

05

## Влияние растягивающих напряжений на $\Delta E$ -эффект ферромагнитных лент $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{V}_{15}$

© А.А. Гаврилюк, А.В. Семиров, А.Л. Семенов,  
А.В. Гаврилюк, Д.В. Прудников, В.О. Кудрявцев

Иркутский государственный университет

E-mail: zubr@api.isu.ru

Иркутский государственный педагогический университет

E-mail: semirov@istuu.irk.ru

Поступило в Редакцию 20 октября 2006 г.

Исследовано влияние постоянных упругих растягивающих напряжений на величину  $\Delta E$ -эффекта аморфных ферромагнитных лент состава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{V}_{15}$ , прошедших термомагнитную обработку в интервале температур от 290 до 360°C. Показано, что при приложении относительно малых растягивающих напряжений максимальное значение отрицательного  $\Delta E$ -эффекта возрастает, а в области больших значений — уменьшается. Обнаружено смещение поля достижения максимального значения отрицательного  $\Delta E$ -эффекта при приложении растягивающих напряжений в область меньших магнитных полей. Полученные результаты объясняются на основе представлений о влиянии постоянных растягивающих напряжений на доменную структуру положительномагнитострикционных ферромагнитных материалов с наведенной одноосной анизотропией.

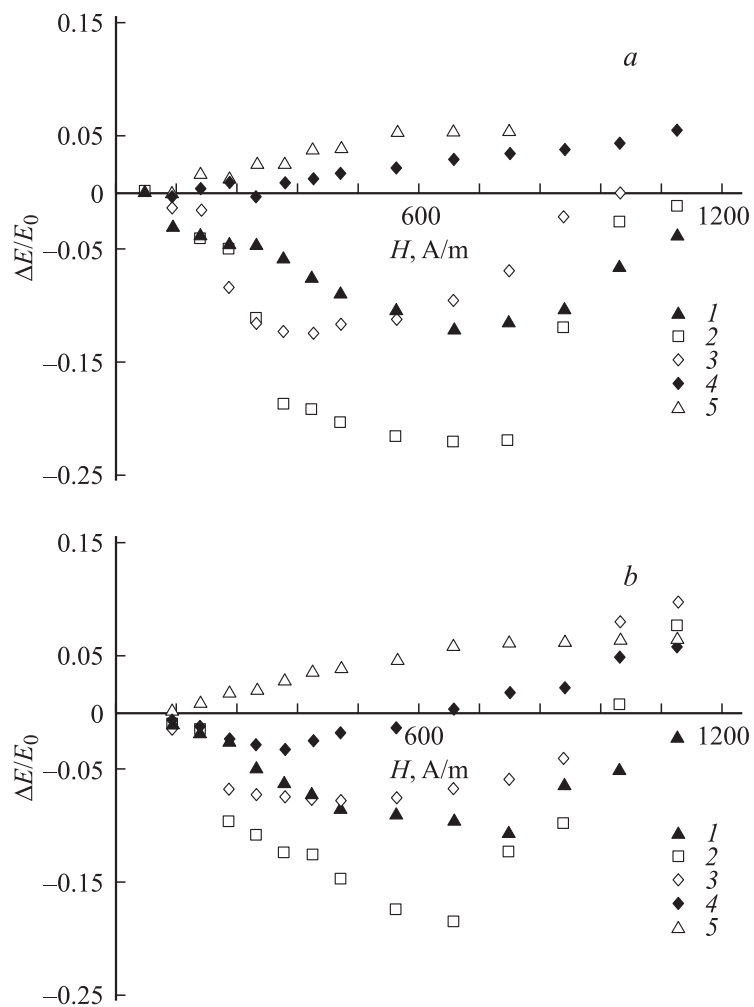
PACS: 75.50.Kj, 75.80.+q

До настоящего времени практически не исследованным остается вопрос о влиянии упругих деформаций на ход зависимости величины  $\Delta E$ -эффекта в магнитострикционных ферромагнитных материалах от магнитного поля. Одним из наиболее удобных модельных объектов для подобного рода исследований являются аморфные ферромагнитные ленты на основе железа, прошедшие термомагнитную обработку. Такие материалы обладают высоким значением константы магнитострикции и малым по значению, но хорошо выраженным и относительно однородным полем наведенной анизотропии. В результате проведения

