

На правах рукописи

Турик -

ТУРИК НАТАЛЬЯ ВИКТОРОВНА

ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ И МАГНИТОУПРУГИЕ СВОЙСТВА
АМОРФНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОЛОК СОСТАВА $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$
И ЛЕНТ СОСТАВА $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$

01.04.07 - физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск 2009

Работа выполнена на кафедре электроники твердого тела Иркутского государственного университета.

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Исхаков Рауф Садыкович
Институт физики СО РАН, г. Красноярск

кандидат физико-математических наук, доцент
Гафнер Александр Евгеньевич
Иркутский государственный педагогический
университет, г. Иркутск

Ведущая организация: Воронежский государственный технический
университет

Защита состоится 17 июня 2009 г. в 12 часов на заседании Диссертационного совета
Д 212.074.04 в Иркутском государственном университете по адресу: 665004,
г.Иркутск, бульвар Гагарина, 20

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Иркутского
государственного университета.

Автореферат разослан 10 апреля 2009 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д 212.074.04
к.ф.-м.н., доцент



Мангазеев Б.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Актуальным направлением исследований в областях физики магнитных явлений и физики конденсированного состояния является изучение структуры и свойств ферромагнитных аморфных металлических сплавов [1-8]. В этом аспекте одними из наиболее перспективных материалов, как с точки зрения практического использования, так и с точки зрения изучения особенностей структуры аморфного конденсированного состояния, являются аморфные металлические сплавы на основе железа в виде проволок и лент. Высокие значения намагниченности насыщения, константы магнитострикции и магнитной проницаемости, а также малые потери на перемагничивание, которыми обладают эти сплавы, позволяют использовать их в различных областях современной промышленности в качестве чувствительных элементов датчиков силы, деформации, температуры, магнитострикционных линий задержки звуковых сигналов, при создании генераторов звуковых и ультразвуковых колебаний и т.д. [1-5]. В таких устройствах аморфные металлические сплавы подвергаются воздействию различного рода деформаций, что приводит к изменению их магнитоупругих характеристик, в частности, величины ΔE -эффекта.

Большая часть магнитомягких материалов, в том числе и аморфные металлические проволоки и ленты на основе железа, используется для работы в переменных магнитных полях низкой частоты (0,1-10кГц). Поскольку по магнитным характеристикам материалов, определенным в постоянных магнитных полях, нельзя полностью рассчитать их параметры в переменных магнитных полях, понятна важность их исследования непосредственно в условиях, близких к условиям работы материалов в реальных устройствах.

Отсутствие комплексного исследования динамических магнитных и магнитоупругих свойств аморфных металлических сплавов на основе железа не позволяет в полной мере реализовать их практическое применение. В связи с этим остается открытым вопрос о влиянии упругих растягивающих напряжений и различных видов предварительной обработки на динамические магнитные характеристики и величину ΔE -эффекта аморфных проволок и лент на основе железа, в частности, проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ и лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$.

Изучение этих вопросов вызывает интерес также и с фундаментальной точки зрения, в связи с недостаточно полно разработанными представлениями о магнитной доменной структуре аморфных металлических лент и проволок и процессах ее перестройки под действием переменного магнитного поля и упругих растягивающих напряжений.

Цели и задачи исследования. Диссертационная работа посвящена изучению динамических магнитных и магнитоупругих свойств аморфных металлических проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ и лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ и изменений этих свойств под действием упругих растягивающих напряжений. На основании проведенных исследований необходимо было разработать представления о взаимосвязи процессов перестройки доменной структуры данных проволок и лент под действием

переменного магнитного поля и растягивающих напряжений с их динамическими магнитными и магнитоупругими характеристиками. **Основными задачами** проводимых исследований являлось:

- Исследование динамических магнитных свойств аморфных металлических проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших предварительную обработку постоянным электрическим током различной плотности на воздухе, а также лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку в вакууме при разных температурах, в диапазоне частот перемагничивающего поля 0,1 – 10 кГц.
- Изучение влияния упругих растягивающих напряжений на основные динамические магнитные характеристики (коэрцитивную силу H_c , остаточную магнитную индукцию B_r , дифференциальную магнитную проницаемость μ_d , энергию потерь на перемагничивание W) исследуемых проволок и лент, и на механизмы их перемагничивания в интервале частот 0,1 – 10 кГц.
- Развитие модельных представлений об особенностях доменной структуры аморфных металлических проволок и механизмах её перестройки под действием внешнего магнитного поля.
- Изучение влияния упругих растягивающих напряжений на величину ΔE -эффекта в аморфных металлических лентах состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших как термомагнитную обработку, так и обработку постоянным электрическим током.

Объект исследования. Аморфные ферромагнитные проволоки состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, полученные методом вытягивания из расплава, а также ленты состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, полученные быстрой закалкой из расплава в ЦНИИ ЧЕРМЕТ им. Л.П. Бардина. Величина константы магнитострикции составляла $\lambda_s \approx (25-30) \times 10^{-6}$, а индукция насыщения - $B_s \approx 1,5$ Тл. Выбор аморфных металлических сплавов указанных составов в качестве исследуемых объектов был обусловлен высокими значениями их магнитных и магнитоупругих параметров, а также поставленными задачами. В ряде случаев для проверки предложенных в работе моделей исследовались динамические магнитные характеристики низкострикционных ($\lambda_s \sim 10^{-7}$) аморфных металлических проволок составов $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ и $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$.

Для снятия внутренних закалочных напряжений и наведения циркулярной анизотропии, образцы проволок диаметром 135-140 мкм и длиной – 5 см перед проведением измерений проходили предварительную обработку постоянным электрическим током, протекающим вдоль длины проволоки, плотность которого варьировалась $J=0 \div 6 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$, при одновременном приложении упругих растягивающих напряжений 130 МПа (для увеличения эффекта наведения анизотропии). Обработка током производилась на воздухе в течение 2 минут.

Образцы лент в виде узких полосок длиной 5 см, шириной 1 – 1,1 мм и толщиной 25 мкм перед проведением измерений подвергались двум видам предварительной обработки:

1. Термомагнитная обработка в вакууме $\sim 10^{-3}$ Па в интервале температур $T=290\div 380^{\circ}\text{C}$ в течение 20 минут с последующим медленным остыванием в печи. Прикладываемое магнитное поле при обработке было ориентировано в плоскости полосок перпендикулярно их длинной стороне и составляло 40 кА/м.

2. Обработка постоянным электрическим током, протекающим вдоль длины полосок, плотностью от $J = 2,7 \times 10^7$ А/м² до $J = 5 \times 10^7$ А/м² на воздухе в течении 2 минут.

Целью проведения предварительных обработок полосок также являлось снятие в них внутренних закалочных напряжений и наведения одноосной анизотропии с осью легкого намагничивания перпендикулярной длине образца.

Научная новизна представленных в диссертации результатов заключается в следующем:

- Впервые исследовано влияние упругих растягивающих напряжений на динамические магнитные свойства аморфных металлических проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших обработку постоянным электрическим током различной плотности. Показано, что на зависимостях магнитной проницаемости и остаточной индукции от величины упругих растягивающих напряжений у аморфных металлических проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших предварительную обработку постоянным электрическим током в интервале плотностей до $6 \cdot 10^7$ А/м² можно выделить два характерных участка. Установлено влияние частоты переменного магнитного поля на ход зависимостей динамических магнитных характеристик от величины упругих растягивающих напряжений.
- Впервые проведена оценка размеров и энергии доменов, реализация которых возможна в ядре аморфной металлической проволоки. Определено влияние величины внешнего магнитного поля, коэрцитивной силы и длины рассматриваемого домена на величину его радиуса. Показано, что наибольшей устойчивостью к внешнему магнитному полю и наименьшей энергией обладает домен, состоящий из цилиндрической части и двух конусообразных доменных верхушек и домен с зигзагообразными доменными верхушками. Исследованы механизмы распространения доменной верхушки, разделяющей противоположно намагниченные домены в ядре аморфной ферромагнитной проволоки под действием внешнего магнитного поля. Установлено, что характер движения верхушки домена в ядре проволоки зависит от взаимной ориентации внешнего магнитного поля и намагниченности домена. Показано, что исследуемые проволоки обладают свойствами магнитного диода.
- Исследовано влияние упругих растягивающих напряжений на величину ΔE -эффекта аморфных ферромагнитных лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку и обработку постоянным электрическим током. Показано, что независимо от характера обработки исследованных лент при приложении к ним относительно малых растягивающих напряжений максимальное абсолютное значение

отрицательного ΔE -эффекта возрастает. Установлено, что наибольшая чувствительность ΔE -эффекта к воздействию постоянных растягивающих напряжений наблюдается у образцов, прошедших термомагнитную обработку.

- Обнаружено наличие двух характерных участков на зависимостях динамических магнитных параметров лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ от значения действующих растягивающих напряжений. Установлено влияние частоты перемагничивающего поля на динамические магнитные характеристики (дифференциальную магнитную проницаемость, остаточную индукцию, коэрцитивную силу и плотность энергии потерь на перемагничивание) исследованных лент.

Научная и практическая ценность. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы при разработке и конструировании устройств современной электроники, высокотехнологичных и прецизионных датчиков, в которых в качестве чувствительных элементов используются магнитоотрицательные аморфные металлические ленты и проволоки на основе железа. Проведенные в диссертации исследования определяют режимы обработки таких лент и проволок для достижения у них оптимальных с практической точки зрения магнитных и магнитоупругих характеристик.

