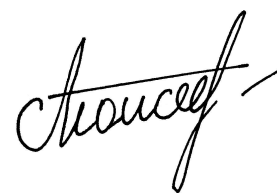


На правах рукописи



Моисеев Алексей Анатольевич

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА  
МАГНИТОИМПЕДАНС АМОΡФНЫХ  
НИЗКОСТРИКЦИОННЫХ ПРОВОЛОК  
НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА

01.04.11 — Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Красноярск — 2012

Работа выполнена на кафедре физики ФГБОУ ВПО «Восточно-Сибирская государственная академия образования».

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент  
**Семиров Александр Владимирович**

Официальные оппоненты: **Исхаков Рауф Садыкович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГБУН «Институт физики им. Л.В.Киренского»  
СО РАН, заведующий лабораторией физики маг-  
нитных пленок

**Зубрицкий Сергей Моисеевич**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный уни-  
верситет», доцент кафедры электроники твердо-  
го тела

Ведущая организация: ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный универ-  
ситет имени первого президента России Б.Н. Ель-  
цина»

Защита состоится 25 мая 2012 года в 14 часов 30 минут на заседании диссер-  
тационного совета Д 003.055.02 по защите докторских и кандидатских дис-  
сертаций при ФГБУН «Институт физики им. Л.В. Киренского» Сибирского  
отделения Российской академии наук по адресу: 660036, г. Красноярск, Ака-  
демгородок 50, стр. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики СО  
РАН.

Автореферат разослан 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 003.055.02  
доктор физико-математических наук



А.Н. Втюрин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

Основной задачей многих исследований современной физики в таких ее областях, как физика магнитных явлений и физика конденсированного состояния, является установление связи между структурным состоянием материала и его физическими свойствами. В настоящее время наряду с традиционными методами исследования структуры материала широко используют косвенные методы, в основе которых лежит сопоставление контролируемых физических свойств материала с его структурным состоянием. Применение косвенных методов структурных исследований обосновано в случае, когда использование традиционных методов трудно реализуемо экспериментально или их результаты сложно интерпретируемы. В качестве контролируемых свойств магнитных материалов выступают магнитные и электрические свойства ввиду их высокой чувствительности к изменениям структуры.

В классе магнитомягких материалов одними из наиболее перспективных в практическом применении являются аморфные и нанокристаллические сплавы на основе железа и кобальта. Данные сплавы обладают уникальным сочетанием механических и магнитных свойств. Их отличают высокая магнитная проницаемость и индукция насыщения, малые значения коэрцитивной силы и потерь на перемагничивание. Подобное сочетание свойств определило область применения аморфных и нанокристаллических магнитомягких материалов в качестве сердечников трансформаторов, в электродвигателях с высоким к.п.д., в системах магнитной записи, в качестве чувствительных элементов датчиков различных величин [1, 2]. Особый интерес представляют кобальтовые сплавы в аморфном состоянии. Данные сплавы уступают нанокристаллическим сплавам на основе железа по магнитным характеристикам, но при этом существенно превосходят их по механическим параметрам.

Окончательного ответа на вопрос о структуре аморфных металлов пока не дано. Использование для ее изучения дифракционных методов ограничено ввиду отсутствия дальнего порядка в расположении атомов аморфных материалов. При этом аморфное состояние является метастабильным и при незначительном воздействии внешних факторов возможны существенные изменения атомной структуры и связанных с ней физических свойств. Из вышесказанного следует, что выявление связи термоиндуцированных изменений атомной структуры аморфных ферромагнетиков с их магнитными и электрическими свойствами представляет существенный интерес как с практической, так и фундаментальной точек зрения.

### **Цель работы**

Выявление особенностей термоиндуцированных изменений структуры и магнитоимпедансных свойств аморфных низкострикционных проволок, а также выявление особенностей влияния температуры на магнитоимпеданс термообработанных проволок в присутствии механических напряжений и подмагничивающего тока.

## Основные задачи

1. Разработать экспериментальные методики изучения совместного влияния магнитного поля, механических напряжений и температуры на импеданс аморфных проволок.
2. Изучить влияние режимов предварительной термообработки на структуру, электрические и магнитные свойства аморфных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ .
3. Изучить влияние температуры на магнитоимпеданс аморфных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ , предварительно подвергнутых термообработке.
4. Изучить влияние механических напряжений и подмагничивающего тока на температурные зависимости магнитоимпеданса термообработанных аморфных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ .

## Объекты исследования

Аморфные проволоки состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  с низким положительным значением константы магнитострикции ( $\lambda_S \approx 10^{-7}$ ). Исследовались проволоки в исходном состоянии и подвергнутые мягкой термообработке в различных температурно-временных режимах.

## Научная новизна

1. Впервые показана применимость метода магнитоимпедансной спектроскопии для детектирования отдельных стадий структурной релаксации аморфных ферромагнитных сплавов.
2. Впервые обнаружен диапазон механических напряжений и температур, в котором возможна компенсация температурных изменений импеданса аморфных магнитомягких проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  с низкой положительной константой магнитострикции приложением соответствующих механических напряжений.
3. Впервые показано влияние циркулярного магнитного поля на характер температурной зависимости импеданса магнитомягких ферромагнитных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ .
4. Впервые предложена непротиворечивая модель магнитной структуры быстрозакаленных аморфных магнитомягких проволок с низкой положительной константой магнитострикции, объясняющая особенности их магнитных и магнитоимпедансных свойств в присутствии механических напряжений и подмагничивающего тока, согласующаяся с расчетным распределением внутренних закалочных напряжений.

## Практическая значимость

1. Определен оптимальный режим предварительной термообработки, позволяющий повысить температурно-временную стабильность магнитоимпедансных свойств аморфных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  с сохранением их высоких механических свойств, что расширяет область применения данных материалов в различного рода устройствах электроники и автоматики, а также увеличивает температурный диапазон их эксплуатации.
2. Показана возможность компенсации температурных изменений импеданса аморфных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  внешними механическими напряжениями.

## Защищаемые положения

1. Различие в изменениях магнитоимпедансных свойств аморфных магнитомягких ферромагнитных проволок, подвергнутых предварительной термообработке при разных температурно-временных режимах, связано с активацией и преимущественным протеканием отдельных стадий структурной релаксации. Высокая чувствительность магнитоимпедансных свойств аморфных ферромагнетиков к изменениям структуры позволяет дифференцировать процесс структурной релаксации на отдельные стадии.
2. Существуют интервалы температур и механических напряжений, в которых в отсутствие внешнего магнитного поля приложение внешних упругих напряжений компенсирует изменение циркулярной магнитной проницаемости аморфных магнитомягких проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  с низкой положительной константой магнитострикции, связанное с температурными изменениями константы эффективной анизотропии и намагниченности насыщения.
3. Наблюдаемые под действием механических напряжений, температуры и подмагничивающего тока изменения магнитоимпедансных свойств аморфных ферромагнитных проволок с низкой положительной константой магнитострикции объяснимы в рамках модели магнитной структуры с циркулярным направлением намагниченности в глубинной области проволоки и геликоидальной ориентацией намагниченности в ее приповерхностной области и согласующейся с расчетным распределением в проволоке внутренних закалочных напряжений.
4. Изменение характера температурной зависимости импеданса аморфных магнитомягких ферромагнитных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  под действием подмагничивающего тока связано с переходом приповерхностной области проволоки в однодоменное состояние с циркулярным направлением намагниченности.

