

ГОЛЫГИН ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ΔE -ЭФФЕКТ В АМОРФНЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

01.04.11 - физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Иркутский государственный университет».

Научный руководитель: Гаврилюк Алексей Александрович, доктор физико-математических наук, доцент.

Официальные оппоненты: Лепешев Анатолий Александрович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ), зав. кафедры ЮНЕСКО «Новые материалы и технологии»;

Комогорцев Сергей Викторович, кандидат физико-математических наук, с.н.с, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дальневосточный федеральный университет».

Защита состоится «__» _____ 2014 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 003.055.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук (ИФ СО РАН) по адресу: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок 50, строение 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2014г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета Д 003.055.02,
доктор физико-математических наук, профессор
Втюрин Александр Николаевич



Актуальность работы.

Аморфные металлические сплавы на основе железа являются перспективными магнитомягкими ферромагнитными материалами. Отсутствие дальнего порядка в расположении атомов приводит к реализации такой совокупности магнитных свойств, которую невозможно получить в ферромагнетике с кристаллической структурой (большие значения магнитострикции и начальной магнитной проницаемости, малые потери на перемагничивание, низкая коэрцитивная сила, и т.д.). Обладая высокими значениями магнитных параметров, такие сплавы находят применение в качестве чувствительных элементов датчиков силы, деформации, температуры, магнитострикционных линий задержки, генераторов звуковых и ультразвуковых колебаний, а также используются для создания сверхпрочных ферромагнитных структур многофункциональных конструкционных материалов [1]. Причиной, сдерживающей применение аморфных ферромагнетиков в современных наукоемких технологиях, является их низкая температурная стабильность, обусловленная неравновесностью их структуры. Перевод аморфного металлического сплава в состояние близкое к метастабильному равновесию, понижает температурную чувствительность его магнитных и магнитоупругих параметров. Аморфные металлические сплавы на основе железа, являются модельными объектами, позволяющими выявить влияние температурных изменений процесса намагничивания ферромагнетика на температурные изменения его магнитных и магнитоупругих параметров. В свою очередь, механизмы намагничивания аморфных металлических сплавов во многом определяются именно видом и режимом их предварительной обработки. В связи с этим можно предположить, что варьирование видов и режимов предварительных обработок позволит получать у аморфных металлических сплавов необходимую температурную чувствительность магнитных и магнитоупругих параметров.

Целью исследований являлось выявление закономерностей влияния температуры нагрева на ΔE -эффект аморфных металлических сплавов на основе железа в виде лент и проволоки, прошедших различные виды предварительной обработки.

Задачи исследований:

1. Исследование влияния температуры предварительной термомагнитной обработки и температуры нагрева в цикле «нагрев-охлаждение» на полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных металлических лент составов $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$ и $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$.
2. Изучение влияния параметров предварительной обработки постоянным электрическим током при одновременном приложении растягивающих напряжений на температурные изменения полевых зависимостей ΔE -эффекта аморфных металлических проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$.
3. Исследование влияния температуры предварительной термомагнитной обработки и температуры нагрева в цикле «нагрев-охлаждение» на полевые

зависимости ΔE -эффекта аморфных металлических проволок состава $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ в широком интервале температур.

4. Выработка представлений о влиянии температуры нагрева на полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных металлических лент и проволок на основе железа, прошедших предварительную обработку.

Научная новизна.

Обнаружено, что в аморфной металлической ленте состава $Fe_{67}Co_{10}Cr_3Si_5B_{15}$, независимо от параметров проведённой термомагнитной обработки, реализуется только положительный ΔE -эффект. Причиной этого является малая величина поля наведённой одноосной анизотропии исследованных лент, а также высокая угловая дисперсия анизотропии.

Предложен метод измерения температурной зависимости наведённой одноосной анизотропии в аморфных металлических лентах состава $Fe_{64}Co_{21}B_{15}$, прошедших предварительную термомагнитную обработку, по измерению их температурной зависимости поля достижения абсолютного максимального значения отрицательного ΔE -эффекта.

Установлено, что представления о магнитоупругой связи между ядром и приповерхностной области проволоки позволяет адекватно объяснить влияние температуры на полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных металлических проволок состава $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$, обработанных постоянным электрическим током с одновременным приложением растягивающих напряжений.

Разработаны представления, объясняющие температурное поведение поля наведённой термомагнитной обработкой анизотропии аморфных металлических проволок состава $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$, на основе представлений о возникновении растягивающих напряжений в приповерхностной области проволоки при намагничивании ее ядра.

Практическая ценность. Результаты исследований могут быть использованы для создания прецизионных датчиков температурных изменений различных физических величин и устройств функциональной электроники, в которых чувствительными элементами являются аморфные металлические сплавы. Проведённые исследования определяют режимы предварительных обработок таких сплавов для достижения у них оптимальной с практической точки зрения температурной чувствительности магнитоупругих характеристик. Результаты исследований вносят вклад в развитие представлений о возможности целенаправленного управления температурной стабильностью магнитных и магнитоупругих параметров аморфных металлических сплавов на основе железа при помощи вариации видов и режимов предварительной обработки.

Защищаемые положения.

1. Положительный ΔE -эффект в аморфной металлической ленте состава $Fe_{67}Co_{10}Cr_3Si_5B_{15}$, прошедшей термомагнитную обработку, объясняется низким значением поля наведённой одноосной анизотропии и значительной угловой дисперсией анизотропии. Следствием этого является появление «заряженных» участков доменных границ, приводящее к росту поверхностной плотности их энергии и к исчезновению отрицательного ΔE -эффекта.

2. Уменьшение максимального абсолютного значения отрицательного ΔE -эффекта с ростом температуры нагрева в аморфных металлических лентах состава $Fe_{64}Co_{21}B_{15}$, прошедших термомагнитную обработку, обусловлено уменьшением поля наведённой одноосной анизотропии. Величина поля наведённой одноосной анизотропии изменяется обратно пропорционально температуре нагрева ленты, что свидетельствует об основополагающем вкладе направленного упорядочения пар атомов переходных металлов в формирование наведённой одноосной анизотропии.

3. Значения плотности постоянного электрического тока обработки и приложенных одновременно растягивающих напряжений в процессе обработки аморфных металлических проволок состава $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ определяют энергию их магнитоупругого взаимодействия. При этом характер полевой зависимости ΔE -эффекта при разных температурах нагрева проволок определяется ходом температурной зависимости отношения энергии наведённой в процессе предварительной обработки анизотропии к энергии упругих напряжений, действующих на приповерхностную область проволоки со стороны ядра за счёт магнитоупругого взаимодействия.

4. Магнитное поле H_{max} , при котором достигается максимальное абсолютное значение отрицательного ΔE -эффекта в аморфных металлических проволоках состава $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$, определяется температурой их термомагнитной обработки. Величина H_{max} уменьшается с ростом температуры нагрева T проволок согласно функциональной зависимости $H_{max} = AT^{-\beta}$, где коэффициенты $\beta=0,4\div 0,7$ и A определяются отношением энергии магнитоупругого взаимодействия ядра и приповерхностной области проволоки к энергии наведённой анизотропии.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Всероссийской Байкальской конференции молодых учёных по наноструктурным материалам (Иркутск, 2009 г.); Международной конференции «Релаксационные явления в твёрдых телах» (Воронеж, 2010 г.); XI Всероссийской школе-семинаре по проблемам физики конденсированного состояния вещества. (Екатеринбург, 2010 г.); IV-V международной Байкальской конференции «Магнитные материалы. Новые технологии» (Иркутск, 2010, 2012 г.); X-ой региональной конференции «Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование» (Владивосток, 2011 г.); International conference «Functional Materials – 2011» (Симферополь, 2011 г.); 9-ой международной конференции «Современные металлические материалы и технологии (Санкт-Петербург, 2011 г.); Всероссийской конференции «Наноматериалы и технологии» (Улан-Удэ, 2012 г.); 18-ой Всероссийской конференции студентов-физиков и молодых учёных ВНКФС – 18 (Красноярск, 2012 г.); 3rd European Workshop on "Self-Organized Nanomagnets" (Мадрид, 2012 г.); XXII международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Астрахань, 2012 г.); V Euro-Asian Symposium Trends in MAGnetism: Nanomagnetism (2013, Vladivostok, Russia); Joint European Magnetic Symposia (2013, Rhodes, Greece); Donostia International Conference on Nanoscaled Magnetism and Applications (2013, San Sebastian, Spain).

Диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке:

Государственного задания Министерства образования и науки РФ на 2012 -2014 гг. по теме «Теоретические и экспериментальные исследования термостабильности аморфных и нанокристаллических сплавов на основе переходных металлов» (рег. номер 01201256008); гранта РФФИ № 12-08-31476 «Влияние атомного упорядочения на термическую стабильность магнитных и магнитоупругих свойств наноструктурированных металлических сплавов на основе переходных металлов»; гранта РФФИ № 11-08-00362 «Влияние температуры на магнитные и магнитоупругие параметров аморфных и наноструктурированных сплавов на основе переходных металлов».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов и списка литературы. Диссертация изложена на 134 страницах, содержит 40 рисунков. Библиография включает 180 наименований.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследований. Сформулированы цели и задачи исследований, показаны новизна, практическая значимость полученных результатов и сведения об апробации работы, приведены защищаемые положения, кратко изложено содержание работы.

В 1-й главе проведён литературный обзор работ по исследованию доменной структуры и процессов её перестройки под действием магнитного поля аморфных металлических лент на основе железа. Рассмотрено влияние различного рода предварительных обработок аморфных металлических лент на их структуру и магнитные параметры. Приведены результаты исследований магнитоупругих характеристик аморфных металлических лент на основе переходных металлов и анализ взаимосвязи механизмов перестройки доменной структуры с магнитоупругими характеристиками аморфных металлических лент с наведённой одноосной анизотропией. Анализируется влияние процессов структурной релаксации и кристаллизации, протекающих в аморфных металлических лентах, на их магнитные и магнитоупругие свойства. Отдельный параграф посвящён анализу результатов исследований магнитных и магнитоупругих свойств аморфных металлических проволок на основе железа.

Во 2-й главе приведены сведения об исследуемых в работе аморфных металлических лентах и проволоках. Приводится описание установки для проведения предварительной термомагнитной обработки аморфных металлических лент и проволок. Описаны используемые методы и режимы проведения предварительных обработок исследуемых образцов, а также методы измерений их температурных зависимостей магнитных и магнитоупругих параметров (метод резонанса – антирезонанса определения ΔE -эффекта, индукционный метод измерения петель гистерезиса).

Глава 3 посвящена экспериментальным исследованиям температурных зависимостей ΔE -эффекта аморфных металлических лент на основе переходных металлов, прошедших предварительную термомагнитную обработку.

В параграфе 3.1 приведены результаты исследований влияния температуры термомагнитной обработки и температуры последующего нагрева

на полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных металлических лент состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$. Как следует из приведённых зависимостей, при всех температурах термомагнитной обработки в исследуемых лентах возникает положительный ΔE -эффект (т.е. увеличение модуля упругости E_H ленты при приложении H) (рис.1). Максимальные значения величины $\Delta E/E_0$ ($\Delta E/E_0=0,8\div0,9$) при комнатных температурах получены у лент, обработанных при температурах $390^\circ\div410^\circ\text{C}$. Отметим также, что полностью положительный ΔE -эффект в аморфных металлических лентах на основе железа, прошедших предварительную термомагнитную обработку и имеющих, предположительно, одноосную наведенную анизотропию, ранее не наблюдался.

С ростом температуры нагрева у исследованных лент наблюдается уменьшение ΔE -эффекта и поля его магнитного насыщения. Это приводит к тому, что даже при достаточно низких температурах нагрева лент, максимальные значения магнитных полей, при которых удаётся измерить ΔE -эффект, уменьшаются. При последующем охлаждении лент от 300°C до комнатной температуры значение ΔE -эффекта возрастает, однако остается меньшим, чем до проведения нагрева.

Проведение второго и последующего циклов «нагрев-охлаждение» не приводит к заметным изменениям в ходе полевых зависимостей ΔE -эффекта. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при проведении именно первого цикла «нагрев-охлаждение» в аморфной металлической ленте состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$ протекают наибольшие структурные изменения.

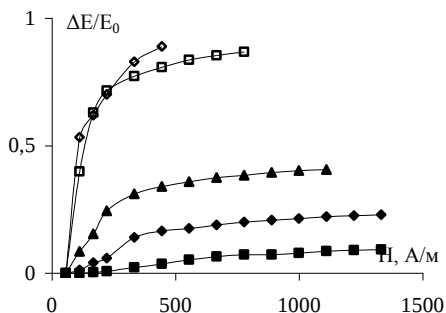


Рис. 1. Полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных лент состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку при температурах T_{pre} :

■ - $T_{pre}=330^\circ\text{C}$, ◆ - $T_{pre}=350^\circ\text{C}$,
 ▲ - $T_{pre}=370^\circ\text{C}$, □ - $T_{pre}=390^\circ\text{C}$,
 ◇ - $T_{pre}=410^\circ\text{C}$.

Температура измерений $T=30^\circ\text{C}$.

Таким образом, независимо от температуры предварительной термомагнитной обработки исследованных лент в них под действием H наблюдается рост E_H . Можно предположить, что причиной такого поведения ΔE -эффекта лент является невозможность наведения у них в процессе проведения предварительных обработок выраженной одноосной анизотропии.

Для проверки того, насколько характерен положительный ΔE -эффект для лент состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$, исследованы зависимости $\Delta E/E_0(H)$ у образцов, прошедших дальнейшую обработку постоянным электрическим током различной плотности, а также двухстадийную обработку (термическая обработка с последующей термомагнитной обработкой). Проведение обработки электрическим током уменьшает положительный ΔE -эффект и увеличивает

температурную стабильность его характеристик при первом цикле «нагрев-охлаждение» (рис.2). При этом наибольший ΔE -эффект наблюдаются у лент, обработанных постоянным электрическим током плотностью $j=3,2 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$.

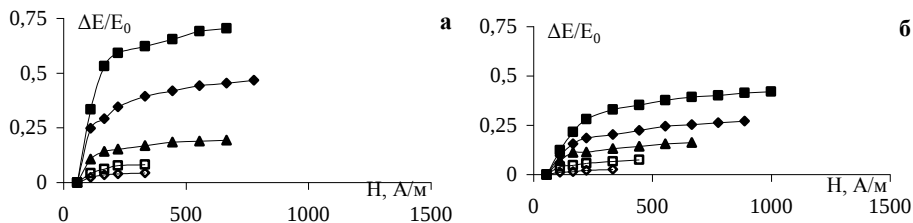


Рис. 2. Полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных лент состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку при температуре $T_{pre}=390^\circ\text{C}$. Дополнительная обработка постоянным электрическим током плотностью $j=3,2 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$. 1-ый цикл «нагрев-охлаждение». а – нагрев, б – охлаждение: ■ - $T=30^\circ\text{C}$, ♦ - $T=90^\circ\text{C}$, ▲ - $T=150^\circ\text{C}$, □ - $T=210^\circ\text{C}$, ◇ - $T=240^\circ\text{C}$.

Причиной роста температурной стабильности ΔE -эффекта аморфных лент состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$ в результате проведения дополнительной обработки постоянным электрическим током может являться разрушение слабовыраженной одноосной наведенной анизотропии и наведение «винтовой» анизотропии [2, 3]. Предварительная термическая обработка лент состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$ проводилась при 200°C в течение 10 часов в вакууме 10^{-3} мм. рт. ст. Условия последующей термомагнитной обработки лент состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_5$ не изменялись. Установлено, что низкотемпературная предварительная термическая обработка не изменяет качественный ход полевой зависимости ΔE -эффекта, но понижает его значение.

Таким образом, независимо от характера и режима предварительной обработки аморфных металлических лент состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$ в них под действием магнитного поля возникает положительный ΔE -эффект. Можно предположить, что причиной такого поведения ΔE -эффекта лент является невозможность наведения при предварительных обработках выраженной одноосной анизотропии, что может быть связано с особенностями состава ленты.

