

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.285.24,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б.Н. ЕЛЬЦИНА», МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 22.04.2019 г., № 5

О присуждении Болячкину Антону Сергеевичу, гражданство Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Роль обменного и магнитостатического взаимодействий в формировании гистерезисных свойств нанокристаллических сплавов» по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений принята к защите 18 февраля 2019 г. (протокол заседания № 3) диссертационным советом Д 212.285.24, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19; приказ Министерства образования и науки Российской Федерации о создании диссертационного совета № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель Болячкин Антон Сергеевич 1990 года рождения.

В 2014 году соискатель окончил ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по направлению подготовки 222900 Нанотехнологии и микросистемная техника; в 2018 году окончил очную аспирантуру ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (физика магнитных явлений); работает в

должности инженера 2-ой категории на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов и в отделе магнетизма твердых тел НИИ Физики и прикладной математики Института естественных наук и математики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник *Кудреватых Николай Владимирович*, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Институт естественных наук и математики, НИИ Физики и прикладной математики, отдел магнетизма твердых тел, заведующий отделом.

Официальные оппоненты:

Гречишкин Ростислав Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет», кафедра прикладной физики, профессор;

Степанов Виктор Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, "Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук" – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь), лаборатория динамики дисперсных систем, старший научный сотрудник,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация, *Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук - обособленное подразделение ФГБНУ*

«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Красноярск, в своем положительном отзыве, подписанном Исхаковым Рауфом Садыковичем, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим лаборатории физики магнитных пленок, **указала**, что «работа Болячкина А.С. представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение важной научной задачи, связанной с анализом кривых намагничивания композиционных наночастиц. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и представленные в ней выводы. Профиль диссертации соответствует формуле специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений, а сама работа по своему научному уровню, значению и достоверности результатов полностью соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней». Таким образом, Антон Сергеевич Болячкин является квалифицированным научным работником и заслуживает присуждения ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений».

Соискатель имеет 57 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 27 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы. Другие публикации по теме диссертации представлены в виде 1 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 23 тезисов докладов, опубликованных в материалах всероссийских (6) и международных (17) конференций и симпозиумов.

Общий объем работ, опубликованных по теме диссертации, составляет 5,4 п.л. / 2,12 п.л. – авторский вклад соискателя. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Bolyachkin A. S. Power-law behavior of coercivity in nanocrystalline magnetic alloys with grain-size distribution / **A. S. Bolyachkin**, S. V. Komogortsev // Scripta Materialia. – 2018. – Vol. 152. – P. 55-58; 0,48 п.л. / 0,24 п.л. (Scopus, WoS).

2. Bolyachkin A. S. Intergrain exchange interaction estimation from the remanence magnetization analysis / **A. S. Bolyachkin**, A. S. Volegov, N. V. Kudrevatykh // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2015. – Vol. 378 – P. 362-366; 0,6 п.л. / 0,4 п.л. (Scopus, WoS).

3. Volegov A. S. A new method of intergrain exchange interaction energy determination in nanostructured alloys with spontaneous spin-reorientation transition / A. S. Volegov, **A. S. Bolyachkin**, N. V. Kudrevatykh // Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 233-234. – P. 615-618; 0,48 п.л. / 0,16 п.л. (Scopus).

4. Болячкин А. С., Волегов А. С., Nd₂Fe₁₄B magnetic properties simulator // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017611009, 19 января 2017.

На автореферат диссертации поступили положительные отзывы от:

Таскаева Сергея Валерьевича, доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры физики конденсированного состояния, декана физического факультета ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет». Отзыв не содержит замечаний и вопросов.

Рамазанова Магомедшейх Курбатовича, кандидата физико-математических наук, заведующего лаборатории математического моделирования конденсированных сред ФГБУН «Института физики им. Х.И. Амирханова» Дагестанского научного центра РАН (г. Махачкала). Отзыв не содержит замечаний и вопросов.

Королева Александра Васильевича, кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника, руководителя отдела магнитных измерений Центра коллективного пользования ФГБУН Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург). Отзыв содержит следующее замечание: «В модели Стонера-Вольфарта процессы намагничивания и

размагничивания происходят путем обратимого и (или) необратимого процесса когерентного вращения намагниченности. В автореферате нет прямых указаний о том, что в рассматриваемых моделях эти процессы происходят по схеме Стонера-Вольфарта или же необходимо другое понимание физики магнитного гистерезиса.».