термомагнитной обработки в таких образцах должна реализоваться полосовая доменная структура, что упрощает интерпретацию полученных экспериментальных результатов. Помимо этого, аморфные ферромагнитные ленты с высоким положительным значением константы магнитострикции широко используются в качестве чувствительных элементов различного рода датчиков механических деформаций, температуры и внешнего магнитного поля. Поэтому исследование вопроса о влиянии упругих растягивающих напряжений на величину  $\Delta E$ -эффекта таких материалов представляет и значительный прикладной интерес.

В данной работе приведены результаты исследования влияния постоянных упругих растягивающих напряжений на величину  $\Delta E$ -эффекта в аморфных ферромагнитных лентах состава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ , полученных быстрой закалкой из расплава с величиной константы магнитострикции  $\lambda_s \approx (25 \div 30) \cdot 10^{-6}$ . Образцы в виде узких полосок длиной 0.05 м, шириной  $0.001 \div 0.0012$  м и толщиной  $25 \cdot 10^{-6}$  м перед проведением измерений проходили термомагнитную обработку в интервале температур  $T$  от 290 до 360°C в течение 20 h с последующим медленным остыванием в печи. Целью проведения термомагнитной обработки являлось снятие внутренних напряжений в образцах и наведение в них одноосной анизотропии с осью легкого намагничивания, ориентированной перпендикулярно длине полосок. Выбор интервала температур термомагнитной обработки обусловлен тем, что в таком интервале температур у исследованных лент наиболее интенсивно протекают процессы структурной релаксации и начальной стадии кристаллизации [1,2]. Измерение величины  $\Delta E$ -эффекта проводилось методом резонанса—антирезонанса [3]. Постоянное магнитное поле  $H$  и малое переменное магнитное поле  $h \approx 5$  А/м, возбуждающие магнитоупругие колебания, прикладывались вдоль длины полосок. Величина постоянных упругих растягивающих напряжений  $\sigma$ , прикладываемых вдоль длины полосок, изменялась от 0 до  $2 \cdot 10^7$  Па.

На рис. 1, *a–c* приведены графики зависимости  $\Delta E$ -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  $H$  при различных  $\sigma$  для лент, прошедших термомагнитную обработку при  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $320^\circ\text{C}$ ,  $340^\circ\text{C}$  соответственно. Подобные зависимости были получены и для лент, обработанных при других  $T$ . Как следует из рис. 1, в исследованных образцах в широком интервале магнитных полей и прикладываемых растягивающих напряжений наблюдается от-



**Рис. 1.** Зависимости величины  $\Delta E$ -эффекта от  $H$  ферромагнитных лент состава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{V}_{15}$ , прошедших термомагнитную обработку при различных температурах  $T$  ( $a$  —  $T = 300^\circ\text{C}$ ,  $b$  —  $T = 320^\circ\text{C}$ ,  $c$  —  $T = 340^\circ\text{C}$ ) и подвергнутых действию постоянных растягивающих напряжений  $\sigma$  ( $1$  —  $\sigma = 0$  Па,  $2$  —  $2 \cdot 10^6$  Па,  $3$  —  $4 \cdot 10^6$  Па,  $4$  —  $8 \cdot 10^6$  Па,  $5$  —  $2 \cdot 10^7$  Па).