Из анализа петель гистерезиса (рис.3) исследованных лент, прошедших термомагнитную обработку при $T_{pre}=370^\circ\text{C}$ в процессе цикла «нагрев-охлаждение» следует, что при комнатной температуре поле наведенной одноосной анизотропии лент не превышает $50 \div 70 \text{ А/м}$. Нагрев ленты до $T=290^\circ\text{C}$ сопровождается уменьшением B_r и H_C . Дальнейшее охлаждение ленты до комнатной температуры ведет к практически полному восстановлению первоначальных значений B_r и H_C . Малое значение поля наведённой анизотропии и относительно высокое значение B_r свидетельствуют о значительной величине угловой дисперсии анизотропии. Данное предположение подтверждается фотографиями доменной структуры исследованных лент.

Рост концентрации хрома за счет уменьшения концентрации железа приводит к увеличению термической стабильности фазовой структуры аморфного сплава. Хром по своему магнитному упорядочению - антиферромагнетик. В сплаве атомы хрома окружают себя либо другими атомами хрома, либо атомами железа. При этом между ними осуществляется антиферромагнитное обменное взаимодействие, препятствующее наведению термомагнитной обработкой одноосной анизотропии. Можно предположить, что в результате конкуренции между процессами наведения одноосной анизотропии и упорядочения атомов хрома и железа в ленте возникает магнитная доменная структура с высокой угловой дисперсией анизотропии. Рост температуры нагрева приводит к уменьшению энергии антиферромагнитного обменного взаимодействия между атомами Cr и Fe, но незначительно влияет на поле наведённой одноосной анизотропии. Чем выше температура нагрева ленты, тем более однородной становится ее магнитная структура, и тем меньше B_r . Охлаждение ленты до комнатной температуры практически не изменяет поле наведенной одноосной анизотропии, но увеличивает энергию антиферромагнитного упорядочения между атомами Cr и Fe. В результате B_r возрастает.

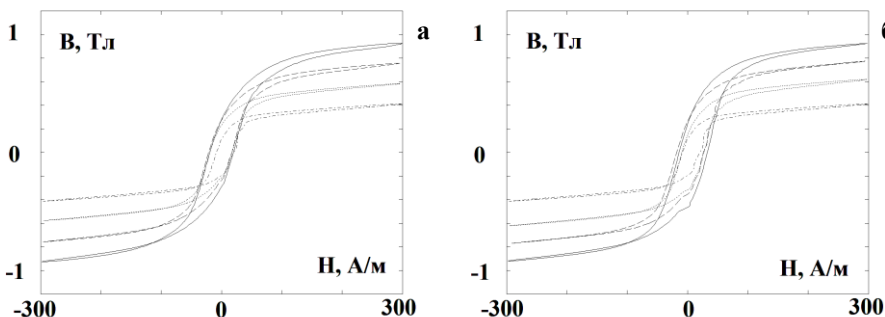


Рис. 3. Петли гистерезиса аморфных лент состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_5$, прошедших термомагнитную обработку при $T_{\text{pre}}=370^\circ\text{C}$ в процессе цикла «нагрев-охлаждение». а - нагрев; б - охлаждение. Температура нагрева T : — 20°C - - 200°C 260°C - · - 290°C .

Угловая дисперсия анизотропии влияет на перестройку доменной структуры и на полевые зависимости ΔE -эффекта в аморфных металлических лентах. Магнитное поле, приложенное перпендикулярно средней оси легкого намагничивания образца, уменьшает угловую дисперсию анизотропии, и, следовательно, уменьшает энергию блоховских доменных границ. С учетом энергии блоховских доменных границ, выражение для углов $\beta_{1,2}$ поворота намагниченности в противоположно намагниченных доменах может быть записано в виде:

$$\sin \beta_{1,2} \approx \mu_0 H / 2(K \pm A n_b \gamma_b) \quad (1)$$

где $A=A(H)>1$ - коэффициент, учитывающий влияние угловой дисперсии анизотропии на поверхностную плотность энергии γ_b блоховских доменных границ, n_b - концентрация блоховских доменных границ, K - константа

одноосной наведённой анизотропии. Выражение для поверхностной плотности энергии γ_b доменных границ, с учетом энергии полей рассеяния неоднородной структуры намагниченности, может быть записано в виде [4]:

$$\gamma_b = \gamma_{b,180} + t^2 \mu_0^2 M_S^2 (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)^2 / 7.4d \quad (2)$$

где $\gamma_{b,180}$ - поверхностные плотности энергий 180°-ных блоховских доменных границ M_S - намагниченность насыщения, t - длина волны угловой дисперсии анизотропии, d - расстояние между доменными границами, $\alpha_1(H)$ и $\alpha_2(H)$ - углы отклонения намагниченности от среднего направления оси легкого намагничивания в соседних доменах. Оценка величины второго члена в (2) для характерных значений параметров $M_S = 1,8 \cdot 10^6$ А/м, $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 \approx 8^\circ - 10^\circ$, $t \approx 10^{-4}$ м, $d = 10^{-4}$ м ($n_b \approx 10000$ м⁻¹) дает $(3,5 \div 4) \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, а для $\gamma_b \approx (4 \div 6) \cdot 10^{-3}$ Дж/м².

Процесс поворота намагниченности в аморфных металлических лентах с одноосной наведённой анизотропией приводит к появлению минимума на зависимости модуля упругости E_H от H вблизи поля блох-неелевского перехода структуры доменных границ H_{b-n} [5]:

$$H_{b-n} = H_K (\gamma_{n,180} - \gamma_{b,180}) / (\gamma_{n,180} + \gamma_{b,180}) \quad (3)$$

где $H_K = 2K/\mu_0 M_S$ - поле наведенной одноосной анизотропии, $\gamma_{n,180}$ - поверхностная плотность энергии 180°-ных неелевских доменных границ. Учитывая, что в магнитомягких материалах толщиной несколько десятков микрон $\gamma_{n,180} \approx (6 \div 8) \cdot 10^{-3}$ Дж/м² и $\gamma_{b,180} \approx (1 \div 2) \cdot 10^{-3}$ Дж/м², получим, что H_{b-n} , а следовательно, и поле минимума на зависимости $\Delta E/E_0(H)$ находятся в интервале $(0,6 \div 0,8) H_K$. Так как высокая угловая дисперсия анизотропии приводит к росту γ_b , то величина H_{bn} становится очень малой (единицы А/м) и сложно измеримой.

Таким образом, рост модуля упругости под действием магнитного поля в аморфных лентах состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$, прошедших предварительную термомагнитную обработку, объясняется низким значением поля наведенной одноосной анизотропии и значительной угловой дисперсией анизотропии, что, в свою очередь, связано с присутствием в составе ленты хрома.

Параграф 3.2 посвящён изучению влияния температур термомагнитной обработки и последующего нагрева на полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных металлических лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$.

При нагреве от 30°С до 240°С ленты, прошедшей термомагнитную обработку при $T_{pre} = 290^\circ\text{C}$ наблюдается отрицательный ΔE -эффект (уменьшение модуля упругости ленты при приложении магнитного поля), максимальное абсолютное значение которого уменьшается с ростом T (рис.4). При этом поле H_{max} достижения максимального абсолютного значения отрицательного ΔE -эффекта уменьшается. Рост T до $270^\circ \div 300^\circ\text{C}$ приводит к положительному ΔE -эффекту (рис.4,а). Последующее охлаждение от 300°С до 30°С сопровождается ростом E_H с увеличением H (рис. 4,б), что свидетельствуют о разрушении наведенной одноосной анизотропии, и изменении механизма намагничивания ленты от поворота намагниченности к смещению не 180°-ных доменных границ.

На рисунке 5 приведены графики $\Delta E/E_0(H, T)$ аморфных лент в процессе цикла «нагрев-охлаждение» до $T = 210^\circ\text{C}$, прошедших термомагнитную обработку

при $T_{pre}=310^{\circ}\text{C}$. При охлаждении лент в них наблюдается отрицательный ΔE -эффект, но его максимальное абсолютное значение уменьшается по сравнению со значением, измеренным при нагреве. Похожие результаты получены и при других T_{pre} в интервале $250^{\circ}\div 350^{\circ}\text{C}$.

