший рост  $V_{m.e.}$  при больших значениях  $H$  связан с изменением структуры доменных границ образцов, происходящим под действием внешнего магнитного поля [2,4]. Максимальное относительное изменение скорости распространения магнитоупругих колебаний у образцов длиной 0.05 м наблюдается при  $j = 5.3 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$  ( $|(V_{m.e.H} - V_{m.e.0})/V_{m.e.0}|_{\max} \approx 9.8\%$ , где  $V_{m.e.H}$  — скорость распространения магнитоупругих колебаний при  $H \approx 600 \text{ A/m}$ ,  $V_{m.e.0}$  — скорость распространения магнитоупругих колебаний при  $H \approx 0$ ). При больших значениях  $j$  ( $j > (5.3 \div 6.0) \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ ) величина относительного изменения  $V_{m.e.}$  под действием  $H$  уменьшается. Такое поведение зависимости  $V_{m.e.}(H)$  при высоких значениях  $j$  обусловлено протеканием в образцах процессов кристаллизации, приводящих к росту уровня внутренних напряжений и к разрушению наведенной одноосной анизотропии. На рис. 1, *b* приведены графики зависимости величины  $\Delta E$ -эффекта ( $\Delta E/E_0 = (E_H - E_0)/E_0$ , где  $E_0$  — значение модуля упругости при  $H \approx 0$ ,  $E_H$  — значение модуля упругости в магнитном поле  $H$ ) от  $H$  для образцов длиной 0.05 м, прошедших обработку при различных значениях  $j$ . При малых величинах  $j$  ( $j < 3.3 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ ) наблюдается положительный  $\Delta E$ -эффект (увеличение  $E_H$  с ростом  $H$ ). При росте  $j$  в интервале от  $3.3 \cdot 10^7$  до  $7.3 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$  в образцах возникает отрицательный  $\Delta E$ -эффект (уменьшение  $E_H$  с ростом  $H$ ). Наличие отрицательного  $\Delta E$ -эффекта также свидетельствует о суще-



**Рис. 2.** Зависимость величины  $\Delta E$ -эффекта от внешнего магнитного поля  $H$  для образцов, прошедших обработку электрическим током плотностью  $j = 5.3 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ , при различной длине образцов  $L$ : 1 —  $L = 0.06 \text{ m}$ , 2 —  $L = 0.05 \text{ m}$ , 3 —  $L = 0.04 \text{ m}$ , 4 —  $L = 0.03 \text{ m}$ .

ствовании в образцах одноосной анизотропии с осью легкого намагничивания, перпендикулярной их длине [5]. Вместе с тем положения минимумов на зависимостях  $V_{m.e.}(H)$  и  $\Delta E/E_0(H)$  не зависят от величины  $j$  и наблюдаются при значениях  $H \approx 470 \div 540 \text{ A/m}$ . Максимальное абсолютное значение отрицательного  $\Delta E$ -эффекта для образца длиной  $0.05 \text{ m}$  достигается при  $j = 5.3 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$  и составляет  $|\Delta E/E_0|_{\max} \approx 0.20$ . При дальнейшем росте  $j$  максимальное абсолютное значение отрицательного  $\Delta E$ -эффекта уменьшается, что можно связать с протекающими в образцах процессами кристаллизации.

Значения плотности электрического тока обработки  $j$ , при которых возникает отрицательный  $\Delta E$ -эффект, составляют  $(3.3 \div 4) \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$  для всех длин образцов, в то время как максимальные абсолютные значения  $\Delta E$ -эффекта уменьшаются при уменьшении  $L$  (рис. 2). Вместе с тем величина  $V_{m.e.}$  и ход зависимости  $V_{m.e.}(H)$  практически не

зависят от  $L$ , а определяются значением  $j$ . Полученные результаты можно объяснить следующим образом: величина  $V_{m.e.}$  связана с  $E_H$  соотношением

$$V_{m.e.} = (E_H/\rho)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность образца. Если процесс намагничивания образца протекает путем поворота намагниченности в направлении  $H$ , то выражение для  $E_H$  может быть записано в виде [2]

$$E_H = E_0(2K - 3\lambda_s\sigma + NM_s^2\mu_0)^3 / [(2K - 3\lambda_s\sigma + NM_s^2\mu_0)^3 + 9\lambda_s^2 M_s^2 H^2 \mu_0^2 E_0], \quad (2)$$

где  $M_s$  — намагниченность насыщения образца,  $N$  — размагничивающий фактор вдоль длины полоски,  $K$  — константа наведенной одноосной анизотропии,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума. Выражение для  $N$  может быть приближенно записано в виде [6]:

$$N = (1/L) / [(1/L) + (1/a) + (1/b)], \quad (3)$$

где  $a$  и  $b$  — ширина и толщина полоски соответственно. Выражение для абсолютной величины  $\Delta E$ -эффекта может быть представлено в виде:

$$\Delta E/E_0 = \left( 9\lambda_s^2 M_s^2 H^2 \mu_0^2 E_0 / [(2K - 3\lambda_s\sigma + NM_s^2\mu_0)^3 + 9\lambda_s^2 M_s^2 H^2 \mu_0^2 E_0] \right). \quad (4)$$

Согласно (1)–(4), величина  $\Delta E/E_0$  значительно сильнее зависит от  $N$  (а следовательно, и от  $L$ ), чем  $V_{m.e.}$ . При этом уменьшение абсолютной величины  $\Delta E/E_0$  с уменьшением  $L$  также свидетельствует о том, что преобладающим механизмом намагничивания полоски является процесс поворота намагниченности.

Таким образом, на основании проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. Обработка электрическим током магнитострикционных аморфных ферромагнетиков в виде узких полосок является эффективным способом наведения в них одноосной анизотропии с осью легкого намагничивания, ориентированной перпендикулярно направлению протекания электрического тока.

2. Величина плотности электрического тока обработки, при которой наблюдается возникновение отрицательного  $\Delta E$ -эффекта в магнитострикционных аморфных ферромагнетиках, практически не изменяется при уменьшении длины исследованных полосок.

3. При увеличении длины магнитострикционных аморфных ферромагнетиков, прошедших обработку электрическим током, максимальное абсолютное значение  $\Delta E$ -эффекта возрастает, а величина скорости распространения магнитоупругих колебаний и ход ее зависимости от внешнего магнитного поля практически не изменяются. Такой результат может быть объяснен в рамках модели однородного вращения намагниченности в магнитострикционных аморфных ферромагнетиках с наведенной одноосной анизотропией.

## Список литературы

- [1] *Savage H.T., Clark A.E., Powers I.M.* // IEEE Trans. on Magn. 1975. V. 11. P. 1355–1357.
- [2] *Гаврилюк А.А., Гаврилюк А.В., Ковалева Н.П.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 6. С. 50–54.
- [3] *Gutierrez J., Muto V., Squire P.T.* // Journ. of Non-Crystalline Solids. 2001. V. 287. P. 417–420.
- [4] *Гаврилюк А.А., Ковалева Н.П., Гаврилюк А.В.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 16. С. 79–83.
- [5] *Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Кондусов В.А.* и др. // Металлофизика. 1989. Т. 11. В. 4. С. 48–51.
- [6] *Ким П.Д.* Динамика доменных стенок в магнитных пленках / Докт. дис. Красноярск, 1988. 246 с.