

**Отзыв официального оппонента**  
о диссертации Деревянко Михаила Сергеевича  
«Магнитные и магнитоимпедансные свойства аморфных  
магнитомягких проводников на основе кобальта в области фазовых  
переходов», представленной на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика  
магнитных явлений

Диссертационная работа Деревянко М.С. посвящена решению **актуальной** проблемы создания новых материалов – установлению зависимости магнито-, стресс- и термо-импедансных эффектов аморфных ферромагнетиков в виде лент и микропроводов от их структурных характеристик, а также получению данных об изменении их магнитных свойств в области ферромагнитного фазового перехода, важных с точки зрения понимания фундаментальных закономерностей. В ней проводится изучение магнитных и магнитоимпедансных свойств аморфных микропроводов и лент на основе кобальта в области фазовых переходов. Магнитомягкие аморфные и аморфно-нанокристаллические сплавы на основе переходных металлов обладают значительным потенциалом практического применения. Они и используются при создании различных сенсорных устройств электроники и радиопоглощающих покрытий. Установление корреляции между структурой и физическими свойствами таких находящихся в неравновесном состоянии материалов, важных с точки зрения как определения фундаментальных физических закономерностей, так и практического применения, определяют высокую **практическую значимость** данной диссертационной работы.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. Автор тщательно анализирует использованные литературные источники, посвященные исследованию импеданса и магнитоимпедансного эффекта, влиянию упругих деформаций, температуры, закалки и элементного состава на импеданс аморфных материалов. Последний подраздел посвящен описанию явления ориентационного магнитного фазового перехода. На основании проведенного изучения литературы определяется цель, и формируются задачи исследования.

Во второй главе описываются основные использованные методики измерения образцов, и приводится оценка погрешности измерений. Существенным достижением работы является разработанный автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии. Этот комплекс позволил Деревянко М.С. проводить комплексные измерения импеданса и магнитострикции с приложением внешних механических напряжений и при изменении температуры, что является новым подходом, который позволил получить значимые результаты.

Вх. № 287-03/6224/32  
от 01.04.2024 г.

В третьей главе приводятся результаты исследований температурной зависимости высокочастотного электрического импеданса аморфных микропроводов и лент в области фазового перехода. Результаты, полученные для микропроводов, являются **новыми** и представляют существенный интерес. В работе предлагается новый подход измерения температуры Кюри, основанный на исследовании температурных зависимостей импеданса, и хорошо согласующийся с известными методами. С использованием разработанного подхода измерения температуры Кюри показано, что в зависимости от диаметра микропровода величина температуры Кюри может изменяться. Это объясняется неравномерным по радиусу микропровода распределением концентрации структурных дефектов. Данный факт может быть принципиально важен при анализе магнитных и механических свойств микропроводов.

Глава четыре посвящена изучению совместного влияния температуры и растягивающих напряжений на магнитоимпеданс и магнитострикцию аморфных микропроводов состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$ . Следует выделить следующий результат, описанный в этой главе: обнаружен ориентационный фазовый переход вблизи температуры смены знака константы магнитострикции насыщения. Полученные результаты описаны с помощью модели когерентного вращения намагниченности. Кроме того выполнены модельные расчеты температурной зависимости циркулярной магнитной проницаемости, которые находятся в хорошем согласии с полученными экспериментальными данными.

Проведено комплексное исследование влияния растягивающих напряжений на полевые зависимости импеданса микропроводов состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ta}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  при низких температурах (до 120 К). При исследовании этого сплава обнаружен **принципиальный эффект** существования двух температурных диапазонов, в которых влияние растягивающих напряжений на ориентацию намагниченности в приповерхностной области различно. В диапазоне температур (120–150) К рост аксиальных растягивающих напряжений приводит к повороту намагниченности в циркулярном направлении, а в диапазоне (180–300) К – в аксиальном. Данные результаты представляют существенный интерес как с точки зрения **применения** таких микропроводов в низкотемпературных сенсорах, так и с точки зрения понимания совместного влияния температуры и механических напряжений на изменение магнитной доменной структуры таких объектов.

В целом, диссертантом получено множество **новых** интересных и важных результатов. Среди них можно выделить несколько. Разработанный автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии, позволил получать результаты по влиянию механических напряжений в широком температурном интервале.

В частности, в аморфном проводе состава  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{15}$  методом магнитоимпедансной спектроскопии обнаружено наличие двух магнитных фаз с различными температурами Кюри. В упругодеформированном проводе вблизи температуры 170 К обнаружен ориентационный фазовый переход, связанный с изменением знака константы магнитострикции.

К данной работе имеется ряд вопросов и замечаний.