Определена энергетически выгодная конфигурация и форма магнитных доменов в ядре проволоки, обладающих максимальной устойчивостью к внешнему магнитному полю. Развита модельная картина, позволяющая оценить энергию магнитного домена в ядре аморфной металлической проволоки.

Результаты проведенных исследований способствуют развитию представлений о взаимосвязи процессов перестройки доменной структуры магнитоотрицательных аморфных металлических лент и проволок с их динамическими магнитными и магнитоупругими свойствами.

Защищаемые положения.

1. Изменения поля максимума дифференциальной магнитной проницаемости под действием растягивающих напряжений у аморфных металлических проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ увеличиваются с ростом частоты перемагничивающего поля. Такое влияние частоты объясняется увеличением поверхностной плотности энергии доменных границ и уменьшением амплитудной дисперсии анизотропии в проволоках с ростом растягивающих напряжений.
2. Магнитный домен в ядре аморфной металлической проволоки, состоящий из цилиндрической части и двух конусообразных верхушек, обладает наименьшей энергией и минимальными устойчивыми к внешнему магнитному полю размерами. При этом, величина магнитного поля смещения доменной границы в ядре аморфной металлической проволоки определяется взаимной ориентацией внешнего магнитного поля и намагниченности в домене.

3. Максимальные изменения дифференциальной магнитной проницаемости термомагнитнообработанных лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ достигаются в области частот 100 - 1000 Гц перемагничивающего поля, что связывается с переориентацией оси легкого намагничивания под действием растягивающих напряжений величиной 20 - 40 МПа и изменением основного механизма перемагничивания лент.
4. Влияние упругих растягивающих напряжений на ход полевых зависимостей ΔE -эффекта аморфных металлических лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших как термомагнитную обработку, так и обработку постоянным электрическим током, выражается в изменении максимального абсолютного значения отрицательного ΔE -эффекта и величины магнитного поля, при котором этот максимум достигается.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научно-технической конференции "Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии" (г. Екатеринбург, УГТУ, 2000г.); Седьмой всероссийской конференции: "Аморфные прецизионные сплавы: технологии- свойства- применение" (г. Москва, ЦНИИ ЧЕРМЕТ им. Л. П. Бардина, 2000г.); Международной конференции «Физическая мезомеханика, компьютерное конструирование и разработка новых материалов» (г. Томск, ИФПМ СО РАН, 2006г.); II-ой Всероссийской конференции "Безопасность и живучесть технических систем" (г. Красноярск, ИВТ СО РАН, 2007г.); XV-ой Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов "Физика конденсированного состояния" (г. Гродно, ГГУ, 2007г.); VII-ой Международной конференции «Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов», (г. Воронеж, ВГТУ, 2007г.); 13-ой Международной конференции по жидким и аморфным металлам LAM13 (г. Екатеринбург, УГПУ, 2007г.); International conference "Functional Materials" ICFM'2007, Crimea, 2007г.; XI-ой конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов (г. Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, 2007г.); Всероссийской научно-практической конференции «Научный поиск: парадигмы, проекции, практики» (гг. Братск-Иркутск, ИГУ, 2007г.); 5-ой Международной научной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование» (Республика Казахстан, г. Алматы, КазНУ, 2007г.); 3-й Байкальской международной научной конференции "Магнитные материалы. Новые технологии" (г. Иркутск, ИГПУ, 2008г.); Moscow International Symposium on Magnetism (г. Москва, МГУ, 2008г.); 9th International Workshop on Non-Crystalline Solids (Porto, Portugal, 2008г.); V-ом Международном семинаре «Физико-математическое моделирование систем» (ФММС-5) (г. Воронеж, ВГТУ, 2008г.); Joint European Magnetic Symposia (Dublin, Ireland, 2008г.); XI-ой Международной школе-семинаре по люминесценции и лазерной физике (г. Иркутск, ИФ ИЛФ СО РАН, 2008г.).

Публикации. По теме диссертации опубликована 31 работа, из которых 5 работ опубликовано в журналах из перечня ВАК РФ.

Личный вклад автора. Автор работы принимал непосредственное участие в постановке задач по теме исследований, создании установки для измерения динамических магнитных характеристик индукционным методом. Все экспериментальные результаты, представленные в работе, получены лично автором. Автор принимал участие в теоретической интерпретации полученных результатов, разработке модельных представлений, а также в написании и редактировании научных публикаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения и списка литературы из 182 наименований. Диссертация изложена на 163 печатных страницах, содержит 50 рисунков и 1 таблицу.

Краткое содержание работы

Во **введении** дано обоснование актуальности выбранной темы исследований. Сформулированы цели и задачи исследования, приведены защищаемые положения, показаны новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложено содержание работы.

В **1-й главе** проведен аналитический обзор работ по исследованию динамических магнитных и магнитоупругих свойств аморфных металлических проволок и лент на основе железа. Особое место в данной главе уделено механизмам удельных магнитных потерь в аморфных сплавах [2,3,6,10], а также методам улучшения их динамических магнитных характеристик путем различных видов предварительной обработки. Рассматривается модель однодородного вращения намагниченности в аморфных металлических лентах с наведенной одноосной анизотропией, а также условия возникновения отрицательного ΔE -эффекта [11-13]. Описывается доменная структура аморфных металлических проволок на основе железа и закономерности процесса ее перестройки под действием внешнего магнитного поля [14-17]. Также рассматриваются модельные представления, развитые ранее для плоских магнитных доменов в низкокоэрцитивных каналах тонких магнитных пленок, для последующей их адаптации к аморфным проволокам [18-20]. На основе изложенной информации поставлены задачи исследования.

Во **2-й главе** приведены сведения об исследуемых образцах аморфных металлических сплавов и описание установок по определению их динамических магнитных характеристик индукционным методом, а также измерению ΔE -эффекта методом резонанса-антирезонанса [9]. Оцениваются погрешности измерений магнитных и магнитоупругих характеристик аморфных металлических сплавов описанными методами.

Глава 3 посвящена экспериментальному исследованию динамических магнитных свойств аморфных металлических проволок состава $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ и изменений этих свойств под действием упругих растягивающих напряжений, а также развитию модельных представлений о доменной структуре аморфных проволок и процессах ее перестройки под действием внешнего магнитного поля.

В §3.1. изучено влияние упругих растягивающих напряжений, величина которых изменялась в интервале $\sigma=0\div 130$ МПа, ориентированных вдоль длины аморфных металлических проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, обработанных постоянным электрическим током, на их динамические магнитные свойства в диапазоне частот перемещающегося поля $f=0,1\div 10$ кГц.

Результаты исследований показали:

На зависимостях магнитной проницаемости μ_d и остаточной индукции B_r от σ у аморфных металлических проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$, прошедших предварительную обработку электрическим током в интервале плотностей $0 < J < 6 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ можно выделить два характерных участка (рис.1). Первый участок соответствует области относительно малых значений $\sigma < 40$ МПа. На этом участке наблюдаются наиболее значительный рост μ_d и B_r , что связывается с переориентацией намагниченности приповерхностной области проволоки вдоль длины образца и увеличением объема проволоки, перемещающейся путем смещения доменных границ. В области значений $\sigma > 40$ МПа изменения магнитной проницаемости и остаточной индукции менее значительны. Это объясняется тем, что основной вклад в изменение намагниченности проволоки дает перемещение ее приповерхностной области, объем которой значительно уступает объему ее ядра.

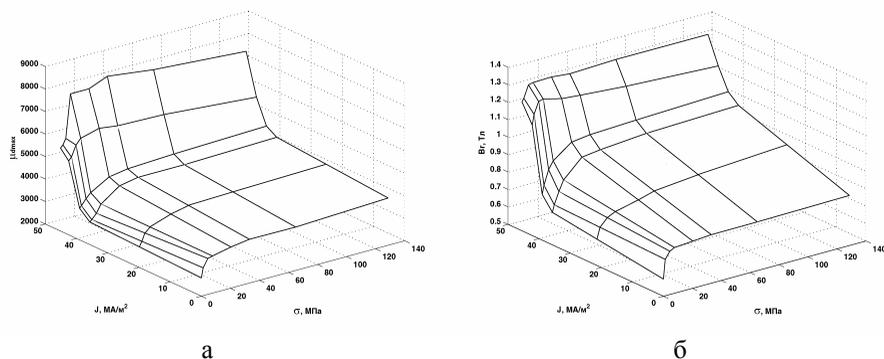


Рис.1. Зависимости максимального значения дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{d\max}$ (а) при частоте перемещающегося поля $f=10$ кГц и остаточной индукции B_r (б) при $f=5$ кГц от плотности тока обработки J проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ и растягивающих напряжений σ .

