ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Олега Игоревича Аксенова **«Влияние механических напряжений на магнитную доменную структуру и свойства аморфных и нанокристаллических сплавов на основе железа»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «физика конденсированного состояния»

Диссертационная работа Олега Игоревича Аксенова посвящена изучению влияния напряженного состояния на структуру и свойства аморфных и нанокристаллических микропроводов в стеклянной оболочке. Данная тема исследования представляется довольно актуальной. Дело в том, что аморфные ферромагнитные микропровода обладают разнообразными уникальными свойствами, такими как естественный ферромагнитный резонанс, прямоугольная петля гистерезиса, малая коэрцитивная сила, гигантский магнитный импеданс и т.д. Весьма интересными являются возможности использования таких микропроводов в стеклянной оболочке для биологически совместимых приложений, поскольку часто возникает острая необходимость безопасного введения электрических зондов в живую ткань организма. Очень важно также использование аморфных микропроводов в качестве датчиков растяжения-сжатия, встраиваемых в реальные строительные конструкции. При наличии бесконтактной системы регистрации изменения магнитных параметров, подобные датчики могут иметь определенные преимущества по сравнению, например, с встраиваемыми резистивными датчиками на основе углеродных нановолокон.

Объектами данной диссертационной работы являлись аморфные и нанокристаллические ферромагнитные микропровода двух составов: $Fe_{77.5}Si_{7.5}B_{15}$ и $Fe_{73.8}Cu_1Nb_{3.1}B_{9.1}Si_{13}$ диаметром от 7.4 до 18 мкм и толщиной стеклянной оболочки от 2.85 до 6.9 мкм. Такие сплавы характеризуются положительной магнитострикцией. Для грамотной интерпретации свойств подобных изделий крайне важны систематические структурные исследования в области физики твердого тела. В ходе выполнения исследований О.И. Аксенову удалось успешно решить несколько важных задач: (i) разработать методики исследования гистерезисных свойств и ферромагнитной доменной структуры методом магнитооптических индикаторных пленок (МОИП) при растяжении in situ; (ii) изучить ферромагнитную доменную структуру и гистерезисные свойства аморфных и нанокристаллических микропроводов этим методом; (iii) изучить эволюцию ферромагнитной доменной структуры и гистерезисных свойств микропроводов при их растяжении in situ; (iv) разработать метод измерения адгезии стеклянной оболочки и аморфного металлического провода и изучить влияние адгезии на магнитные свойства микропроводов при их растяжении.

Диссертация О.И. Аксенова состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, состоящего из 107 ссылок. Объем диссертации составляет 136 страниц, включая 70 рисунков и 9 таблиц.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. Автор тщательно анализирует имеющиеся литературные источники, посвященные изучению свойств аморфных ферромагнитных микропроводов, их магнитной доменной структуре, напряженному

состоянию, методикам изготовления микропроводов и вариантам их применения в электронных устройствах, а также обосновывает необходимость дальнейших исследований в изучаемой области.

Во второй главе описываются основные методики подготовки и исследования микропроводов, включая их термическую обработку. Изученные в рамках диссертационной работы микропровода были исследованы в двух видах: в стеклянной оболочке и после ее удаления. Такой подход позволил О.И. Аксенову исследовать микропровода одинакового состава и диаметра с различным уровнем внутренних напряжений, а также изучить влияние стеклянной оболочки на процессы эволюции напряженного состояния и магнитные свойства таких изделий.

В третьей главе приводятся результаты изучения эволюции магнитной доменной структуры микропроводов в зависимости от напряженного состояния и величины магнитострикции. Описано изучение эволюции атомной структуры микропроводов состава $Fe_{73.8}Cu_1Nb_{3.1}B_{9.1}Si_{13}$ при их отжиге из аморфного состояния. Приведены результаты исследования магнитной доменной структуры микропроводов методом магнитооптических индикаторных пленок и методом магнитно-силовой микроскопии.

В четвертой главе представлены полученные результаты исследования магнитных гистерезисных свойств микропроводов в зависимости от их напряженного состояния и величины магнитострикции методами вибрационной и индукционной магнитометрии. В данной главе выполнен количественный анализ эволюции средних напряжений в микропроводах при их растяжении и проведена оценка влияния адгезии на процесс растяжения микропроводов в стеклянной оболочке. Последнее представляется достаточно оригинальным исследованием для подобного типа объектов.

В заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Среди наиболее значимых результатов, полученных в данной диссертационной работе, можно отметить следующие.

1) Релаксация внутренних напряжений и образование нанокристаллической структуры вызывает существенное увеличение среднего размера поверхностных доменов.

2) При растяжении микропровода до напряжений, близких к половине предела прочности, средний размер поверхностных доменов уменьшается на 30 % по сравнению с исходным ненагруженным состоянием.

3) Впервые экспериментально обнаружено, что ослабление исходного напряженного состояния приводит к уменьшению скорости роста коэрцитивной силы микропровода.

4)Установлено влияние адгезии между стеклянной оболочкой и металлической частью микропровода на скорость возрастания коэрцитивной силы при растяжении микропроводов.