1. В работе не указано, каким именно методом получены исследованные микропровода. Поскольку в зависимости от технологии изготовления напряженно-деформированное состояние микропроводов может существенно различаться и соответственно влиять на магнитные свойства, это необходимо учитывать при анализе полученных результатов.
2. Не указано, как определялся и контролировался по длине микропровода его состав. Зависимость магнитных характеристик микропровода от состава, описанных в работе, сильная, поэтому определение состава и его точность имеют важное значение.
3. Структурные исследования образцов на основе Co производились с помощью рентгеновских установок с использованием  $\text{Cu K}\alpha$  излучения. Трудно подобрать более неподходящее излучение для исследования образцов на основе Co. Это худшее излучение для исследуемых сплавов из-за возникающей сильной флуоресценции. Для примера: массовые коэффициенты поглощения  $\mu/\rho$  для Co, Fe, Cr в  $\text{Cu K}\alpha$  излучении составляют 313, 308 и 260, соответственно. Для сравнения те же коэффициенты поглощения при использовании, например,  $\text{Mo K}\alpha$  излучении равны 42.5, 38.5 и 31  $\text{см}^2/\text{г}$ . Если автор использовал  $\text{Cu K}\alpha$  излучение, необходимо объяснить причины и описать, каким образом при расчете учитывалось явление флуоресценции.
4. Рис. 3 1.1. – кривые плохого качества, а верхняя кривая имеет вообще интенсивный загадочный максимум на углах около 20 градусов, про который ничего не говорится. Это подложка подсвечивает? Рис.3.2.1, 3.1.9. - кривые плохого качества.
5. Стр. 61. Не понятно происхождение и применимость формулы (3.1.9) для оценки среднего расстояния между атомами. Не указано, как вычитался фон на рентгенограммах. Смущают и значения величин 2.447, 2.441 Å. Что такое D? Известно, что для сплавов примерно такого состава радиус первой координационной сферы (кратчайшего расстояния между атомами в аморфной структуре) в зависимости от состава составляет 2.460 – 2.485 Å. Указанные в диссертации величины заметно меньше суммы радиусов компонентов (Co-Fe, Co-Co, Co-Cr) даже с учетом перекрытия электронных оболочек. Для подобных оценочных расчетов для оценки размера первой координационной сферы стоило бы использовать уравнение Эренфеста.

6. В разделе 3.2 указано, что действующее значение пробного переменного тока при исследовании импеданса микропроводов составляло 1 мА. В то же время в разделе 3.1.1 для лент данный параметр составлял 10 мА. Хотелось бы уточнить, с чем связаны такие изменения?

Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки работы.

Результаты, полученные при выполнении диссертации, опубликованы в ведущих научных журналах и докладывались на национальных и международных научных конференциях. Диссертация Деревянко Михаила Сергеевича «Магнитные и магнитоимпедансные свойства аморфных магнитомягких проводников на основе кобальта в области фазовых переходов» является законченной научно-квалифицированной работой и полностью удовлетворяет требованиям ВАК, соответствует паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений. и отвечает требованиям, п.п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней» утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Автореферат и публикации полностью отражают содержание диссертации, которое соответствует специальности. Автор диссертации Деревянко Михаил Сергеевич заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. «Физика магнитных явлений».

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук по специальности

01.04.07 «Физика конденсированного состояния», профессор,

Главный научный сотрудник лаборатории структурных исследований

Федерального государственного бюджетного учреждения

науки Институт физики твердого тела имени Ю.А.Осипяна

Российской академии наук

Тел.: 8 (496)522-46-89

E-mail: [aronin@issp.ac.ru](mailto:aronin@issp.ac.ru)

Адрес: 142432, Черноголовка Московской области,

ул. Академика Осипяна, д. 2, ИФТТ РАН

Аронин Александр Семенович

Подпись Аронина А.С. заверяю

Ученый секретарь ИФТТ РАН, к. ф.-м. н.

Терещенко Алексей Николаевич



29.03.2024

Сведения об официальном оппоненте по диссертации  
Деревянко Михаила Сергеевича ««Магнитные и магнитоимпедансные свойства аморфных магнитомягких проводников на основе кобальта в области фазовых переходов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

|                             |                                                                                                                                         |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ФИО                         | Аронин Александр Семенович                                                                                                              |
| Ученая степень              | доктор физико-математических наук                                                                                                       |
| Ученое звание               | профессор                                                                                                                               |
| Специальность               | 01.04.07 - Физика конденсированного состояния                                                                                           |
| Полное название организации | Федеральное государственное бюджетное учреждение науки<br>Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна<br>Российской академии наук |
| Сокращенное название        | ИФТТ РАН                                                                                                                                |
| Должность                   | Главный научный сотрудник                                                                                                               |
| Структурное подразделение   | Лаборатория структурных исследований                                                                                                    |
| Почтовый адрес с индексом   | 142432, Россия, г. Черноголовка, Московская обл.,<br>ул. Академика Осипьяна, д.2. ИФТТ РАН                                              |
| Телефон                     | 8 (496) 522-46-89                                                                                                                       |
| Электронная почта           | aronin@issp.ac.ru                                                                                                                       |