## **Апробация**

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях, семинарах и симпозиумах: Eight International Workshop on Non-Crystalline Solids (Gijon, Spain, 2006); XV Республиканская научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (Гродно, Беларусь, 2007); Moscow International Symposium on magnetism (Moscow, 2008, 2011); Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии» (Иркутск, 2008, 2010); Третья Всероссийская конференция по наноматериалам НАНО-2009 (Екатеринбург, 2009); XXI Международной конференции «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Москва, 2009); Всероссийская Байкальская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по наноструктурным материалам (Иркутск, 2009); II Всероссийская школа-семинар студентов аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноматериалы» (Рязань, 2009); International Conference “Functional Materials” (Simferopol, Ukraine, 2009); Юбилейная X Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2009); Пятая Российская научно-практическая конференция «Физические свойства металлов и сплавов» (Екатеринбург, 2009); International Conference and Seminar on Micro/Nano Electron Devices EDM’2010 (Erlagol, 2010); IV Euro-Asian symposium “Trends in magnetism”: Nanospintronics (Ekaterinburg, 2010); Recent Trends in Nanomagnetism, Spintronics and their Applications (Ordizia, Spain, 2011).

## **Публикации и личный вклад автора**

Результаты проведенных исследований представлены в 27 работах, из них 8 работ опубликованы в ведущих научных рецензируемых журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией, остальные в сборниках трудов, тезисов докладов и материалах ведущих международных и всероссийских конференций по физике конденсированного состояния и физике магнитных явлений.

Все основные результаты были получены лично автором. Выбор направления исследования, формулировка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем. Экспериментальные исследования и обсуждение их результатов проведены совместно с соавторами работ в лаборатории физики магнитных явлений Восточно-Сибирской государственной академии образования.

Работа была поддержана грантами Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проекты № 05-08-18063-а, №07-0805037-мтб и №09-08-00406-а) и Правительством Российской Федерации (специальная государственная стипендия, приказ Министерства образования и науки РФ №1581 от 15.10.09).

## **Структура диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 134 страницы, включая 52 рисунка и 1 таблицу. В списке литературы приведено 132 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** аргументированы актуальность темы исследования, обозначены цель работы и основные задачи, отражена новизна и практическая значимость полученных результатов, констатированы защищаемые положения.

В **первой главе** в реферативной форме представлен обзор публикаций по исследованию влияния внешнего магнитного поля, упругих напряжений и температуры на высокочастотные электрические свойства магнитомягких проволок. Показано, что особенности магнитоимпеданса магнитомягких проволок связаны с доменной структурой проволок и процессами их перемагничивания. В свою очередь, доменная структура, определяющая совокупность магнитоэлектрических и магнитодинамических свойств проволок, связана с их атомной структурой. В отсутствие дальнего порядка в расположении атомов аморфного материала основной характеристикой атомной структуры данного материала оказывается их дефектность [3]. При этом показано доминирующее влияние дефектов пустотной природы (пор) в сравнении с дефектами других видов на магнитные свойства аморфных сплавов.

Во **второй главе** приводится описание автоматизированного комплекса магнитоимпедансной спектроскопии и резистометрии магнитомягких материалов, изготовленного на базе прецизионного анализатора импеданса Agilent 4294A, а также автоматизированного индукционного гистереографа. Особенностью разработанных установок является унифицирование их воздействующих частей, позволяющее проводить исследование магнитоимпедансных и магнитных гистерезисных свойств магнитомягких материалов при идентичных внешних условиях. При этом измерение импеданса производится в широком диапазоне частот переменного тока при совместном влиянии внешнего постоянного магнитного поля, аксиальных растягивающих напряжений, температуры и подмагничивающего тока. Уделено внимание определению погрешностей измеряемых величин.

В **третьей главе** анализируется влияние внешнего магнитного поля, механических напряжений и подмагничивающего тока на импеданс аморфных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  и эволюция рассматриваемых свойств при мягкой термообработке. Так же проведен корреляционный анализ изменения электрических и магнитных свойств проволок с изменениями их атомной структуры.

Исследовались проволоки в исходном состоянии и подвергнутые предварительной мягкой термообработке, основная идея которой заключается в длительной выдержке образцов при температурах, ниже температуры кристаллизации. Цель мягкой термообработки состоит в повышении температурно-временной стабильности магнитоимпедансных характеристик без значительного ухудшения механических свойств исследуемых образцов. Из анализа литературных данных были определены режимы термообработки: образцы выдерживались в электропечи на воздухе при температурах 100°C, 150°C и 200°C поэтапно при длительности одного этапа 20 часов, общее время термо-

обработки при каждой температуре достигало 100 часов.

Установлено, что в отличие от незначительных изменений электрических и магнитных гистерезисных характеристик непродолжительное воздействие повышенной температуры в ходе мягкой термообработки приводит к значительным необратимым изменениям магнитоимпеданса проволок (рис. 1).

Стоит отметить, что результаты рентгеноструктурных исследований свидетельствуют о том, что исходные образцы и образцы, подвергнутые термообработке при  $200^\circ\text{C}$  в течение 100 часов, являются рентгеноаморфными.

Основные изменения магнитоимпедансных свойств исследуемых образцов независимо от температуры происходят в первые 20 часов термообработки. Увеличение времени термообработки приводит к менее существенным изменениям импеданса. Изменение импеданса в отсутствие внешнего магнитного поля  $Z_0$  (начальный импеданс) зависит от частоты переменного тока, температуры и времени термообработки.

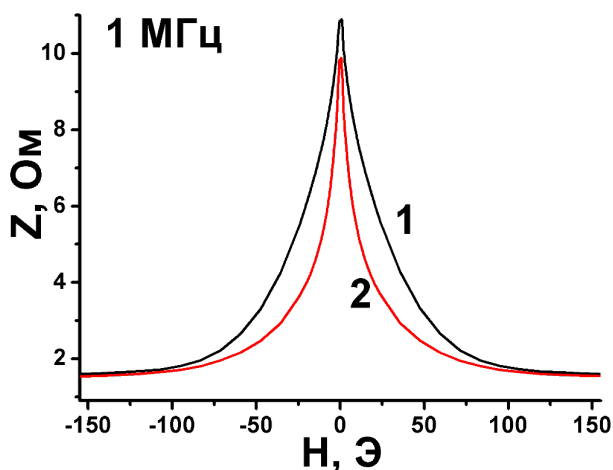


Рис. 1: Полевые зависимости импеданса аморфной проволоки состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ : 1 — в исходном состоянии, 2 — после термообработки при  $100^\circ\text{C}$  в течение 20 часов.

При температуре термообработки  $200^\circ\text{C}$  на частотах ниже 30 МГц с ростом времени термообработки  $\tau$  наблюдается падение  $Z_0$ , а на более высоких частотах отмечается его рост. С уменьшением температуры термообработки частота переменного тока, соответствующая переходу ниспадающей зависимости  $Z_0(\tau)$  к возрастающей, уменьшается. Так при температуре  $150^\circ\text{C}$  переход от падения к росту  $Z_0$  наблюдается при частоте переменного тока 10 МГц. Термообработка при температуре  $100^\circ\text{C}$  ведет к падению начального импеданса во всем исследованном частотном диапазоне  $0.1 \div 100$  МГц. Максимальное значение импеданса во внешнем магнитном поле  $Z_m$  (максимальный импеданс) уменьшается во всем исследованном температурном диапазоне термообработок. При этом изменения максимального импеданса с повышением температуры термообработки возрастают. Так, максимальные относительные изменения импеданса при температуре термообработки  $200^\circ\text{C}$  составляют 22-25%, при  $150^\circ\text{C}$  порядка 15%, при температуре  $100^\circ\text{C}$  эти изменения не превышают 10%. После воздействия повышенной температуры наибольшее изменение импеданса происходит в слабых магнитных полях. В магнитном поле порядка 150 Э изменения импеданса после воздействия температур практически отсутствуют.

Для детального анализа наблюдаемых в процессе термообработки изменений магнитоимпеданса исследуемых образцов рассматривалось влияние ее режимов на эффективную циркулярную магнитную проницаемость. Расчет



последней проводился исходя из выражения для импеданса цилиндрического проводника [4]:

$$Z = \frac{1}{2} R_{DC} k a \frac{J_0(ka)}{J_1(ka)} \quad (1)$$

где  $a$  — радиус проволоки,  $k = (1 + i)/\delta$ ,  $i$  — мнимая единица,  $\delta$  — толщина скин-слоя,  $R_{DC}$  — сопротивление постоянному току (электросопротивление),  $J_0$  и  $J_1$  — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка, соответственно. Из выражения (1) численно определялось значение толщины скин-слоя  $\delta$ , которая, в свою очередь, связана с искомой эффективной циркулярной магнитной проницаемостью  $\mu_\phi$ :

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_\phi \mu_0 \omega}} \quad (2)$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление,  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\omega$  — циклическая частота переменного тока. Таким образом рассчитывалась частотная зависимость циркулярной магнитной проницаемости  $\mu_\phi$ .