Букреева Дмитрия Александровича, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории материаловедения НИЧ, и *Семирова Александра Владимировича*, доктора физико-математических наук, директора Педагогического института ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет». В отзыве отмечаются следующие недостатки:

1. Автором в разделе «Научная новизна работы» заявляется, что программа для компьютерного моделирования, разработанная им, имеет возможность учета термических флуктуаций магнитных моментов зерен, однако примеры реализации этой возможности в автореферате, к сожалению, не приведены.
2. Обозначения не всех величин, используемых в автореферате, описаны должным образом, что несколько затрудняет восприятие. Например, не описаны обозначения $\langle D \rangle$ и $\langle D \rangle_V$.

Головня Оксаны Александровны, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории ферромагнитных сплавов, и *Попова Александра Гервасиевича*, кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника лаборатории ферромагнитных сплавов ФГБУН Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург). В отзыве содержатся следующие вопросы:

1. Моделирование высыпания полидисперсных частиц в LAMMPS производится с объектом упругая сфера и не является типичным подходом для формирования распределения многогранников Вороного. Почему был выбран такой метод?
2. Почему важно было получить именно логнормальную функцию распределения частиц?

3. Почему на рис. 2а кривая, описывающая приближение среднего поля, лучше согласуется с расчетной кривой $\sigma = 0,15$, а не $\sigma = 0$?
4. Чем вызван перегиб на рис. 2б на кривой $\beta = 0,3$ при аргументе 1,5?
5. Была ли проведена экспериментальная проверка полученных значений K_{eff} ?
6. Чем объясняется отсутствие гладкости на расчетной кривой рис. 6а $\langle \alpha \rangle_V = 0$ и $\beta = 0,06$?
7. Как производилась подгонка параметров α и β на рис. 6в? Из сравнений данных с рис. 5а, возникает ощущение, что экспериментальная кривая соответствует более низкому значению параметров α ?
8. Почему для апробации был выбран сплав $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{0.8}\text{Co}_{0.2})_{14}\text{B}$?

Савченко Александра Григорьевича, кандидата физико-математических наук, заведующего кафедрой физического материаловедения, и *Менушенкова Владимира Павловича*, кандидата физико-математических наук, заведующего научно-исследовательской лабораторией постоянных магнитов ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (г. Москва). В отзыве содержатся следующие замечания:

1. При компьютерном моделировании нанокристаллического сплава использованные в предложенной автором модели параметры были нормированы на первую константу магнитокристаллической анизотропии. При этом не было учтено, что для одноосных ферромагнетиков второй и даже третьей константой магнитной анизотропии в общем случае пренебрегать нельзя. Тем более, когда, например, как в случае соединения $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ при температурах ниже комнатной, первая константа становится отрицательной.
2. Не совсем понятно использование союза «и» в выражениях типа «графики Хенкеля и зависимости $\delta m(h)$ », ведь графики Хенкеля это и есть зависимости $\delta m(h) = m_d(H) - [1 - 2m_r(H)]$.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью и достижениями в области физики магнитных явлений, наличием аналитических работ цитируемых публикаций с

результатами исследования магнитных материалов и способностью определить научную и практическую значимость диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработана компьютерная программа, позволяющая моделировать процессы перемагничивания полидисперсных нанокристаллических сплавов с одноосной магнитной анизотропией и учитывающая обменное и магнитостатическое взаимодействия между зёрнами.

Для нанокристаллических сплавов со случайной ориентацией осей легкого намагничивания **установлены** зависимости остаточной намагниченности и магнитных восприимчивостей в состоянии остаточной намагниченности от параметра межзёрненного обменного взаимодействия. Магнитные восприимчивости анализировались в параллельном и перпендикулярном направлениях относительно остаточной намагниченности. Продемонстрированы изменения данных зависимостей под влиянием магнитостатического взаимодействия между зёрнами и дисперсии их размера.

Получены формулы, описывающие в рамках приближения среднего поля продольную и поперечную магнитные восприимчивости в состоянии остаточной намагниченности, как функции параметра межзёрненного обменного взаимодействия.

Разработан новый метод оценки эффективной константы магнитной анизотропии K_{eff} и константы межзёрненного обменного взаимодействия J_{int} , основанный на анализе продольной и поперечной магнитных восприимчивостей в состоянии остаточной намагниченности. Метод был опробован на нанокристаллическом сплаве $Nd_2(Fe_{0,8}Co_{0,2})_{14}B$.