Список основных публикаций оппонента по теме диссертации соискателя в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Абросимова Г.Е., Астанин В.В., Волков Н.А., Гундеров Д.В., Постнова Е.Ю., Аронин А.С. Изменение радиуса первой координационной сферы в аморфных сплавах при деформировании // Физика металлов и металловедение. – 2023. – Т. 124. – № 7. – С. 622-634.
2. Фукс А.А., Абросимова Г.Е., Аксенов О.И., Аронин А.С. Поверхностная кристаллизация аморфных микропроводов состава  $\text{Fe}_{73.8}\text{Si}_{13}\text{B}_9.1\text{Cu}_1\text{Nb}_{3.1}$  И  $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65. – № 1. – С. 35-38.
3. Абросимова Г.Е., Аронин А.С. Свободный объем в аморфных сплавах и его изменение при внешних воздействиях // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 8. – С. 98-106.
4. Makarov A.S., Afonin G.V., Aronin A.S., Khonik V.A., Kobelev N.P. Thermodynamic approach for the understanding of the kinetics of heat effects induced by structural relaxation of metallic glasses // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2022. – V. 34. – № 12. – P. 125701.
5. Чиркова В.В., Волков Н.А., Шолин И.А., Абросимова Г.Е., Аронин А.С. Структура и магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов Co-Fe-B-(Nb, Ti) // Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64. – № 7. – С. 759-764.
6. Abrosimova G., Volkov N., Chirkova V., Aronin A. The effect of the type of component crystal lattice on nanocrystal formation in Co-based amorphous alloys / Materials Letters. – 2021. – Vol. 297. – P. 129996.
7. Abrosimova G.E., Volkov N.A., Pershina E.A., Chirkova V.V., Sholin I.A., Aronin A.S. Formation of bcc nanocrystals in Co-based amorphous alloys / Journal of Non-Crystalline Solids. – 2021. – Vol. 565. – P. 120864.



8. Aksenov O.I., Aronin A.S. Investigation of the Domain Structure of Co-Based Microwires by Magneto-Optical Indicator Films Method / Physics of the Solid State. – 2021. – Vol. 63, Iss. 4. – P. 610–615.
9. Makarov A.S., Afonin G.V., Konchakov R.A., Qiao J.C., Aronin A.S., Kobelev N.P., Khonik V.A. One-to-one correlation between the kinetics of the enthalpy changes and the number of defects assumed responsible for structural relaxation in metallic glasses / Journal of Non-Crystalline Solids. – 2021. – Vol. 558. – P. 120672.
10. Abrosimova G., Gnesin B., Gunderov D., Drozdenko A., Matveev D., Mironchuk B., Pershina E., Sholin I., Aronin A. Devitrification of Zr<sub>55</sub>Cu<sub>30</sub>Al<sub>15</sub>Ni<sub>5</sub> Bulk Metallic Glass under Heating and HPT Deformation / Metals. – 2020. – Vol. 10, Iss. 10. – P. 1329.
11. Abrosimova G.E., Aronin A.S. Formation of Metastable Phases during Crystallization of Amorphous Iron-Based Alloys / Crystallography Reports. – 2020. – Vol. 65, Iss. 4. – P. 573–576.
12. Abrosimova G., Volkov N., Pershina E., Tran Van Tuan, Aronin A. Amorphous structure rejuvenation under cryogenic treatment of Al-based amorphous-nanocrystalline alloys / Journal of Non-Crystalline Solids. – 2020. – Iss. 528. – P. 119751.
13. Aksenov O.I., Fuks A.A., Aronin A.S. The effect of stress distribution in the bulk of a microwire on the magnetization processes / Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 836. – P. 155472.
14. Aksenov O.I., Orlova N., Churyukanova M.N., Aronin A.S. Stress state effect on the magnetic properties of amorphous microwires / Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2020. – Vol. 495. – P. 165878.
15. Volkov N., Abrosimova G., Aronin A. The effect of structural matching of crystalline lattices in the formation of nanocrystals in the amorphous phase / Materials Letters. – 2020. – Vol. 265. – P. 127431.

Согласен на обработку моих персональных данных.

гнс лаборатории структурных исследований  
ИФТТ РАН, докт. физ.-мат. наук, профессор

  
подпись

Аронин Александр Семенович

«15» марта 2024 г.

Подпись Аронина Александра Семеновича удостоверяю

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ**  
**ИФТТ РАН**  
**ТЕРЕЩЕНКО А.Н.**

