

*На правах рукописи*



Деревянко Михаил Сергеевич

МАГНИТНЫЕ И МАГНИТОИМПЕДАНСНЫЕ  
СВОЙСТВА АМОРФНЫХ МАГНИТОМЯГКИХ ПРОВОДНИКОВ НА  
ОСНОВЕ КОБАЛЬТА В ОБЛАСТИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

1.3.12. Физика магнитных явлений

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Иркутск – 2024

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

Научный руководитель: Семиров Александр Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», директор Педагогического института ИГУ, заведующий кафедрой физики.

Официальные оппоненты: Аронин Александр Семенович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории структурных исследований.

Пустовалов Евгений Владиславович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», профессор департамента информационных и компьютерных систем института математики и компьютерных технологий.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург).

Защита состоится «26» апреля 2024 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.228.01 при ФИЦ КНЦ СО РАН по адресу: г. Красноярск, Академгородок, 50, строение № 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН и на сайте по адресу [http://kirensky.ru/zdoc/2024/diss\\_derevyanko\\_ms.pdf](http://kirensky.ru/zdoc/2024/diss_derevyanko_ms.pdf)

Автореферат разослан «05» марта 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.1.228.01,  
д-р физ.-мат. наук

Втюрин Александр Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность и степень разработанности темы

Магнитомягкие аморфные сплавы на основе переходных металлов обладают значительным потенциалом практического применения. Они высоко востребованы при разработке различных сенсорных устройств [1, 2], электротехнических устройств с высоким к.п.д., устройств электроники и радиопоглощающих покрытий [3]. Объем их производства постоянно увеличивается. Однако, широкое практическое применение данных материалов ограничивается температурно-временной нестабильностью их свойств. Для оптимизации свойств, в том числе для повышения температурно-временной стабильности [4], данные сплавы подвергают различным термическим постобработкам [5]. В свою очередь, термическая обработка аморфных материалов приводит к структурной релаксации, сопровождающейся изменением величины и перераспределением закалочных напряжений, возникающих при производстве аморфных материалов, а также изменением ближнего порядка в расположении атомов [6]. При этом термоиндуцированная флуктуация атомной структуры приводит к изменению таких магнитных свойств аморфных ферромагнетиков, как температура Кюри ( $T_C$ ) [7], константа магнитной анизотропии ( $K$ ), магнитострикция насыщения ( $\lambda_s$ ) [8].

При исследовании магнитоимпедансного (МИ) эффекта, заключающегося в изменении высокочастотного электрического импеданса во внешнем магнитном поле, сформировался метод магнитоимпедансной спектроскопии (MIS) [A1, A6, A7]. Он основан на анализе зависимостей электрического импеданса от внешнего магнитного поля в широком диапазоне частот переменного тока. Благодаря такому явлению, как скин-эффект, MIS позволяет оценить изменения магнитных свойств по толщине, которые происходят в результате термообработки аморфных ферромагнетиков. Поэтому данный метод является перспективным для изучения особенностей фазовых превращений, происходящих в объеме магнитомягких ферромагнетиков.

Несмотря на достаточную разработанность темы изучения аморфных магнитомягких ферромагнетиков в виде проводов и лент, представленные в рамках диссертации исследования позволяют расширить знания о связи высокочастотного электрического импеданса и МИ в области ферромагнитного фазового перехода со структурными особенностями аморфных магнитомягких материалов, вызванными вариацией элементного состава, концентрационным распределением дефектов в их объеме и термообработкой. С помощью МИ можно исследовать связь эволюции магнитной структуры с термоиндуцированными изменениями магнитных и магнитоупругих параметров в упругодеформированных магнитомягких проводниках.

**Целью** работы является изучение связи термоиндуцированного изменения магнитных свойств с температурной зависимостью импеданса и магнитоимпедансного эффекта аморфных магнитомягких лент и проводов на основе кобальта в области ферромагнитного фазового перехода и температуры смены знака константы магнитострикции.

### **Основные задачи:**

1. Разработать и изготовить универсальную температурную приставку, позволяющую проводить исследования импеданса, магнитных гистерезисных параметров и магнитострикции насыщения аморфных магнитомягких материалов при температурах ниже комнатной.
2. Изучить влияние термоиндуцированного изменения магнитных свойств на температурную зависимость импеданса и магнитоимпедансного эффекта в области ферромагнитного фазового перехода аморфных лент сплавов  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  и проводов сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ .
3. Изучить совместное влияние температуры и механических напряжений на импеданс и магнитоимпедансный эффект проводов сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  в широком температурном диапазоне.

### **Объекты исследования:**

- аморфные ленты сплавов  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$
- аморфные провода сплавов  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ .

Выбор данных объектов обусловлен тем, что в аморфном состоянии наиболее интересны сплавы на основе кобальта, так как они обладают околонулевой магнитострикцией. Вследствие этого в сплавах наблюдается малая величина магнитоупругой анизотропии и высокая магнитная проницаемость. Помимо этого аморфные сплавы на основе кобальта обладают высокой механической прочностью и коррозионной стойкостью. Добавление в сплав системы  $\text{CoFeSiB}$  хрома повышает коррозионную стойкость и термостабильность магнитных и высокочастотных электрических свойств, а добавление ниобия или тантала улучшает их механические свойства.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Высокая чувствительность метода магнитоимпедансной спектроскопии позволяет использовать его как для определения температур Кюри магнитомягких ферромагнитных сплавов, так и для изучения особенностей температурных изменений их магнитных свойств.
2. Наличие двух магнитных фаз с разной температурой Кюри в аморфном проводе сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  связано с неоднородным радиальным распределением структурных дефектов в виде избыточного свободного объема.
3. Изменение температуры Кюри аморфного провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  под воздействием термообработки связано с его диаметром, что обусловлено различными условиями закалки проводов разного диаметра, влияющими на концентрацию и размер структурных дефектов.
4. Максимум на температурных зависимостях магнитной проницаемости и магнитоимпеданса упругодеформированного аморфного провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  в диапазоне температур (150 ÷ 180) К обусловлен

переориентацией намагниченности в приповерхностной области провода от циркулярного направления к аксиальному ввиду термоиндуцированного изменения знака константы магнитострикции насыщения.

### **Научная новизна**

1. Показана возможность определения с высокой точностью температуры Кюри магнитомягких ферромагнитных сплавов по температурной зависимости их электрического импеданса на примере аморфных лент сплавов  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ ,  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  и проводов сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ .
2. Впервые обнаружено в аморфном проводе сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  наличие как минимум двух магнитных фаз, обладающих разной температурой Кюри. Методом магнитоимпедансной спектроскопии установлено, что в объеме провода разные магнитные фазы имеют разное радиальное концентрационное распределение. Возникновение данных фаз ввиду технологии получения аморфных проводов быстрой закалкой из расплава связано с неоднородным распределением по объему провода структурных дефектов в виде избыточного свободного объема, а также с их перераспределением в результате термообработки.
3. Обнаружено, что степень влияния термообработки аморфного провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  на температуру Кюри связана с его диаметром. Изменение температуры Кюри под действием термообработки больше для провода большего диаметра. Это объясняется разницей в концентрации и размерах структурных дефектов в проводах разного диаметра, возникающих при их быстрой закалке из расплава.
4. Обнаружено, что в области температуры смены знака константы магнитострикции происходит значительное изменение импеданса упругодеформированного аморфного магнитомягкого провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ . Показано, что такое поведение возникает за счет переориентации оси легкого намагничивания в приповерхностной области упругодеформированного провода от циркулярного направления к аксиальному.

**Практическая значимость работы** обусловлена тем, что магнитоимпедансный эффект (МИ) является высокочувствительным к изменению магнитной проницаемости магнитомягких проводников. В аморфных и нанокристаллических ферромагнитных сплавах воздействие внешних магнитных полей, механических напряжений и температуры оказывает существенное влияние на их магнитную проницаемость. Таким образом, на основе данных материалов и проявляющегося в них МИ эффекта можно создавать датчики магнитных полей, деформаций и температуры. Так, например, в аморфных магнитомягких лентах сплава  $\text{CoFeCrSiB}$  и проводах сплава  $\text{CoFeNbSiB}$  чувствительность импеданса к температуре в области ферромагнитного фазового перехода достигает около 10 %/К.

Также, исследуя температурную зависимость импеданса аморфных ферромагнетиков, можно с высокой точностью определять их температуру Кюри. С помощью магнитоимпедансной спектроскопии можно детектировать в них

отдельные магнитные фазы с различной температурой Кюри, концентрация которых имеет разную радиальную координату. Последнее явно наблюдается в проводах сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  в присутствии внешнего магнитного поля.