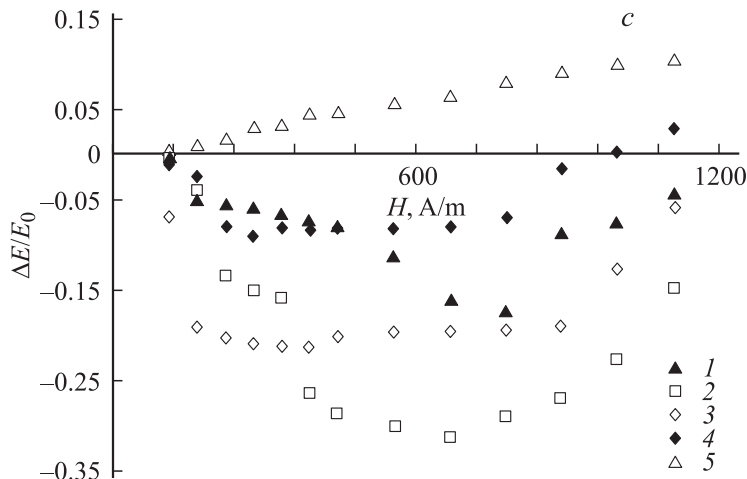
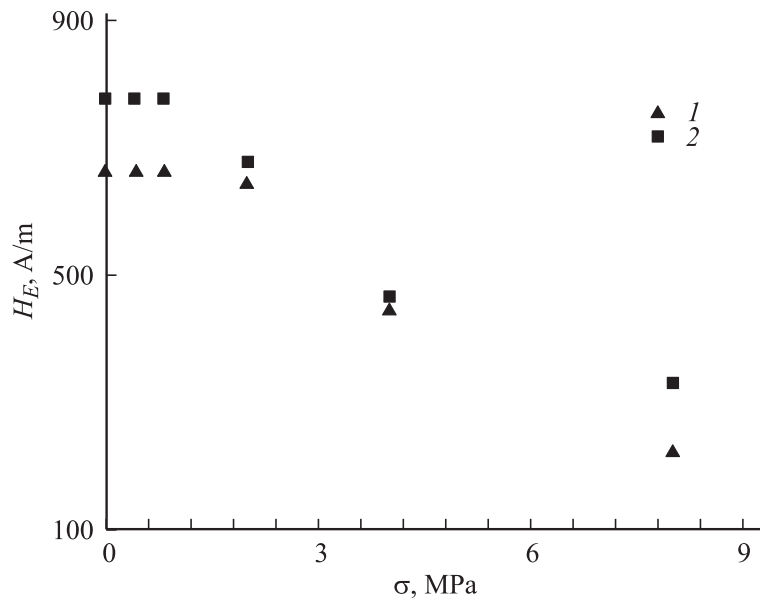


Рис. 1 (продолжение).

рицательный  $\Delta E$ -эффект, т. е. эффект уменьшения модуля упругости под действием внешнего магнитного поля. На рис. 2 представлены графики зависимости поля достижения максимального абсолютного значения отрицательного  $\Delta E$ -эффекта  $H_{\max}$  от  $\sigma$  для образцов, обработанных при  $T = 300$  и  $330^\circ\text{C}$ . На рис. 3 приведен график зависимости относительного изменения максимального значения отрицательного  $\Delta E$ -эффекта ( $\delta = ((\Delta E/E_0)_\sigma / (\Delta E/E_0)_{\sigma=0}) / (\Delta E/E_0)_{\sigma=0} \cdot 100\%$ ) под действием растягивающих напряжений  $\sigma$  от температуры термомагнитной обработки  $T$  исследованных лент. Из анализа полученных результатов могут быть сделаны следующие выводы:

1. Наибольшие изменения величины отрицательного  $\Delta E$ -эффекта под действием упругих растягивающих напряжений наблюдаются в образцах, обработанных при температуре  $T = 340^\circ\text{C}$  (относительное изменение максимального абсолютного значения отрицательного  $\Delta E$ -эффекта составляет  $\sigma = 84\%$ ), а наименьшие — при  $T = 360^\circ\text{C}$  ( $\delta = 9.2\%$ ).

2. Приложение  $\sigma$  в интервале от  $\sigma = 0$  до  $\sigma = (1.6 \div 2) \cdot 10^6$  Па для всех исследованных полосок ведет к увеличению максимального абсолютного значения отрицательного  $\Delta E$ -эффекта. При дальнейшем росте  $\sigma$  происходит уменьшение максимального значения абсолютной



