ОТЗЫВ

официального оппонента Гречишкина Ростислава Михайловича на диссертационную работу Болячкина Антона Сергеевича «Роль обменного и магнитостатического взаимодействий в формировании гистерезисных свойств нанокристаллических сплавов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений».

Магнитные нанокристаллические сплавы имеют большое практическое значение для современной техники и технологий. Это справедливо как для класса магнитотвердых материалов, так и для магнитомягких, чьими яркими представителями являются нанокристаллические сплавы $Nd_2Fe_{14}B$ и $Fe_{73,5}Si_{13,5}B_9Nb_3Cu_1$ (сплав марки Finemet) соответственно. Известно, что макроскопические магнитные свойства таких сплавов сильно зависят от их микроструктуры: фазового состава и морфологии зерен, включающей в себя их размер, форму и пространственную организацию. Современные методы исследования микроструктуры сплавов позволяют определить ее параметры и установить зависимости гистерезисных магнитных свойств, как функции от них. Например, зависимость коэрцитивной силы нанокристаллического сплава от среднего размера зерен. Но не меньшую роль для нанокристаллических сплавов играют взаимодействия между зернами, а именно магнитостатическое и межзеренное обменное взаимодействия. Напрямую охарактеризовать эти взаимодействия нельзя, требуется привлечение косвенных методов для их анализа и зачастую компьютерное моделирование. Поэтому на данный момент остается множество важных вопросов, адресованных связи гистерезисных свойств нанокристаллических сплавов с обменным и магнитостатическим взаимодействиями. Поиску ответов на ряд таких вопросов преимущественно путем компьютерного моделирования посвящена диссертационная работа Болячкина Антона Сергеевича «Роль обменного и магнитостатического взаимодействий в формировании гистерезисных свойств нанокристаллических сплавов», которая несомненно является актуальной и демонстрирует новизну полученных результатов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Полный объем текста составляет 132 страницы, включая 42 рисунка, 2 таблицы, 56 формул и 115 источников в списке использованной литературы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель, задачи и основные положения, выносимые на защиту. Здесь же отмечена новизна, научное и практическое значение результатов, а также приведены сведения об апробации работы.

В первой главе представлен подробный обзор литературы по теме диссертации. В нем описаны как классическая модель магнитного гистерезиса, предложенная Стонером и Вольфартом, так и обобщения на ее основе. Для нанокристаллических сплавов рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования графиков Хенкеля и $\delta M(H)$, а также полевых зависимостей продольной и поперечной обратимых магнитных восприимчивостей. Глава завершается формулировкой цели и основных задач работы.

Во второй главе детально описана компьютерная модель нанокристаллического сплава, в рамках которой получены все численные результаты в данной работе. Представлены подробности как создания структуры модельного сплава, так и вычисления его свободной энергии и процесса перемагничивания в разработанной автором компьютерной программе, в

которой задействован кинетический метод Монте Карло. Положительной оценки заслуживает апробация авторской программы путем сравнения отдельных результатов ее расчетов с таковыми, полученными в известном микромагнитном пакете OOMMF. Продемонстрированное совпадение в пределах погрешности позволяет не сомневаться в достоверности представленных в работе результатов. Также в данной главе приведены характеристики экспериментально полученного нанокристаллического сплава $Nd_2(Fe_{0,8}Co_{0,2})_{14}B$, который использовался для опробования на практике ряда результатов вычислений. Описана структурная аттестация сплава, перечислены методики измерений магнитных свойств его образцов и использованное для этого оборудование.

В третьей главе даны результаты исследования остаточной намагниченности и магнитных восприимчивостей высокоанизотропных нанокристаллических сплавов с одноосной магнитной анизотропией и случайной ориентацией осей легкого намагничивания (ОЛН). К достоинству представленного исследования относится его комплексность. Оно включает в себя: аналитические выкладки в рамках теории среднего поля, компьютерное моделирование и экспериментальное опробование с применением результатов моделирования. Для остаточной намагниченности, продольной и поперечной магнитных восприимчивостей в состоянии остаточной намагниченности установлены зависимости от параметра межзеренного обменного взаимодействия, а также исследовано влияние на эти зависимости дисперсии размера зерен и магнитостатического взаимодействия. Вышеупомянутый параметр – это отношение характерных энергий межзеренного обменного взаимодействия и магнитной анизотропии. Оригинальным является предложенный в работе метод оценки константы межзеренного обменного взаимодействия и эффективной константы магнитной анизотропии в высокоанизотропных нанокристаллических сплавах, основывающийся на измерениях магнитных восприимчивостей в состоянии остаточной намагниченности. Данный метод был опробован на быстрозакаленном сплаве $Nd_2(Fe_{0,8}Co_{0,2})_{14}B$, для которого были получены значения констант, коррелирующие с таковыми из других источников.

В четвертой главе представлено исследование влияния микроструктурных параметров и взаимодействий между зернами на вид графиков Хенкеля и $\delta M(H)$ высокоанизотропных нанокристаллических сплавов со случайной ориентацией ОЛН. В частности, при прочих равных условиях последовательно рассмотрена трансформация вышеуказанных графиков при варьировании параметра межзеренного обменного взаимодействия, дисперсии размера зерен, параметра магнитостатического взаимодействия и размагничивающего фактора. Предложено феноменологическое выражение, связывающее максимальное значение зависимости $\delta M(H)$ с параметром межзеренного обменного взаимодействия. Для образца нанокристаллического сплава $Nd_2(Fe_{0,8}Co_{0,2})_{14}B$ выполнена аппроксимация графика $\delta M(H)$ при помощи компьютерного моделирования. На ее основе определены микромагнитные параметры сплава.

