УВЕРЖДАЮ:

НИТУ «МИСиС»

Проректор по науке и инновациям

М. Р. Филонов

_____

«_24_» _мая_ 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную **работу Аксенова Олега Игоревича**
«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 Аксенова О.И. посвящена изучению влияния напряжений на магнитную доменную структуру и свойства аморфных и нанокристаллических микропроводов. Данная тема исследования является актуальной, в аморфных микропроводах наблюдается ряд интересных прикладных свойств, таких как естественный ферромагнитный резонанс, бистабильное перемагничивание, малая коэрцитивная сила, гигантский магнитный импеданс и т.д. При этом свойства таких магнитомягких материалов строго коррелируют с напряженным состоянием. Особенно перспективно применение подобных материалов в различных сенсорных системах, в частности в качестве датчиков напряжений, а также для использования в ряде биологически совместимых приложений. Несмотря на очевидный потенциал применения таких материалов, корреляция между напряженным состоянием микропроводов, их магнитной доменной структурой и свойствами изучена недостаточно хорошо. Таким образом, **актуальность темы диссертационной работы** не вызывает сомнений.

Объектами исследования данной диссертационной работы являются аморфные ферромагнитные микропровода в стеклянной оболочке двух составов с различными геометрическими параметрами аморфной металлической жилы и оболочки. Варьированием геометрических размеров достигалось различное исходное напряженное состояние аморфной металлической жилы в микропроводах. Изученные микропровода подвергались термообработке, механическому растяжению, при этом определялась магнитная доменная структура микропроводов и их магнитные петли гистерезиса. Автором проводились подробные структурные исследования всех изученных микропроводов.

Диссертация Аксенова О.И. изложена на 136 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа хорошо структурирована, текст сопровождается наглядными рисунками. В конце каждой главы автор кратко суммирует полученные результаты

Научная новизна работы заключается в том, что автором впервые была исследована эволюция магнитной доменной структуры микропроводов с положительной магнитострикцией в зависимости от величины механических напряжений (средних и растягивающих) и уровня магнитострикции материала, определены характерные размеры поверхностных доменов. Впервые обнаружено, что увеличение уровня механических напряжений в микропроводах приводит к уменьшению среднего размера поверхностных доменов. Установлено, что в микропроводах состава $Fe_{73,8}Cu_1Nb_{3,1}B_{9,1}Si_{13}$ нанокристаллизация приводит к увеличению среднего размера поверхностных доменов. Впервые измерены зависимости коэрцитивной силы от величины растягивающих напряжений для микропроводов с различным исходным уровнем напряжений. Обнаружено, что скорость роста коэрцитивной силы при увеличении напряжений в микропроводах без оболочки выше, чем в проводах в оболочке. Автором проведен расчет эволюции средних напряжений в микропроводах при их растяжении. На основе данных расчетов было установлено влияние адгезии между стеклянной и металлической частью микропроводов на эволюцию их коэрцитивной силы при растяжении. Разработан новый метод измерения адгезии между стеклянной оболочкой тонких микропроводов и их металлической частью.

Практическая значимость работы состоит в том, что измеренные зависимости коэрцитивной силы от механических напряжений могут быть использованы для проектирования датчиков деформаций на основе аморфных микропроводов. Установленное автором влияние сил связи между стеклянной оболочкой и аморфным микропроводом на особенности изменения коэрцитивной силы микропроводов при их растяжении открывает перспективы контроля магнитных параметров данного типа материалов для различных практических приложений.

Во **Введении** изложены основные проблемы, связанные с исследованием и применением аморфных ферромагнитных микропроводов, сформулированы цель и задачи, данные о новизне полученных результатов, их практической и теоретической значимости.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы, посвященной изготовлению и исследованию аморфных ферромагнитных микропроводов. Автор проводит внимательный анализ литературных источников. Определены основные

проблемы исследования тонких микропроводов, обозначены возможные варианты их решения. Рассмотрены вопросы применения микропроводов в качестве датчиков различного типа (деформаций, магнитного поля и т.д.).

Вторая глава посвящена описанию основных методик подготовки и исследования микропроводов. В частности, описаны две экспериментальные установки (по измерению магнитных петель гистерезиса и измерению магнитной доменной структуры при растяжении микропроводов in situ), разработанные автором в рамках диссертационной работы. Описанные автором методы и подходы гарантируют корректность и достоверность полученных им результатов.

