

ОТЗЫВ

официального оппонента Степанова Виктора Ивановича на диссертационную работу Болячкина Антона Сергеевича «**Роль обменного и магнитоэлектростатического взаимодействий в формировании гистерезисных свойств нанокристаллических сплавов**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 - Физика магнитных явлений.

Актуальность темы: Диссертационная работа А.С. Болячкина посвящена исследованию влияния локальных взаимодействий и микроструктурных параметров магнитных нанозерен на макроскопические гистерезисные свойства магнитных сплавов. Детальное понимание этих зависимостей важно для создания нанокompозитных магнитных материалов с рекордными характеристиками, такими как коэрцитивная сила, энергетическое произведение, температура Кюри. Ввиду своей сложности, задача учета локальных взаимодействий в магнитных нанокристаллических сплавах, сформулированная достаточно давно, не является в настоящий момент решенной в полной мере с точки зрения количественных результатов. Восполнение этого пробела является актуальной задачей, имея в виду расчет макроскопических характеристик магнитных нанокompозитов, исходя из микроскопических свойств составляющих их нанозерен и межзеренных взаимодействий.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. **Во Введении** описана актуальность работы, степень разработанности темы исследования, сформулированы цель работы и задачи, методология и методы исследования, научная новизна работы, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности, личный вклад автора и апробация работы. **Первая глава** посвящена обзору литературы по теме диссертации. В ней достаточно полно освещено современное состояние исследований, обобщающих классическую теорию магнитного гистерезиса Стонера-Вольфарта с целью учета обменного и магнитоэлектростатического взаимодействия между частицами, термических флуктуаций магнитных моментов частиц, динамического режима перемагничивания частиц. Также рассмотрены современные методы компьютерного моделирования магнитных нанокompозитов. **Вторая глава** посвящена описанию методики исследования поставленных задач. Основным методом является компьютерное моделирование, включающее в себя молекулярную динамику, построения многогранников Вороного с учетом

весовых коэффициентов, кинетический метод Монте-Карло (КМК), моделирование по алгоритму Метрополиса и микромагнитное моделирование. Кроме того, использовались аналитические методы в рамках теории среднего поля. Для экспериментальной апробации отдельных расчетных результатов был получен нанокристаллический сплав $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2})_{14}\text{B}$ с образцами которого были проведены прецизионные магнитные измерения. **В третьей главе** представлены результаты экспериментальных и компьютерных исследований остаточной намагниченности и магнитных восприимчивостей высокоанизотропных нанокристаллических сплавов. Эти же величины были сосчитаны в рамках приближения среднего поля аналитическим методом. Аналитические вычисления удачно дополняют компьютерное моделирование в части интерпретации полученных результатов. В этой же главе проанализировано влияние на магнитные восприимчивости распределения зерен по размерам и магнитостатического взаимодействия между ними. Сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования позволило сформулировать новый метод оценки эффективной константы магнитной анизотропии и константы межзеренного обменного взаимодействия на основе измерений продольной и поперечной магнитных восприимчивостей в состоянии остаточной намагниченности. **В четвертой главе**, на основе компьютерного моделирования высокоанизотропных нанокристаллических сплавов со случайной ориентацией осей легкого намагничивания построены графики Хенкеля и зависимости $\delta m(h)$. Эти кривые наиболее информативно отражают роль локальных взаимодействий, привнесенных в классическую модель Стонера-Вольфарта. Сравнение экспериментальных графиков образца быстрозакаленного сплава $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2})_{14}\text{B}$ с результатами компьютерного моделирования позволило сделать количественные оценки для параметров межзеренного обменного взаимодействия и магнитостатического взаимодействия. **Пятая глава** посвящена исследованию коэрцитивной силы полидисперсных ансамблей со случайной магнитной анизотропией путем моделирования КМК методом. Особое внимание уделено зависимости коэрцитивной силы от среднего размера зерен с учетом полидисперсности. **В заключении** приведены обобщенные результаты, сделаны выводы по диссертационной работе, а также обозначены перспективы дальнейшей разработки темы

На мой взгляд, наибольший интерес представляют следующие результаты работы, которые характеризуют ее научную **значимость**:

1. Формулы, описывающие в приближении среднего поля зависимости остаточной намагниченности, а также продольной и поперечной к ней компонент магнитной восприимчивости от параметра межзеренного обменного взаимодействия α . Аналитические выражения дают ключ к пониманию результатов компьютерного моделирования.