Показано как меняются графики Хенкеля и зависимости $\delta M(H)$ изотропных магнитотвёрдых нанокристаллических сплавов при варьировании при прочих равных условиях: параметра межзёрненного обменного взаимодействия, параметра магнитостатического взаимодействия, среднеквадратического отклонения (СКО) размера зёрен и размагничивающего фактора.

Впервые предложено феноменологическое выражение, устанавливающее связь между максимумом $\delta M(H)$ и следующими величинами: константой магнитной анизотропии, константой межзеренного обменного взаимодействия, средним размером зерен и его СКО.

Для полидисперсных нанокристаллических сплавов со случайной магнитной анизотропией **установлены** зависимость коэрцитивной силы H_c от средневзвешенного по объему размера зерен $\langle D \rangle_V$ вида $H_c \propto \langle D \rangle_V^n$ с показателем степени $n < 6$ и зависимость n от СКО размера зерен $\sigma_V / \langle D \rangle_V$. Убывающий вид зависимости $n(\sigma_V / \langle D \rangle_V)$ объяснен в рамках теории случайной магнитной анизотропии через уменьшение магнитных корреляционных объемов и изменение их морфологии.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Результаты диссертационной работы способствуют развитию теоретических представлений о связи макроскопических магнитных гистерезисных свойств нанокристаллических сплавов с их микроструктурными параметрами и локальными взаимодействиями. В частности, результаты, касающиеся коэрцитивной силы полидисперсных нанокристаллических сплавов с сильным межзеренным обменным взаимодействием, способствуют развитию и обобщению модели случайной магнитной анизотропии. Предложенные методы количественного описания межзеренного обменного взаимодействия имеют предсказательную силу для высокоанизотропных нанокристаллических сплавов со случайной ориентацией осей легкого намагничивания. Работа вносит вклад в разработку современных методов компьютерного моделирования процессов перемагничивания в нанокристаллических сплавах.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Разработанный метод оценки эффективной константы магнитной анизотропии и константы межзеренного обменного взаимодействия может найти широкое применение для аттестации высокоанизотропных

нанокристаллических сплавов с одноосной магнитной анизотропией. Для таких сплавов также предложен метод количественного описания графиков Хенкеля и зависимостей $\delta M(H)$. Разработанные компьютерные программы могут использоваться для прогнозирования магнитных свойств нанокристаллических сплавов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Достоверность полученных в работе численных результатов обеспечивается проверкой разработанной соискателем компьютерной программы на задачах с известными решениями и сравнительными расчетами в независимых программах, в том числе в микромагнитном пакете OOMMF. Отдельные аналитические выкладки, представленные в работе, проверялись путем символьных вычислений. Ряд расчетных данных при слабом обменном взаимодействии между зернами соотносится с прогнозами теории среднего поля, при сильном обменном взаимодействии – с моделью случайной магнитной анизотропии.

Апробация расчетных результатов выполнена на экспериментальных данных, полученных для аттестованных образцов с использованием современного экспериментального оборудования.

Личный вклад соискателя:

Соискателем реализована генерация ансамблей полиэдров с применением молекулярной динамики и построений многогранников Вороного, написаны компьютерная программа в среде MATLAB и программа на языке Fortran, моделирующие процесс перемагничивания нанокристаллических сплавов. В обсуждении методического обеспечения последней из двух программ принимали участие научные сотрудники Университета Йорка (Великобритания). Соискателем выполнен весь объем представленных в работе вычислений и проведен анализ их результатов, в том числе анализ магнитных восприимчивостей в состоянии остаточной намагниченности в рамках теории среднего поля. Соискателем сформулирован метод оценки константы

межзеренного обменного взаимодействия на основе измерений магнитных восприимчивостей в состоянии остаточной намагниченности и предложено феноменологическое выражение для зависимости максимума $\delta M(H)$ от параметра межзеренного обменного взаимодействия. Соискатель принимал непосредственное участие в подготовке публикаций по выполненной работе.

Диссертационная работа Болячкина Антона Сергеевича соответствует п.9 Положения о присуждении ученых степеней и является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой соискателем исследована связь магнитных гистерезисных свойств нанокристаллических сплавов с обменным и магнитостатическим взаимодействиями между зернами, что имеет существенное значение для физики магнитных явлений.

На заседании 22 апреля 2019 г. диссертационный совет принял решение присудить Болячкину А.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 15 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 14, против нет, недействительных бюллетеней 1.

Председатель

диссертационного совета

Памятных Евгений Алексеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Овчинников Александр Сергеевич



22.04.2019 г.