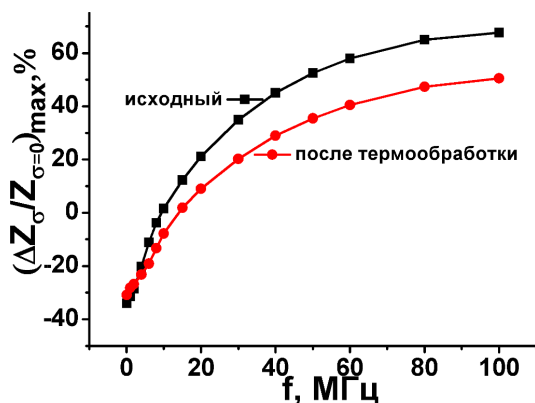


Рис. 2: Влияние термообработки при  $150^\circ\text{C}$  в течение 100 часов на частотные зависимости относительного изменения импеданса проволок под воздействием внешних упругих напряжений 327 МПа.

В результате термообработки в течение 100 часов при температуре  $150^\circ\text{C}$  изменяется степень влияния упругих напряжений на магнитоимпеданс проволок (рис. 2), при этом характер зависимости  $Z_0(\sigma)$  сохраняется. Импеданс термообработанных проволок менее чувствителен к воздействию растягивающих напряжений в сравнении с проволоками в исходном состоянии.

При протекании по проволоке постоянного подмагничивающего тока  $I_{DC}$  характер и степень изменений импеданса зависят от частоты переменного тока и внешнего аксиального магнитного поля.

В отсутствие внешнего магнитного поля на частотах переменного тока от 100 кГц до 10 МГц рост подмагничивающего тока приводит к падению  $Z_0$ . На частотах переменного тока 10 МГц и выше рост  $I_{DC}$  от 0 до 20 мА слабо изменяет начальный импеданс. Дальнейшее увеличение  $I_{DC}$  от 20 мА до 60 мА приводит к резкому падению  $Z_0$ .

Подмагничивающий ток существенно влияет на полеую зависимость импеданса  $Z(H)$  исследуемых образцов. Зависимости  $Z(H)$  на частотах выше критического значения  $f_p$  имеют вид «два пика». При протекании по проволокам постоянного подмагничивающего тока данные зависимости приобретают асимметричный характер (рис. 3). Мягкая термообработка аморфных проволок приводит к уменьшению изменений магнитоимпедансных характеристик под

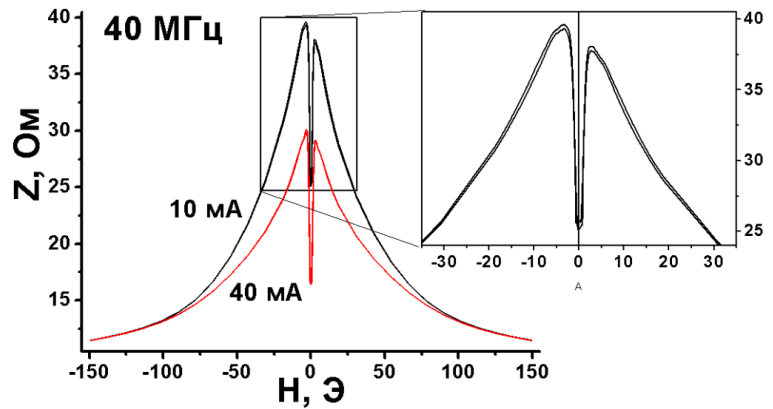


Рис. 3: Полевые зависимости импеданса при  $I_{DC}=10$  мА и  $I_{DC}=40$  мА. На вставке представлен фрагмент полевой зависимости импеданса при  $I_{DC}=10$  мА и полном цикле перемагничивания  $H_S \rightarrow 0 \rightarrow -H_S \rightarrow 0 \rightarrow H_S$ , где  $H_S = 150$  Э.

действием подмагничивающего тока. Так, максимальное изменение начального импеданса под действием подмагничивающего тока для образцов в исходном состоянии наблюдается на частоте переменного тока 4 МГц и составляет 400%. В свою очередь для образцов, подвергнутых мягкой термообработки при 150°C в течение 100 часов, аналогичное изменение не превышает 80%. Также в результате мягкой термообработки наблюдается изменение величины асимметрии полевой зависимости импеданса. Максимальная величина асимметрии полевой зависимости импеданса для проволок в исходном состоянии наблюдается на частоте переменного тока 4 МГц при  $I_{DC} = 40$  мА и составляет  $\Delta Z_{mm}/Z_m = 12,6\%$ , для термообработанных образцов аналогичная величина наблюдается на частоте переменного тока 6 МГц при  $I_{DC} = 60$  мА и составляет  $\Delta Z_{mm}/Z_m = 23\%$ .

В результате анализа магнитных гистерезисных и магнитоимпедансных свойств исследуемых проволок была модифицирована модель магнитной структуры аморфных ферромагнитных проволок с низкой положительной константой магнитострикции. Согласно данной модификации в глубинной области проволоки намагниченность должна иметь циркулярную, а в приповерхностной области — геликоидальную ориентацию. При этом в области проволоки с геликоидальной анизотропией угол  $\alpha$  между ОЛН и циркулярным направлением изменяется: на поверхности проволоки  $\alpha \approx 0^\circ$ , по мере приближения к ядру проволоки  $\alpha$  возрастает до значений  $\sim 90^\circ$ , затем намагниченность возвращается к циркулярной ориентации. Данная модель распределения намагниченности в объеме проволоки согласуется как с полученными экспериментальными результатами, так и с расчетным распределением внутренних закалочных напряжений, представленным в работе [5].

В рамках предложенной модели магнитной структуры получено выражение для циркулярной магнитной проницаемости при воздействии на проволоку внешнего аксиального постоянного магнитного поля  $H$  и упругих рас-

тягивающих напряжений  $\sigma$ :

$$\mu_\phi = 1 + \frac{4\mu_0 M_S^2 \sin^3(\alpha + \theta)}{2K\zeta + 3\lambda_S \sigma \eta + 4\mu_0 H M_S} \quad (3)$$

где  $\zeta = 3 \sin(\alpha - \theta) + \sin(\alpha + 3\theta)$ ,  $\eta = 3 \sin(\alpha + \theta) - \sin 3(\alpha + \theta)$ ,  $\alpha$  — угол отклонения оси легкого намагничивания (ОЛН) от циркулярного направления,  $\theta$  — угол отклонения намагниченности от ОЛН,  $K$  — константа анизотропии,  $\lambda_S$  — константа магнитострикции насыщения,  $M_S$  — намагниченность насыщения.

Методом минимизации функционала свободной энергии получены зависимости  $\theta(H, \sigma, \alpha)$ . На основе этих зависимостей были определены соответствующие значения циркулярной магнитной проницаемости  $\mu_\phi(H, \sigma, \alpha)$  (рис.4). Для расчетов использовались следующие параметры  $M_S = 3,2 \cdot 10^5$  А/м,  $K = 30$  Дж/м<sup>3</sup>,  $\lambda_S = 10^{-7}$ . При направлении ОЛН близком к циркулярному зависимости  $\mu_\phi(H)$  и  $\mu_\phi(\sigma)$  имеют ярко выраженные максимумы (рис.4, а). С ростом угла отклонения ОЛН от циркулярного направления наблюдается рост начальной проницаемости, при этом максимумы на зависимостях  $\mu_\phi(H)$  и  $\mu_\phi(\sigma)$  снижаются и становятся менее выраженными (рис.4, б). При углах  $\alpha \gtrsim 55^\circ$  циркулярная магнитная проницаемость монотонно падает как с ростом аксиального магнитного поля, так и с ростом упругих растягивающих напряжений (рис.4, в, г).