2. Зависимости продольной и поперечной магнитных восприимчивостей от параметра межзеренного обменного взаимодействия в промежутке $\langle\alpha\rangle_V \in [0; 1,5]$, полученные с учетом магнитостатического взаимодействия между зернами и дисперсии их размера.

3. Метод оценки эффективной константы магнитной анизотропии и константы межзеренного обменного взаимодействия в нанокристаллических сплавах, основанный на измерениях продольной и поперечной магнитных восприимчивостей в состоянии остаточной намагниченности.

4. Обоснование необходимости совокупного учета параметра межзеренного обменного взаимодействия α , дисперсии размера зерен, параметра магнитостатического взаимодействия β и размагничивающего фактора при интерпретации графиков Хенкеля и зависимостей $\delta M(H)$ нанокристаллических сплавов со случайной ориентацией осей легкого намагничивания.

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

6. Степенные зависимости коэрцитивной силы полидисперсных нанокристаллических сплавов со случайной магнитной анизотропией от среднего 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 в промежутке $\sigma_V / \langle D \rangle_V \in [0; 0,15]$.

Достоверность результатов компьютерного моделирования, полученных с помощью разработанной автором программы, проверялась на задачах с известными решениями, выполнялись сравнительные расчеты в независимых программах и микромагнитном пакете ООММФ, надежность которого признана научным сообществом. Результаты компьютерного моделирования при слабом обменном взаимодействии между зернами хорошо согласуются с теорией среднего поля, при сильном обменном взаимодействии – с моделью случайной магнитной анизотропии. Достоверность экспериментальных результатов подкрепляется

использованием аттестованных образцов и современного экспериментального оборудования.

Результаты диссертационной работы Болячкина Антона Сергеевича кроме научной, имеют и **практическую значимость** для оценки константы магнитной анизотропии и констант обменного и магнитостатического взаимодействий в нанокристаллических сплавах с одноосной магнитной анизотропией.

Публикации и апробирование результатов диссертационной работы: По теме диссертационной работы А.С. Болячкин в соавторстве опубликовал 3 статьи в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки РФ; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Работа хорошо известна научной общественности, её результаты докладывались на многочисленных международных и всероссийских конференциях и симпозиумах.

Диссертационная работа написана ясным языком, хорошо структурирована, все её части логически связаны между собой, а полученные в диссертации результаты полностью соответствуют поставленной в работе цели и задачам. Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание и результаты работы.

По работе имеются следующие вопросы и Замечания:

1. На мой взгляд, в диссертации несколько противоречиво отражена роль поворотных термических флуктуаций магнитных моментов наночастиц. С одной стороны говорится, что они не учитываются. И действительно, ни одной зависимости характеристики петли гистерезиса нанокристаллического сплава от температуры в работе не встречается. С другой стороны, для расчета этих характеристик используется кинетический метод Монте-Карло (КМК), который в своей основе предполагает наличие термических флуктуаций. С точки зрения кинетического метода петля гистерезиса всегда соответствует энергетически неравновесному состоянию, а в переменном поле появляется зависимость формы петли от частоты. Насколько правомерен предельный переход к нулевой температуре при использовании КМК?

2. Температурные флуктуации приносят с собой дополнительные эффекты в зависимости петли гистерезиса от размера частиц. Особенно чувствительны к флуктуациям малые частицы, находящиеся в

суперпарамагнитном состоянии. По этой причине по крайней мере левый участок на рисунках 5.2 я бы поставил под знак вопроса.

3. Считаю, что содержание диссертации и её практическая значимость выиграли бы, если была поставлена задача оптимизации параметров, характеризующих размер частиц и констант взаимодействия, с целью достижения максимальных характеристик: коэрцитивной силы, остаточной намагниченности, энергетического произведения.

Указанные недочёты не носят принципиального характера и не снижают общий высокий научный уровень диссертационной работы А.С. Болячкина.

Считаю, что диссертационная работа Болячкина Антона Сергеевича «Роль обменного и магнитостатического взаимодействий в формировании гистерезисных свойств нанокристаллических сплавов» полностью удовлетворяет требования п.9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор А.С. Болячкин заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 - Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

старший научный сотрудник лаборатории Динамики дисперсных систем "Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук" – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

(подпись) _____ / Степанов В.И. / « 29 » марта 2019 г.
(Ф.И.О)

(печать)



Почтовый адрес: 614088, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1

Телефон: (342)2378325, E-mail: stepanov@icmm.ru