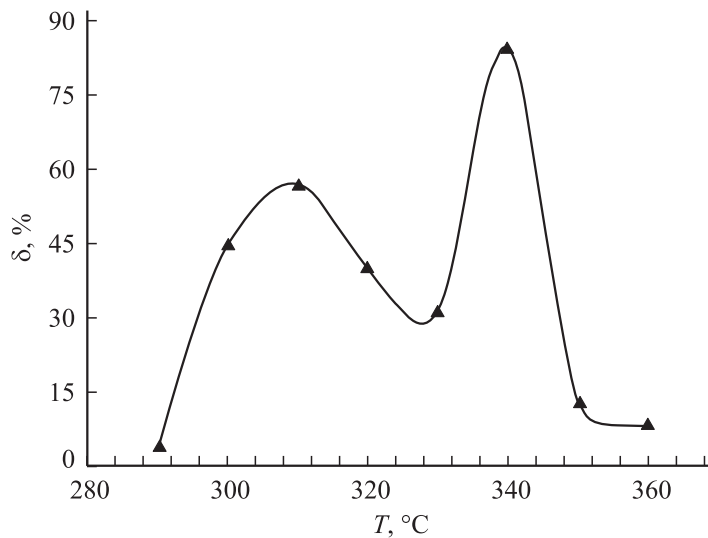
**Рис. 2.** Зависимости поля достижения максимального абсолютного значения отрицательного  $\Delta E$ -эффекта  $H_E$  от  $\sigma$  для ферромагнитных лент состава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{V}_{15}$ , обработанных при: 1 —  $T = 310^\circ\text{C}$  и 2 —  $T = 330^\circ\text{C}$ .

величины отрицательного  $\Delta E$ -эффекта, а при достижении  $\sigma$  величин  $(1.8 \div 2) \cdot 10^7$  Па у исследованных образцов наблюдается только положительный  $\Delta E$ -эффект (т.е. рост модуля упругости при приложении магнитного поля во всем исследованном диапазоне  $H$ ).

3. Рост  $\sigma$  выше определенного значения приводит к смещению поля достижения максимума абсолютного значения отрицательного  $\Delta E$ -эффекта в область меньших  $H$ .

Полученные результаты можно объяснить исходя из следующих представлений.

Известно [4], что наибольшие изменения магнитных и магнитоупругих характеристик под действием внешнего магнитного поля наблюдаются в аморфных ферромагнитных лентах, проходящих начальные стадии кристаллизации, когда на поверхности ленты возникает кристал-



**Рис. 3.** Зависимость относительного изменения максимального значения отрицательного  $\Delta E$ -эффекта  $\delta$  под действием растягивающих упругих напряжений  $\sigma$  от температуры термомагнитной обработки  $T$  ферромагнитных лент состава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ .

лический слой толщиной несколько десятков нанометров. Как показывают данные структурных исследований [1], у аморфных ферромагнитных лент состава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$  такая стадия протекает при температурах термомагнитной обработки  $T = (320 \div 340)^\circ\text{C}$ . По всей видимости, наибольшие изменения величины  $\Delta E$ -эффекта под действием растягивающих напряжений возникают у исследованных лент при тех же температурах термомагнитной обработки. Вместе с тем немонотонный характер зависимости  $\delta(T)$  может свидетельствовать о влиянии на чувствительность  $\delta E$ -эффекта к постоянным растягивающим напряжениям значительного числа факторов (константы наведенной анизотропии, величины магнитострикции, однородности доменной структуры и т. д.), сложным образом зависящих от температуры термомагнитной обработки исследованных лент.

Термомагнитная обработка аморфных лент состава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$  наводит в них одноосную анизотропию с осью легкого намагничивания,

перпендикулярной длине исследованных полосок. При этом основным механизмом намагничивания образцов под действием  $H$ , приложенного вдоль их длины, является механизм поворота намагниченности. Приложение  $\sigma$  перпендикулярно оси легкого намагничивания образцов ведет к уменьшению эффективного поля наведенной в процессе термомагнитной обработки полосок одноосной анизотропии. При этом в области малых значений  $\sigma$  ось легкого не изменяет своей ориентации [5]. Согласно модели однородного вращения намагниченности, выражение для величины модуля упругости  $E_H$  в магнитном поле в этом случае может быть записано в виде [6]:

$$E_H = E_0(2K - 3\lambda_S\sigma)^3 / [(2K - 3\lambda_S\sigma)^3 + 9\lambda_S^2 M_S^2 H^2 \mu_0^2 E_0], \quad (1)$$