В **третьей** главе приведены результаты исследования магнитной доменной структуры микропроводов в зависимости от их напряженного состояния и величины магнитострикции. Полученные магнитооптические изображения доменной структуры анализируются с точки зрения эволюции магнитоупругой анизотропии материала. Делается вывод о том, что уменьшение напряженного состояния микропроводов и их магнитострикции приводит к росту среднего размера поверхностных доменов. Также автором представлены результаты рентгеновских исследований эволюции структуры аморфных микропроводов состава $Fe_{73,8}Cu_1Nb_{3,1}B_{9,1}Si_{13}$ при их отжиге и образовании нанокристаллов.

В **четвертой** главе представлены результаты исследования эволюции магнитных гистерезисных свойств микропроводов в зависимости от их напряженного состояния. Все результаты получены методом индукционной магнитометрии с помощью изготовленной автором специальной установки. Автором проведен количественный анализ эволюции средних напряжений в центральном и поверхностном доменном слоях микропроводов при их растяжении. Проанализированы зависимости коэрцитивной силы от величины растягивающих напряжений для проводов в оболочке и без нее. Обнаружено, что при растяжении проводов без оболочки достигается большая скорость роста коэрцитивной силы, чем при растяжении проводов в оболочке. Автором выдвинуто предположение о влиянии адгезии на эволюцию напряженного состояния микропроводов в оболочке при их растяжении. Предложен новый метод измерения адгезии между металлической частью и стеклянной оболочкой тонких микропроводов. Измеренное значение адгезии 270 МПа находится в хорошем соответствии с известными литературными данными.

Наиболее значимые и ценные результаты данной диссертационной работы заключаются в следующем:

- Магнитная доменная структура и ее зависимость от внутренних напряжений в столь миниатюрных объектах исследования изучена экспериментально. Экспериментально доказано, что уменьшение внутренних напряжений и образование нанокристаллической структуры в микропроводах состава $Fe_{73,8}Cu_1Nb_{3,1}B_{9,1}Si_{13}$ приводит к существенному увеличению среднего размера поверхностных доменов.
- Впервые экспериментально обнаружено, что уменьшение исходного уровня напряжений в микропроводе приводит к уменьшению скорости роста коэрцитивной силы при увеличении внешнего напряжения. При этом скорость роста коэрцитивной силы при растяжении проводов без оболочки выше, чем при растяжении проводов в оболочке.
- Впервые предпринята попытка исследования неоднородного распределения напряжений внутри металлической жилы микропровода в стеклянной оболочке. И хотя это можно было бы предположить из общих соображений, сделаны количественные оценки такого распределения.

В ходе обсуждения диссертации Аксенова О.И. возникли следующие вопросы и замечания:

1. Магнитострикция аморфной металлической жилы микропровода принимается одинаковой для всех геометрических соотношений стекла и металла в микропроводе и берется из литературных данных. Между тем, сама величина магнитострикции зависит от уровня напряжений, не говоря уже о том, что от плавки к плавке состав жилы может меняться. Стоило бы измерить магнитострикцию отдельных образцов для уточнения этого вопроса.
2. Вызывают некоторые сомнения большие величины напряжений на металлической жиле, вызванные влиянием стеклянной оболочки (до 940 МПа, рис.53) и под нагрузкой (2200 МПа, рис.59). Такой уровень напряжений должен приводить к релаксации, которая могла бы выражаться как в релаксации структуры стеклянной оболочки и аморфной жилы, так и в отслоении стеклянной оболочки и деформации жилы.
3. Качественные результаты диссертации, найденные тенденции и зависимости не вызывают особых сомнений, вместе с тем количественные характеристики, основанные на расчетах и оценках, нуждаются в более тщательном экспериментально подтверждении.
4. Не совсем удачно сформулированы положения диссертации, выносимые на защиту, это скорее результаты работы. Стоило бы сформулировать положения как некоторые подтвержденные в работе идеи и закономерности.

Указанные замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертации, работа заслуживает высокой оценки.

Результаты диссертационной работы изложены в 6 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.

По актуальности тематики, объему представленного материала, его новизне, научной и практической значимости диссертация отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (раздел II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) и соответствует паспорту научной специальности. Таким образом, представленная к защите работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Аксенов Олег Игоревич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния».

Доклад Аксенова Олега Игоревича по диссертационной работе заслушан и обсужден на семинаре Научно-исследовательского центра композиционных материалов 12 мая 2021 года.

Отзыв составил:
Директор Института новых материалов и
нанотехнологий НИТУ «МИСиС», д. ф-м. н. С.Д. Калошкин

27 мая 2021 г

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».
Адрес: 119049, Москва, Ленинский пр.4
тел. 8 (499) 2367294
e-mail: kaloshkin@misis.ru
Адрес в сети Интернет: https://misis.ru