Поле максимума дифференциальной магнитной проницаемости $H_{\mu_{d\max}}$ (т.е. максимум $\mu_d(H)$) с ростом σ сдвигается сначала в область меньших магнитных полей, что наблюдается при значениях $\sigma < 10-20$ МПа. При дальнейшем увеличении $\sigma > 10-20$ МПа поле $H_{\mu_{d\max}}$ (соответственно максимум $\mu_d(H)$) сдвигается в область больших магнитных полей H при всех частотах перемещающегося поля (рис.2а). Уменьшение поля $H_{\mu_{d\max}}$ максимума дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_d(H)$ при приложении относительно малых значений σ может быть обусловлено уменьшением амплитудной дисперсии анизотропии образца, а увеличение поля максимума $\mu_d(H)$ при приложении относительно высоких значений σ - ростом

поверхностной плотности энергии доменных границ в ядре проволоки. При этом незначительный рост величины коэрцитивной силы при увеличении растягивающих напряжений (рис.2б) объясняется конкуренцией двух рассмотренных факторов (уменьшением амплитудной дисперсии анизотропии в ядре проволоки под действием упругих растягивающих напряжений (в области относительно малых значений σ), а с другой стороны - с увеличением поверхностной плотности энергии доменных границ (в области относительно высоких значений σ). Первое обстоятельство приводит к уменьшению времени релаксации и поля смещения доменной границы, а второе обстоятельство - к их увеличению.

При повышении частоты f перемagnичивающего поля, изменения поля $H_{\mu d \max}$ максимума дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_d(H)$ под действием σ возрастают (рис.2а). Такое влияние частоты f перемagnичивающего поля на величину $H_{\mu d \max}$ также связывается с одной стороны с уменьшением амплитудной дисперсии анизотропии в ядре проволоки под действием упругих растягивающих напряжений (в области относительно малых значений σ), а с другой стороны - с увеличением поверхностной плотности энергии доменных границ (в области относительно высоких значений σ). Первое обстоятельство приводит к уменьшению времени релаксации и поля смещения доменной границы, а второе обстоятельство - к их увеличению.

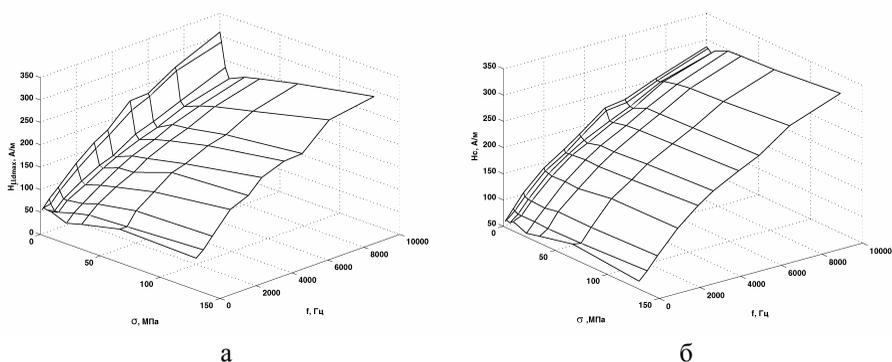


Рис.2. Зависимости поля максимума дифференциальной магнитной проницаемости $H_{\mu d \max}$ (а) и коэрцитивной силы H_c (б) от частоты перемagnичивающего поля f и прикладываемых растягивающих напряжений σ проволоки состава $Fe_{75}Si_{10}V_{15}$, прошедшей обработку постоянным электрическим током плотностью $J=3,57 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$.

Исследуемые динамические магнитные свойства (величины коэрцитивной силы, остаточной индукции и магнитной проницаемости) аморфных металлических проволок на основе железа определяются, прежде всего, магнитной доменной структурой ядра проволоки. Так как визуальное наблюдение доменной структуры в ядре проволоки крайне затруднительно необходимо развитие модельных представлений, позволяющих оценить в первом приближении, как размеры, так и энергию доменов в ядре проволоки.

В §3.2. проведена оценка размеров и энергии доменов, реализация которых возможна в ядре аморфной металлической проволоки. Установлено влияние величины внешнего магнитного поля, коэрцитивной силы и длины рассматриваемого домена на величину его радиуса. Определена наиболее

энергетически выгодная форма домена в ядре аморфной металлической проволоки, обладающего наибольшей устойчивостью к внешнему магнитному полю.

Устойчивым в ядре проволоки домен является тогда, когда при приложении внешнего магнитного поля H меньше некоторого критического значения H_{cr} его размеры и форма остаются неизменными. Для определения условий существования устойчивого домена в ядре проволоки необходимо учитывать его энергетическое состояние, оценить которое можно, если условно выделить две энергетические составляющие: магнитную W_{magn} и диссипативную W_{dissip} .

$$W = W_{magn} + W_{dissip} \quad (1)$$

Магнитная составляющая энергии домена будет определять полную энергию магнитной системы - домен в ядре аморфной металлической проволоки:

$$W_{magn} = W_{\gamma} + W_m + W_H, \quad (2)$$

где W_m - собственная магнитостатическая энергия домена, W_{γ} - энергия доменных границ, W_H - энергия намагниченности домена во внешнем магнитном поле.

Диссипативная составляющая энергии домена, возникающая при движении границ домена, связана с затратами энергии на его перемагничивание. Как следствие этого, диссипативная составляющая препятствует любому изменению размеров домена.

$$W_{dissip} = W_{HC} + W_t, \quad (3)$$

где W_{HC} - энергия, затрачиваемая на перемагничивание домена, W_t - энергия, затрачиваемая на перемагничивание переходной области, разделяющей ядро и приповерхностную область.

При этом условии устойчивого состояния домена можно записать в виде:

$$\Delta W_{magn} \leq \Delta W_{dissip}. \quad (4)$$

Знак равенства в выражении соответствует пределу устойчивости домена в ядре проволоки [20].

Рассматривались условия устойчивости к внешнему магнитному полю для доменов, имеющих различные формы (рис.3). Энергетически выгодный размер домена находили из условия:

$$\partial W / \partial r = 0,$$

где r - радиус домена.

Расчеты показали, что:

Все рассмотренные модели домена в ядре проволоки позволяют получить устойчивый домен радиусом несколько десятков микрон, что хорошо согласуется с известными экспериментальными результатами. Вместе с тем, для реализации доменов, состоящих только из двух конусообразных верхушек или в виде эллипсоида вращения с доменными границами близкими к 180° -ным необходимы высокие значения коэрцитивной силы доменных границ H_C^w (несколько десятков и даже сотен А/м). Для реализации устойчивых доменов в виде цилиндра без доменных верхушек, в виде цилиндра с двумя конусообразными доменными верхушками и домена с несколькими зигзагообразными верхушками необходимое значение коэрцитивной силы не превышает 10 А/м (таблица 1, рис.4).

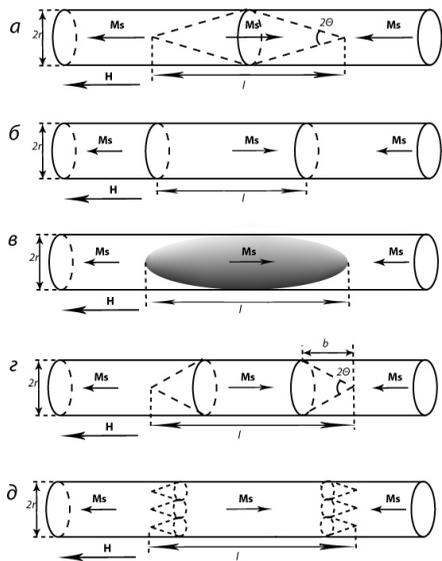


Рис.3. Рассматриваемые формы домена в ядре аморфной металлической проволоки.

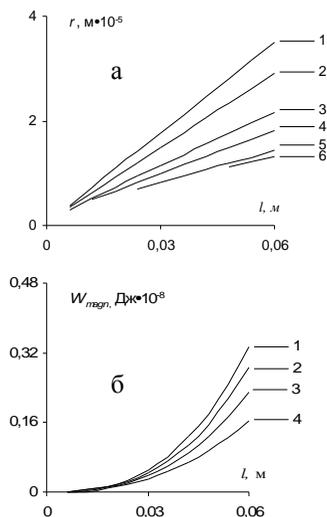


Рис.4. Зависимости (а) радиуса r и (б) энергии $W_{\text{магн}}$ домена, состоящего из цилиндрической части и двух конусообразных верхушек, от его длины l при величине $H_C^w = 10$ А/м и различных значениях магнитного поля H , противоположного направлению намагниченности домена в ядре проволоки: 1 - $H=3$ А/м, 2 - $H=5$ А/м, 3 - $H=7$ А/м, 4 - $H=9$ А/м, 5 - $H=9,5$ А/м, 6 - $H=9,9$ А/м.

Таблица 1.

Форма домена в ядре аморфной металлической проволоки	Длина домена l , м	Радиус домена r , мкм	Коэрцитивная сила смещения доменных границ H_C^w , А/м	Энергия домена, Дж
а. Домен, состоящий только из двух конусообразных верхушек	0,006-0,06	До 100	210 (>80-120)	От $1 \cdot 10^{-9}$ (при $l=0,012$ м и $H=80$ А/м) до $1,2 \cdot 10^{-7}$ (для $l=0,06$ м и $H=10$ А/м)
б. Домен в виде цилиндра	0,06-0,012	До 40	10	От $2,8 \cdot 10^{-10}$ до $2,0 \cdot 10^{-8}$
в. Домен в виде сильно вытянутого вдоль длины проволоки эллипсоида вращения	0,02-0,06	До 70	140	От $1,14 \cdot 10^{-8}$ до $25 \cdot 10^{-8}$ (для $\gamma_0=0,002$ Дж/м ² $H=20$ А/м, $l=0,024$ м) и от $0,05 \cdot 10^{-8}$ до $18 \cdot 10^{-8}$ (для $\gamma_0=0,0005$ Дж/м ² $H=20$ А/м, $l=0,024$ м)
г. Домен, состоящий из цилиндрической части и двух конусообразных верхушек	0,006-0,06	До 40	10	От $8,8 \cdot 10^{-12}$ (для $l=0,006$ м и $H=9$ А/м) до $3,3 \cdot 10^{-9}$ (для $l=0,06$ м и $H=2$ А/м)
д. Домен с зигзагообразными доменными верхушками	0,006-0,06	До 40	10	$\sim 10^{-12} - 10^{-9}$

С увеличением магнитного поля, ориентированного противоположно намагниченности рассматриваемого домена, минимальная длина домена, при котором он является устойчивым, возрастает (рис.4а). В свою очередь, рост величины магнитного поля, ориентированного параллельно намагниченности рассматриваемого домена, приводит к уменьшению минимальной длины устойчивого домена.