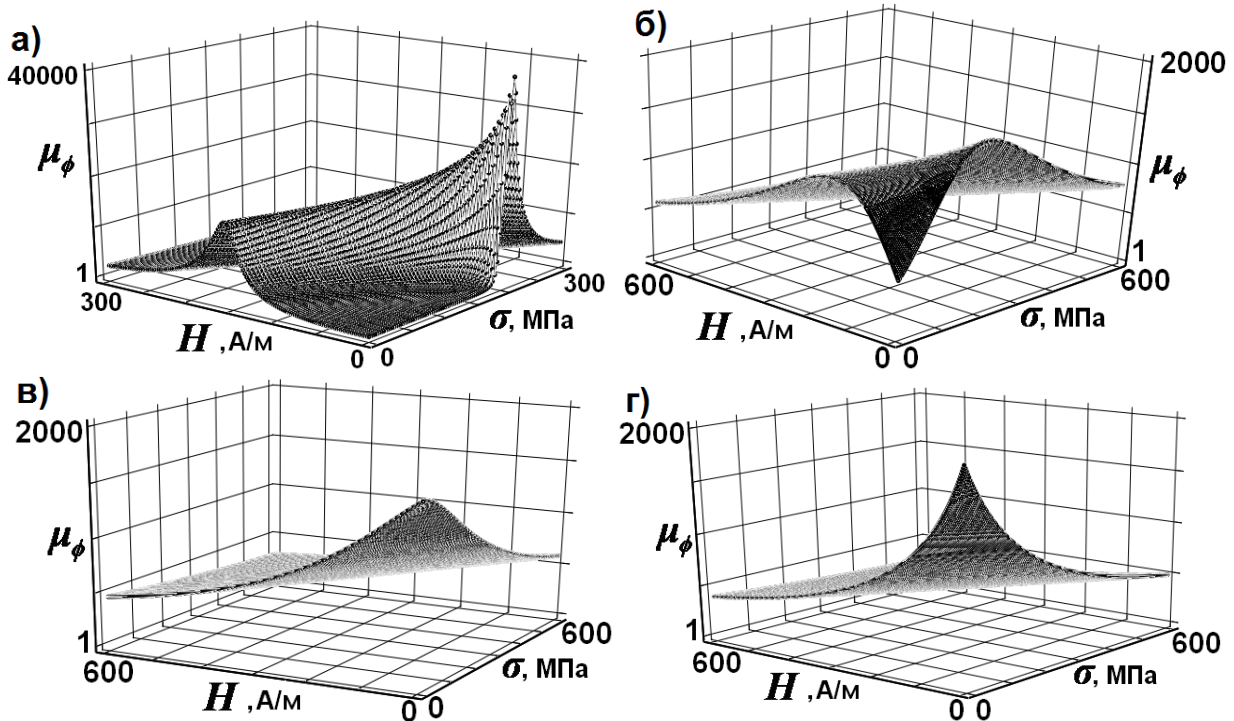


Рис. 4: Расчетные зависимости циркулярной магнитной проницаемости от внешнего магнитного поля и растягивающих напряжений, приложенных аксиально, при углах отклонения ОЛН от циркулярного направления: а)  $1^\circ$ , б)  $30^\circ$ , в)  $60^\circ$ , г)  $89^\circ$ .

Полученные зависимости циркулярной магнитной проницаемости хоро-

шо согласуются с зависимостями импеданса от внешнего магнитного поля и упругих растягивающих напряжений.

Для объяснения особенностей влияния подмагничивающего тока на магнитоимпеданс необходимо наличие в приповерхностной области проволоки с геликоидальной анизотропией доменов с противоположным направлением намагниченности. В этом случае эффективная циркулярная магнитная проницаемость будет определяться соотношением объемов данных доменов.

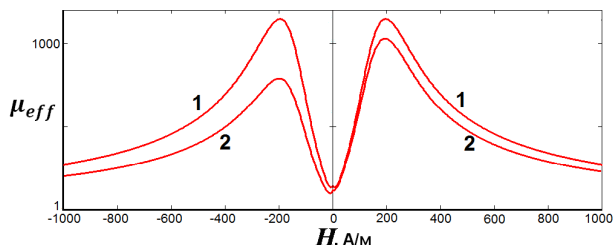


Рис. 5: Расчетные зависимости циркулярной магнитной проницаемости от внешнего аксиального магнитного поля. Соотношение объемов доменов: 1 —  $V_A = V_B$ ; 2 —  $V_A = 0.7V_B$ .  $\alpha = 15^\circ$ .

В случае равенства объемов доменов полевая зависимость циркулярной магнитной проницаемости симметрична и безгистерезисна, что соответствует полевой зависимости импеданса в отсутствие подмагничивающего тока (рис. 5, кривая 1). При протекании подмагничивающего тока его циркулярное магнитное поле приводит к изменению объема доменов и, как следствие, наблюдается асимметричная зависимость циркулярной проницаемости от внешнего магнитного поля (рис. 5, кривая 2).

Таким образом, предложенная модель магнитной структуры, предполагающая геликоидальную анизотропию в приповерхностной области проволок, не только объясняет поведение импеданса во внешнем магнитном поле, но и влияние механических напряжений и подмагничивающего тока на полевые зависимости импеданса.

Регистрируемые в результате термообработки аморфных проволок изменения магнитоимпеданса обусловлены изменениями их электрических и магнитных свойств. Наблюдаемое уменьшение электросопротивления в результате термообработки при  $100^\circ\text{C}$  в течение 100 часов может быть связано с частичным снятием внутренних напряжений и уменьшением энергии межфазных границ [6, 7]. На данной стадии структурной релаксации — СР, по видимому, происходит аннигиляция «мелких» пор и дефектов, представляющих собой кластеры атомов с высокими значениями сдвиговых напряжений. В целом концентрация дефектов различного вида уменьшается.

Термообработка при температурах  $150^\circ\text{C}$  и  $200^\circ\text{C}$  в течение 100 часов приводит к росту электросопротивления. Данный факт может свидетельствовать о начале новой стадии структурной релаксации, а именно о начале процесса диффузии дефектов. Диффузия дефектов представляет собой процесс залечивания «крупных» пор, при котором происходит смещение отдельных атомов на несколько межатомных расстояний. В результате такого смещения на месте движущегося атома образуется новая пора. Движение пор и атомов приводит к существенному перераспределению атомных напряжений. Основным механизмом аннигиляции — «залечивания» пор связан с вязким течением [8]. При этом движущими силами данного процесса являются закалочные

напряжения и силы лапласовского давления, обусловленные кривизной пор и кривизной поверхности проволоки. Наличие указанных сил обуславливает движение атомов из поверхностных слоев проволоки в более глубокие слои, что эквивалентно движению пор из глубоких слоев к поверхности. Из вышесказанного можно предположить, что вторая стадия СР активизирует процесс диффузии дефектов, в результате которой дефектность глубоких слоев уменьшается, а приповерхностных — увеличивается. Процесс диффузии дефектов будет приводить к росту энергии межфазных границ и, как следствие, росту электросопротивления материала. На связь между ростом электросопротивления и выходом избыточного свободного объема указывают и результаты других работ [6].

Изменение магнитных свойств исследуемых образцов в результате обозначенных процессов структурной релаксации в первую очередь будет связано с изменением дисперсии анизотропии. Предполагая, что распределение углов отклонения локальных ОЛН от среднего направления подчиняется закону Гаусса, было получено выражение для среднего значения циркулярной магнитной проницаемости:

$$\langle \mu_\phi \rangle = 1 + \frac{M_s^2}{2K\gamma_0\sqrt{2\pi}} \int_{-3\gamma_0}^{3\gamma_0} \exp\left(-\frac{\gamma^2}{2\gamma_0^2}\right) \sin^2(\alpha + \gamma) d\gamma \quad (4)$$

где  $\alpha$  — угол отклонения средней ОЛН от циркулярного направления,  $\gamma$  — угол отклонения локальной ОЛН от среднего направления,  $\gamma_0$  — среднеквадратичное значение угла отклонения локальной ОЛН от среднего направления.