В пятой главе описаны результаты исследования коэрцитивной силы нанокристаллических сплавов со случайной магнитной анизотропией. Обнаружено, что зависимость коэрцитивной силы H_c от среднего размера зерен $\langle D \rangle_V$ имеет степенной вид $H_c \propto \langle D \rangle_V{}^n$, где показатель n сильно зависит от нормированного среднеквадратического отклонения размера зерен $\sigma_V / \langle D \rangle_V$. А именно, n резко уменьшается от 6 (для монодисперсного случая) до значения, близкого к 3 при $\sigma_V / \langle D \rangle_V = 0{,}15$. Данный результат интерпретирован автором в рамках теории случайной магнитной анизотропии. Показано, что при увеличении дисперсии

размера зерен уменьшаются магнитные корреляционные объемы и изменяется их морфология. Выдвинута гипотеза о фрактальной размерности данных объемов. Эти новые результаты представляют непосредственный интерес для развития теории случайной магнитной анизотропии.

Таким образом, к наиболее важным научным результатам, полученным диссертантом, можно отнести следующее:

Впервые для высокоанизотропных нанокристаллических сплавов со случайной ориентацией ОЛН, находящихся в состоянии остаточной намагниченности, изучены магнитные восприимчивости в параллельном и перпендикулярном направлениях относительно вектора остаточной намагниченности, как функции параметра межзеренного обменного взаимодействия. Выведены формулы, описывающие данные зависимости при слабом межзеренным обменном взаимодействии. Разработан новый метод оценки константы магнитной анизотропии и константы межзеренного обменного взаимодействия в высокоанизотропных нанокристаллических сплавах. Для этих же сплавов изучены изменения графиков Хенкеля и зависимостей $\delta M(H)$, обусловленные взаимодействиями между зернами. Установлено количественное соотношение между максимумом $\delta M(H)$ и параметром межзеренного обменного взаимодействия.

Для нанокристаллических сплавов с сильным межзеренным обменным взаимодействием и случайной магнитной анизотропией впервые изучено влияние дисперсии размера зерен на зависимости коэрцитивной силы от среднего размера зерен. Установлено, что данные зависимости имеют степенной вид с показателем, зависящим от дисперсии размера зерен.

Диссертация Болячкина Антона Сергеевича является законченной исследовательской работой, выполненной на профессиональном уровне, и заслуживает высокой положительной оценки. Ее результаты носят общий характер, а вышеупомянутый метод оценки констант применим для широкого ряда магнитных нанокристаллических сплавов. Положительному впечатлению о работе способствует то, что результаты компьютерного моделирования были опробованы на экспериментальных данных.

По материалам диссертационной работы автором опубликовано три научные статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, одна из которых входит в Q1. Автор также имеет одно свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ. Результаты работы докладывались и обсуждались с ведущими специалистами как на всероссийских, так и международных конференциях. Автореферат диссертации полностью отражает содержание диссертационной работы.

Однако имеется ряд вопросов и замечаний по диссертационная работе:

1. В работе не указывается чем обоснован выбор именно быстрозакаленного сплава $Nd_2(Fe_{0,8}Co_{0,2})_{14}B$ для опробования расчетных результатов. Из каких соображений было выполнено частичное замещение Fe на Co?
2. В работе отмечается, что при комнатной температуре размер абсолютной однодоменности для $Nd_2Fe_{14}B$ составляет около 20 нм. Для исследуемого сплава $Nd_2(Fe_{0,8}Co_{0,2})_{14}B$ согласно данным рентгеноструктурного анализа приводится значение среднего размера зерен около 45 нм. Насколько корректно использование для анализа

магнитных свойств такого сплава компьютерной модели, в которой заложено когерентное вращение намагниченности зерен?

3. В третьей и четвертой главах независимыми способами определены константы эффективной магнитной анизотропии и константы межзеренного обменного взаимодействия. Для более объективного сравнения этих констант желательна оценка погрешностей их определения.
4. В пятой главе исследуется коэрцитивная сила нанокристаллических сплавов со случайной магнитной анизотропией и сильным межзеренным обменным взаимодействием. Данное исследование актуально для магнитомягких наноструктурированных материалов, для которых могут иметь значение термические флуктуации магнитных моментов зерен. Однако в исследовании это не учитывалось.
5. В работе использована устаревшая система единиц СГС.

Приведенные замечания не снижают научной ценности диссертационной работы и не влияют на общее положительное впечатление. Диссертация по содержанию, предмету, задачам и результатам исследований полностью соответствует избранной специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений».

Диссертационная работа Болячкина Антона Сергеевича «Роль обменного и магнитостатического взаимодействий в формировании гистерезисных свойств нанокристаллических сплавов» полностью удовлетворяет требованиям п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Таким образом, Болячкин Антон Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной выше специальности.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной физики — Р.М. Гречишкин
«22» марта 2019 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет»
Адрес: 170100, г. Тверь, ул. Желябова, д.33
Тел. +7 (4822) 34-24-52
Факс +7 (4822) 32-12-74
E-mail: Grechishkin.RM@tversu.ru

Подпись Гречишкина Р.М.
ПОДТВЕРЖДАЮ Проректор по НИД
И.А. Каплунов