Наиболее энергетически выгодными доменными конфигурациями, реализация которых возможна в ядре аморфной металлической проволоки, оказываются домен, состоящий из цилиндрической части и двух конусообразных верхушек, а также домен, имеющий несколько зигзагообразных доменных верхушек. Приблизительный интервал изменения энергий таких доменов в зависимости от их размеров и величин действующих магнитных полей составляет $10^{-12} - 10^{-9}$ Дж (таблица 1). Для увеличения точности оценок энергии доменов в ядре аморфной металлической проволоки необходим более точный учет их собственной магнитостатической энергии.

Так как наименьшей расчетной энергией обладает домен, состоящий из цилиндрической части и двух конусообразных верхушек, то в дальнейшем, при рассмотрении механизмов перестройки доменной структуры, будем считать, что в ядре проволоки домен имеет именно такую конфигурацию.

В §3.3. исследованы механизмы распространения доменной верхушки, разделяющей противоположно намагниченные домены в ядре аморфной ферромагнитной проволоки, под действием внешнего магнитного поля. Определены равновесные параметры домена в ядре проволоки.

Рассматривалась магнитная структура ядра аморфной проволоки представленная на рисунке 5. При этом не учитывались факторы, связанные с магнитостатическим взаимодействием между собой доменных границ разделяющих противоположно намагниченные домены. Считалось, что верхушка, разделяющая участки с противоположной намагниченностью в ядре проволоки, имеет конусообразную форму. Доменные границы, образующие верхушки доменов являются заряженными [18-20]. Энергию, связанную с заряженными доменными границами, W_γ можно записать в виде:

$$W_\gamma = 2\pi r^2 (\gamma_0 + \omega \sin^2 \theta) / \sin \theta, \quad (5)$$

где γ_0 - поверхностная плотность энергии 180° -ных доменных границ, ω - коэффициент, зависящий от магнитных характеристик материала, 2θ - угол при доменной верхушке, r - радиус домена. Из условия $dW_\gamma/d\theta = 0$ находилось равновесное значение угла θ_0 при $H=0$.

$$\theta_0 = \arcsin(\gamma_0/\omega)^{1/2}. \quad (6)$$

Длина верхушки домена b_0 в отсутствие магнитного поля определялась как

$$b_0 = r \cdot \sqrt{\frac{\omega}{\gamma_0} - 1}. \quad (7)$$

Проведенные расчеты показали, что величина угла при доменной верхушке 2θ при значениях параметров, характерных для магнитомягких материалов ($\gamma_0 = 0,001 \div 0,003$ Дж/м² и $\omega = 0,02 \div 0,03$ Дж/м²) в отсутствие H составляет $20-30^\circ$. При этом значение b_0 не превышало $(2 \div 3) \cdot 10^{-4}$ м. Таким образом, в достаточно длинных

проволоках длина верхушки домена крайне незначительна по сравнению с длиной самого домена.

Величина радиуса домена в ядре проволоки r при заданных значениях длины домена и длины его верхушки, уменьшалась с ростом H . Наиболее близкие к экспериментально наблюдаемым значениям радиуса домена в ядре проволоки в отсутствие H достигались при малых значениях толщины t и константы анизотропии K переходной области.

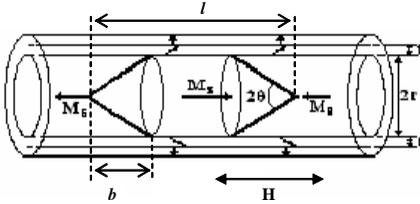


Рис.5. Рассматриваемая магнитная доменная структура ядра проволоки.

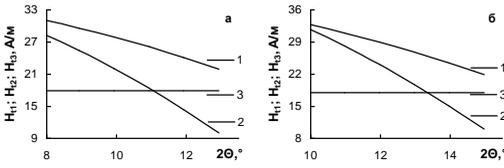


Рис.6. Зависимости величины полей смещения доменной верхушки от ее угла 2θ , при различном значении поверхностной плотности энергии доменных границ γ_0 , образующих верхушку: а- $\gamma_0=0,005$ Дж/м², б- $\gamma_0=0,001$ Дж/м²; $\omega=0,002$ Дж/м³; Зависимость 1 - $H_{12}(2\theta)$, 2 - $H_{13}(2\theta)$, 3 - $H_{11}(2\theta)$.

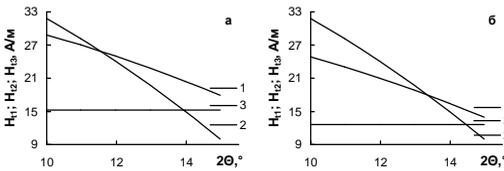


Рис.7. Зависимости величины поля смещения доменной верхушки от ее угла 2θ , при различном значении константы анизотропии K в переходной области проволоки: а - $K=400$ Дж/м³, б - $K=200$ Дж/м³; $t=2 \cdot 10^{-6}$ м; Зависимость 1 - $H_{12}(2\theta)$, 2 - $H_{13}(2\theta)$, 3 - $H_{11}(2\theta)$.

Проведена оценка полей смещения доменной верхушки в ядре проволоки для случая, когда уменьшение размеров домена происходит за счет параллельного смещения доменной верхушки. Выражение, описывающее связь энергии с геометрическими и магнитными параметрами домена, имеет вид:

$$W=2\pi r^2(\gamma_0+\omega \sin^2\theta)/\sin\theta+2\mu_0 M_S \pi r^2(H-H_C^w)(l-4r/3t\theta)-0,5K\pi((r+t)^2-r^2)(l-2r/t\theta), \quad (8)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, M_S – намагниченность насыщения, l – длина домена, H_C^w – коэрцитивная сила доменной верхушки.

Из условий $dW/dl=0$ и $\theta, r=\text{const}$ установлена величина магнитного поля H_{11} , при котором начинается уменьшение размеров домена с намагниченностью противоположной направлению H .

$$H_{11} \approx H_C^w + (Kt/2\mu_0 M_S r). \quad (9)$$

Величина H_{11} будет одинакова как при уменьшении домена (намагниченность в домене ориентирована противоположно H), так и при его увеличении (намагниченность в домене ориентирована вдоль H). Следовательно, если

механизмом изменения размеров домена под действием H является параллельное смещение доменной верхушки, то петля гистерезиса, получаемая при перемагничивании проволоки, не будет смещена относительно оси магнитной индукции (намагниченности) образца.

Для случая уменьшения размера домена, намагниченность в котором ориентирована противоположно направлению H путем изменения угла при его верхушках, функциональное выражение для энергии, по-прежнему, записывается в виде (8). При этом на первоначальном этапе изменения размеров домена его длина l не изменяется.

Из условия $dW/d\theta=0$, при $l, r=\text{const}$ получено следующее выражение для поля изменения угла при верхушке домена H_{12} :

$$H_{12}=H_C^w+3(\gamma_0+Kt-\omega\sin^2\theta)/4\mu_0M_Sr. \quad (10)$$

Величина H_{12} (рис.6,7) при выбранных значениях магнитных параметров ($M_S\approx 1,5\cdot 10^6\text{ A/m}^2$, $r=(3\div 5)\cdot 10^{-5}\text{ м}$, $t=(1\div 2)\cdot 10^{-6}\text{ м}$, $K=(200\div 400)\text{ Дж/м}^3$, $H_C^w=10\text{ A/m}$, $\gamma_0=(0,0005\div 0,001)\text{ Дж/м}^2$, $\omega=(0,01\div 0,03)\text{ Дж/м}^2$) возрастает с уменьшением значения 2θ . Отметим, что максимальное (при фиксированных значениях магнитных параметров наиболее энергетически выгодное) значение угла при верхушке доменов составляет $2\theta_0$. При всех выбранных значениях магнитных параметров выполняется соотношение $H_{12}>H_{11}$, поэтому механизм параллельного смещения доменной границы при уменьшении домена является предпочтительным.

При изменении направления магнитного поля H на противоположное, намагниченность в домене совпадает с направлением H . Величина поля смещения доменной границы H_{11} в случае, если размеры домена увеличиваются за счет смещения доменной верхушки параллельно самой себе, представляется в виде (9). Если рост домена под действием H осуществляется за счет вытягивания доменной верхушки и уменьшения ее угла, то функциональное выражение для энергии доменной структуры можно записать в виде:

$$W\approx -2\mu_0M_S(H-H_C^w)\pi r^2(2r/3\text{tg}\theta)+2\pi r^2(\gamma_0+\omega\sin^2\theta)/\sin\theta. \quad (11)$$

Из условия $dW/d\theta=0$ найдем выражение для поля смещения доменной верхушки H_{13} за счет уменьшения угла 2θ :

$$H_{13}=H_C^w+3(\gamma_0-\omega\sin^2\theta)/2\mu_0M_Sr. \quad (12)$$

Как показывают расчеты, при величине угла $2\theta\approx 2\theta_0$ $H_{13}<H_{11}$ (рис.6,7) при всех выбранных значениях магнитных параметров. В связи с этим основным механизмом увеличения размеров домена в магнитном поле, параллельном его намагниченности, будет являться уменьшение угла при верхушке домена.