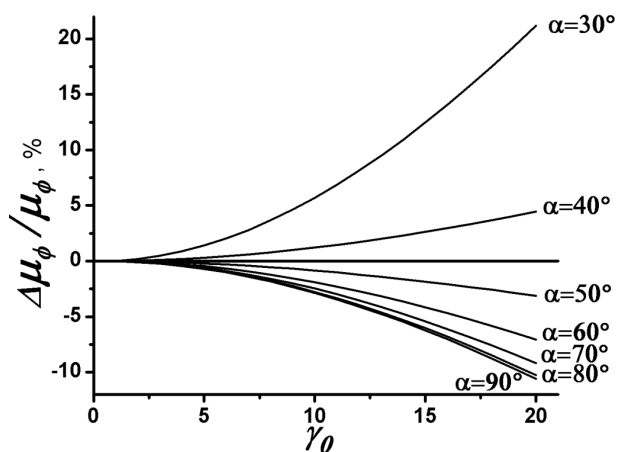


Рис. 6: Зависимости относительного изменения циркулярной магнитной проницаемости от величины угловой дисперсии анизотропии при различных углах отклонения средней ОЛН от циркулярного направления.

увеличение угловой дисперсии анизотропии в данном случае приводит к падению циркулярной проницаемости. При  $\alpha = 45^\circ$  циркулярная проницаемость не зависит от величины

Анализ результатов расчета относительного изменения циркулярной проницаемости с ростом угловой дисперсии анизотропии для разных направлений средней ОЛН показывает, что при углах отклонения  $\alpha < 45^\circ$  увеличение угловой дисперсии анизотропии приводит к росту циркулярной проницаемости, при этом рост проницаемости тем сильнее, чем меньше угол отклонения средней ОЛН от циркулярного направления (рис. 6). Отклонение средней ОЛН от циркулярного направления на угол более  $45^\circ$  меняет характер зависимости циркулярной проницаемости от дисперсии анизотропии: увеличение угловой дисперсии

угловой дисперсии анизотропии.

Изменение числа дефектов приводит к соответствующему изменению угловой дисперсии анизотропии. Вклад в импеданс образцов от слоев, где  $\alpha > 45^\circ$ , существенен на частотах переменного тока ниже  $f_p$ . В данном частотном диапазоне изменение импеданса определяется как изменениями электросопротивления, так и изменениями циркулярной магнитной проницаемости. На частотах выше  $f_p$  определяющими в изменении импеданса становятся изменения циркулярной магнитной проницаемости. Таким образом, экспериментально наблюдаемое на термообработанных при  $100^\circ\text{C}$  проволоках падение импеданса в области низких частот в основном связано с уменьшением электросопротивления. В области более высоких частот падение импеданса обусловлено преимущественно уменьшением циркулярной магнитной проницаемости, что согласуется с предположением о снижении концентрации дефектов без их пространственного перераспределения (диффузией).

Изменение импеданса в результате термообработки при  $150^\circ\text{C}$  и  $200^\circ\text{C}$  зависит от частоты переменного тока, на которой проводились измерения. Существует граничная частота, ниже которой импеданс образца, подвергнутого термообработке при указанных температурах, уменьшается, а выше — увеличивается.

Как отмечалось ранее, в результате термообработки при  $150^\circ\text{C}$  и  $200^\circ\text{C}$  начинается процесс диффузии дефектов, который приводит к росту их концентрации в области, соответствующей максимальной толщине скин-слоя в исследуемом диапазоне частот переменного тока. Возросшая концентрация дефектов в данной области проволоки должна привести к росту дисперсии анизотропии. Следовательно, на низких частотах, где вклад от областей с  $\alpha > 45^\circ$  определяющий, будет наблюдаться падение циркулярной проницаемости и, соответственно, импеданса. На более высоких частотах переменного тока, где определяющий вклад в циркулярную проницаемость дают области с  $\alpha < 45^\circ$ , рост дисперсии анизотропии должен привести к росту импеданса. Данные рассуждения хорошо коррелируют с результатами экспериментальных исследований.

В **четвертой главе** рассматриваются и обсуждаются вопросы влияния температуры на магнитоимпеданс термообработанных аморфных проволок, а также изменение температурной зависимости магнитоимпеданса под действием растягивающих напряжений и подмагничивающего тока. Все температурные исследования магнитоимпеданса проведены на аморфных проволоках состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ , предварительно подвергнутых мягкой термообработке при температуре  $150^\circ\text{C}$  в течение 100 часов. Показано, что все температурные изменения магнитоимпедансных свойств в исследованном диапазоне температур  $(22\div 130)^\circ\text{C}$  являются обратимыми.

С ростом температуры импеданс проволок уменьшается, при этом зависимость  $Z(t)$  близка к линейной (рис. 7). Также наблюдается изменение величины магнитоимпедансного эффекта, что согласуется с исследованиями [9, 10]. На частотах переменного тока ниже 4 МГц повышение температуры образца до  $130^\circ\text{C}$  приводит к появлению на зависимости  $Z(H)$  возрастающего участка.

Рост магнитоимпедансного эффекта при повышении температуры наблюдается и на более высоких частотах переменного тока. Однако с повышением частоты переменного тока температурное изменение магнитоимпедансного эффекта уменьшается. При нагреве образцов наблюдается уменьшение значения поля  $H_p$ , соответствующего максимальному значению импеданса, во всем исследованном диапазоне частот.

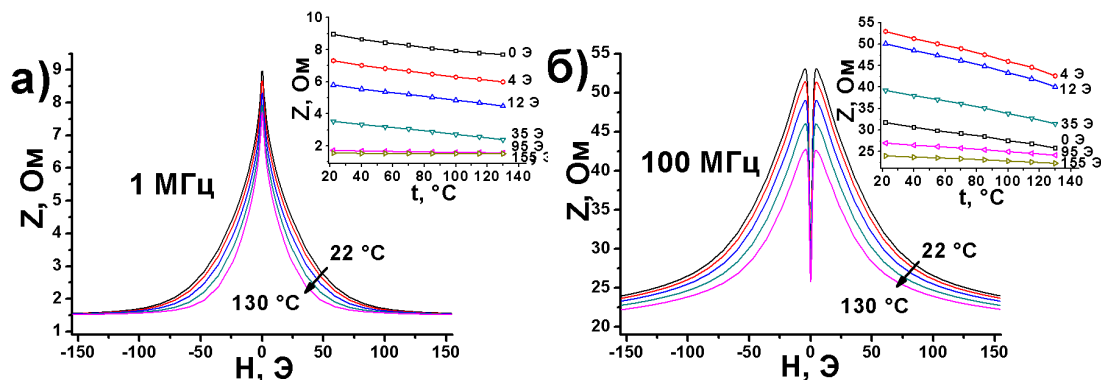


Рис. 7: Зависимости импеданса проволоки состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{V}_{15}$  от внешнего магнитного поля при разных значениях температуры на частоте пробного переменного тока: а) 1 МГц, б) 100 МГц. На вставках приведены температурные зависимости импеданса образцов при разных значениях внешнего магнитного поля.