Совместное исследование влияния внешнего магнитного поля и упругих растягивающих напряжений на импеданс вышеописанных сплавов позволяет определять их константу магнитострикции. Проводя данные исследования в широком температурном диапазоне, можно определить температуру компенсации магнитострикции, как это было показано в случае аморфного провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ .

Кроме практической значимости, представленные результаты исследований имеют фундаментальную значимость. Такие исследования позволят расширить и углубить знания о связи высокочастотного электрического импеданса и МИ в области ферромагнитного фазового перехода со структурными особенностями аморфных магнитомягких материалов, вызванными вариацией элементного состава, концентрационным распределением дефектов в их объеме и термообработкой.

### **Методология и методы исследований**

В работе использовались современные методы исследования и сертифицированное оборудование.

Основу метода магнитоимпедансной спектроскопии составлял прецизионный анализатор импеданса Agilent 4294A. Магнитные свойства исследовались с помощью индукционной магнитометрии, а также вибрационного магнитометра Lake Shore (Уральский Федеральный Университет имени первого президента РФ Б.Н. Ельцина). Магнитострикция измерялась методом малоуглового вращения намагниченности (SAMR).

Рентгеноструктурные исследования лент и проводов проведены в  $\text{Cu-K}\alpha$  излучении с помощью дифрактометров PHILIPS X'PERT PRO и PANalytical X'Pert PRO в Уральском Федеральном Университете имени первого президента РФ Б.Н. Ельцина.

### **Достоверность полученных результатов**

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в диссертации, получены с использованием апробированных методик на высокоточных приборах и установках. Полученные результаты и их интерпретация не противоречат имеющимся экспериментальным и теоретическим данным других исследователей, опубликованных в рецензируемых изданиях.

### **Апробация результатов**

Материалы диссертационной работы были представлены на 24 научных международных и всероссийских конференциях, школах и семинарах: International Conference and Seminar on Micro/Nano Electron Devices EDM'2010 (Erlagol, 2010); Открытая школа-конференция стран СНГ Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы (УМЗНМ) (УФА, 2010); Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии» (Иркутск, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018, 2023); Moscow International Symposium on

Magnetism (Moscow, 2011, 2014, 2017); II Международная научно-техническая конференция “Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2012)” (Тольяти, 2012); 22-я и 23-я Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Астрахань, 2012), (Москва, 2018); Всероссийская школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (СПФКС) (Екатеринбург, 2012, 2013, 2015); V, VI, VII и VIII Euro-Asian symposium “Trends in MAGnetism”: Nanomagnetism (Владивосток, 2013), (Красноярск, 2016), (Екатеринбург, 2019), (Казань, 2022); VI Международная школа «Физическое материаловедение» (Новочеркасск, 2013); International Baltic conference on magnetism: focus on biomedical aspects (Светлогорск, 2015); XIII Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2016); International Baltic conference on magnetism: focus on functionalized magnetic structures for energy and biotechnology (Светлогорск, 2017, 2023).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 27 работ, из них 12 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией. Из них 11 статей входят в международные базы научного цитирования Web of Science и Scopus. Остальные работы представлены в сборниках трудов международных и всероссийских конференций.

### **Личный вклад автора**

Все основные результаты были получены лично автором. Выбор направления исследования, формулировка задач и обсуждение результатов проводилось совместно с руководителем. Экспериментальные исследования и обсуждение их результатов проведены совместно с соавторами работ в лаборатории физики магнитных явлений кафедры физики Педагогического института, а также на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов Уральского Федерального Университета.

Работа была частично поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 12-02-16090-моб\_з\_рос, № 12-02-31170-мол\_a и № 16-32-50167-мол\_нр), проектом Минобрнауки России на выполнение научно-исследовательских работ № 3.1941.2017/4.6, а также грантом для поддержки научно-исследовательской работы аспирантов и молодых сотрудников ИГУ (091-15-213).

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 118 страниц, включая 51 рисунок. Список литературы включает 192 наименования.

### **Основное содержание работы**

**Первая глава** состоит из реферативного обзора результатов исследований, близких к теме диссертации. Рассматривается влияние внешнего магнитного поля, растягивающих напряжений и температуры на высокочастотный магнитоимпеданс и магнитные свойства аморфных магнитомягких

ферромагнетиков на основе железа и кобальта. Отдельное внимание уделяется рассмотрению связи магнитных свойств (в особенности температуры Кюри) и структуры сплава с элементным составом и скоростью закалки при получении материалов в виде проводов и лент. Данные параметры во многом определяют структурные [9] и магнитные [10, 11] характеристики, а также связанный с ними высокочастотный магнитоимпеданс [12, 13] аморфных ферромагнетиков, проявляющий высокую чувствительность к внешним воздействиям.

Рассматриваются работы, посвященные изучению связи дефектности аморфных быстрозакаленных сплавов с их магнитными, структурными и механическими характеристиками. Эволюция дефектов, происходящая при воздействии температуры на магнитомягкие аморфные сплавы, приводит к изменению структурной флуктуации [14] и магнитных свойств [15].

Приводится описание ориентационного фазового перехода (ОФП), относящегося к типу «порядок-порядок». Данный переход характерен для магнитных материалов с кристаллической структурой и характеризуется изменением ориентации магнитных моментов относительно кристаллографических осей под действием внешних факторов (температура, давление, магнитное поле) [16]. Ввиду наличия в аморфных ферромагнетиках магнитной анизотропии, имеющей, преимущественно, магнитоупругую природу, воздействие температуры может привести к переориентации намагниченности (ОФП) за счет изменения магнитоупругих свойств.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальных методик [A1, A7], с помощью которых получены результаты исследований. Разработанный метод магнитоимпедансной спектроскопии позволяет проводить исследования отдельного и совместного влияния внешнего магнитного поля, растягивающих напряжений и температуры [A3] на импеданс аморфных магнитомягких ферромагнетиков различной геометрической конфигурации [A6]. Разработанная температурная приставка позволяет проводить исследования при температурах ниже комнатной, что расширяет границы исследований. Методы индукционной магнитометрии и малоуглового вращения намагниченности (SAMR) позволяют исследовать магнитные характеристики, в том числе при различных температурах [A8].

**Третья глава** посвящена изучению влияния термоиндуцированного изменения магнитных свойств на температурную зависимость импеданса и магнитоимпедансного эффекта аморфных лент сплавов  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  [A2, A4]. Ленты были получены методом быстрой закалки из расплава на вращающийся барабан в ИФМ УрО РАН. Данные объекты выбраны ввиду одинаковых условий их изготовления, что позволило добиться идентичной ширины (2 мм) и толщины (20 мкм). Исследования структуры методом рентгеновской дифракции подтверждают аморфность лент обоих составов (*Рисунок 1а*).

Показано, что температурное изменение импеданса (термоимпедансный эффект, рассчитанный по формуле:  $(\Delta Z/Z)_T = 100\% \cdot [Z(T) - Z(T_{max})]/Z(T_{max})$ , где  $Z(T)$  – модуль импеданса, измеренный при температуре  $T$ , а  $Z(T_{max})$  – модуль импеданса, измеренный при максимальной температуре  $T_{max}$ ) лент



обоих составов испытывает сильное изменение в области ферромагнитного фазового перехода (Рисунок 2). Зависимости хорошо коррелируют с температурными зависимостями намагниченности лент (Рисунок 1б), полученными на вибрационном магнитометре во внешнем магнитном поле, напряженностью около 8 кА/м.