Следовательно, механизмы перестройки доменной структуры в ядре проволоки зависят от ориентации магнитного поля относительно намагниченности в домене. В длинных проволоках при $r\ll l$, такое различие может приводить к возникновению смещенной относительно оси магнитной индукции петли гистерезиса. Такое смещение тем значительнее, чем больше толщина переходного слоя t , и чем выше значение константы анизотропии K этого слоя. Так как величина θ_0 определяется отношением γ_0/ω , то с увеличением этого отношения разность $H_{11}-H_{13}$ возрастает. Это должно приводить к увеличению смещения петли гистерезиса относительно оси магнитной индукции образца.

В таблице 2 приведены результаты измерений поля смещения динамической петли гистерезиса H_d относительно оси магнитной индукции аморфных проволок различных составов в зависимости от частоты f перемагничивающего поля, ориентированного вдоль длины проволок.

Таблица 2. Зависимости поля смещения петли гистерезиса H_d относительно оси магнитной индукции аморфных проволок различных составов от частоты f перемагничивающего поля.

Частота f	100 Гц	1000 Гц	2000 Гц	5000 Гц	10000 Гц
Состав	H_d , А/м				
Fe ₇₅ Si ₁₀ B ₁₅	2,2	2,7	2,2	1,2	1,2
Co ₆₆ Fe ₄ Nb _{2,5} Si _{12,5} B ₁₅	3,3	3,1	3,1	2,4	1,7
Co ₆₆ Fe ₄ Ta _{2,5} Si _{12,5} B ₁₅	1,4	1,3	1,2	0,7	0,7

Как следует из приведенных данных, для проволок всех исследованных составов наблюдается некоторое смещение петли гистерезиса относительно оси магнитной индукции. Величина H_d уменьшается с увеличением частоты перемагничивающего поля. При этом диапазон изменений H_d не превышает 4 А/м, что хорошо согласуется с результатами проведенных расчетов.

Полученные результаты свидетельствуют, о том, что механизм перестройки магнитной структуры ядра аморфных ферромагнитных проволок зависит от ориентации магнитного поля. Таким образом, аморфные ферромагнитные проволоки на основе переходных металлов в области слабых магнитных полей обладают свойствами магнитного диода.

Глава 4 посвящена экспериментальному исследованию влияния упругих растягивающих напряжений на динамические магнитные и магнитоупругие свойства аморфных металлических лент состава Fe₆₄Co₂₁B₁₅.

В §4.1. приведены результаты по исследованию влияния упругих растягивающих напряжений σ , величина которых изменялась в интервале $\sigma=0\div 100$ МПа, ориентированных вдоль длины образцов термомагнитнообработанной аморфной ферромагнитной ленты состава Fe₆₄Co₂₁B₁₅, на ее динамические магнитные характеристики в диапазоне частот перемагничивающего поля $f=0,1\div 10$ кГц.

В результате исследований было установлено:

Приложение упругих растягивающих напряжений σ ведет к увеличению максимальной величины дифференциальной магнитной проницаемости μ_{dmax} , коэрцитивной силы H_C , остаточной индукции B_r и плотности энергии потерь на перемагничивание w исследованных лент во всем диапазоне частот f внешних магнитных полей (рис.8,9). Такое поведение магнитных параметров связывается с изменениями, происходящими в доменной структуре образцов при приложении к ним растягивающих напряжений.

Обнаружено два характерных участка на зависимостях исследованных магнитных параметров от значения действующих растягивающих напряжений (рис.8,9). Существование первого участка (область малых значений σ) можно объяснить уменьшением константы наведенной одноосной анизотропии и

поворотом оси легкого намагничивания образца в направлении линии приложения растягивающих напряжений. Наличие второго участка (область высоких значений σ) объяснено изменениями, происходящими в магнитной структуре ленты, имеющей одноосную анизотропию вдоль линии приложения напряжений (уменьшение дисперсии анизотропии, рост поверхностной плотности энергии доменных границ и т.д.). При этом основным механизмом перемагничивания исследованных образцов становится механизм смещения доменных границ.

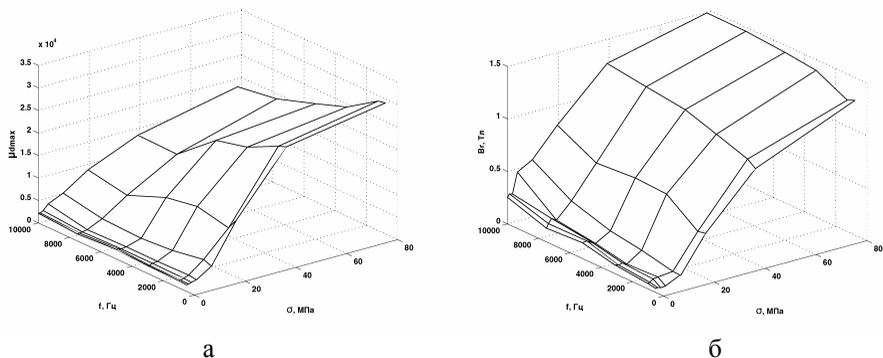


Рис.8. Зависимость величины максимального значения дифференциальной магнитной проницаемости μ_{dmax} (а) и остаточной индукции B_r (б) от частоты f перемагничивающего поля и упругих растягивающих напряжений σ ленты состава $Fe_{64}Co_{21}V_{15}$, прошедшей термомагнитную обработку при $T=320^{\circ}C$.

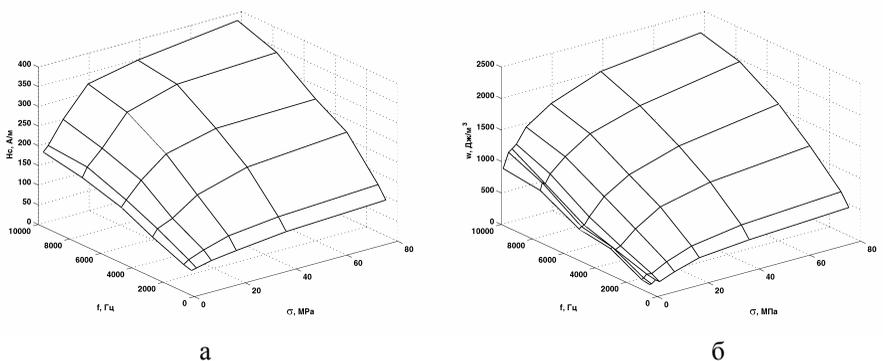


Рис.9. Зависимость коэрцитивной силы H_C (а) и плотности энергии потерь на перемагничивание w (б) от частоты f перемагничивающего поля и растягивающих напряжений σ ленты состава $Fe_{64}Co_{21}V_{15}$, прошедшей термомагнитную обработку при $T=290^{\circ}C$.

С ростом частоты f перемагничивающего поля наиболее существенные изменения происходят в ходе зависимостей величины максимальной дифференциальной магнитной проницаемости μ_{dmax} , коэрцитивной силы H_C и плотности энергии потерь на перемагничивание w от значения упругих растягивающих напряжений σ (рис.8,9). Величина остаточной индукции B_r исследованных образцов наиболее сильно зависит от частоты магнитного поля в

области сравнительно малых растягивающих напряжений, что может быть связано с образованием блокированных доменных структур, возникающих при перемагничивании образца.

Максимальные изменения величины дифференциальной магнитной проницаемости μ_{dmax} наблюдаются у лент, подвергнутых упругим растягивающим напряжениям величиной $\sigma=20\text{--}40\text{МПа}$, в области относительно малых частот f перемагничивающего поля. В свою очередь, максимальные изменения величин коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r и плотности энергии потерь на перемагничивание w достигаются под действием таких же растягивающих напряжений в области высоких частот f перемагничивающего поля.

Наибольшие изменения динамических магнитных характеристик исследованных образцов, вызываемых приложением растягивающих напряжений, наблюдаются у образцов, прошедших термомагнитную обработку при температурах $290^0\text{--}320^0\text{С}$, а наименьшие при температурах $350^0\text{--}380^0\text{С}$. Данное обстоятельство связывается с тем, что в первом интервале температур уровень внутренних напряжений незначителен, что обуславливает однородный характер перемагничивания образца. Во втором интервале температур обработки в исследованных лентах протекают процессы кристаллизации, а уровень внутренних напряжений возрастает. При этом уменьшается чувствительность доменной структуры, а, следовательно, и динамических магнитных характеристик к действию растягивающих напряжений.

Для большего понимания механизма влияния упругих растягивающих напряжений на процессы динамического перемагничивания аморфных лент, также изучалось изменение величины их ΔE -эффекта под действием растягивающих напряжений.

В §4.2. исследовано влияние постоянных упругих растягивающих напряжений, величина которых изменялась в интервале $\sigma = 0\text{--}40\text{ МПа}$, приложенных вдоль длины образцов, на величину ΔE -эффекта аморфных ферромагнитных лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку и обработку постоянным электрическим током.