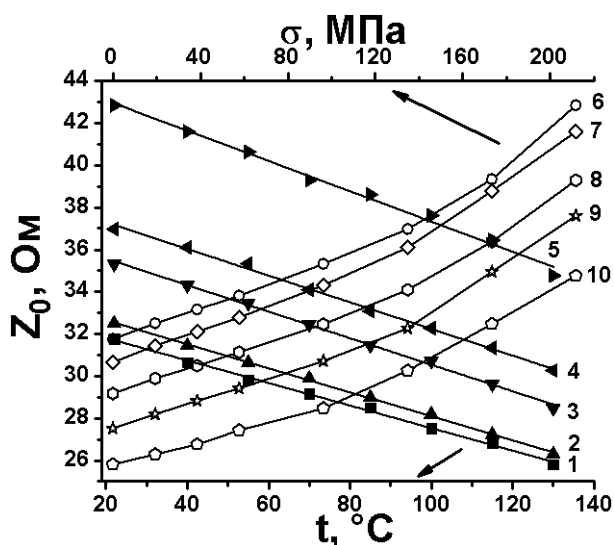


Рис. 8: Зависимости начального импеданса на частоте переменного тока 100 МГц от температуры (закрашенные маркеры) при упругих напряжениях: 1 — 0 МПа, 2 — 19.2 МПа, 3 — 96.3 МПа, 4 — 134.8 МПа, 5 — 212 МПа и начального импеданса от упругих напряжений (пустые маркеры) при температурах: 6 — 22°C, 7 — 40°C, 8 — 70°C, 9 — 100°C, 10 — 130°C.

Приложение упругих растягивающих напряжений к образцу изменяет ход температурной зависимости его импеданса. При этом характер влияния упругих напряжений на зависимость  $Z(t)$  определяется частотой переменного пробного тока, протекающего по образцу, и величиной внешнего магнитного поля. Анализ относительных температурных изменений импеданса при различных механических напряжениях в отсутствие внешнего магнитного поля показал, что упругие деформации проволок оказывают более существенное влияние на температурное изменение их импеданса в области частот переменного пробного тока от 100 кГц до 15 МГц. При этом, в данном частотном интервале во всем температурном диапазоне (22 ÷ 130)°C рост упругих напряжений вызывает падение начального импеданса. С ростом частоты пробного тока влияние

упругих напряжений на температурные зависимости импеданса уменьшается и на частоте 100 МГц температурные изменения импеданса в отсутствие механических напряжений и при напряжениях 327 МПа очень близки.

В области частот переменного пробного тока от 15 МГц до 100 МГц температурная зависимость начального импеданса  $Z_0(t)$  близка к линейной (рис. 8). В указанном частотном диапазоне воздействие упругих напряжений приводит к росту начального импеданса. Так как с повышением температуры начальный импеданс уменьшается, то это падение  $Z_0$  можно компенсировать приложением соответствующих растягивающих напряжений.

Постоянный подмагничивающий ток существенно изменяет зависимость магнитоимпедансных свойств проволок от температуры. В отсутствие внешнего магнитного поля подмагничивающий ток приводит к отклонению температурной зависимости импеданса от линейного закона и появлению двух диапазонов температур, в которых зависимости  $Z_0(t)$  имеют различный характер (рис. 9). В интервале температур от 22 °С до 85 °С на частотах переменного тока ниже 6 МГц начальный импеданс практически не зависит от температуры. Для частот переменного тока выше 6 МГц при увеличении температуры в данном интервале наблюдается слабый рост  $Z_0$ . Интервал температур от 85 °С до 130 °С характеризуется быстрым падением  $Z_0$  во всем исследованном диапазоне частот переменного тока.

Температурное поведение импеданса проволок определяется изменениями их электрических и магнитных свойств. Поэтому, наряду с исследованиями магнитоимпеданса, были проведены температурные исследования электросопротивления и индукции насыщения проволок. Если предположить, что температурные изменения импеданса обусловлены только соответствующими изменениями электросопротивления, то импеданс образцов должен возрастать при повышении температуры. Это подтверждается ростом импеданса образца при его нагреве на частоте переменного тока 100 кГц во внешнем магнитном поле напряженностью 150 Э, так как при данных условиях  $\mu_\phi$  близка к единице и ход температурной зависимости импеданса определяется соответствующей зависимостью электросопротивления. Однако данный вывод не соответствует результатам эксперимента при меньших значениях внешнего магнитного поля. Следовательно, температурное поведение импеданса во многом будет определяться и температурным изменением циркулярной магнитной проницаемости. Температурная зависимость последней определяется изменениями намагниченности и константы эффективной анизотропии.

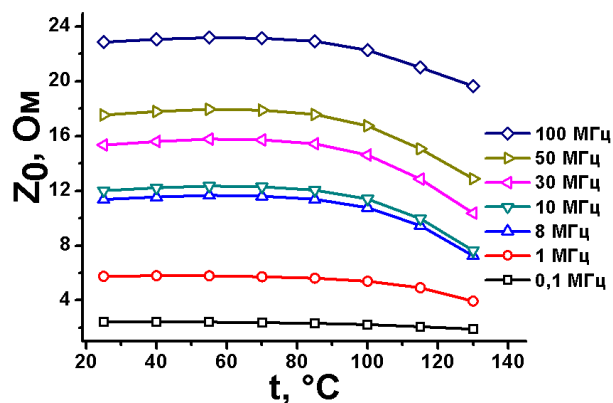


Рис. 9: Температурные зависимости начального импеданса проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  после их мягкой термообработки при температуре 150 °С в течение 100 часов при  $I_{DC} = 60$  мА.



Повышение температуры проволок приводит к падению намагниченности, что подтверждается уменьшением индукции технического насыщения, согласующимся с классическим законом Блоха. На уменьшение с ростом температуры константы эффективной анизотропии указывает уменьшение поля  $H_p$ , соответствующего максимальному импедансу во внешнем магнитном поле.

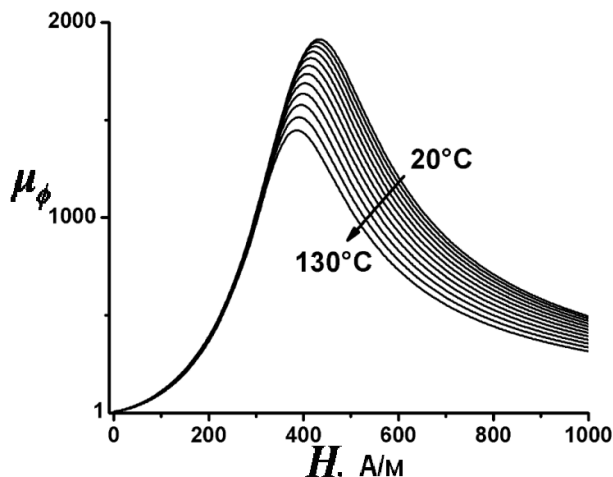


Рис. 10: Расчетные зависимости циркулярной магнитной проницаемости от внешнего магнитного поля при различных температурах,  $\alpha = 5^\circ$ .

Температурная зависимость циркулярной проницаемости определяется соотношением температурных коэффициентов намагниченности и константы анизотропии. Если с ростом температуры намагниченность уменьшается быстрее, чем константа анизотропии, то будет наблюдаться падение циркулярной проницаемости. И наоборот, если при нагреве образцов быстрее уменьшается константа анизотропии, то циркулярная проницаемость будет возрастать. Расчетные зависимости  $\mu_\phi(H)$  (рис. 10), полученные согласно (3), при использовании экспериментальных зависимостей  $M_S(t)$  и  $H_K(t)$ , согласуются с выводом о преимущественном влиянии на  $Z(t)$  температурного изменения намагниченности проволок.

Нагрев образца в присутствии подмагничивающего тока силой до 40 мА не изменяет механизм влияния циркулярного поля на полевую зависимость импеданса. Увеличение силы подмагничивающего тока более 40 мА при повышении температуры приводит к существенному изменению магнитной структуры. Анализ экспериментальных результатов позволяет заключить, что появление двух восходящих участков на зависимости  $Z(H)$  при температуре  $130^\circ\text{C}$  и силе подмагничивающего тока 60 мА связано с переходом приповерхностной области проволоки в однодоменное состояние. Причиной этого является уменьшение константы анизотропии, наблюдаемое при нагреве проволок и высокое ориентирующее воздействие на намагниченность циркулярного магнитного поля подмагничивающего тока.