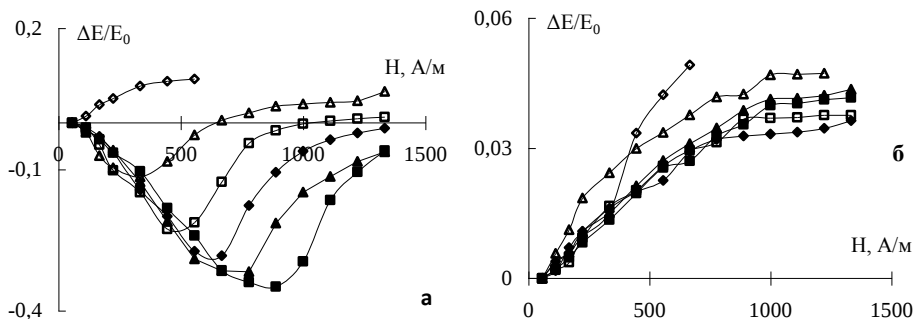


Рис. 4. Полевые зависимости величины ΔE -эффекта аморфных лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших предварительную термомагнитную обработку при температуре $T_{pre}=290^{\circ}\text{C}$. Первый цикл «нагрев-охлаждение»: а - нагрев, б - охлаждение. Температуры нагрева T : ■ - $T=30^{\circ}\text{C}$, ▲ - $T=90^{\circ}\text{C}$, ◆ - $T=150^{\circ}\text{C}$, □ - $T=210^{\circ}\text{C}$, Δ - $T=240^{\circ}\text{C}$, ◇ - $T=300^{\circ}\text{C}$.

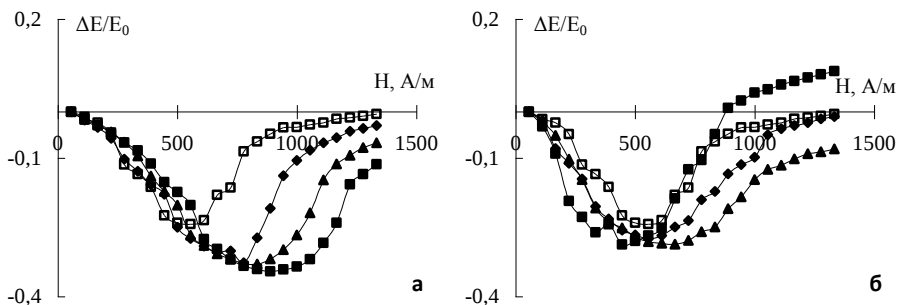


Рис. 5. Полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку при температуре $T_{pre}=310^{\circ}\text{C}$. Первый цикл «нагрев-охлаждение»: а - нагрев, б - охлаждение. Температуры нагрева T : ■ - $T=30^{\circ}\text{C}$, ▲ - $T=90^{\circ}\text{C}$, ◆ - $T=150^{\circ}\text{C}$, □ - $T=210^{\circ}\text{C}$.

Температура термомагнитной обработки T_{pre} влияет на H_{max} (рис.6). Наибольшие значения H_{max} наблюдаются для лент, прошедших обработку при $T_{pre}=310^{\circ}\text{C}$, а наименьшие - при $T_{pre}=250^{\circ}\text{C}$. Уменьшение H_{max} для лент, прошедших термомагнитную обработку при $T_{pre}=330^{\circ}\div 350^{\circ}\text{C}$, связано с уменьшением поля наведенной одноосной анизотропии при протекании в них кристаллизации. Величина H_{max} уменьшается с ростом T , а зависимости $H_{max}(T)$ близки к линейным. Полученные результаты объясняются на основании представлений о блох – неелевском переходе структуры доменных границ.

В лентах с одноосной наведенной магнитной анизотропией, под действием магнитного поля, ориентированного перпендикулярно оси одноосной анизотропии, протекает процесс поворота намагниченности. При этом

выражение для модуля упругости в магнитном поле $E_{H,b}$ с учетом энергии блоховских доменных границ записывается в виде [5]:

$$E_{H,b} = E_0 \left\{ 1 + \frac{9\lambda_s^2 \mu_0^2 M_s^2 H^2 E_0}{(2K - 3\lambda_s \sigma - 2n_b \gamma_{b,180})^3} \right\}^{-1} \quad (4)$$

а $E_{H,n}$ с учётом энергии неелевских доменных границ - в виде:

$$E_{H,n} = E_0 \left\{ 1 + \frac{9\lambda_s^2 (\mu_0^2 M_s^2 H^2 + 2n_n \gamma_{n,180})^2 E_0}{(2K - 3\lambda_s \sigma - 2n_n \gamma_{n,180})^3} \right\}^{-1} \quad (5)$$

где, λ_s – константа магнитострикции, σ – величина упругих растягивающих напряжений, n_b и n_n – плотности неелевских и блоховских доменных границ, соответственно.

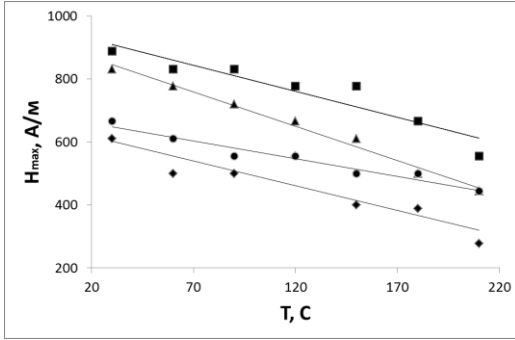


Рис. 6. Зависимости $H_{max}(T)$, полученные при нагреве аморфных металлических лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку при температурах T_{pre} :

- ♦ - $T_{pre} = 250^\circ\text{C}$;
- ▲ - $T_{pre} = 290^\circ\text{C}$;
- - $T_{pre} = 310^\circ\text{C}$;
- - $T_{pre} = 350^\circ\text{C}$;

Согласно (4), модуль упругости уменьшается с ростом H . В свою очередь, (5) описывает его увеличение за счет роста n_n в магнитных полях, больших чем H_{b-n} [5]. Переход от блоховской структуры доменных границ к неелевской и, как следствие этого, появление минимума на зависимости $\Delta E/E_0(H)$ (максимального абсолютного значения отрицательного ΔE -эффекта) происходит в магнитных полях H_{bn} больших поля блох – неелевского перехода структуры доменных границ (3). Так как отношение $(\gamma_{n,180} - \gamma_{b,180})/(\gamma_{n,180} + \gamma_{b,180})$ слабо зависит от величины поля H_K , то зависимость $H_{max}(T)$ аналогична зависимости $H_K(T)$. Таким образом, температурная зависимость поля наведенной одноосной анизотропии аморфных металлических лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку в интервале $T_{pre} = 250^\circ\div 350^\circ\text{C}$ близка к линейной ($H_K(T) \sim 1/T$), что свидетельствует о том, что в них основным механизмом наведения анизотропии является механизм направленного упорядочения пар атомов.

При комнатной температуре форма петли гистерезиса (рис.7) ленты состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедшей термомагнитную обработку, свидетельствует о преобладании механизма поворота намагниченности, что характерно для лент с наведённой одноосной анизотропией.

С ростом температуры нагрева ленты происходит рост B_r . Такой рост тем значительнее, чем больше температура нагрева. При нагреве ленты до $230^\circ\div 290^\circ\text{C}$ основным механизмом перестройки доменной структуры образцов становится процесс смещения доменных границ, т.е. одноосная наведенная

анизотропия в них разрушается. Чем выше температура термообработки, тем выше температура разрушения наведённой одноосной анизотропии.

При дальнейшем охлаждении лент до комнатной температуры наблюдается увеличение B_r и H_C . Охлаждение лент от высоких температур способствует развитию одноосной анизотропии вдоль их длины, что можно объяснить эффектом анизотропии формы [6].

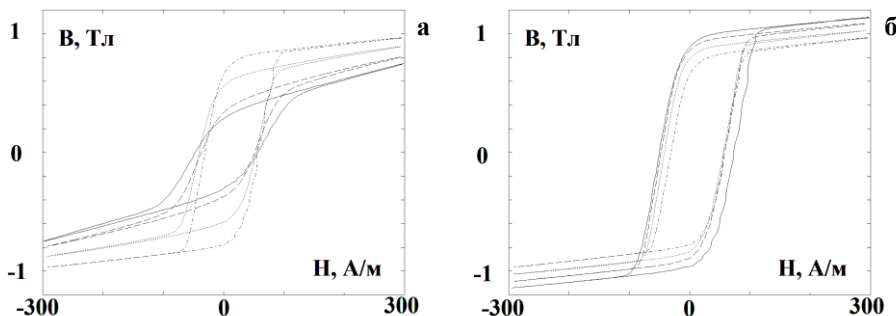


Рис. 7. Петли гистерезиса аморфных лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку при $T_{pre}=250^\circ\text{C}$ в процессе цикла «нагрев-охлаждение». а – нагрев, б – охлаждение. Температура нагрева T : — 20°C — 200°C 260°C — · — 290°C .