Для построения модели, объясняющей влияние постоянных растягивающих напряжений на ΔE -эффект аморфных ферромагнитных лент, с исследованных образцов снимались петли гистерезиса. Постоянное магнитное поле и упругие растягивающие напряжения, прикладываемые к образцам в процессе снятия петель гистерезиса, были ориентированы вдоль длины полосок.

Анализ полученных результатов показал, что:

Наибольшие изменения величины отрицательного ΔE -эффекта под действием упругих растягивающих напряжений наблюдаются в образцах, термомагнитнообработанных в интервале температур $\Delta T=300^0\text{--}340^0\text{С}$ (рис.10А). Наибольшие изменения величины отрицательного ΔE -эффекта под действием упругих растягивающих напряжений наблюдаются в образцах, обработанных электрическим током в интервале $\Delta J=(3,3 - 4,5)\times 10^7\text{ А/м}^2$ (рис.10Б).

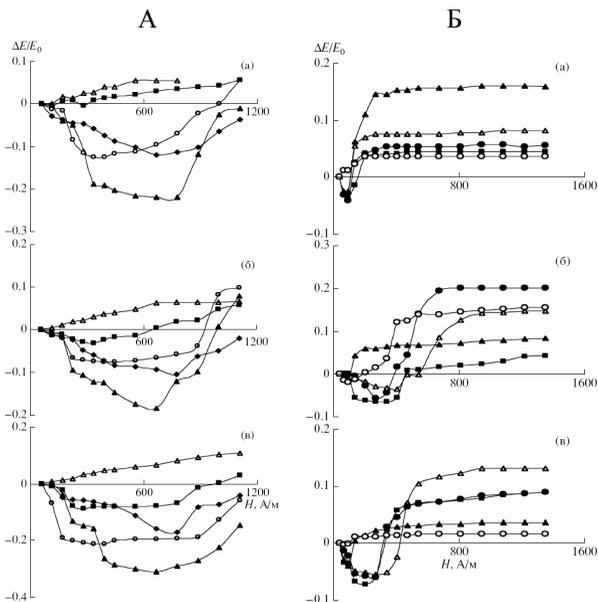


Рис.10. Зависимости величины ΔE -эффекта от магнитного поля H при различных значениях растягивающих напряжений σ :

Δ – $\sigma = 0$ МПа,
 \bullet – $\sigma = 0,8$ МПа,
 \blacksquare – $\sigma = 2$ МПа,
 \blacktriangle – $\sigma = 4$ МПа,
 \circ – $\sigma = 8$ МПа,
 \blacklozenge – $\sigma = 20$ МПа.

А - для лент, прошедших термомагнитную обработку при температурах T :

а – $T=300^{\circ}\text{C}$,
 б – $T=320^{\circ}\text{C}$,
 в – $T=340^{\circ}\text{C}$;

Б - для лент, прошедших обработку постоянным электрическим током плотностью J :

а – $J=3,3 \times 10^7 \text{ A/m}^2$,
 б – $J=4,0 \times 10^7 \text{ A/m}^2$,
 в – $J=4,5 \times 10^7 \text{ A/m}^2$.

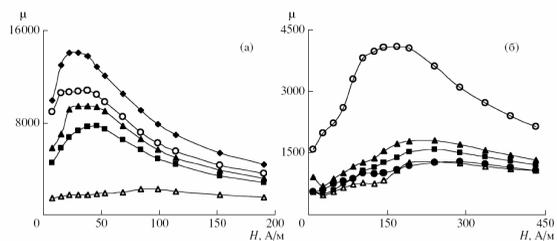


Рис.11. Зависимости величины дифференциальной магнитной проницаемости μ от внешнего магнитного поля H , при различных значениях растягивающих напряжений σ :

Δ – $\sigma = 0$ МПа, \bullet – $\sigma = 0,8$ МПа,
 \blacksquare – $\sigma = 2$ МПа, \blacktriangle – $\sigma = 4$ МПа,
 \circ – $\sigma = 8$ МПа, \blacklozenge – $\sigma = 20$ МПа:

а – образцы, прошедшие термомагнитную обработку при температуре $T=320^{\circ}\text{C}$;

б – образцы, прошедшие обработку постоянным электрическим током плотностью $J=4,0 \times 10^7 \text{ A/m}^2$.

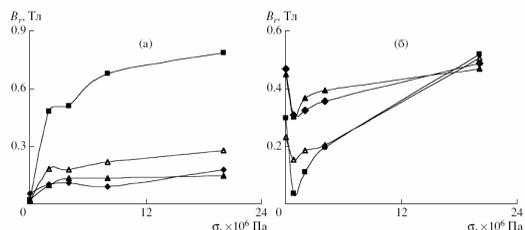


Рис.12. Зависимости величины остаточной индукции B_r от значения растягивающих напряжений σ :

а – образцы, прошедшие термомагнитную обработку при температуре T (\blacklozenge – $T=300^{\circ}\text{C}$, \blacktriangle – $T=320^{\circ}\text{C}$, \blacksquare – $T=350^{\circ}\text{C}$);

б – образцы, прошедшие обработку постоянным электрическим током плотностью J (\blacktriangle – $J=3,3 \times 10^7 \text{ A/m}^2$, Δ – $J=4 \times 10^7 \text{ A/m}^2$, \blacklozenge – $J=4,7 \times 10^7 \text{ A/m}^2$).

Независимо от характера обработки исследованных лент приложение к ним относительно небольших σ в диапазоне от $(0,4 \div 0,8)$ МПа до $(2 \div 4)$ МПа ведет к увеличению максимального абсолютного значения отрицательного ΔE -эффекта.

Рост σ выше определенного значения приводит к уменьшению поля достижения максимума абсолютного значения отрицательного ΔE -эффекта.

Как следует из полученных зависимостей $\mu(H, \sigma)$ и $B_r(\sigma)$, у образцов, прошедших термомагнитную обработку, величины μ и B_r увеличивается с ростом σ (рис.11,12). При этом с увеличением σ наблюдается изменение хода зависимости $\mu(H)$. При $\sigma=0$ величина μ лишь незначительно изменяется с ростом H , а величина B_r мала, что свидетельствует о преобладающей роли механизма поворота намагниченности в процессах перестройки магнитной доменной структуры лент. При приложении σ величина дифференциальной магнитной проницаемости возрастает, а на зависимости $\mu(H)$ появляется характерный максимум. Такое изменение хода зависимости $\mu(H)$, а также рост B_r при увеличении σ свидетельствует об изменении основного механизма намагничивания аморфных лент, прошедших термомагнитную обработку при приложении к ним растягивающих напряжений.

У аморфных металлических лент, прошедших обработку электрическим током, зависимости $\mu(H)$ имеют характерный максимум при всех значениях σ . Помимо этого величина B_r у лент, прошедших обработку электрическим током, при $\sigma=0$ Па превышала значения B_r у лент, прошедших термомагнитную обработку. Характер зависимости $\mu(H)$, а также относительно высокие значения B_r при $\sigma=0$ Па, свидетельствовало о неоднородном характере процесса перемагничивания лент, обработанных электрическим током, даже в отсутствии приложенных растягивающих напряжений, а также о значительном вкладе механизма смещения доменных границ в процессы перестройки доменной структуры исследованных лент.

Таким образом, совместный анализ зависимостей величины ΔE -эффекта от внешнего магнитного поля и упругих растягивающих напряжений в совокупности с аналогичными зависимостями магнитных характеристик позволил сделать выводы о магнитной доменной структуре и механизмах ее перестройки в аморфных металлических лентах, прошедших как термомагнитную обработку, так и обработку электрическим током. При этом поведение величины ΔE -эффекта под действием магнитного поля и упругих напряжений у лент, прошедших различную обработку, являлось качественно одинаковым, что связано с идентичными механизмами перестройки их магнитной доменной структуры под действием магнитного поля и упругих растягивающих напряжений. Вместе с тем, необходимым условием высокой чувствительности величины ΔE -эффекта к действию упругих растягивающих напряжений у высокомагнотриксционных аморфных металлических лент следует считать наличие однородной по всему их объему одноосной наведенной анизотропии.

Независимо от характера обработки исследованных лент при приложении к ним относительно малых растягивающих напряжений максимальное значение отрицательного ΔE -эффекта возрастало. При дальнейшем увеличении упругих

растягивающих напряжений максимальное значение отрицательного ΔE -эффекта уменьшалось. Наибольшая чувствительность ΔE -эффекта к воздействию постоянных растягивающих напряжений наблюдалось у образцов, прошедших термомагнитную обработку, что связано с их более однородной магнитной структурой по сравнению с лентами прошедшими обработку постоянным электрическим током.

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

Основные результаты и выводы

1. С ростом упругих растягивающих напряжений максимум дифференциальной магнитной проницаемости проволок состава $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ сдвигается сначала в область меньших магнитных полей. При дальнейшем увеличении растягивающих напряжений максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости сдвигается в область больших магнитных полей при всех частотах перемагничивающего поля. Такое поведение максимального значения дифференциальной магнитной проницаемости в области малых растягивающих напряжений обусловлено уменьшением амплитудной дисперсии анизотропии образца, а в области высоких значений растягивающих напряжений - ростом поверхностной плотности энергии доменных границ в ядре проволоки.