В **заклучении** диссертационной работы приведены основные результаты работы и список литературы.

Константа эффективной анизотропии связана с константой магнитострикции и внутренними закалочными напряжениями [11]. Так как, повышение температуры в материалах данного класса приводит к росту константы магнитострикции [12], то наблюдаемое уменьшение константы эффективной анизотропии должно быть обусловлено существенным уменьшением, с ростом температуры, закалочных напряжений.

Температурная зависимость циркулярной проницаемости определяется соотношением темпера-

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе комплексных исследований влияния температуры, механических напряжений и подмагничивающего тока на магнитоимпеданс аморфных низкострикционных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  установлено следующее:

1. Обнаружено различающееся влияние стадий структурной релаксации на магнитоимпеданс аморфных магнитомягких ферромагнитных проволок.
2. Изменение магнитных гистерезисных, магнитоимпедансных и электрических свойств аморфных ферромагнитных проволок в результате предварительной термообработки при температурах  $100^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$  и  $200^\circ\text{C}$  объясняется в предположении двух стадий структурной релаксации. На первой стадии происходит снижение дефектности образцов за счет аннигиляции дефектов с низкой энергией активации. На второй стадии наряду с аннигиляцией дефектов активируется процесс их диффузии.
3. Высокая чувствительность магнитоимпедансных свойств аморфных ферромагнетиков к процессам структурной релаксации позволяет дифференцировать ее на отдельные стадии.
4. Наблюдаемые изменения магнитоимпедансных свойств аморфных ферромагнитных проволок с низкой положительной константой магнестрикции объяснимы в рамках модели магнитной структуры согласующейся с расчетным распределением внутренних закалочных напряжений в проволоке и предполагающей циркулярное направление намагниченности в глубинной области проволоки и геликоидальное направление намагниченности в приповерхностной области;
5. Температурное поведение импеданса ферромагнитных проволок с низкой положительной константой магнестрикции определяется конкурирующим влиянием температурных изменений намагниченности и константы эффективной магнитной анизотропии на циркулярную магнитную проницаемость.
6. Рост внешних упругих растягивающих напряжений позволяет компенсировать температурное уменьшение циркулярной магнитной проницаемости аморфных магнитомягких проволок с низкой положительной константой магнестрикции.
7. Изменение характера температурной зависимости импеданса аморфных магнитомягких ферромагнитных проволок под воздействием подмагничивающего тока связано с переходом приповерхностной области проволоки в однодоменное состояние с циркулярным направлением намагниченности.

## Список цитируемой литературы

1. Курляндская Г.В. Магниточувствительные преобразователи для неразрушающего контроля, работающие на основе гигантского магнитоимпедансного эффекта (обзор) / Г.В. Курляндская, Д. де Кос, С.О. Волчков // Дефектоскопия. — 2009. — № 6. — С. 13–42.
2. Square P.T. Amorphous wires and their applications / P.T. Square, D. Atkinson, M.R.J. Gibbs, S. Atalay // JMMM. — 1994. — V. 132. — P. 10–21.
3. Золотухин И.В. Аморфные металлические сплавы / И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин // УФН. — 1990. — Т. 160. — С. 75–110.
4. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М.:Наука, 1982. 621 с.
5. Antonov A.S. Residual quenching stresses in amorphous ferromagnetic wires produced by an in-rotating-water spinning process / A.S. Antonov, V.T. Borisov, O.V. Borisov, V.A. Pozdnyakov, A.F. Prokoshin, N.A. Usov // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1999. — V. 32. — P. 1788–1794.
6. Хоник С.В. Кинетика структурной релаксации стекла  $Pd_{40}Cu_{30}Ni_{10}P_{20}$  в объемном и ленточном состояниях по данным измерений электрического сопротивления / С.В. Хоник, В.В. Свиридов, Н.П. Кобелев, М.Ю. Язвицкий, В.А. Хоник // ФТТ. — 2007. — Т. 49. — С. 1345–1351
7. Крайнова Г. С. Влияние процессов структурной релаксации на структуру, магнитные и электрические свойства спиннингованных лент на основе железа / Г. С. Крайнова, В.И. Невмержицкий, А.М. Фролов, Т.А. Писаренко, В.В. Юдин // Фазовые переходы, упорядоченные состояния и новые материалы. — 2010. — Т. 5. — С. 1–3
8. Бетехтин В.И. Влияние отжига на избыточный свободный объем и прочность аморфных сплавов / В.И. Бетехтин, Е.Л. Гюлиханданов, А.Г. Кадомцев, А.Ю. Кипяткова, О.В. Толочко // ФТТ. — 2000. — Т. 42. — С. 1420–1424
9. Radkovskaya A. The thermal and stress effect on GMI in amorphous wires / A. Radkovskaya, A.A. Rakhmanov, N. Perov, P. Sheverdyayeva, A.S. Antonov // JMMM. — 2002. — V. 249. — P. 113–116.
10. Rakhmanov A.A. The temperature dependence of the magneto-impedance effect in the Co-based amorphous wires / A.A. Rakhmanov, N. Perov, P. Sheverdyayeva, A. Granovsky, A.S. Antonov // Sensors and Actuators.—2003.—V.106.—P.240–242.
11. Усов Н.А. Микромагнетизм мелких ферромагнитных частиц, наноструктур и аморфных проводов / Н.А. Усов // Докторская диссертация. — Троицк. — 2000. — 253 с.
12. Hernando A. Influence of the tensile stress on the magnetostriction, resistivity and magnetic anisotropy of Co-rich metallic glasses. TSRO and CSRO correlation / A. Hernando // Physica Scripta. — 1988. — V. 24. — P. 11–21.

## Список публикаций по теме диссертации

### Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ:

1. Семиров А.В. Влияние упругих напряжений растяжения на дифференциальную магнитную проницаемость аморфных ферромагнитных проволок в широком частотном диапазоне / А.В. Семиров, А.А. Гаврилюк, В.О. Кудрявцев, **А.А. Моисеев** // Письма в журнал технической физики. — 2006. — Т. 35. — С. 24–29.
2. Семиров А.В. Влияние отжига на импедансные свойства упругодеформированных магнитомягких проволок / А.В. Семиров, А.А. Гаврилюк, В.О. Кудрявцев, **А.А. Моисеев**, Д.А. Букреев, А.Л. Семенов, З.Ф. Ущаповская // Дефектоскопия. — 2007. — № 10. — С. 3–7.
3. Семиров А.В. Влияние температуры на магнитоимпеданс упругодеформированной фольги состава  $\text{Fe}_4\text{Co}_{67}\text{Mo}_{1.5}\text{Si}_{16.5}\text{V}_{11}$  / А.В. Семиров, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, **А.А. Моисеев**, А.А. Гаврилюк, А.Л. Семенов, Г.В. Захаров // ЖТФ. — 2009. — Т. 79. — № 11. — С. 25–29.
4. Семиров А.В. Автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии магнитомягких материалов / А.В. Семиров, **А.А. Моисеев**, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, А.А. Гаврилюк, Г.В. Захаров, М.С. Деревянко // Научное приборостроение. — 2010. — V. 20. — №. 2. — С. 42–45.
5. Семиров А.В. Магнитоимпедансное детектирование структурной релаксации аморфных ферромагнитных сплавов / А.В. Семиров, **А.А. Моисеев**, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, А.А. Гаврилюк, Г.В. Захаров, А.А. Гаврилюк, А.Н. Сапожников // Дефектоскопия. — 2010. — № 12. — С. 26–31.
6. Курляндская Г.В. Магнитные свойства и магнитоимпедансный эффект наноструктурных лент  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{V}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  с наведенной магнитной анизотропией / Г.В. Курляндская, А.В. Семиров, В.А. Лукшина, С.О. Волчков, Д.А. Букреев, **А.А. Моисеев** // Известия РАН. Серия физическая. — 2010. — Т. 74. — С. 1526–1528.
7. Семиров А.В. Температурная зависимость магнитных свойств и магнитоимпеданса нанокристаллических лент  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{V}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  / А.В. Семиров, Д.А. Букреев, **А.А. Моисеев**, В.А. Лукшина, Е.Г. Волкова, С.О. Волчков, Г.В. Курляндская // ЖТФ. — 2011. — V. 81. — № 3. — С. 80–84.
8. Семиров А.В. Влияние особенностей эффективной магнитной анизотропии на температурные зависимости магнитоимпеданса нанокристаллических лент  $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{16.5}\text{V}_6\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  / А.В. Семиров, Д.А. Букреев, **А.А. Моисеев**, В.А. Лукшина, Е.Г. Волкова, С.О. Волчков // Известия высших учебных заведений. Физика. — 2011. — №5. — С. 95–100.