Глава 4 посвящена исследованию температурных зависимостей ДЕ-эффекта аморфных металлических проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших различные виды предварительной обработки.

В параграфе 4.1 приведены результаты исследований влияния температуры нагрева на полевые зависимости ДЕ-эффекта аморфных металлических проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших предварительную обработку постоянным электрическим током при одновременном приложении растягивающих напряжений.

Как показали проведенные исследования, варьирование величин плотности постоянного электрического тока и растягивающих напряжений в процессе обработки проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ позволяет изменять качественный ход полевой зависимости ДЕ-эффекта. При $j=(25\div 30)\cdot 10^6$ А/м² и величине $\sigma=(32\div 128)\cdot 10^6$ Па в исследованных проволоках наблюдается монотонное уменьшение E_H . Рост температуры нагрева проволоки в интервале от 30° до 330°C приводит к уменьшению отрицательного ДЕ-эффекта. Последующее охлаждение проволок до 30°C приводит к увеличению отрицательного ДЕ-эффекта и появлению выраженного минимума на зависимости $\Delta E/E_0$ от H . При охлаждении от 330°C до 30°C минимум на зависимости $\Delta E/E_0(H)$ смещается в область больших магнитных полей.

С ростом j до $36\cdot 10^6$ А/м² на зависимостях ДЕ-эффекта от H появляется характерный минимум. Последующий нагрев проволоки в процессе измерений приводит к уменьшению абсолютного максимального значения отрицательного ДЕ-эффекта и к смещению минимума $\Delta E/E_0$ в область меньших H (рис.8). При дальнейшем охлаждении проволок до комнатных температур минимум на

зависимости $\Delta E/E_0(H)$ приобретает более выраженный характер и смещается в область больших H . При этом абсолютные значения ΔE -эффекта увеличиваются по сравнению с его значениями в процессе нагрева проволоки.

При увеличении j от $39 \cdot 10^6$ А/м² до $45 \cdot 10^6$ А/м² в проволоках наблюдается переход от отрицательного (при $\sigma=0$) к положительному (при $\sigma \geq 128 \cdot 10^6$ Па) ΔE -эффекту. Наибольшие значения ΔE -эффекта наблюдаются при обработке проволоки электрическим током плотностью $j > (42-45) \cdot 10^6$ А/м². В области относительно малых значений H будет иметь место отрицательный ΔE -эффект, абсолютное значение которого уменьшается с ростом T .

Полученные результаты объясняются на основе представлений о неоднородном распределении намагниченности в аморфных металлических проволоках (существование внутреннего ядра, в котором намагниченность ориентирована аксиально, и приповерхностной области, намагниченность в которой ориентирована либо радиально, либо циркулярно). Так как максимальное абсолютное значение отношения $\Delta E/E_0$ наблюдается при H близких к полю H_{b-n} блох-неелевского перехода структуры доменных границ в приповерхностной области проволоки, то в магнитных полях $H > H_{b-n}$ абсолютное значение отношения $\Delta E/E_0$ уменьшается.

В результате магнитоупругого взаимодействия ядра и приповерхностной области проволоки, процессы перестройки доменной структуры в этих областях взаимосвязаны. Плотность энергии $W_{m.e}$ магнитоупругого взаимодействия ядра и приповерхностной области проволоки определяется соответствующими константами магнитострикции ядра λ_{SC} и приповерхностной области λ_{SSH} , а также модулем упругости приповерхностной области E_{Hsh} . [7]:

$$W_{m.e.} = (3/2) \lambda_{SC} \lambda_{SSH} E_{Hsh} \quad (6)$$

Величина $W_{m.e}$ уменьшается с ростом T . При этом ход зависимости $\Delta E/E_0(T)$ при увеличении температуры нагрева проволоки определяется влиянием двух процессов: уменьшением поля наведенной анизотропии в приповерхностной области проволоки и уменьшением энергии магнитоупругого взаимодействия ядра и приповерхностной области проволок. Если процесс намагничивания приповерхностной области проволоки обусловлен вращением намагниченности, а ядро проволоки перемагничивается смещением доменных границ, то зависимости $\Delta E/E_0(T, H)$ определяются ходом температурной зависимости отношения δ поля наведённой циркулярной анизотропии $H_K = 2K_{Sh}/(\mu_0 M_s)$ и поля $H_{Sh} = (3/2) \lambda_{SC} \lambda_{SSH} E_{Hsh}/(\mu_0 M_s)$, действующего на приповерхностную область проволоки со стороны ядра за счет магнитоупругого взаимодействия, т.е. температурной зависимостью отношения:

$$\delta = 4K_{Sh}/(3\lambda_{SC} \lambda_{SSH} E_{Hsh}) \quad (7),$$

где K_{Sh} – константа наведенной анизотропии приповерхностной области проволоки. При увеличении δ с ростом T , минимум на зависимости $\Delta E/E_0(T, H)$ смещается в область больших значений H . Если же δ уменьшается с ростом T , минимум на зависимости $\Delta E/E_0(T, H)$ смещается в область меньших значений H .

Из полученных результатов следует, что рост T ведет к практически линейному уменьшению H_{max} (рис.9), т.е. отношение $4K_{Sh}/(3\lambda_{SC}\lambda_{SSH}E_{HSh})$ уменьшается. Следовательно, на зависимость $\Delta E/E_0(T, H)$ определяющее влияние оказывает уменьшение поля наведенной анизотропии с ростом температуры нагрева.

Эффективное магнитное поле $H_{эфф}$, действующее на намагниченность в приповерхностной области проволоки при намагничивании записывается как:

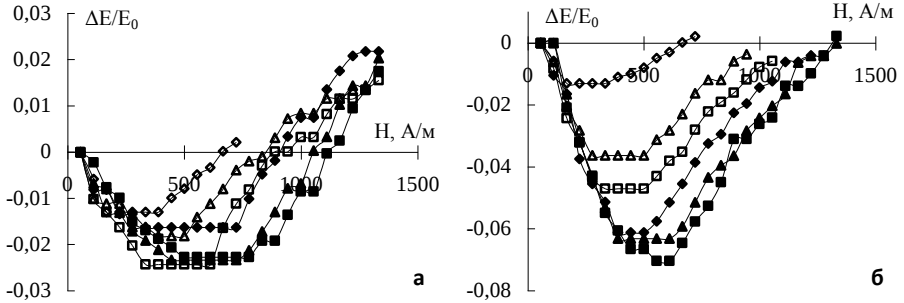


Рис. 8. Полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных проволок состава $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ обработанных постоянным электрическим током плотностью $j=36 \cdot 10^6$ А/м² с одновременным приложением растягивающих напряжений $\sigma=127 \cdot 10^6$ Па. а - нагрев, б - охлаждение. Температуры нагрева T : ■ - $T=30^\circ\text{C}$, ▲ - $T=90^\circ\text{C}$, ◆ - $T=150^\circ\text{C}$, □ - $T=210^\circ\text{C}$, Δ - $T=240^\circ\text{C}$, ◇ - $T=300^\circ\text{C}$.

$$H_{эфф} = H + (3/2)\lambda_{SC}\lambda_{SSH}E_{HSh} / (\mu_0 M_s) \quad (8),$$

а условие существования минимума на зависимости $\Delta E/E_0(T, H)$ в магнитных полях, больших поля намагничивания ядра проволоки, в виде:

$$\mu_0 M_s H + (3/4)\lambda_{SC}\lambda_{SSH}E_{HSh} < K_{Sh}(\gamma_n - \gamma_\delta) / (\gamma_n + \gamma_\delta) \quad (9)$$

С ростом T условие (9) перестает выполняться, т.е. отрицательный ΔE -эффект исчезает. Выполнение (9) зависит от величин радиусов ядра и приповерхностной области проволоки. С ростом радиуса приповерхностной области возрастает γ_n , а γ_δ уменьшается. При этом правый член в (9) возрастает, а само неравенство становится справедливым для более высоких значений H и T .