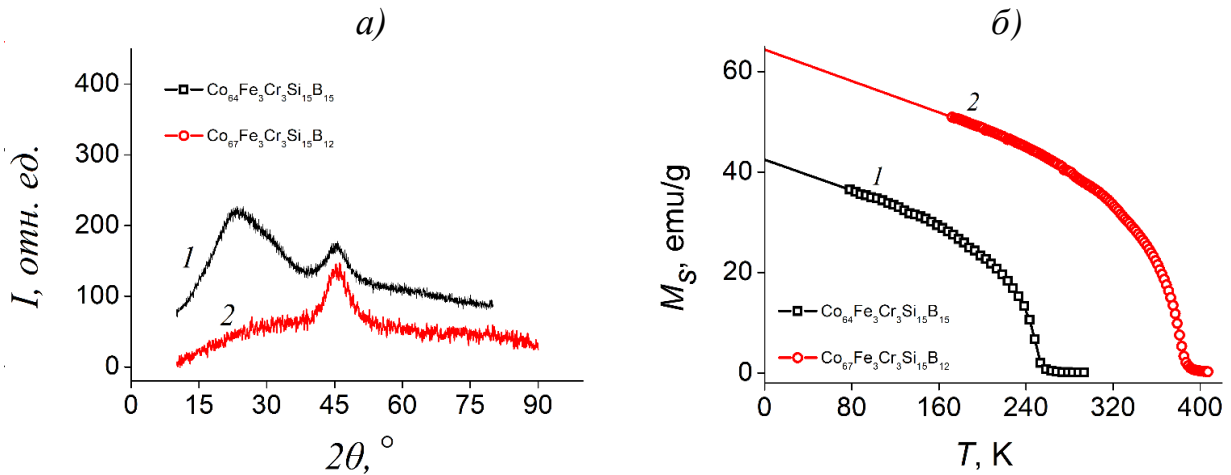


Рисунок 1. Дифрактограммы (а) и температурные зависимости намагниченности (б) (линии отображают результат экстраполяции) аморфных лент сплавов: 1 —  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ , 2 —  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ .

Сравнительный анализ зависимостей  $(\Delta Z/Z)_T(T)$  с температурными зависимостями намагниченности лент  $M_S(T)$  (Рисунок 1б) показал возможность использования зависимостей модуля импеданса и его компонент от температуры для высокоточного детектирования ферромагнитных фазовых переходов.

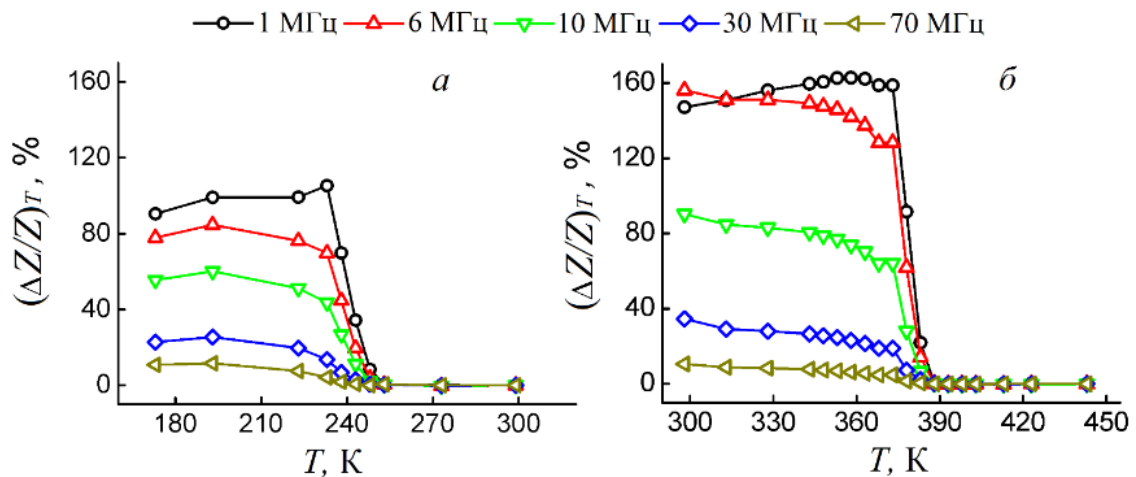


Рисунок 2. Температурные зависимости приведенного импеданса лент сплавов: а —  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ , б —  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ . Зависимости получены на частотах переменного тока 1, 6, 10, 30 и 70 МГц.

Так, на примере ленты сплава  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$  можно показать, что температурные зависимости вторых производных намагниченности, модуля и компонент импеданса пересекают ось абсцисс практически в одном и том же значении температуры (Рисунок 3).

Анализ основных факторов, определяющих температуру Кюри аморфных ферромагнитных сплавов приводит к выводу об определяющем влиянии ближнего порядка на различие  $T_C$  в сплавах  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ .

Причиной этого является вариация величины обменного взаимодействия между атомами металла вследствие изменения композиционного (химического) и топологического ближних порядков [17].

Изменение ближнего порядка обусловлено вариацией содержания атомов Со и В. Ожидается, что увеличение числа ферромагнитных атомов Со приведет к увеличению обменного взаимодействия в сплаве в целом, а, следовательно, и к увеличению температуры Кюри.

Стоит отметить, что для аморфной структуры характерно наличие дефектов, приводящих к структурным флуктуациям [18], которые также могут оказывать влияние на  $T_C$ . Наибольшую концентрацию имеют, как правило, дефекты в виде нанопор, формирующиеся при быстрой закалке расплава [19]. Однако в случае лент величина и концентрация дефектов, вероятно, сопоставима ввиду одинаковых условий их изготовления.

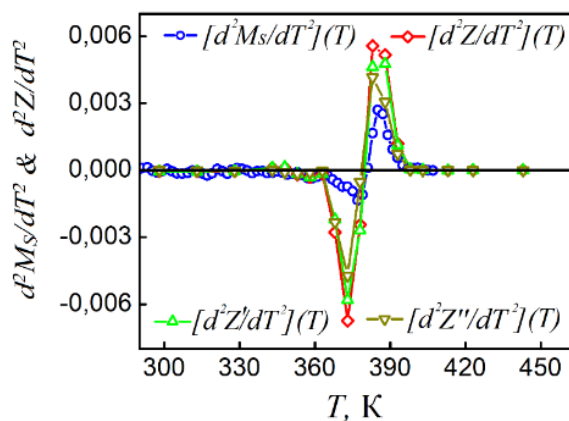


Рисунок 3. Температурные зависимости вторых производных намагниченности, модуля импеданса и его компонент по температуре (см. легенду) для лент сплава  $Co_{67}Fe_3Cr_3Si_{15}B_{12}$ .

подвергались термообработке при температуре 523 К в течение 5 часов. Рентгеноструктурные исследования показали, что в результате термообработки данный материал остается аморфным (Рисунок 4). В представленных исследованиях многократное термоциклирование в пределах исследуемого интервала температур показало отсутствие необратимых изменений импеданса образцов, подвергнутых термообработке.

При исследовании температурных зависимостей высокочастотного импеданса данных проводов с низкой положительной константой магнитострикции выявлены некоторые особенности [A5].

Для оценки влияния дефектов на температуру Кюри, являющуюся чувствительной к структурной флуктуации, были выбраны аморфные провода сплава  $Co_{66}Fe_4Nb_{2,5}Si_{12,5}B_{15}$  [A10, A11]. диаметром 180 мкм, полученные методом быстрой закалки из расплава в ЦНИИ ЧЕРМЕТ им. Л. П. Бардина. Выбор проводов обусловлен тем, что их магнитная и атомная структура является более неоднородной в радиальном направлении по сравнению с лентами. Это происходит из-за неоднородного процесса застывания провода, приводящего к возникновению разных закалочных напряжений в центральной части провода и оболочке [20]. Исследуемые провода

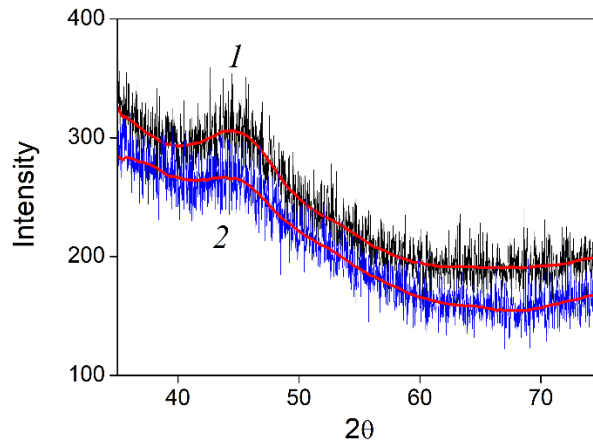


Рисунок 4. Дифрактограммы аморфного провода  $Co_{66}Fe_4Nb_{2,5}Si_{12,5}B_{15}$ : 1 — в исходном состоянии, 2 — после термообработки при 523 К.