### Другие публикации:

1. Semirov A.V. Temperature influence on field dependences of impedance of amorphous CoFeNbSiV wires / A.V. Semirov, A.A. Gavriliuk, V.O. Kudryavtsev, **A.A. Moiseev**, D.A. Bukreev // Journal of Physics: Conference Series. — 2008. — V. 98. — P. 062005.

2. Семиров А.В. Магнитная проницаемость аморфных ферромагнитных проволок в широком частотном диапазоне / А.В. Семиров, А.А. Гаврилюк, В.О. Кудрявцев, **А.А. Моисеев** // Новые магнитные материалы микроэлектроники: Сб. трудов XX международной юбилейной школы-семинара. – М.: МГУ, 2006. – С.162-164.
3. Semirov A.V. Influence of tensile stress on differential magnetic permeability of amorphous ferromagnetic wires in a wide frequency range / A.V. Semirov, A.A. Gavriliuk, V.O. Kudryavcew, **A.A. Moiseev** // Eight International Workshop on Non-Crystalline Solids: Abstract booklet. – Gijon: Departament of Physics University of Oviedo, 2006. – P. 40-41.
4. Semirov A.V. Temperature influence on field dependences of impedance of amorphous CoFeNbSiB wires / A.V. Semirov, A.A. Gavriliuk, V.O. Kudryavtsev, **A.A. Moiseev**, D.A. Bukreev // Thirteenth international conference on liquid and amorphous metals: book of abstracts: Ekaterinburg, 2007. – P. 60
5. Семиров А.В. Автоматизированный измерительный комплекс для температурных исследований эффекта гигантского магнитоимпеданса / А.В. Семиров, **А.А. Моисеев**, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, В.С. Багинский // XV Респ. Научн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов. Физика конденсированного состояния. Тезисы докл.: В 2ч. Гродно ГрГУ, 2007. – Ч.2. – С. 21–24.
6. Кудрявцев В.О. Влияние отжига на импеданс аморфных ферромагнитных проволок состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  / В.О. Кудрявцев, **А.А. Моисеев**, Д.А. Букреев // XV Респ. Научн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов. Физика конденсированного состояния. Тезисы докл.: В 2ч. Гродно ГрГУ, 2007. – Ч.2. – С. 3–5.
7. Семиров А.В. Влияние температуры на импеданс магнитомягких проволок на основе кобальта / А.В. Семиров, А.А. Гаврилюк, **А.А. Моисеев**, В.О. Кудрявцев, Д.А. Букреев // Магнитные материалы. Новые технологии: III Байкальская международная конференция: Тезисы докладов. – Иркутск, 2008. – С. 120-121.
8. Семиров А.В. Установка для исследования влияния температуры и механических напряжений на магнитоимпеданс магнитомягких материалов / А.В. Семиров, **А.А. Моисеев**, В.О. Кудрявцев, Д.А. Букреев, Г.В. Захаров // Магнитные материалы. Новые технологии: III Байкальская международная конференция: Тезисы докладов. Иркутск, 2008. – С. 140–141.
9. Semirov A.V. Temperature dependance of magnitimpedance of FeCoMoSiB foils / A.V. Semirov, A.A. Gavriliuk, D.A. Bukreev, V.O. Kudryavcew, **A.A. Moiseev** // Moscow International Symposium on Magnetism: book of abstracts. 2008. P. 124.
10. **Моисеев А.А.** Влияние упругих напряжений на магнитоимпеданс ферромагнитных проволок на основе кобальта в широком частотном диапазоне / А.А. Моисеев, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, Г.В. Захаров, М.С. Деревянко, Н.В. Васюхно // Юбилейная X Всероссийская молодежная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества: Тезисы докладов. Екатеринбург, 2009. – С. 32-33.

11. **Моисеев А.А.** Температурно-временная стабильность магнитоимпедансных характеристик магнитомягких проволок на основе кобальта / А.А. Моисеев, Д.А. Букреев, А.В. Семиров, В.О. Кудрявцев, Г.В. Захаров // Всероссийская Байкальская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по наноструктурным материалам: Сб. тезисов. – Иркутск, 2009. – С. 13-14.
12. Семиров А.В. Магнитные свойства и гигантский магнитоимпедансный эффект в нанокристаллических лентах  $Fe_{73.5}Si_{16.5}B_6Nb_3Cu_1$  / А.В. Семиров, Д.А. Букреев, В.А. Лукшина, **А.А. Моисеев**, С.О. Волчков, Г.В. Курляндская // Физические свойства металлов и сплавов: Сб. научных трудов. Екатеринбург, 2009. – С.48-52.
13. Семиров А.В. Влияние подмагничивающего тока на магнитоимпедансный эффект магнитомягких проволок на основе кобальта / А.В. Семиров, А.А. Гаврилюк, **А.А. Моисеев**, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, Г.В. Захаров // Новое в магнетизме и магнитных материалах: Сб. трудов XXI международной конференции. – М., 2009. – С. 332-334
14. Кудрявцев В.О. Влияние подмагничивающего тока на активную и реактивную компоненты импеданса аморфных проволок / В.О. Кудрявцев, **А.А. Моисеев**, Д.А. Букреев, Г.В. Захаров // Труды II Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноматериалы»: Сб. трудов. – Рязань, 2009. – С. 169-172.
15. Semirov A.V. Influence of elastic deformations on impedance properties of soft magnetic  $Co_{66}Fe_4Nb_{2.5}Si_{12.5}B_{15}$  wires annealed by DC current / A.V. Semirov, V.O. Kurdyvtsev, A.A. Gavriliuk, **A.A. Moiseev**, D.A. Bukreev // International Conference “Functional Materials”: abstracts. – Simferopol, Ukraine, 2009. – P. 96.
16. Semirov A.V. Influence of Structural Relaxation on Magnetoimpedance Properties of Amorphous Materials / A.V. Semirov, **A.A. Moiseev**, D.A. Bukreev, V.O. Kudryavtsev, M.S. Derevyanko // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM2010: Conference Proceedings. Novosibirsk, 2010. – P. 50–52.
17. Семиров А.В. Влияние химического утончения аморфных магнитомягких проволок на основе кобальта на их магнитоимпедансные свойства / А.В. Семиров, **А.А. Моисеев**, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, М.С. Деревянко // Магнитные материалы. Новые технологии: Сб. тезисов докл. IV Байкальской международной конф. Иркутск, 2010. – С. 31-32.
18. Semirov A.V. Influence of soft heat treatment on magnetoimpedance effect in amorphous ferromagnetic wires / A.V. Semirov, **A.A. Moiseev**, D.A. Bukreev, V.O. Kudryavtsev, M.S. Derevyanko, G.V. Zakharov // IV Euro-Asian symposium "Trends in magnetism": Nanospintronics: book of abstracts. Ekaterinburg, 2010. – P. 122.
19. Semirov A.V. DC-bias current influence on temperature dependence of the Co-based amorphous wires impedance / A.V. Semirov, **A.A. Moiseev**, D.A. Bukreev, M.S. Derevyanko // Moscow International Symposium on Magnetism: book of abstracts. Moscow, 2011. - P. 799.

Подписано в печать  
Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,6  
Тираж 100 экз.