При низких j ($j \approx 25 \cdot 10^6$ А/м²) и $\sigma < 190$ Па монотонное уменьшение $\Delta E/E_0$ в исследованных интервалах H и T может быть объяснено высоким уровнем внутренних напряжений в приповерхностной области проволоки, и, как следствие этого, выполнением условия (9). При $j > 36 \cdot 10^6$ А/м² и приложенных σ монотонное увеличение $\Delta E/E_0$ с ростом H может быть связано с возникновением локальных пластических деформаций. Это приводит к переориентации оси легкого намагничивания проволоки вдоль линии приложения напряжений, и к изменению механизмов намагничивания проволоки.

В параграфе 4.2 представлены результаты исследований влияния температуры нагрева на полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных проволок состава $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ прошедших термомагнитную обработку.

При всех температурах термомагнитной обработки при относительно низких температурах нагрева у исследованных проволок наблюдается

отрицательный ΔE -эффект (рис. 10). С ростом T от 30°C до 90°C абсолютное значение ΔE -эффекта возрастает, в то время как увеличении температуры нагрева до $T > 90^\circ\text{C}$ уменьшается абсолютную величину ΔE -эффекта.

Изменение температуры термомангнитной обработки T_{pre} слабо влияет на максимальное абсолютное значение ΔE -эффекта, но изменяет магнитное поле его достижения H_{max} . Увеличение T_{pre} от 370°C до 430°C ведёт к уменьшению H_{max} во всем интервале температур последующего нагрева проволоки. При $T_{pre}=470^\circ\text{C}$ H_{max} возрастает. Относительно высокие значения H_{max} свидетельствует о высоком уровне внутренних напряжений в проволоках.

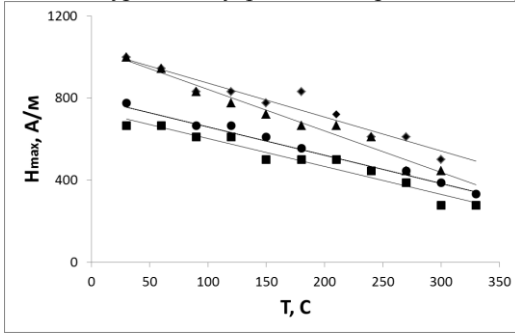


Рис. 9. Зависимости $H_{max}(T)$, полученные при нагреве аморфных проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, обработанных постоянным электрическим током плотностью $j=36 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ и растягивающих напряжений σ :
 ◆ - $\sigma=0$ Па; ▲ - $\sigma=31 \cdot 10^6$ Па;
 ■ - $\sigma=127 \cdot 10^6$ Па; ● - $\sigma=191 \cdot 10^6$ Па;

Наличие отрицательного ΔE -эффекта подтверждает, что в приповерхностной области проволоки протекают процессы поворота намагниченности. Следовательно, можно говорить о наличии в проволоках наведенной анизотропии перпендикулярной их длине.

С ростом T в интервале от 30°C до 180°C до 210°C H_{max} значительно уменьшается (рис.11). При более высоких T уменьшение H_{max} менее значительно. При этом зависимость $H_{max}(T)$ описывается функциональным соотношением:

$$H_{max} = AT^{-\beta} \quad (10)$$

где A и β ($\beta=0,4 \div 0,7$) параметры, зависящие от температуры термомангнитной обработки проволоки. Если считать $H_{max} \sim H_K$, следовательно, и поле наведенной термомангнитной обработкой анизотропии в приповерхностной области проволоки уменьшается с ростом T по степенному закону. В связи с этим, следует говорить не об изменении поля наведенной анизотропии, а об изменении эффективного поля анизотропии $H_K^{эфф}$. Намагничивание ядра проволоки приводит к возникновению в приповерхностной области дополнительных напряжений, способствующих повороту намагниченности в направлении H . При этом $H_{max} \sim H_K^{эфф}$. С некоторыми допущениями выражение для эффективного поля анизотропии $H_K^{эфф}$ в приповерхностной области проволоки с учетом ее магнитоупругого взаимодействия с ядром можно записать в виде:

$$H_K^{эфф} = H_K (1 + P^2 + 2P \cos \gamma)^{1/2} \quad (11)$$

где $P = (3/2) \lambda_{sc} \lambda_{ssh} E_{Hsh} / 2K$, γ - угол между наведенной осью лёгкого намагничивания в приповерхностной области и возникающими в ядре проволоки напряжениями. При $\gamma \approx 90^\circ$, $H_K^{эфф}$ возрастает с ростом величины напряжений [8]. С ростом температуры нагрева происходит ослабление магнитоупругого

взаимодействия ядра с приповерхностной областью и уменьшение H_K . При этом $H_K \sim 1/T$. В свою очередь, коэффициент P в (11) возрастает с ростом T за счет более значительного уменьшения знаменателя по сравнению с числителем. Противоположным действием этих факторов объясняется отличие коэффициента β от 1.

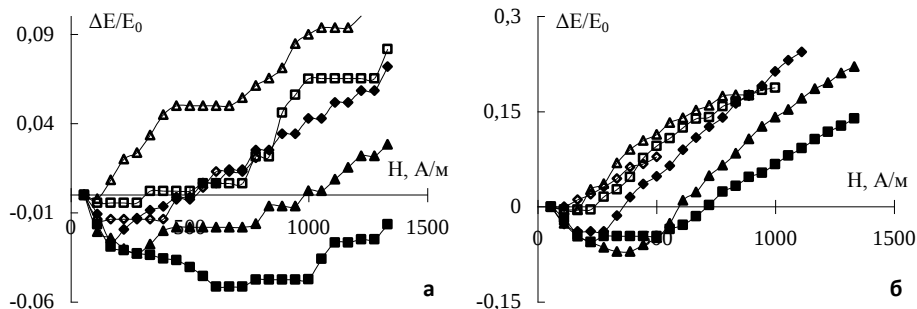


Рис. 10. Полевые зависимости ΔE -эффекта аморфных проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку при температурах T_{pre} : а - $T_{pre}=370^\circ\text{C}$, б - $T_{pre}=420^\circ\text{C}$. Нагрев образца. Температура T : ■ - $T=30^\circ\text{C}$, ▲ - $T=90^\circ\text{C}$, ◆ - $T=150^\circ\text{C}$, □ - $T=210^\circ\text{C}$, △ - $T=240^\circ\text{C}$.

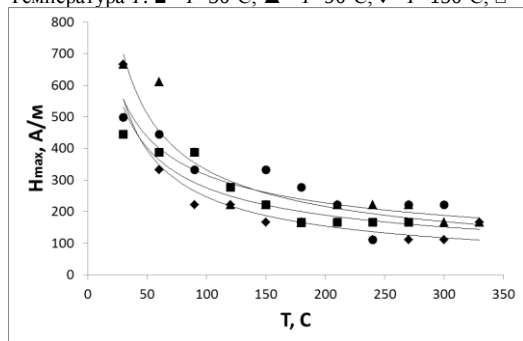


Рис. 11. Зависимости $H_{max}(T)$, полученные при нагреве проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку при различных температурах T_{pre} : ◆ - $T_{pre}=370^\circ\text{C}$; ▲ - $T_{pre}=390^\circ\text{C}$; ■ - $T_{pre}=420^\circ\text{C}$; ● - $T_{pre}=470^\circ\text{C}$;

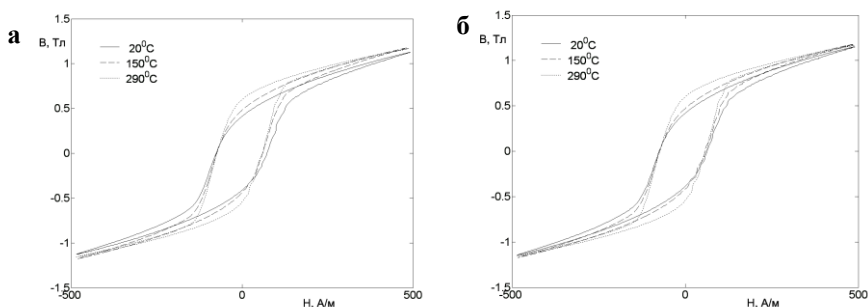


Рис. 12. Петли гистерезиса аморфных проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку при $T_{pre}=420^\circ\text{C}$. (а) - нагрев, (б) - охлаждение.