Так, на частоте 100 кГц рост температуры приводит сначала к падению импеданса, продолжающемуся до  $T = 415$  К, а затем к его росту, заканчивающемуся при  $T = 455$  К (Рисунок 5а, кривая 1). Это происходит из-за того, что сначала вклад температурного уменьшения намагниченности преобладает над вкладом температурного уменьшения константы анизотропии, в результате чего наблюдается монотонное уменьшение импеданса. При дальнейшем повышении температуры происходит обратное: вклад температурного уменьшения константы анизотропии в импеданс становится преобладающим над вкладом температурного уменьшения намагниченности, т.е. наблюдается эффект Гопкинсона. С повышением частоты участок, на котором наблюдается рост импеданса, нивелируется. Дальнейший рост температуры выше 455 К приводит к резкому падению импеданса (Рисунок 5а). Данное резкое уменьшение  $Z$  продолжается до температуры около 470 К, после чего отношение  $dZ/dT$  начинает расти, а по достижению  $T = 489$  К становится близко к нулю, и импеданс не изменяется.

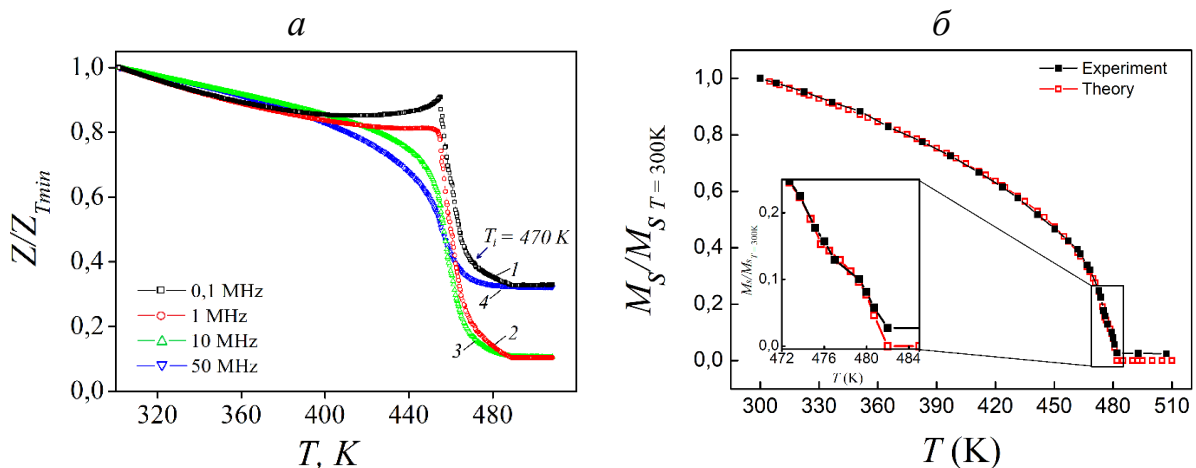


Рисунок 5. а – Температурные зависимости импеданса аморфного провода  $Co_{66}Fe_4Nb_{2,5}Si_{12,5}B_{15}$ , полученные на частотах переменного тока: 1 – 100 кГц, 2 – 1 МГц, 3 – 10 МГц, 4 – 50 МГц; б – относительная температурная зависимость намагниченности аморфного провода сплава  $Co_{66}Fe_4Nb_{2,5}Si_{12,5}B_{15}$ .

При приложении аксиального внешнего магнитного поля на температурных зависимостях импеданса на низких частотах в области 470 К наблюдается

участок (изгиб зависимости), на котором температурное приращение импеданса уменьшается и достигает нулевого значения с ростом  $H$  (Рисунок 6а). Данное явление может быть связано либо с наличием в проводе разных областей с отличающимися направлениями и величинами (константами) магнитной анизотропии, либо существованием как минимум двух магнитных фаз, имеющих различную температуру Кюри.

Отметим, что магнитная структура исследуемого провода имеет преимущественно циркулярно намагниченный kern и оболочку, в которой выделяют две области с разным направлением анизотропии: аксиальную и геликоидальную [21]. Геликоидальная анизотропия наблюдается в приповерхностном слое.

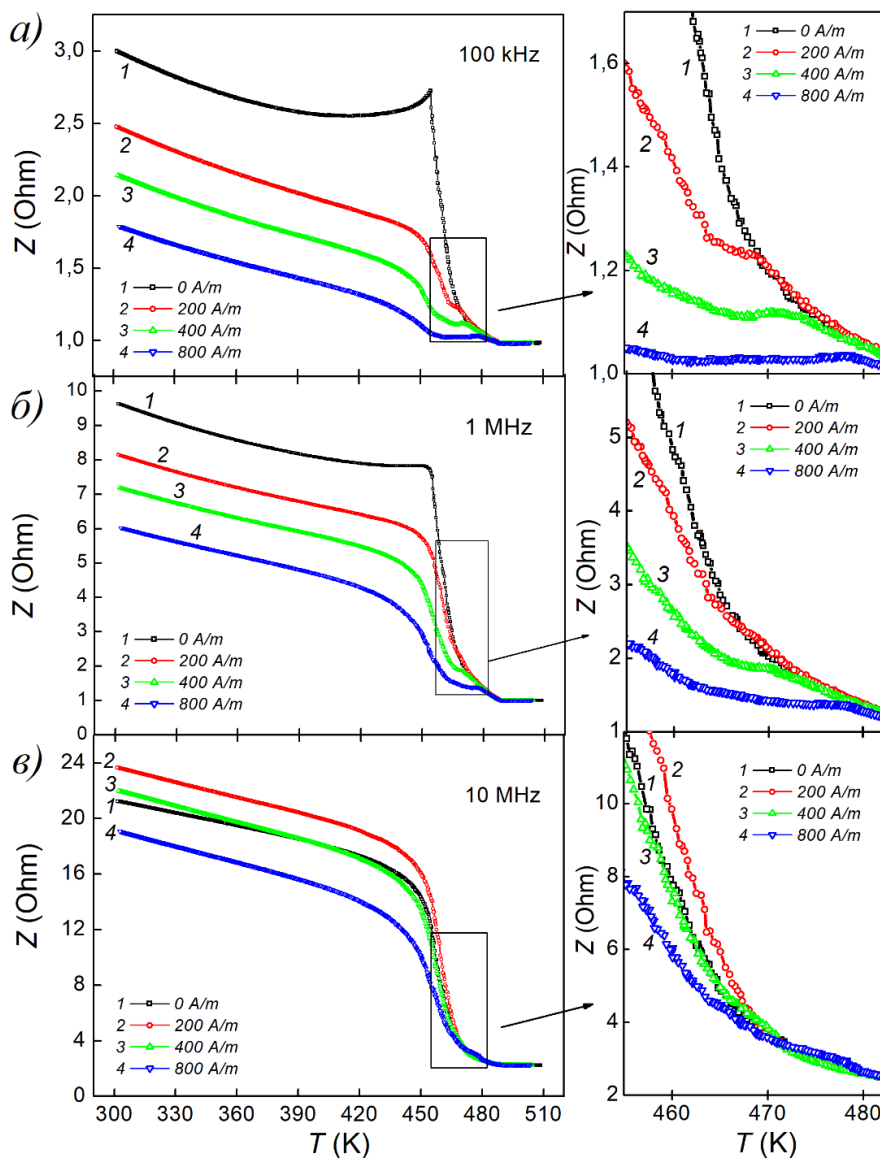


Рисунок 6. Температурные зависимости импеданса аморфного провода  $Co_{66}Fe_4Nb_{2.5}Si_{12.5}B_{15}$ , полученные в магнитных полях 0, 200, 400 и 800 А/м на частотах переменного тока: а) 100 кГц, б) 1 МГц, в) 10 МГц.

Действие внешнего магнитного поля на провод приводит к исчезновению возрастающего участка на температурной зависимости импеданса, полученной на частоте 100 кГц (Рисунок 6а). Это можно объяснить тем, что намагниченность

в керне провода под действием внешнего поля меняет ориентацию с циркулярного направления на аксиальное.

Таким образом, влияние разных областей в проводе с отличающимися направлениями магнитной анизотропии (в случае, когда  $H = 0$ ) на возникновение изгиба на температурной зависимости импеданса можно исключить. Следовательно, причиной возникновения изгиба зависимости может являться наличие как минимум двух магнитных фаз в исследуемом проводе.

Исследования температурной зависимости намагниченности исследуемых проводов показали, что вблизи температуры 478 К наблюдается слабовыраженный изгиб (*Рисунок 5б*). Экспериментальная температурная зависимость относительной намагниченности хорошо аппроксимируется в рамках модели двухфазного ферромагнетика. Согласно данной модели, температурная зависимость намагниченности может быть представлена следующим выражением [22]:

$$M_S(T) = \sum_{i=1}^2 v_i M_{S0i} \left(1 - \frac{T}{T_{Ci}}\right)^{\beta_i}, \quad (4)$$

где  $v_i$ ,  $M_{S0i}$ ,  $T_{Ci}$ ,  $\beta_i$  – объемная доля, намагниченность при 0 К, температура Кюри и критический показатель  $i$ -ой фазы соответственно.