Все вышеуказанные результаты обладают определенной новизной и представляют существенную научную и практическую значимость. Достоверность этих результатов не вызывает сомнений, поскольку они были воспроизведены в достаточном количестве опытов.

К данной работе имеется ряд вопросов и замечаний.

1. На странице 75 диссертации автор пишет: “Принято считать, что магнитный момент сердцевины провода не имеет строгой осевой ориентации и изменяется по спирали, период которой может варьироваться для проводов с различным напряженным состоянием и размерами [31]. Тогда наблюдаемые области

преимущественного темного или светлого контраста могут соответствовать характерному периоду спирали домена сердцевины. Однако данное предположение требует дополнительной проверки." В этой связи, хотелось бы знать о какой дополнительной проверке идет речь и была ли она выполнена?

2. На странице 83 диссертации автор пишет: "Из рисунков 39, 43 и 46 видно, что полученные Фурье-образы содержат в себе не только пики с наибольшей амплитудой, соответствующей характерному размеру доменов, но и значительное количество менее интенсивных пиков, которые могут быть связаны как с наличием доменов больших или меньших размеров, *так и с дефектами обработки изображения*." К сожалению, последнее предположение в данной диссертационной работе осталось без надлежащего рассмотрения.
3. На рисунках 51 и 52, отображены зависимости тангенциального и аксиального компонентов тензора напряжений, соответственно, на поверхности аморфного микропровода от его диаметра. Обе зависимости выглядят довольно близкими по своим значениям. Хотелось бы получить адекватное объяснение такому поведению.
4. На странице 108 диссертации автор пишет: "Рисунок 65 – Аппроксимация зависимости Hc (σ) кусочно-заданными линейной и степенной функциями." Однако внимательное изучение данного рисунка показывает, что в пределах обозначенной автором погрешности измерений конечный участок данной зависимости можно аппроксимировать походящей линейной функцией.
5. На странице 111 диссертации автор пишет: "При этом будем полагать, что взаимодействие между стеклянной оболочкой и аморфным микропроводом отсутствует." Хотелось бы уточнить, на чем основано подобное предположение и какой характер взаимодействия предполагался?
6. Имеется ряд технических помарок, типа:

   а) На странице 14 диссертации написано:" Ферромагнетизм аморфных сплавов обусловлен наличием в них одного или нескольких переходных металлов Fe, Co или Ni, то есть элементов с незаполненной d- или f- оболочкой." Автору следовало бы добавить пример ферромагнитного РЗМ с незаполненной f-оболочкой.

   б) Страница 20, 21. Написано: "…(магнитно-стрикционного)." Правильное написание - магнитострикционного.

   в) Страница 36. Написано:"…для проводов с различным соотношением диаметра и толщины стекла…". Правильнее будет так - …диаметра провода и толщины стекла…

   г) Страница 37. Написано "…для проводов с указанием их диаметра аморфного микропровода…". Следует писать:"…с указанием диаметра их аморфного микропровода…".

   д) Страница 48. Автор пишет:"…намотанная восьмеркой…". Это сленговое выражение требует уточнения.

   е) На рисунке 55 трудно различить ход кривых по их цвету.

   ж) Страница 102. Точность определения коэрцитивной силы с помощью вибрационного магнитометра представляется завышенной.

   з) Ссылка 11 аналогична ссылке 35.

и) Присутствуют незначительные ошибки в тексте ряда ссылок.

7. В тексте диссертации также встречается некоторое количество опечаток и стилистических небрежностей.

В тексте автореферата, на странице 8, написано: “Данный метод использовался нами для измерения величины остаточной намагниченности и намагниченности насыщения микропроводов”. Здесь, автору следовало бы упомянуть и коэрцитивную силу.

Однако сделанные замечания не умаляют достоинства данной диссертации и не могут повлиять на общую положительную оценку диссертационной работыО.И. Аксенова. Диссертация содержит исчерпывающий набор литературных ссылок на публикации, имеющие прямое отношение к теме исследования, написана достаточно понятным языком и хорошо оформлена.

Результаты диссертационной работы были изложены в научных публикациях в зарубежных и отечественных журналах, а также были представлены на 12 российских и международных конференциях. Автореферат и опубликованные статьи полностью отражают основное содержание диссертационной работы.

В целом диссертация О.И. Аксенова представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне, соответствующую всем критериям и требованиям раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Аксенов Олег Игоревич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:
Морозов Юрий Георгиевич,
Доктор физико-математических наук,
Ученое звание: старший научный сотрудник,
Должность: ведущий научный сотрудник лаборатории СВС
Организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук (ИСМАН)
Почтовый адрес: 142432 Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 8
Тел.: +7(496)524-63-68,
E-mail: morozov@ism.ac.ru

Согласен на обработку персональных данных.

Ю.Г. Морозов

18 мая 2021 года

Подпись в.н.с. д.ф.-м.н. Ю.Г. Морозова подтверждаю.

Ученый секретарь ИСМАН, к.ф.-м.н. О.К. Камынина