где  $K$  — константа наведенной одноосной анизотропии,  $M_S$  — намагниченность насыщения образца,  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума. Как следует из выражения (1), с ростом  $H$  и  $\sigma$  должно происходить уменьшение величины  $E_H$ . При этом выражение для величины  $\Delta E$ -эффекта может быть представлено в виде

$$\Delta E/E_0 = - (9\lambda_S^2 M_S H^2 \mu_0^2 E_0 / [(2K - 3\lambda_S\sigma)^3 + 9\lambda_S^2 M_S^2 H^2 \mu_0^2 E_0]). \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что уменьшение эффективного поля одноосной анизотропии  $H_k = (2K - 3\lambda_S\sigma)/\mu_0 M_S$  при неизменной ориентации оси наведенной анизотропии вызывает рост абсолютного значения отрицательного  $\Delta E$ -эффекта.

При высоких значениях  $\sigma$  происходит поворот оси легкого намагничивания к линии приложения  $\sigma$ . В результате этого, помимо механизма поворота намагниченности, вклад в процесс намагничивания дает механизм смещения доменных границ, что приводит к уменьшению значений отрицательного  $\Delta E$ -эффекта. Можно предположить, что при  $\sigma = 2 \cdot 10^7$  Па ось легкого намагничивания исследованных полосок ориентирована таким образом, что основным механизмом намагничивания образцов становится процесс смещения доменных границ, приводящий к исчезновению отрицательного  $\Delta E$ -эффекта.

Максимум абсолютной величины отрицательного  $\Delta E$ -эффекта достигается в магнитных полях, близких к полю блох—неелевского перехода структуры доменных границ [7], которое уменьшается при уменьшении поля наведенной одноосной анизотропии. Вместе с тем при приложении  $\sigma$  перпендикулярно оси легкого намагничивания полосок значительно

возрастает угловая дисперсия анизотропии и происходит образование так называемых заряженных доменных границ [8], поля рассеяния от которых препятствуют процессам перестройки доменной структуры исследованных образцов. Это, в свою очередь, должно приводить к росту величины поля блох–неелевского перехода. Можно предположить, что при приложении относительно малых  $\sigma$  действие этих факторов компенсирует друг друга. При приложении больших  $\sigma$  уменьшение поля одноосной анизотропии становится преобладающим. Как следствие этого, поле блох–неелевского перехода структуры доменных границ уменьшается, и максимальное абсолютное значение отрицательного  $\Delta E$ -эффекта смещается в область меньших  $H$ .

Таким образом, в положительно-магнитострикционных ферромагнитных лентах состава  $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{V}_{15}$  с наведенной одноосной анизотропией приложение постоянных упругих растягивающих напряжений приводит как к существенному изменению величины  $\Delta E$ -эффекта, так и к изменению хода зависимости этой величины от внешнего магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 05-08-18063).

## Список литературы

- [1] Болдырев В.И., Векслер А.С., Носкова Н.И. // Физика металлов и металловедение. 1999. Т. 87. В. 5. С. 74–77.
- [2] Болдырев В.И., Векслер А.С., Гаврилюк А.А. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 12. С. 76–81.
- [3] Savage H.T., Clark A.E. // IEEE Trans. on Magn. 1975. V. 11. P. 1355.
- [4] Hilzinger H.R., Herzer G. // Journ. Magn. and Magn. Mater. 1986. V. 62. P. 143–151.
- [5] Pinch H.L., Pinto A.A. // Journ. Appl. Phys. 1964. V. 35. P. 828.
- [6] Livingston J.D. // Phys. Stat. Sol. (a). 1982. V. 70. N 8. P. 591–596.
- [7] Гаврилюк А.А., Гаврилюк А.В., Гаврилюк Б.В., Семенов А.Л. // Известия РАН. Сер. Физ. 2001. Т. 65. № 10. С. 1487–1491.
- [8] Jones G.A., Middleton B.K. // Inf. J. Magnetism. 1974. V. 6. P. 16–21.