Величина β определяется отношением объемов ядра и приповерхностной области проволоки, а также уровнем внутренних напряжений в этих областях.

Эти параметры варьируются в зависимости от условий термоманитной обработки проволок.

Необработанные проволоки и проволоки, обработанные при $T_{pre} < 420^{\circ}\text{C}$, имеют петли гистерезиса (рис.12) характерные для образцов, в которых основным механизмом перестройки доменной структуры в области слабых магнитных полей является смещение доменных границ в ядре. В более сильных магнитных полях основным механизмом намагничивания становится поворот намагниченности в приповерхностной области проволок. Вместе с тем, из-за магнитоупругого взаимодействия ядра и приповерхностной области проволоки оба механизма перестройки доменной структуры взаимосвязаны. Взаимосвязь процессов перестройки доменной структуры ядра и приповерхностной области, а также высокий уровень внутренних напряжений приводит к тому, что полученные петли гистерезиса характеризуются относительно высокой коэрцитивной силой H_C и относительно низкой остаточной индукцией B_r .

При всех температурах термоманитной обработки с ростом T наблюдается рост B_r , что свидетельствует об увеличении объёма ядра проволоки. Рост объёма ядра приводит к увеличению энергии магнитоупругого взаимодействия с приповерхностной областью. Магнитоупругое взаимодействие наиболее эффективно влияет на полевые зависимости ΔE -эффекта при $H \approx H_C$. Чем выше H_C , тем в более сильных магнитных полях достигается максимальное абсолютное значение отрицательного ΔE -эффекта.

С ростом T_{pre} до $420^{\circ}\div 450^{\circ}\text{C}$ уровень внутренних напряжений в проволоках понижается. В результате уменьшается H_C , а также магнитное поле, при котором начинается эффективное взаимодействие ядра с приповерхностной областью проволоки. Как следствие, H_{max} уменьшается с ростом T_{pre} .

В заключение диссертации приводятся основные результаты и выводы работы, а также список цитируемой литературы (библиография).

Основные результаты

Установлено, что в лентах состава $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$ при температурах термоманитной обработки от 330°C до 410°C и последующего нагрева от 30°C до 300°C реализуется только положительный ΔE -эффект. В свою очередь, в лентах состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших термоманитную обработку в интервале температур от 250° до 350°C , при их нагреве до 210°C наблюдается отрицательный ΔE -эффект. Различия в ходе полевых зависимостей ΔE -эффекта аморфных металлических лент составов $\text{Fe}_{67}\text{Co}_{10}\text{Cr}_3\text{Si}_5\text{B}_{15}$ и $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ связаны с отсутствием выраженной наведенной одноосной анизотропии в образцах первого состава и с ее наличием в образцах второго состава.

В лентах $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ с ростом температуры нагрева обнаружено уменьшение абсолютного максимального значения отрицательного ΔE -эффекта и магнитного поля его достижения. Уменьшение поля наведённой одноосной анизотропии ленты состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ с ростом температуры нагрева в интервале от 30°C до 210°C можно считать линейным.

В аморфных проволоках состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших обработку постоянным электрическим током при одновременном действии растягивающих напряжений, рост плотности электрического тока обработки приводит к переходу от отрицательного ДЕ-эффекта к положительному. Фактором, влияющим на полевые зависимости ДЕ-эффекта в исследованных проволоках, является магнитоупругое взаимодействие их ядра и приповерхностной области. Изменения полевых зависимостей ДЕ-эффекта при варьировании температуры нагрева определяется температурными изменениями отношения энергии наведенной анизотропии к энергии упругих напряжений в приповерхностной области, возникающих при намагничивании ядра проволоки.

Обнаружено, что в проволоках состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку, наблюдается отрицательный ДЕ-эффект, поле достижения максимального абсолютного значения которого $H_{\max}$ определяется температурой обработки. Зависимость $H_{\max}$ от температуры нагрева T подчиняется соотношению $H_{\max} = AT^{-\beta}$, где A и β ($\beta=0,4\div0,7$) - параметры, зависящие от температуры термомагнитной обработки проволок. Влияние температуры нагрева проволок на полевые зависимости ДЕ-эффекта определяется изменением поля наведенной анизотропии за счет магнитоупругого взаимодействия ядра и приповерхностной области.

Список цитируемой литературы

1. Глезер А.М. Принципы создания многофункциональных конструкционных материалов нового поколения / А.М. Глезер // УФН. - 2012. - Т. 182. - № 5. - С. 559-566.
2. Улымжиева Э.Ц. Распределение намагниченности в пленке с винтовой анизотропией / Э.Ц. Улымжиева, А.Г. Прищепа // Сб. "ФМП" Красноярск - 1974. - С. 13-16.
3. Гаврилюк А.А. Магнитные и магнитоупругие свойства аморфных ферромагнитных сплавов, обработанных электрическим током / А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, А.Ю. Моховиков // ЖТФ. – 2006.- Т.76. - В.6. - С.64-71.
4. Hayashi N. The influence of magnetic field on the structure of domain walls in thin permalloy films / N Hayashi., E. Goto, K. Nishimoto // Jap. Journ. Appl. Phys. - 1968.-V.7. - P. 555 - 558.
5. Зубрицкий С.М. Процессы перестройки полосовой доменной структуры и модуль упругости в аморфных металлических пленках / С.М. Зубрицкий, А.Л. Петров // Физика металлов и металловедение. - 1995. - Т. 80. - В. 6. - С.47-52.
6. Wei - Hau Wu Demagnetization adjustment of the anisotropy of magnetic thin films / Wu Wei - Hau // IEEE Trans. Magn. – 1967. – V.3. – N.2 – P.171 -173.
7. Gavriluk A.A. The stability of the magnetic domains inside the core of amorphous metal wire / A.A. Gavriluk, A.Yu. Mokhovikov, A.V. Semirov, A.L. Semenov, N.V. Turik // Journal of Non-Crystalline Solids - 2008. - V. 354. - P. 5230-5232.
8. Буравихин В.А. Влияние механических напряжений на магнитные свойства пленок. / В.А. Буравихин // Иркутск. Восточно - Сибирское книжное издательство. 1968. 160 с.

Публикации по теме диссертации

Публикации в журналах из перечня ВАК РФ

1. Гаврилюк А.А. Возбуждение магнитоупругих колебаний в аморфных металлических лентах с одноосной наведенной анизотропией / А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, **Е.А. Голыгин**, Н.В. Морозова, А.В. Гаврилюк, З.Л. Ярычева, А.Р. Гафаров, А.Ю. Моховиков // Известия вузов. Физика. - 2012. - Т. 55.- № 6. -С. 62-68.
2. Гаврилюк А.А. Влияние температуры на ДЕ-эффект в аморфных металлических лентах состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ / А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, **Е.А. Голыгин**, А.А. Зинченко, А.Р.

Гафаров//ФММ-2013.-Т.114,В.4.-С.325-328.

3. Гаврилюк А.А. Влияние температуры на ΔE -эффект в аморфных металлических лентах $Fe_{67}Co_{10}Cr_3Si_5B_{15}$ / А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, А.В. Гаврилюк, **Е.А. Голыгин**, А.Р. Гафаров, М.Ю. Просекин, И.Г. Просекина, Б.В. Гаврилюк, Н.В. Морозова, А.Ю. Моховиков // Материаловедение. - 2013. - В. 3. - С.13-18.

4. Семенов А.Л. Влияние термоциклирования на динамические магнитные характеристики быстроокаленных лент $FeCoCrSiB$ и $FeCoB$ / А.Л. Семенов, А.А. Гаврилюк, **Е.А. Голыгин**, А.Р. Гафаров, Н.В. Морозова, Ю.В. Пузанков // Вестник БГУ. - 2013. - В. 3. - С. 119-123.

5. Семёнов А.Л. Влияние термоманитной обработки на температурную стабильность динамических магнитных характеристик аморфных металлических лент / А.Л. Семёнов, А.А. Гаврилюк, А.А. Гафаров, **Е.А. Голыгин**, А.Ю. Моховиков, Н.В. Морозова // Известия вузов. Чёрная металлургия - 2013. - № 12. - С. 65-67.