Наличие областей провода с разными магнитными фазами хорошо согласуется с тем, что с повышением частоты переменного, когда скин-эффект проявляется сильно, область на зависимостях  $Z/Z_{Tmax}(T)$ , где температурное изменение импеданса проявляется слабо, нивелируется (*Рисунок 6*).

Причинами возникновения различных магнитных фаз может являться радиальное распределение дефектов в аморфной структуре провода. Исходно, неравномерному распределению атомов по объему провода, приводящему к вариации ближнего порядка в расположении атомов, способствуют значительные внутренние напряжения, возникающие при его получении методом быстрой закалки из расплава. Возникающие закалочные напряжения неравномерно распределены по объему провода. Внутренняя часть провода оказывается радиально растянутой, а приповерхностный слой циркулярно сжат [20]. Кроме этого, на вариации композиционного ближнего порядка, в основном определяющего температуру Кюри, может сказываться многокомпонентность сплава, в следствие чего может происходить так называемое расслоение аморфной фазы [23]. Данное расслоение может являться одной из причин формирования различных нанокристаллов при нанокристаллизации многокомпонентных систем, происходящей при высокотемпературном отжиге [24]. В нашем случае термообработка проводов проводилась при температуре много ниже температуры кристаллизации.

Основная разновидность дефектов, относящаяся к избыточному свободному объему [25], – нанопоры, характерна для аморфного состояния и также имеет неоднородное радиальное распределение [26].

Исследуемые провода были подвергнуты термообработке при 520 К в течение 5 часов. В ходе происходящей структурной релаксации активизируется

процесс диффузии дефектов [27], в результате которой дефектность внутренней области провода уменьшается, а приповерхностной – увеличивается [9].

Так как основу дефектов представляют области с увеличенным межатомным расстоянием (нанопоры), то это приводит к изменению обменного взаимодействия. В рамках классической теории Кюри-Вейса величина обменного взаимодействия определяет характерное значение температуры Кюри. В связи с отличием обменного интеграла в приповерхностном слое и во внутренней области провода существование нескольких магнитных фаз с отличающимися значениями температуры Кюри становится возможным.

Эволюцию дефектов в аморфных проводах сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ , происходящей при его термической обработке можно оценить исходя из высокочастотных исследований импеданса в области ферромагнитного фазового перехода.

Известно, что скорость закалки аморфных сплавов влияет на концентрацию и размеры дефектов [26]. В свою очередь, чем выше скорость закалки, тем меньше диаметр провода. Тогда вариации концентрации и размеров дефектов, а также их неоднородное распределение в объеме провода, приведет к структурным флуктуациям, что отразится на флуктуации обменного взаимодействия и, как следствие, изменении температуры Кюри. В ходе проверки данного вывода были проведены дополнительные температурные исследования магнитных и высокочастотных электрических свойств аморфных проводов диаметром 150 мкм, имеющих тот же состав, что и провода диаметром 180 мкм. Провода диаметром 150 мкм подвергались идентичной термообработке, что и в случае проводов диаметром 180 мкм.

Обнаружено, что в исходно полученных проводах температура Кюри по крайней мере одной из магнитных фаз зависит от диаметра, что хорошо прослеживается на *рисунке 7а*.

После термообработки различие температур Кюри становится более существенным и наблюдается во всем объеме провода (*Рисунок 7б*), что также подтверждается температурными зависимостями их намагниченности (*Рисунок 8*).

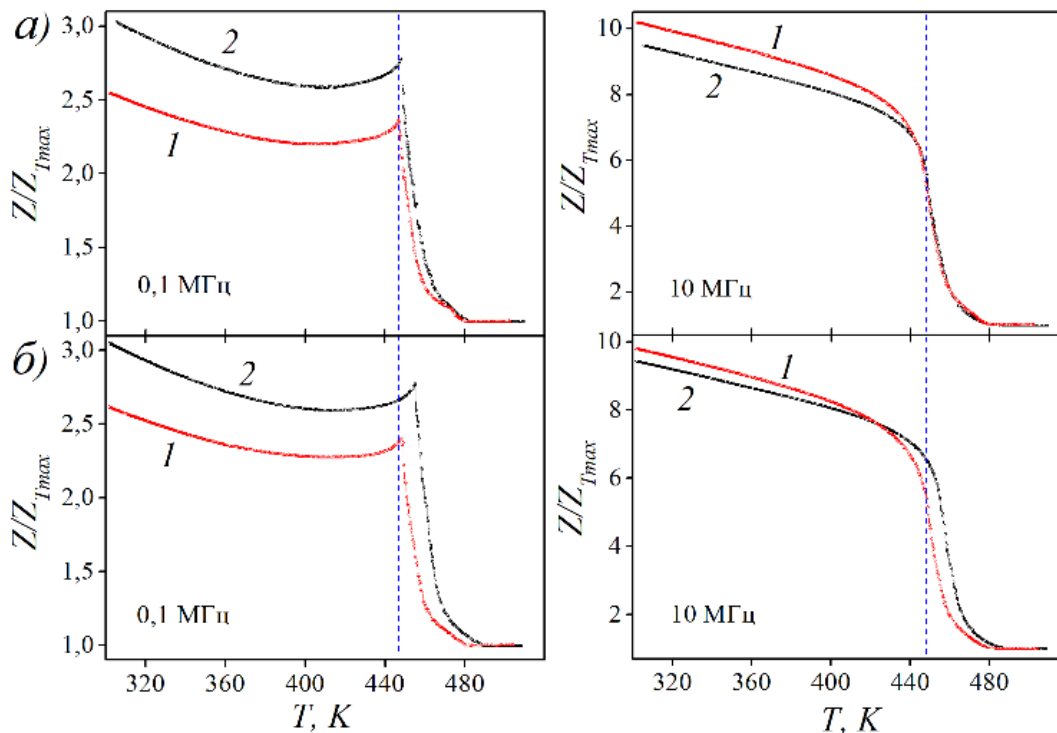


Рисунок 7. Температурные зависимости приведенного значения импеданса проводов  $Co_{66}Fe_4Nb_{2.5}Si_{12.5}B_{15}$  диаметрами 150 мкм (кривая 1) и 180 мкм (кривая 2). Зависимости получены при частотах переменного тока 0,1 и 10 МГц до термообработки – а (верхний ряд) и после термообработки – б (нижний ряд).

Обнаруженная разница температур Кюри в проводах с разным диаметром, усиливающаяся после термообработки может быть объяснена в рамках модели (описана выше) влияния дефектов на магнитные свойства провода. Согласно ей, величина обменного взаимодействия, а, следовательно, температура Кюри должна быть ниже в проводе меньшего диаметра, что и наблюдается экспериментально.

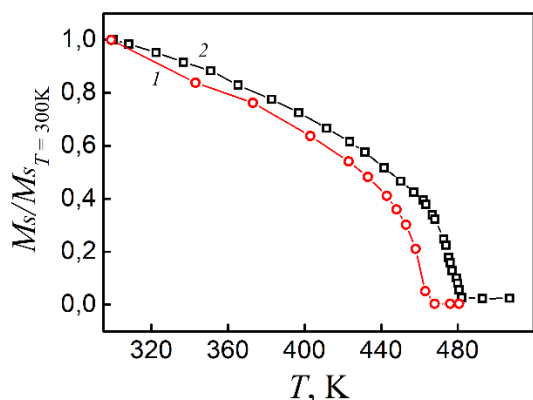


Рисунок 8. Температурные зависимости приведенной намагниченности термообработанного аморфного провода состава  $Co_{66}Fe_4Nb_{2.5}Si_{12.5}B_{15}$  диаметром: 1 – 150 мкм и 2 – 180 мкм.

Можно предположить, что, ввиду наличия в проводах меньшего диаметра большего числа мелких нанопор, процесс коалесценции (объединение более мелких нанопор) в них будет превалировать в процессе термообработки [11, 20].

В проводах большего диаметра интенсивнее будут происходить процессы «высвобождения» и «залечивания» дефектов. Тогда в проводах меньшего диаметра следует ожидать большей структурной флуктуации.

