ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.114.01 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КРИСТАЛЛОГРАФИЯ И ФОТОНИКА» РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» ПО ДИССЕРТАЦИИ АКСЕНОВА ОЛЕГА ИГОРЕВИЧА НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 22 июня 2021 г., протокол № 5

О присуждении **Аксенову Олегу Игоревичу,** гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Влияние механических напряжений на магнитную доменную структуру и свойства аморфных и нанокристаллических сплавов на основе железа» по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния» принята к защите 20.04.2021 г., протокол № 4, диссертационным советом Д 002.114.01 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН), Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России), 119333, г. Москва, Ленинский проспект, дом 59. Диссертационный совет Д 002.114.01 создан приказом Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Аксенов Олег Игоревич, 1993 г.р., в 2016 году окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный университет», физико-технический факультет по специальности «Электроника и наноэлектроника». В настоящее время работает в лаборатории структурных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в должности младшего научного сотрудника.

Диссертационная работа выполнена в лаборатории структурных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – **Аронин Александр Семенович**, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией структурных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

Исхаков Рауф Садыкович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных плёнок Института физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН;

Морозов Юрий Георгиевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова Российской академии наук.

— дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (г. Москва)** в своём **положительном отзыве**, подписанном директором Института новых материалов и нанотехнологий НИТУ «МИСиС», доктором физико-математических наук С.Д. Калошкиным и утвержденном проректором по науке и инновациям НИТУ «МИСиС», доктором технических наук, профессором, М.Р. Филоновым, указала, что диссертационная работа Аксенова Олега Игоревича «Влияние механических напряжений на магнитную доменную структуру и свойства аморфных и нанокристаллических сплавов на основе железа» 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.

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.

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 соисканием ученой 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».

По теме диссертационной работы опубликовано 6 статей в рецензируемых научных журналах. Результаты представлены на 12 российских и международных конференциях. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. The change of domain structure of the amorphous microwire of $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ composition under thermal treatment / **O.I. Aksenov**, G.E. Abrosimova, A.S. Aronin, N.N. Orlova, M.N. Churyukanova, V.A. Zhukova, A.P. Zhukov // **Journal of Applied Physics**. – 2017. – Vol. 122, Iss. 23. – P. 235103.
2. Non-contact method for stress monitoring based on stress dependence of magnetic properties of Fe-based microwires / M. Churyukanova, S. Kaloshkina, E. Shuvaeva, A. Stepashkina, M. Zhdanova, A. Aronin, **O. Aksenov**, P. Arakelov, V. Zhukov, A. Zhukov // **Journal of Alloys and Compounds**. – 2018. – Vol. 748. – P. 199–205.
3. Stress state effect on the magnetic properties of amorphous microwires / **O.I. Aksenov**, N. Orlova, M.N. Churyukanova, A.S. Aronin // **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. – 2020. – Vol. 495. – P. 165878.
4. The effect of stress distribution in the bulk of a microwire on the magnetization process / **O.I. Aksenov**, A.A. Fuks, A.S. Aronin // **Journal of Alloys and Compounds**. – 2020. – Vol. 836. – P. 155472.

На диссертацию и автореферат поступило 6 **положительных отзывов**.

Добаткин Сергей Владимирович – д.т.н., профессор, заведующий лабораторией металловедения цветных и легких металлов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук и **Страумал Петр Борисович –** к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории металловедения

цветных и легких металлов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук отметили в качестве замечания, что в тексте автореферата содержится незначительное число опечаток и стилистических небрежностей. Из текста автореферата не до конца ясно, для чего была использована вибрационная магнитометрия, перечисленная в числе методов исследования.

Шарипов Ильгиз Зуфарович – к.ф.-м.н., доцент кафедры материаловедения и физики металлов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» отметил в качестве замечания к автореферату, что в разделе 4.3 при анализе графиков на рис.7 утверждается, что они описываются степенной функцией. Однако без указания степени функции данное утверждение малосодержательно, степень 1 или 2 это совершенно разные функции.

Сундеев Роман Вячеславович – к.ф.-м.н., доцент кафедры наноэлектроники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» отметил в качестве замечаний:

1. В тексте автореферата нет отдельного пункта, где бы была представлена новизной работы.
2. В литературе отмечается, что оптимальным магнитные свойства для сплавов типа «Файнмет» достигаются при соотношении между нанокристаллической/аморфной компонентами, как 60/40. Из раздела 3.1 автореферата не понятно, какое соотношение между нанокристаллической и аморфной компонентами было получено автором после проведенной серии отжигов.
3. В автореферате на рис. 5. 6 и 10 не указана точность представленных величин.

Горнаков Владимир Степанович – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории квантовых кристаллов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук в качестве замечаний отметил, что в тексте автореферата содержатся опечатки и отдельные стилистические небрежности. К сожалению, отдельные изображения в печатной версии автореферата видны недостаточно хорошо для их детального анализа, а именно рисунки 7 и 8.

Меркулов Денис Иювинальевич – к.ф.-м.н., заведующий Совместной лабораторией физики конденсированного состояния и новых методов исследования в материаловедении Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Астраханский

государственный университет» в качестве замечания отметил некоторое количество опечаток.