Патент

1. Гаврилюк А.А. Датчик температуры на аморфной металлической ленте / А.А. Гаврилюк, А.Л. Семёнов, А.Ю. Моховиков, **Е.А. Голыгин**, С.М. Зубрицкий // Патент РФ на полезную модель № 129634. - 2013.

Другие публикации

1. Ярычева З.Л. Пьезомагнитные свойства быстроокаленных ферромагнетиков / З.Л. Ярычева, **Е.А. Голыгин**, А.Л. Петров, А.А. Гаврилюк, С.М. Зубрицкий // Вестн. ИГУ. - Иркутск, 2008. - 447 С.

2. Петров А.Л. Деформационное намагничивание аморфных ферромагнитных лент на основе железа / А.Л. Петров, А.А. Гаврилюк, **Е.А. Голыгин**, С.Г. Федоров, З.Л. Ярычева, С.М. Зубрицкий // Вестн. ИГУ. - Иркутск, 2008. - С. 345-350.

3. **Голыгин Е.А.** Термостабильность ΔE -эффекта в аморфных металлических лентах на основе железа / **Е.А. Голыгин**, А.А. Гаврилюк, А.В. Гаврилюк, А.Л.Семенов, А.Ю.Моховиков, А.А.Зинченко, И.Л. Морозов, Н.В.Морозова, Б.В. Гаврилюк// Т. д. IV Байкальской международной конференции. Иркутск: Изд-во ИГПУ. - 2010. - 186 С.

4. Гаврилюк А.А. Термостабильность ΔE -эффекта в аморфных металлических лентах на основе железа / А.А. Гаврилюк, А.В. Гаврилюк, А.Л. Семенов, А.Ю. Моховиков, А.А. Зинченко, И.Л. Морозов, Н.В. Морозова, Б.В. Гаврилюк, А.Л. Петров, **Е.А. Голыгин** // Т.д. IV - Байкальской международной конференции «Магнитные Материалы. Новые технологии»: Иркутск. - Иркутск: Изд-во ГОУ ВПО «ВСГАО». 2010. - С. 174.

5. Семенов А.Л. Магнитные и магнитоупругие свойства аморфных металлических сплавов на основе железа /А.Л. Семенов, И.Л. Морозов, **Е.А. Голыгин**, Н.В. Морозова, А.Р. Гафаров, А.А. Зинченко, А.Ю. Моховиков, С.М. Зубрицкий, А. В. Пельменева, А.Ю. Корзун, А.А. Гаврилюк // Т.д. 9 международной конференция «Современные металлические материалы и технологии»: Санкт-Петербург, 2011.

6. Semenov A.L. Automatic setup for discovering the effect of the temperature on dynamic magnetic and magnetoelastic properties of amorphous ferromagnetic alloys / A.L. Semenov, I.L. Morozov, **E.A. Golygin**, N.V. Morozova, A.R. Gafarov, A.A. Zinchenko, A.Yu. Mokhovikov, S.M. Zubritsky, A.V. Pelmeneva, A.Yu. Korzun, A.A. Gavriliuk // Abstract. - International Conference «Functional Materials – 2011»: Crimea, Ukraine - P. 342-343.

7. Gavriliuk A. Influence of thermocycling on ΔE -effect in amorphous $Fe_{67}Co_{10}Cr_3Si_5B_{15}$ ribbons / A. Gavriliuk, A. Semenov, A. Mokhovikov, **E. Golygin**, A. Gafarov, N. Morozova, A. Zinchenko // Joint European Magnetic Symposia: Abstracts.– Parma, Italy. -2012. - P. - Fp-21.

8. Семенов А.Л. Динамические магнитные характеристики быстроокаленных лент $FeCoCrSiB$ и $FeCoB$, прошедших термоманитную обработку /А.Л. Семенов А.А. Гаврилюк, А.Р. Гафаров, И.Л. Морозов, Б.В.Гаврилюк, **Е.А. Голыгин**, А.Ю. Моховиков,

- С.М. Зубрицкий, Ю.В. Пузанков // V-International Baikal Conference «Magnetic Materials. New Technologies». – Иркутск.- 2012. - С.76-77.
9. Гаврилюк А.А. Влияние температуры на ΔE -эффект в аморфных металлических лентах на основе железа, прошедших термомагнитную обработку / А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, **Е.А. Голыгин**, А.Р. Гафаров, А.А. Зинченко, Б.В. Гаврилюк, Н.В. Морозова, А.Ю. Моховиков // V-International Baikal Conference «Magnetic Materials. New Technologies». Иркутск.-2012. - С.150-151.
10. **Голыгин Е.А.** Магнитоупругие свойства аморфных лент $Fe_{67}Co_{10}Cr_3Si_5B_{15}$ / **Е.А. Голыгин**, А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, А.Р.Гафаров, А.А. Зинченко // Сб. тр. XXII Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах», Астрахань НМММ-2012. с. 105-107.
11. Семенов А.Л. Влияние лазерной обработки на магнитоупругие свойства аморфных лент на основе железа / А.Л.Семенов, А.А. Гаврилюк, **Е.А. Голыгин**, Б.В. Гаврилюк, А.А. Зинченко // Сб. тр. XXII Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах», НМММ-2012. 2012 г. - Астрахань. - С. 97-100.
12. Семенов А.Л. Влияние термоциклирования на динамические магнитные характеристики наноструктурированных лент $FeCoCrSiB$ и $FeCoB$, прошедших термомагнитную обработку / А.Л. Семенов, А.А. Гаврилюк, А.Р. Гафаров, Н.В. Морозова, **Е.А. Голыгин**, А.Ю. Моховиков, Ю.В. Пузанков //Сб. тр. конф. «Наноматериалы и технологии». Улан-Удэ, 2012. - С. 144-149.
13. Гаврилюк А.А. Влияние температуры на ΔE -эффект в наноструктурированных металлических лентах состава $Fe_{67}Co_{10}Cr_3Si_5B_{15}$ / А.А.Гаврилюк, А.Л. Семенов, **Е.А.Голыгин**, Б.В.Гаврилюк, А.Р.Гафаров, И.Г.Просекина, А.А.Зинченко // Сб. тр. конф. «Наноматериалы и технологии». - Улан-Удэ, 2012,. - С. 186-191.
14. Гаврилюк А.А. Влияние температуры на ΔE -эффект в наноструктурированных металлических лентах состава $Fe_{67}Co_{10}Cr_3Si_5B_{15}$ // А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, **Е.А. Голыгин**, Б.В. Гаврилюк, А.Р. Гафаров, И.Г. Просекина, // Материалы Всероссийской молодежной школы «Актуальные проблемы физики» Таганрог. 2012, - С. 29 -34.
15. Gavriluk A.A. Influence of the temperature on the ΔE -effect of rapid-quenched $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ wires/ A.A. Gavriluk, **E.A. Golygin**, A.L. Semenov, A.Yu. Mokhovikov, A.R. Gafarov, N.V. Morozova // Abstract: DICNMA. - 2013. - San Sebastian. - Spain. –P.4A-13-6
16. Semenov A. Influence of the temperature on magnetoelastic parameters of rapid-quenched $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ wires / A. Semenov, **E. Golygin**, A. Gavriluk, A. Mokhovikov, A. Gafarov, N. Morozova // Abstract: V Euro-Asian Symposium Trends in MAGnetism:. - 2013.- Vladivostok. – Russia. – P.303-304.
17. Gavriluk A. Influence of the thermocycling on dynamic magnetic parameters of rapid-quenched $Fe_{81.5}B_{13.5}Si_3C_2$ ribbons / A. Gavriluk, **E. Golygin**, A. Mokhovikov, A. Gafarov, N. Morozova, A. Semenov // Abstract: V Euro-Asian Symposium Trends in MAGnetism: 2013. - Vladivostok. – Russia - P. 307-308.
18. Semenov A. Magnetic and magnetoelastic properties of amorphous $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ wires / A. Semenov, A. Gavriluk, A. Mokhovikov, A. Seredkin, **E. Golygin**, A. Gafarov, N. Morozova // JEMS-2013, Rhodes, Greece. Ref. Numb. 367.1367814949.