Следовательно, термообработка проводов диаметром 180 мкм приведет к большему уменьшению дефектности и структурной флуктуации, чем в проводах

диаметром 150 мкм, а значит и температура Кюри в них изменится больше. Данный вывод хорошо согласуется с экспериментальными данными (Рисунок 7).

В четвертой главе рассматривается совместное влияние температуры и упругих растягивающих напряжений на магнитоимпеданс аморфного магнитомягкого провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  [A9]. Образы получены методом быстрой закалки из расплава в ЦНИИ ЧЕРМЕТ им. Л. П. Бардина. Диаметр составлял 130 мкм, а длина 30 мм. Магнитоимпедансный эффект исследовался в магнитных полях  $H$  напряженностью до 12 кА/м [A12]. Внешнее магнитное поле и пробный переменный ток были ориентированы вдоль длины образца.

Обнаружено, что при температурах 120 и 140 К рост растягивающих напряжений,  $\sigma$ , приводит к увеличению восходящего участка на магнитолевых зависимостях магнитоимпедансного эффекта (МИ). При этом максимум на зависимостях  $\Delta Z/Z(H)$  под действием  $\sigma$  смещается в область больших значений напряженности внешнего магнитного поля (Рисунок 9а).

В интервале (180 – 300) К создание механических растягивающих напряжений в образце приводит к тому, что восходящий участок на зависимостях  $\Delta Z/Z(H)$  исчезает (Рисунок 9б).

Из модели когерентного вращения намагниченности под действием растягивающих напряжений следует, что смена характера влияния растягивающих напряжений на зависимости импеданса от внешнего магнитного поля, происходящая в температурном интервале (160 – 180) К возможна при изменении знака константы магнитострикции с отрицательного на положительный.

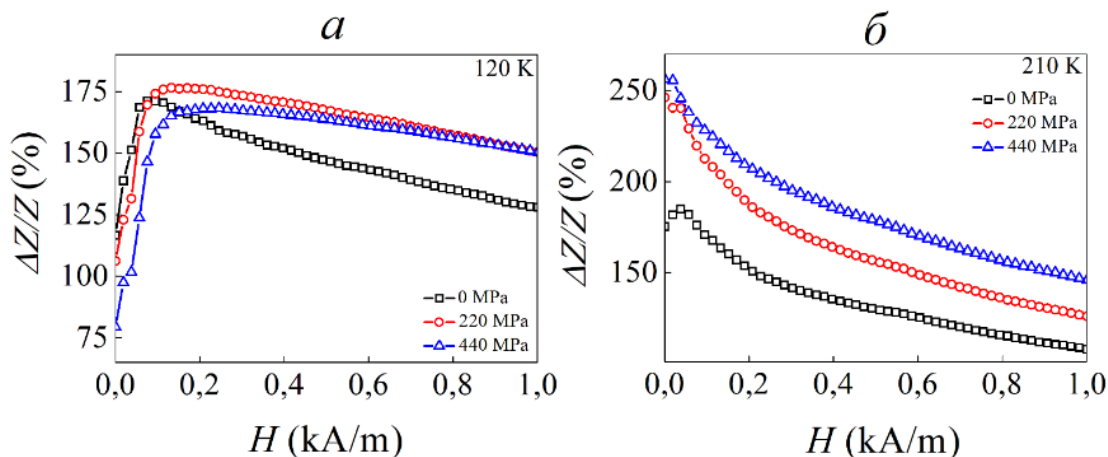


Рисунок 9. Магнитолевые зависимости МИ аморфных проводов сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ . Зависимости получены на частоте 100 МГц при температурах 120 К (а) и 210 К (б), а также упругих растягивающих напряжениях 0, 300 и 440 МПа (см. легенду).

Данный вывод подтвержден экспериментальным исследованием температурной зависимости магнитострикции насыщения методом малоуглового вращения намагниченности (SAMR) (Рисунок 10).

Таким образом, в области температуры смены знака константы магнитострикции происходит термоиндуцированный ориентационный фазовый



переход, заключающийся в переориентации намагниченности в приповерхностной области упругодеформированного провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ .

Циркулярная магнитная проницаемость,  $\mu_\phi$ , в приповерхностной области упругодеформированного провода должна претерпевать значительное температурное изменение вблизи ориентационного фазового перехода [28].

Расчет температурных зависимостей  $\mu_\phi$  для различных ориентаций оси легкого намагничивания (ОЛН) осуществлялся в рамках модели когерентного вращения намагниченности с использованием экспериментально полученных температурных зависимостей намагниченности,  $M_S(T)$ , магнитострикции,  $\lambda_S(T)$  и константы эффективной анизотропии,  $K(T)$ . На рисунке 11 представлены температурные зависимости  $\mu_\phi$ , приведенной к значению, полученному при  $T=120$  К, рассчитанные для разных значений  $\sigma$  и углов отклонения ОЛН от циркулярного направления,  $\alpha$ .

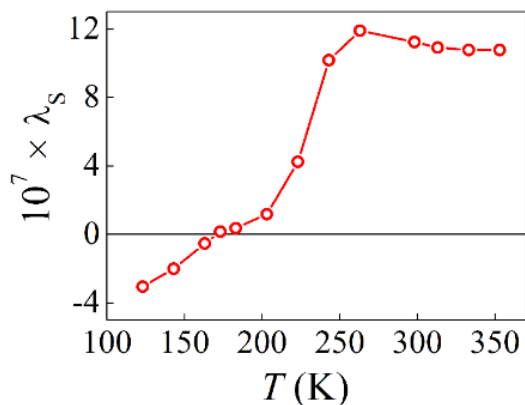


Рисунок 10. Зависимость константы магнитострикции насыщения аморфного провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  от температуры.

Видно, что направление ОЛН отражается на зависимостях  $\mu_\phi / \mu_\phi^{T=120}(T)$ : чем больше угол  $\alpha$ , т.е. чем меньше циркулярная составляющая ОЛН, тем при меньшей температуре наблюдается максимум проницаемости (Рисунок 11). В случае, когда  $\alpha = 65^\circ$ , максимум проницаемости наблюдается вблизи температуры компенсации магнитострикции провода (Рисунок 11б).

Так как ориентационные фазовые переходы сопровождаются аномалиями физических свойств, к которым можно отнести резкий рост магнитной проницаемости [28], то можно заключить, что в исследуемых проводах

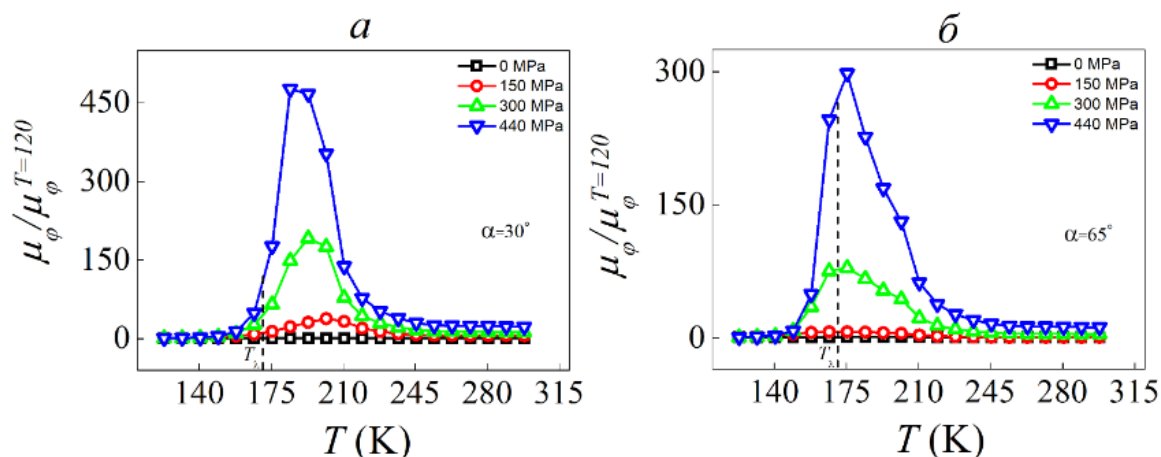


Рисунок 11. Температурные зависимости приведенной циркулярной магнитной проницаемости аморфного провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ , рассчитанные для растягивающих напряжений 0, 150, 300 и 440 МПа и углов  $\alpha=30^\circ$  и  $\alpha=65^\circ$ . ориентационный фазовый переход будет наблюдаться в области максимума

циркулярной магнитной проницаемости на ее температурной зависимости. Соответствующая максимуму температура будет являться температурой фазового перехода,  $T_{ФП}$ .