Рыбаков Алексей Владимирович – к.ф.-м.н., директор физико-математического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Астраханский государственный университет» в качестве замечаний указал следующие: в пояснении к рисунку 8 написано, что наилучшее соответствие экспериментального результата наблюдается при описании зависимости $H_C(\sigma)$ линейной зависимостью и степенной, однако непонятно, почему сделан вывод, что это именно наилучшее соответствие. На графиках рисунка 7 приведены аппроксимирующие кривые, однако не указаны погрешности и способ аппроксимации.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что оппоненты являются ведущими специалистами в области физики твердого тела, исследовании магнитных материалов, а в ведущей организации активно проводятся работы по созданию и исследованию аморфных микропроводов различными современными экспериментальными методами.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований реализован и успешно **применен** комплекс современных экспериментальных методов исследования атомной структуры, магнитной доменной структуры и магнитных гистерезисных свойств. Соискателем **проведен** анализ имеющихся подходов к исследованию аморфных ферромагнитных микропроводов и **предложен** подход, позволяющий осуществлять комплексное исследование взаимосвязи между напряженным состоянием таких объектов и их свойствами. **Проведен** расчет изменения средних напряжений в центральном и поверхностном доменном слоях микропровода при его растяжении. **Продемонстрировано**, что в центральном доменном слое скорость роста средних напряжений в несколько раз выше, чем в поверхностном доменном слое. **Проведено** исследование эволюции доменной структуры микропроводов при изменении их напряженного состояния и нанокристаллизации. **Показано**, что уменьшение напряженного состояния микропровода и величины магнитострикции приводит к увеличению размера поверхностных доменов. **Проведено** исследование эволюции коэрцитивной силы микропроводов при их растяжении in situ. **Продемонстрирована** обратимость зависимости коэрцитивной силы от величины растягивающих напряжений вплоть до напряжений близких к половине предела прочности материала (не менее 1.5 ГПа). **Показано**, что для проводов без оболочки зависимость коэрцитивной силы от величины напряжений описывается степенной функцией с показателем степени 0.5. Аналогичная зависимость для проводов в стеклянной оболочке имеет более сложных характер. **Предложен** вариант описания такой зависимости

комбинацией линейной и степенной функций, что связано с особенностями изменения напряженного состояния микропровода в оболочке при его растяжении. **Показано**, что в проводах в оболочке скорость роста коэрцитивной силы при растяжении ниже, чем в проводах без оболочки. Это объясняется влиянием адгезии между стеклянной оболочкой и металлическим микропроводом. **Предложен** метод измерения адгезии между стеклянной оболочкой и металлической частью микропроводов. **Показано**, что величина адгезии между металлической и стеклянной частями микропровода на основе железа составляет 270 МПа.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что: установленная автором взаимосвязь между напряженным состоянием, магнитострикцией и магнитной доменной структурой микропроводов позволяет расширить понимание процессов, лежащих в основе эволюции магнитных характеристик таких объектов. Установленные автором зависимости коэрцитивной силы от растягивающих напряжений, а также проведенная оценка эволюции среднего уровня напряжений дают достаточных набор данных для проектирования магитоупругих датчиков напряжений на основе микропроводов.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается тем, что все измерения выполнены соискателем с применением современных экспериментальных методик. Обоснованность и достоверность положений, выносимых соискателем на защиту, подтверждается согласованностью результатов расчета эволюции средних напряжений в микропроводе и полученных экспериментальных данных. По материалам диссертации опубликовано **6 статей** в рецензируемых международных научных журналах, **входящих** в список рекомендованных ВАК, а также представлены доклады на 12 профильных российских и международных научных конференциях.

Личный вклад соискателя состоял в проведении экспериментов по исследованию атомной структуры, магнитной доменной структуры и коэрцитивной силы микропроводов, разработке установки по исследованию петель гистерезиса микропроводов при их растяжении in situ, проведении расчетов эволюции средних напряжений в микропроводах при их растяжении, создании методики измерения адгезии между металлической и стеклянной частями микропровода, а также сопоставлении результатов расчета и экспериментальных данных. Автор активно участвовал в обсуждении и обобщении полученных результатов и формировании научных выводов, а также в подготовке научных публикаций в журналах и докладов на международных конференциях.

Диссертация отвечает на ключевые вопросы поставленной научной проблемы и соответствует критерию внутреннего единства. Объединяющим

фактором и основной идейной линией является совокупное исследование магнитной доменной структурой, напряженного состояния и свойств микропроводов, представляющее интерес как с точки зрения физического понимания взаимосвязи данных параметров, так и с точки зрения практического применения в электронике и разработки магнитоупругих датчиков.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая полностью соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от **24** сентября **2013 г. № 842.**

На заседании 22 июня 2021 года диссертационный совет принял решение присудить Аксенову Олегу Игоревичу учёную степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния».

В заседании 11 членов диссертационного совета участвовали очно, и 6 членов совета участвовали дистанционно.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 3 доктора наук по специальности 01.04.07 – «физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против – 0, воздержалось – 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета,
д.ф.-м.н., профессор И.С. Любутин

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук К.В. Фролов

« 22 » июня 2021 г.
Учёный секретарь ФНИЦ
«Кристаллография и фотоника» РАН
кандидат физико-математических наук Л.А. Дадинова