2. Во всем исследованном диапазоне упругих растягивающих напряжений рост частоты перемагничивающего поля приводит к увеличению изменений поля максимума дифференциальной магнитной проницаемости проволок, что может быть обусловлено, с одной стороны, уменьшением амплитудной дисперсии анизотропии в ядре проволоки под действием растягивающих напряжений (в области их малых значений), а с другой стороны - увеличением поверхностной плотности энергии доменных границ (в области их высоких значений). Первое обстоятельство приводит к уменьшению времени релаксации и поля смещения доменной границы, а второе обстоятельство - к их увеличению.

3. Рост коэрцитивной силы проволоки приводит к уменьшению минимального размера домена в ее ядре. Наиболее энергетически выгодным в ядре аморфной металлической проволоки является домен, состоящий из цилиндрической части и двух конусообразных верхушек. При этом поле начала движения доменной верхушки в ядре проволоки зависит от взаимной ориентации магнитного поля и намагниченности домена.

4. На зависимостях динамических магнитных характеристик аморфных металлических лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших термомагнитную обработку, от значения растягивающих напряжений имеется два участка с различным углом наклона к оси приложенных напряжений. Первый участок связан с уменьшением константы наведенной анизотропии и поворотом оси легкого намагничивания лент в направлении действия растягивающих напряжений. Второй участок обусловлен

изменениями в магнитной структуре ленты в результате наведения анизотропии приложенными растягивающими напряжениями.

5. Увеличение частоты перемагничивающего поля по-разному влияет на изменение динамических магнитных характеристик лент под действием растягивающих напряжений, что наиболее заметно при их относительно больших значениях. Рост растягивающих напряжений ведёт к увеличению энергии доменных границ и к понижению их восприимчивости к действию магнитных полей относительно высокой частоты. Последнее обстоятельство приводит к уменьшению дифференциальной магнитной проницаемости, а также к росту коэрцитивной силы и остаточной индукции ленты.

6. Качественный характер зависимостей величины ΔE -эффекта от магнитного поля и растягивающих напряжений одинаков для аморфных металлических лент состава $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$, прошедших как термомагнитную обработку, так и обработку постоянным электрическим током. В результате обеих обработок, в образцах наводится одноосная анизотропия с осью легкого намагничивания перпендикулярной длине полосок. В связи с этим, под действием магнитного поля и относительно малых упругих растягивающих напряжений в образцах наблюдается рост максимального абсолютного значения отрицательного ΔE -эффекта. При дальнейшем увеличении упругих растягивающих напряжений максимальное абсолютное значение отрицательного ΔE -эффекта уменьшается. Более высокая чувствительность ΔE -эффекта к действию упругих растягивающих напряжений у аморфных металлических лент, прошедших термомагнитную обработку по сравнению с лентами, обработанными постоянным электрическим током, связана с более однородной наведенной анизотропией.

Список цитируемой литературы

1. Золотухин И.В. Физические свойства аморфных металлических материалов / И.В. Золотухин. - М.: Металлургия, 1986. - 176 с.
2. Судзуки К. Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. - М.: Металлургия, 1987. - 328 с.
3. Магнетизм наносистем на основе редкоземельных и 3-d переходных металлов: Хрестоматия./ Под ред. В.О. Васьковского. – Екатеринбург: УГУ, 2007. - 266 с.
4. Сокол-Кутыловский О.Л. Исследование магнитоупругих свойств аморфных ферромагнетиков с целью их применения в магнитных и механических датчиках/ О.Л. Сокол-Кутыловский // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук.- Екатеринбург, 1997.- 218 с.
5. Vazquez M. Magnetic bistability of amorphous wires and sensor applications / M. Vazquez, C. Gomez-Polo, D.-X. Chen, A. Hernando // J. Magn. Magn. Mater. – 1994. – V. 130. – P. 907-912.
6. Скулкина Н.А. Распределение намагниченности и магнитные свойства кристаллических, аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалов / Н.А. Скулкина // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.–Екатеринбург: УГУ, 2008.- 44с.
7. Потапов А.П. Физическое обоснование и реализация методов направленного воздействия на функциональные свойства магнитомягких аморфных и нанокристаллических материалов / А.П. Потапов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Екатеринбург: Институт физики металлов УрО РАН, 2008.- 48 с.
8. Моховиков А.Ю. Магнитные и магнитоупругие свойства аморфных металлических проволок и лент на основе железа / А.Ю. Моховиков // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико- математических наук. – Иркутск: ИГУ, 2006. 127 с.
9. Чечерников В.И. Магнитные измерения/ В.И. Чечерников. - М: Изд-во МГУ, 1969. -2-е изд., доп. и перераб.- 388 с.
10. Pry R.H. Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model / R.H. Pry, C.P. Bean // J.Appl.Phys. - 1958. - Vol.29, №3. - P.532 - 533.
11. Livingston J.D. Magnetomechanical properties of amorphous metals/ J.D. Livingston // Phys. Stat. Sol.(a). – 1982. - V. 70, №8. - P.591-596.
12. Золотухин И.В. ДЕ-эффект в аморфном сплаве Fe₇₄Co₁₀B₁₆ / И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин, В.А. Кондусов, Б.Г. Суходолов // Металлофизика. – 1989. - Т.11, в.4. – С. 48.
13. Гаврилюк А.А. Отрицательный ДЕ-эффект в аморфных и нанокристаллических сплавах / А.А. Гаврилюк, Н.П. Ковалева, А.В. Гаврилюк // Известия Вузов. Физика. – 1998. -В.10. - С.121-123.
14. Vazquez M. Domain structure and magnetization process of bent Fe-rich amorphous wire / M. Vazquez, C. Gomez-Polo, H. Theuss, H. Kronmuller // JMMM.- 1996.- V.164.- P. 319-326.

15. Chen D.-X. AC magnetization analyses in iron-rich amorphous wires / D.-X. Chen, N.M. Dempsey, A. Hernando, M. Vazquez // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1995. - V.28. - P.1022.
16. Гаврилюк А.В. Магнитные свойства аморфных металлических проволок $Fe_{75}Si_{10}B_{15}$ / А.В. Гаврилюк, А.А. Гаврилюк, Н.П. Ковалева, А.Ю. Моховиков, А.Л. Семенов, Б.В. Гаврилюк // ФММ.- 2006. - Т.101, В.5.-С.21.
17. Carcia-Miquel H. Domain wall propagation in bistable amorphous wires / H. Carcia-Miquel, D.X. Chen, M. Vazquez // JMMM. – 2000. – V.212. - P.101-106.
18. Боярченко М.А. Логические устройства на магнитных средах с управляемым движением доменов / М.А. Боярченко, Н.П. Васильева, Ю.Д. Розенталь. - М.: Энергия, 1978. – 160с.
19. Семенов В.С. Заряженные стенки между ферромагнитными доменами/ В.С. Семенов // ФММ. – 1980. - Т.50, вып.3. - С. 520-525.
20. Семенов В.С. Разработка регистров сдвига для доменных устройств памяти на основе исследования устойчивости плоских магнитных доменов/ В.С. Семенов // Автореферат кандидатской диссертации. – Москва: Институт проблем управления (автоматики и телемеханики), 1981. - 21с.

Публикации автора по теме диссертации

1. Турик Н.В. Отрицательный ΔE - эффект в аморфных металлических сплавах на основе железа, полученных различными методами / Н.В. Турик, М.В. Пинегин // Студент и научно-технический прогресс: сб. тез. докл. студентов и аспирантов ИГУ. - Иркутск, 1999. - С.129.
2. Турик Н.В. Измерение кривой намагничивания в динамическом режиме/ Н.В. Турик, И.Г. Писляр, М.В. Пинегин // Известия метрологической академии. – 2000.- № 2. - С. 54-56.
3. Турик Н.В. Применение аморфных сплавов в магнитомеханическом преобразователе энергии / Н.В. Турик, И.Г. Писляр и др. // Аморфные прецизионные сплавы: технологии- свойства – применение: сб. тез. докл. VII-й Всероссийской конф. 13-16 ноября 2000г.- Москва, 2000. - С. 457.
4. Быков С.П. Исследование взаимосвязи механических и магнитных характеристик конструкционных сталей / С.П. Быков, Г.Г. Золотенин, М.В. Лопатин, И.Л. Морозов, Н.В. Турик // Физическая мезомеханика, компьютерное конструирование и разработка новых материалов: сб. тез. докл. Междунар. конф. 19-22 сентября 2006г.- Томск, 2006. - С.338.
5. Морозов И.Л. Определение механических свойств ферромагнитных конструкционных материалов неразрушающими методами / И.Л. Морозов, Н.В. Турик, Г.Г. Золотенин // Безопасность и живучесть технических систем: сб. тез. докл. II-й Всероссийской конф. 10 - 12 октября 2007г. - Красноярск, 2007. - С.116.
6. Морозов И.Л. Изменение динамических магнитных характеристик термомагнитнообработанных аморфных ферромагнитных лент под