В исследуемом проводе ориентационный фазовый переход наблюдается в диапазоне температур (160 – 180) К, когда намагниченность поворачивается от геликоидального направления к аксиальному. При этом на магнитоимпедансной зависимости упругодеформированного провода с ростом  $T$  исчезает восходящий участок в малых магнитных полях и зависимость становится ниспадающей (Рисунок 12а).

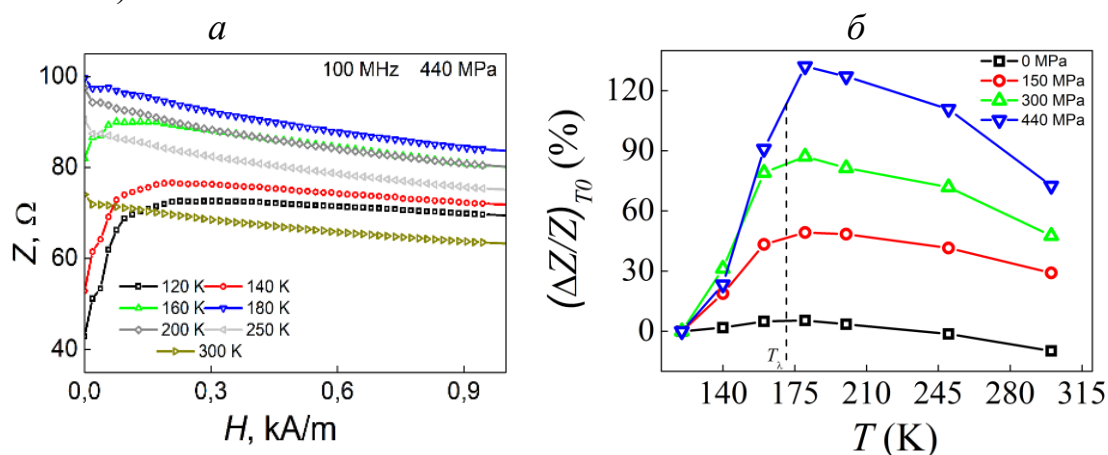


Рисунок 12. Магнитополевые (а) и температурные (б) зависимости импеданса аморфного провода сплава  $Co_{66}Fe_4Ta_{2,5}Si_{12,5}V_{15}$ .

Экспериментальная зависимость приведенного импеданса упругодеформированного аморфного провода от температуры повторяет ход расчетной зависимости  $\mu_{\phi} / \mu_{\phi}^{T=120}(T)$ . При этом рост растягивающих напряжений приводит к увеличению температурного отклика импеданса (Рисунок 12б), что в полной мере коррелирует с температурным откликом циркулярной магнитной проницаемости (Рисунок 11).

Таким образом, изменение характера влияния температуры на импеданс исследуемого провода хорошо согласуется с расчётной температурной зависимостью циркулярной магнитной проницаемости, полученной в рамках модели термоиндуцированной смены знака константы магнитострикции.

## Основные результаты

1. Показана возможность определения с высокой точностью температуры Кюри ( $T_C$ ) ферромагнитных аморфных лент и проводов, исходя из их экспериментальных температурных зависимостей магнитоимпеданса. Температуры Кюри аморфных лент сплавов  $\text{Co}_{64}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  и  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Cr}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{12}$ , полученные из температурных зависимостей намагниченности и магнитоимпеданса согласуются и составляют 250 и 380 К, соответственно.
2. Температурные зависимости намагниченности и магнитоимпеданса в проводе аморфного сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ , подвергнутого термообработке при 523 К в течение 5 часов, характеризуются особенностями, указывающими на формирование двух фаз с различными температурами Кюри (475 и 481 К). Исследования температурного поведения магнитоимпеданса при различных частотах указывают на локализацию фазы с более низкой температурой Кюри в приповерхностной области провода.
3. Установлено, что температуры Кюри проводов аморфного сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  диаметрами 150 и 180 мкм различны. Термообработка проводов приводит к разному температурному изменению  $T_C$ . Наблюдаемые различия можно объяснить различными условиями закалки проводов разного диаметра.
4. Обнаружено, что в диапазоне температур (120 ÷ 150) К упругая растягивающая деформация аморфного провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  приводит к повороту намагниченности в его приповерхностной области в циркулярном направлении, а в диапазоне (180 ÷ 300) К – в аксиальном.
5. Показано, что при нагреве аморфного провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  в диапазоне температур (150 ÷ 180) К константа магнитострикции меняет знак с отрицательного на положительный. Это объясняет наблюдаемую переориентацию намагниченности в приповерхностной области провода от циркулярного направления к аксиальному под действием растягивающих напряжений.
6. Показано, что термоиндуцированная смена знака константы магнитострикции обуславливает максимум на температурных зависимостях импеданса и циркулярной магнитной проницаемости провода сплава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ , подвергнутого упругой растягивающей деформации.

## Список публикаций автора по теме диссертации

*Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

[A1] А.В. Семиров, А.А. Моисеев, Д.А. Букреев, В.О. Кудрявцев, А.А. Гаврилюк, Г.В. Захаров, **М.С. Деревянко**. Автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии магнитомягких материалов // Научное Приборостроение. – 2010. – Т. 20. – С. 120–123.

[A2] A. V. Semirov, **M.S. Derevyanko**, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, G. V. Kurlyandskaya. Impedance and magnetic properties of CoFeCrSiB amorphous ribbons near the curie point // Tech. Phys. – 2013. – V. 58. – pp. 774–777.

[A3] **M.S. Derevyanko**, A. V. Semirov, G. V. Kurlyandskaya, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev. Magnetoimpedance of Amorphous Ferromagnetic CoFeSiB Ribbons in the Wide Temperature Range // Solid State Phenom. – 2014. – V. 215. – pp. 337–341.

[A4] A. V. Semirov, **M.S. Derevyanko**, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, G. V. Kurlyandskaya. High frequency impedance of cobalt-based soft magnetic amorphous ribbons near the Curie temperature // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. – 2014. – V. 78. – pp. 81–84.

[A5] D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, **M.S. Derevyanko**, A. V. Semirov. High-Frequency Electric Properties of Amorphous Soft Magnetic Cobalt-Based Alloys in the Region of Transition to the Paramagnetic State // Russ. Phys. J. – 2015. – V. 58. – pp. 141–145.

[A6] A. V. Semirov, **M.S. Derevyanko**, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, V.O. Kudryavtsev, A.P. Safronov. Magnetoimpedance of cobalt-based amorphous ribbons/polymer composites // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – V. 415. – pp. 97–101.

[A7] D.A. Bukreev, **M.S. Derevyanko**, A.A. Moiseev, A. V Semirov, P.A. Savin, G. V Kurlyandskaya. Magnetoimpedance and Stress-Impedance Effects in Amorphous CoFeSiB Ribbons at Elevated Temperatures // Materials. – 2020. – V. 13. – P. 3216.

[A8] **M.S. Derevyanko**, D.A. Bukreev, A.A. Moiseev, G. V. Kurlyandskay, A. V. Semirov. Effect of Heat Treatment on the Magnetoimpedance of Soft Magnetic Co<sub>68.5</sub>Fe<sub>4</sub>Si<sub>15</sub>B<sub>12.5</sub> Amorphous Ribbons // Phys. Met. Metallogr. – 2020. – V. 121. – pp. 32–36.

[A9] D.A. Bukreev, **M.S. Derevyanko**, A.A. Moiseev, A. V. Semirov. Effect of tensile stress on cobalt-based amorphous wires impedance near the magnetostriction compensation temperature // J. Magn. Magn. Mater. – 2020. – V. 500. – P. 166436.

[A10] D.A. Bukreev, **M.S. Derevyanko**, A.A. Moiseev, V.O. Kudryavtsev, A. V. Semirov. Influence of the magnetic prehistory of amorphous magnetically soft wires on their electrical impedance // Sensors Actuators, A Phys. – 2020. – V. 303. – P. 111669.

[A11] Bukreev D.A., **Derevyanko M.S.**, Golubev D.N., Moiseev A.A., Semirov A. V The Magnetic Prehistory and Stress-Impedance Effect in Amorphous CoFeNbSiB Wires // Physics of Metals and Metallography – 2022. – V. 123 – № 8 – pp. 721–725.

[A12] Bukreev D.A., **Derevyanko M.S.**, Moiseev A.A., Semirov A. V. Magnetoimpedance Tomography of Amorphous CoFeTaSiB Wires // Physics of Metals and Metallography – 2023. – V. 124 – № 8 – pp. 781–786.

## Список цитируемой литературы

1. Kurlyandskaya G. V. Soft magnetic materials for sensor applications in the high frequency range / Kurlyandskaya G. V., Shcherbinin S. V., Volchkov S.O., Bhagat S.M., Calle E., Pérez R., Vazquez M. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* – 2018. – V. 459 – pp. 154–158.
2. Komogortsev S. V. Advanced Characterization of FeNi-Based Films for the Development of Magnetic Field Sensors with Tailored Functional Parameters / Komogortsev S. V., Vazhenina I.G., Kleshnina S.A., Iskhakov R.S., Lepalovskij V.N., Pasyukova A.A., Svalov A. V. // *Sensors* – 2022. – V. 22 – № 9 – P. 3324.
3. Charles A.D.M. Multifunctional magneto-polymer matrix composites for electromagnetic interference suppression, sensors and actuators / Charles A.D.M., Rider A.N., Brown S.A., Wang C.H. // *Progress in Materials Science* – 2021. – V. 115 – P. 100705.
4. Radkovskaya A. The thermal and stress effect on GMI in amorphous wires / Radkovskaya A., Rakhmanov A., Perov N., Sheverdyeva P., Antonov A. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* – 2002. – V. 249 – № 1–2 – pp. 113–116.
5. Kurlyandskaya G. V Stress-anneal-induced magnetic anisotropy in an amorphous alloy Fe<sub>3</sub>Co<sub>67</sub>Cr<sub>3</sub>Si<sub>15</sub>B<sub>12</sub> / Kurlyandskaya G. V, Dmitrieva N. V, Potapov A.P., Lukshina V.A., Voronova L.M., Gervas'eva I. V, Bebenin N.G. // *Physics Of Metals And Metallography* – 1997. – V. 83 – № 5 – pp. 487–490.
6. Egami T. Structure and magnetism of amorphous alloys / Egami T. // *IEEE Transactions on Magnetics* – 1981. – V. 17 – № 6 – pp. 2600–2605.
7. Flanders P.J. Changes in curie temperature, physical dimensions, and magnetic anisotropy during annealing of amorphous magnetic alloys / Flanders P.J., Liebermann H.H., Graham C.D. // *IEEE Transactions on Magnetics* – 1977. – V. 13 – № 5 – pp. 1541–1543.
8. Hernando A. Influence of the tensile stress on the magnetostriction resistivity and magnetic anisotropy of co-rich metallic glasses. Tsro and csro correlation / Hernando A. // *Physica Scripta* – 1988. – V. 1988 – № T24 – pp. 11–21.
9. García Del Muro M. The effect of quenching rate on the nanocrystallization of amorphous Fe-Cu-Nb-Si-B / García Del Muro M., Zquiak R., Batlle X. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* – 1997. – V. 171 – № 3 – pp. 315–319.
10. Madurga V. Magnetostriction of the rapidly quenched Co<sub>80</sub>Nb<sub>8</sub>B<sub>12</sub> alloy: Dependence on quenching rate, structural relaxation, and temperature / Madurga V., Barandiarán J.M., Vázquez M., Nielsen O. V, Hernando A. // *Journal of Applied Physics* – 1987. – V. 61 – № 8 – pp. 3228–3230.
11. Yue S. Magnetic and thermal stabilities of FeSiB eutectic amorphous alloys: Compositional effects / Yue S., Zhang H., Cheng R., Wang A., Dong Y., He A., Ni H., Liu C.T. // *Journal of Alloys and Compounds* – 2019. – V. 776 – pp. 833–838.
12. Song Y. Thermal stability, magnetic properties and GMI effect of Cr-doping amorphous CoFeSiB ribbons / Song Y., Jia M., Lin M., Li X., Lu W. // *Journal of Alloys and Compounds* – 2015. – V. 622 – pp. 500–503.
13. Lotfollahi Z. Comparative study of magnetic and magnetoimpedance properties of CoFeSiB-based amorphous ribbons of the same geometry with Mo or W additions / Lotfollahi Z., García-Arribas A., Amirabadizadeh A., Orue I., Kurlyandskaya G.V.

- // Journal of Alloys and Compounds – 2017. – V. 693 – pp. 767–776.
14. Egami T. Structural relaxation in amorphous alloys - compositional short range ordering / Egami T. // Materials Research Bulletin – 1978. – V. 13 – № 6 – pp. 557–562.
  15. Бетехтин В.И. Влияние отжига на избыточный свободный объем и прочность аморфных сплавов / Бетехтин В.И., Гюлиханданов Е.Л., Кадомцев А.Г., Кипяткова А.Ю., Толочко О.В. // ФТТ – 2000. – Т. 42 – С.1420–1424.
  16. Белов К.П. Переходы спиновой переориентации в редкоземельных магнетиках / Белов К.П., Звездин А.К., Еадомцева А.М., Левитин Р. З. // Успехи Физических Наук – 1976. – Т. 119 – № 3 – С.447–486.
  17. Аморфные металлические сплавы / Под ред. Ф.Е. Люборского – Металлургия, М. (1987). 584 с.
  18. Хандрих К. Аморфные ферро- и ферримагнетики / К. Хандрих, С. Кобе – М., 1982. – 296 с.
  19. Слуцкер А.И. Зависимость магнитных свойств аморфного металлического сплава от его нанопористости / Слуцкер А.И., Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Толочко О.В., Амосова О.В. // Физика твердого тела – 2008. – Т. 50 – № 2 – С.280–284.
  20. Antonov A.S. Residual quenching stresses in amorphous ferromagnetic wires produced by an in-rotating-water spinning process / Antonov A.S., Borisov V.T., Borisov O. V, Pozdnyakov V.A., Prokoshin A.F., Usov N.A. // Journal of Physics D: Applied Physics – 1999. – V. 32 – № 15 – pp. 1788–1794.
  21. Usov N.A. GMI spectra of amorphous wires with different types of magnetic anisotropy in the core and the shell regions / Usov N.A., Antonov A.S., Lagar'kov A.N., Granovsky A.B. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials – 1999. – V. 203 – № 1–3 – pp. 108–110.
  22. Herzer G. Grain structure and magnetism of nanocrystalline ferromagnets / Herzer G. // IEEE Transactions on Magnetics – 1989. – V. 25 – № 5 – pp. 3327–3329.
  23. Исхаков Р.С., Денисова Е.А. Л.А.А. Размытый фазовый переход ‘аморфная фаза 1 - аморфная фаза 2’ в аморфном сплаве Co-Ni-Fe-B-Si / Исхаков Р.С., Денисова Е.А. Л.А.А. // Письма в ЖЭТФ – 1995. – Т. 62 – № 7 – С. 548–551.
  24. Абросимова Г.Е. Формирование Нанокристаллов В Аморфной Фазе Многокомпонентных Систем / Абросимова Г.Е., Аронин А.С., Волков Н.А. // Журнал Технической Физики – 2019. – Т. 61 – № 7 – С. 1352.
  25. Abrosimova G.E. Free Volume in Amorphous Alloys and Its Change under External Influences / Abrosimova G.E., Aronin A.S. // Journal of Surface Investigation – 2023. – V. 17 – № 4 – pp. 934–941.
  26. Бетехтин В.И. Избыточный свободный объем и механические свойства аморфных сплавов / Бетехтин В.И., Глезер А.М., Кадомцев А.Г., Кипяткова А.Ю., Российской А.Ф.И. // Физика твердого тела – 1998. – Т. 40 – С. 85–89.
  27. Cohen M.H. Molecular transport in liquids and glasses / Cohen M.H., Turnbull D. // The Journal of Chemical Physics – 1959. – V. 31 – № 5 – pp. 1164–1169.
  28. Gaviko V.S. Magnetoelastic lattice distortion in the spin-reorientation region of TbxDy<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub> / Gaviko V.S., Mushnikov N. V., Korolyov A. V. // Journal of the Magnetism Society of Japan – 1999. – V. 23 – № 1\_2 – pp. 453–455.

*Дервянко Михаил Сергеевич*

Магнитные и магнитоимпедансные свойства  
аморфных магнитомягких проводников на основе кобальта  
в области фазовых переходов

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать 19.02.2024 г. Заказ № 19/2.  
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,4. Тираж 80 экз.  
Отпечатано в типографии ООО «Весь Иркутск»,  
г. Иркутск, ул. Карла Маркса 11а, офис 203.