- действием упругих деформаций / И.Л. Морозов, Н.В. Турик, Д.В. Прудников// Физика конденсированного состояния: сб. тез. докл. XV Республиканской науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов 25-27 апреля 2007г.- Гродно, 2007.-С.181-185.
7. Турик Н.В. Параметры магнитной структуры ядра аморфных ферромагнитных проволок / Н.В. Турик, П.А. Скоробогатов, Д.В. Прудников// Физика конденсированного состояния: тез. докл. XV Республиканской науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов 25-27 апреля 2007г. - Гродно, 2007. - С.253-256.
 8. Скоробогатов П.А. Механизмы перемагничивания ядра аморфной металлической проволоки / П.А. Скоробогатов, Н.В. Турик, Д.В. Прудников, А.А. Гаврилюк // Вестник ИГУ. – Иркутск, 2007. - С.144-146.
 9. Gavriliuk A.A. Stability of magnetic domains inside the core of amorphous wire / А.А. Gavriliuk, А.Yu. Mokhovikov, А.V. Semirov, А.L. Semenov, N.V. Turik, V.O. Kudrewcev // Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism 20-25 June 2008. - Москва, 2008.- С. 777.
 10. Гаврилюк А.А. Влияние растягивающих напряжений на ΔE-эффект в аморфных лентах Fe₆₄Co₂₁B₁₅, обработанных электрическим током / А.А. Гаврилюк, А.В. Семиров, А.Л. Семенов, Н.В. Турик, Д.В. Прудников, В.О. Кудрявцев // Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов: Материалы VII Международной конф. 25-27 мая 2007г. - Воронеж, 2007. - С.87-92.
 11. Гаврилюк А.А. Механизмы перемагничивания ядра аморфной металлической проволоки / А.А. Гаврилюк, А.В. Гаврилюк, И.Л. Морозов, Н.В. Турик, А.В. Семиров, А.Л. Семенов, Б.В. Гаврилюк // Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов: Материалы VII Международной конф. 25-27 мая 2007г. - Воронеж, 2007. - С. 147-152.
 12. Gavriliuk A.A. Effect of Tensile Stresses on the Magnetoelasticity of FeCoB Amorphous Ferromagnetic Ribbons / А.А. Gavriliuk, А.V. Semirov, А.L. Semenov, D.V. Prudnikov, V.O. Kudryavtsev, N.V. Turik, А.Yu. Mokhovikov // Abstracts of 13th International conference on liquid and amorphous metals (LAM13) 8-14 july 2007.- Ekaterinburg, 2007. - С. 60.
 13. Gavriliuk A.A. Influence of tensile stresses on ΔE-effect in the amorphous ribbons Fe₆₄Co₂₁B₁₅ annealing by electric current / А.А. Gavriliuk, А.L. Semenov, А.V. Semirov, А.Yu. Mokhovikov, N.V. Turik // Functional Materials (ICFM'2007): Abstracts of International conference 1-6 oktober 2007. - Crimea, 2007. - P.258-259.
 14. Прудников Д.В. Влияние растягивающих напряжений на величину ΔE-эффекта быстрозакаленных лент Fe₆₄Co₂₁B₁₅, обработанных электрическим током / Д.В. Прудников, Н.В. Турик, А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, И.Л. Морозов // Труды XI конф. студентов, аспирантов и молодых ученых по физике полупроводниковых, диэлектрических и магнитных материалов 13-16 июня 2007г. - Владивосток, 2007. - С.264-269.

15. Морозов И.Л. Динамические магнитные свойства быстрозакаленных лент $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ / И.Л. Морозов, Н.В. Турик, Д.В. Прудников, А.А. Гаврилюк, А.Л. Петров, С.М. Зубрицкий // Научный поиск: парадигмы, проекции, практики: сб. статей всероссийской научно-практической конференции 15-17 апреля 2007г. - Братск-Иркутск, 2007. - С.398-404.
16. Прудников Д.В. Параметры магнитной структуры и механизмы перемагничивания ядра аморфной металлической проволоки на основе переходных металлов / Д.В. Прудников, Н.В. Турик, И.Л. Морозов, А.А. Гаврилюк, С.М. Зубрицкий, А.Л. Петров // Научный поиск: парадигмы, проекции, практики: сб. статей всероссийской научно-практической конференции 15-17 апреля 2007г. - Братск-Иркутск, 2007. - С.404-410.
17. Турик Н.В. Динамические свойства аморфных ферромагнитных проволок FeSiB / Н.В. Турик, И.Л. Морозов, А.А. Гаврилюк // Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование: труды 5-ой Международной научной конференции 9-12 октября 2007г. - Казахстан, Алматы, 2007. - С.231-236.
18. Gavriliuk A.A. The stability of the magnetic domains inside the core of amorphous metal wire / A.A. Gavriliuk, A.Yu. Mokhovikov, A.V. Semirov, A.L. Semenov, N.V. Turik, O.V. Kudrewcev // 9th International Workshop on Non-Crystalline Solids 27-30 April 2008 - Porto, Portugal, 2008. - P.60.
19. Gavriliuk A.A. Stability of magnetic domains inside the core of amorphous metal wire / A.A. Gavriliuk, A.Yu. Mokhovikov, A.V. Semirov, A.L. Semenov, N.V. Turik, O.V. Kudrewcev // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2008. – V. 354. - P. 5230-5232.
20. Гаврилюк А.А. Влияние управляемой кристаллизации на магнитные и магнитоупругие свойства аморфных металлических лент на основе железа / А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, С.Н. Малов, Н.В. Турик // Физико-математическое моделирование систем (ФММС-5): Материалы V Международного семинара. – ВГТУ. - Воронеж, 2008.- <http://www.vorstu.ru/conferences/48/53/231/>
21. Semenov A.L. Influence of laser treatment to the magnetic properties of amorphous $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ ribbon / A.L. Semenov, A.A. Gavriliuk, S.N. Malov, I.L. Morozov, A.V. Semirov, A.Yu. Mokhovikov, N.V. Turik // Abstracts of Moscow International Symposium on Magnetism 20-25 June 2008. - Москва, 2008. - С.778.
22. Гаврилюк А.А. Влияние растягивающих напряжений на ΔE – эффект ферромагнитных лент $\text{Fe}_{64}\text{Co}_{21}\text{B}_{15}$ / А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, А.В. Семиров, А.В. Гаврилюк, Б.В. Гаврилюк, Н.В. Турик, В.О. Кудрявцев // ФММ.- 2009.- Т.107, №1.- С.1-8.
23. Гаврилюк А.А. Магнитная структура и механизмы перемагничивания ядра быстрозакаленной ферромагнитной проволоки / А.А. Гаврилюк, А.В. Гаврилюк, И.Л. Морозов, Н.В. Турик, Б.В. Гаврилюк, А.В. Семиров, А.Л. Семенов // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – Вып.2. - С. 64-71. (Russian Physics Journal. - 2008. -Vol. 51, № 2. - P. 182-187.)

24. Гаврилюк А.А. Устойчивость магнитных доменов в аморфной металлической проволоке / А.А. Гаврилюк, А.В. Гаврилюк, Б.В. Гаврилюк, А.Л. Семенов, А.В. Семиров, Н.В. Турик // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – Вып.11. - С. 53-60.
25. Семенов А.Л. Магнитные свойства быстрозакаленных лент на основе железа, прошедших лазерную обработку / А.Л. Семенов, А.А. Гаврилюк, А.В. Семиров, С.Н. Малов, И.Л. Морозов, Н.В. Турик, Б.В. Гаврилюк // Магнитные Материалы. Новые технологии: сб. тез. докл. 3-ой Байкальской международной конференции 23-26 сентября 2008г. – Иркутск: Изд. Иркут. гос. пед. ун-та, 2008. - С.71.
26. Морозов И.Л. Автоматизированная установка для исследования динамических магнитных и магнитоупругих свойств ферромагнитных материалов / И.Л. Морозов, Н.В. Турик, А.Л. Семенов, А.А. Гаврилюк // Магнитные Материалы. Новые технологии: сб. тез. докл. 3-ой Байкальской международной конференции 23-26 сентября 2008 г. – Иркутск: Изд. Иркут. гос. пед. ун-та, 2008. - С.154.
27. Gavriliuk A.A. The magnetodiode effect in the amorphous ferromagnetic wires / A.A. Gavriliuk, A.Yu. Mokhovikov, A.L.Semenov, N.V. Turik // Proceedings of Joint European Magnetic Symposia 13-17 September, 2008. - Dublin, Ireland. - 2008. - SM032.
28. Скоробогатов П.А. Магнитная доменная структура и процессы ее перестройки в аморфных металлических проволоках на основе железа П.А. Скоробогатов, Н.В. Турик, Д.В. Прудников, А.А. Гаврилюк // Вестник ИГУ. – Иркутск, 2008. - С. 113-115.
29. Гаврилюк А.А. Магнитные и магнитоупругие свойства аморфных металлических лент на основе железа / А.А. Гаврилюк, А.В. Гаврилюк, А.Л. Семенов, Б.В. Гаврилюк, А.В. Семиров, Н.В. Турик, Н.П. Ковалева, С.М. Зубрицкий, А.Ю. Моховиков, А.Л.Петров // Магнитные Материалы. Новые технологии: сб. тез. докл. 3-ой Байкальской международной конференции 23-26 сентября 2008г. – Иркутск: Изд. Иркут. гос. пед. ун-та, 2008. - С.70.
30. Семенов А.Л. Влияние лазерной обработки на магнитные свойства аморфных металлических лент / А.Л.Семенов, А.А. Гаврилюк, С.Н. Малов, А.В. Семиров, Н.В. Турик, И.Л. Морозов, А.Ю. Моховиков // Сб. докл. XI Международной школы-семинара по люминесценции и лазерной физике. Иркутск, 27-31 окт. 2008г. – Иркутск: Изд. Иркут. ун-та, 2008. - С.101.
31. Gavriliuk A.A. The magnetodiode effect in amorphous ferromagnetic wires / A.A. Gavriliuk, A.Y. Mokhovikov, A.L. Semenov, N.V. Turik // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (in print).

Подписано в печать 01.04.09.
Тираж 100 экз.