



Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр «Красноярский научный
центр Сибирского отделения Российской академии
наук»
(ФИЦ КНЦ СО РАН)

Институт физики им. Л.В. Киренского
Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
(ИФ СО РАН)

Академгородок, д. 50, стр. 38,
Красноярск, 660036

тел.: (391) 243-26-35, факс (391) 243-89-23

14.03.2019 № 356 – 42 12171-107

на № _____ от _____

«Утверждаю»

директор ИФ СО РАН, д.ф.-м.н.

Балаев Д.А.

«14» марта 2019

ОТЗЫВ

Ведущей организации «Институт физики им. Л.В. Киренского, Федерального исследовательского центра "Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук"» 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

Актуальность работы

Гистерезисные свойства ферромагнитных сплавов являются основой для их практических приложений. Основным теоретическим подходом, с помощью которого было достигнуто принципиальное понимание магнитного гистерезиса является так называемое микромагнитное приближение. К сожалению, число точно решаемых задач в теории магнитного гистерезиса очень мало, что во многом сдерживает создание новых магнитных материалов и понимание корреляций «структура – свойства» по их кривым намагничивания. Микромагнитное моделирование является выходом из этой ситуации. Это отражается в значительном росте числа работ по этой тематике и в

многообразии компьютерных, программ для микромагнитного моделирования разработанных за последние десятилетия. Одной из основных проблем, затрудняющих теоретическое описание гистерезисных свойств, является учет таких основных взаимодействий в магнитной подсистеме, как магнитодипольное и обменное взаимодействия. Поскольку во многих задачах аналитически такой учет не может быть выполнен, востребованы компьютерные микромагнитные расчеты. Такие расчеты особенно полезны для разработки новых материалов, так как позволяют предсказывать, какие изменения в микроструктуре следует проводить для получения требуемых свойств. Также численные результаты для эталонных, хорошо методически поставленных задач, могут служить заделом для новых методов тестирования материалов. Поэтому работа Болячкина А.С., посвященная компьютерному моделированию магнитного гистерезиса в полидисперсных нанокристаллических сплавах, с целью установления его связи с обменным и магнитостатическим взаимодействиями, представляется актуальной.

Оценка проведенного исследования и полученных результатов

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во введении автор обосновал актуальность работы, сформулировал ее задачи, отметил новизну, научное и практическое значение результатов, а также привел сведения об апробации работы.

В 1-й главе дается обзор точных результатов полученных в рамках модели Стонера-Вольфарта, для сплавов с однородным и случайным распределением осей легкого намагничивания кристаллитов. Рассмотрены форма петли гистерезиса и угловые зависимости ее основных параметров: остаточной намагниченности, коэрцитивного поля и магнитной восприимчивости. Дан обзор состояния дел в исследованиях графиков Хенкеля, предложенных для оценок взаимодействий в ансамблях однодоменных частиц. В частности показано, что в настоящий момент, по этим данным возможны лишь качественные оценки взаимодействий.

Во 2-й главе описана предлагаемая автором численная модель нанокристаллического полидисперсного сплава. Подробно рассмотрены вопросы генерации и описания полидисперсных ансамблей кристаллитов. Даны детали техники микромагнитного моделирования использованной автором, такие как способы вычисления эффективного магнитного поля, периодические граничные условия. Здесь представлены новаторские подходы. Например, автор использовал учет диполь-дипольного взаимодействия, сочетая точный расчет дипольных сумм на малых расстояниях от макроспина и подход среднего поля на больших масштабах, что позволило ему резко повысить

скорость численного расчета с сохранением его точности и корректности. Приведены сведения о методиках экспериментальных измерений, выполненных для сравнения с численными расчетами.

В 3-й главе, автор сопоставил предсказания теории среднего поля с результатами моделирования. Сравнивалась зависимость остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости, в различных направлениях по отношению к вектору остаточной намагниченности, от отношения энергетических вкладов обменного взаимодействия и магнитной анизотропии кристаллитов. Показано, что при очень слабом обменном взаимодействии результаты теории среднего поля удовлетворительно согласуются с численным экспериментом. Определены интервалы отношения энергий, вне которых это согласие нарушается. Кроме того, изучено влияние магнитостатического взаимодействия и распределения кристаллитов по размеру на эти зависимости. Оказалось, что формулы для остаточной намагниченности характеризуются более широким диапазоном применимости, чем формулы для восприимчивости. Далее автор предложил новый метод оценки эффективной константы магнитной анизотропии кристаллитов и константы межзеренного обменного взаимодействия на основе сравнения данных численного эксперимента и измерений продольной и поперечной магнитных восприимчивостей в состоянии остаточной намагниченности. Этот метод был применен для оценки микромагнитных констант нанокристаллического сплава $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2})_{14}\text{B}$. Полученные оценки по порядку величины согласуются с литературными данными.

В 4-й главе приведены данные численного эксперимента по влиянию взаимодействий и полидисперсности в ансамбле кристаллитов со случайной ориентацией оси легкого намагничивания на необратимое поведение намагниченности – так называемые графики Хенкеля. Автор не только пронаблюдал такое влияние, но и выразил его количественно. Предложено эмпирическое выражение для связи легко измеряемого параметра графиков Хенкеля либо графиков Келли (максимума на зависимости $\delta M(H)$) и характеристиками сплава: средним размером, среднеквадратичным отклонением этого размера; константой магнитной анизотропии K и константой межзеренного обменного взаимодействия. Примечательно, что при всем многообразии вариантов микромагнитных проблем функциональный тип предложенной зависимости сохраняется, изменяются лишь величины коэффициентов. Установленные закономерности также были использованы для оценки фундаментальных магнитных констант нанокристаллических сплавов при сравнении измеренных и численных данных. Такие измерения и

последующие оценки были выполнены для нанокристаллического сплава $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{0,8}\text{Co}_{0,2})_{14}\text{B}$.

В 5-й главе описаны результаты численного эксперимента по влиянию полидисперсности в ансамбле кристаллитов нанокристаллического сплава на функциональную зависимость коэрцитивной силы от размера зерна. Здесь получен интересный новый результат – оказалось, что степенная зависимость коэрцитивной силы от размера сохраняется при изменении дисперсии, но ее показатель существенно изменяется: от 6 для монодисперсного ансамбля, до 3 при относительной дисперсии 0,3. Такое изменение указывает на возможность принципиальных изменений в магнитной микроструктуре объемного нанокристаллического сплава, а именно, на появление стохастических магнитных доменов с пониженной нецелой размерностью и, следовательно, на фрактальность «ряби намагниченности». Эту идею автор подтверждает оценками корреляционных радиусов намагниченности в исследуемых структурах.

К наиболее важным **научным результатам**, полученным диссертантом, можно отнести следующее:

Установлены границы применимости выражений теории среднего поля для параметров петли гистерезиса магнито жестких нанокристаллических сплавов. Разработаны и опробованы новые методы оценки эффективной константы магнитной анизотропии кристаллитов и константы межзеренного обменного взаимодействия для магнито жестких нанокристаллических сплавов. Проведен численный эксперимент, указывающий на формирование в магнитной микроструктуре объемного нанокристаллического сплава, стохастических магнитных доменов с пониженной нецелой размерностью. Данный результат имеет высокую общность и существенно расширяет традиционные представления о микромагнетизме нанокристаллических сплавов.

Практическая значимость работы

Автором разработана оригинальная компьютерная программа, позволяющая рассчитывать квазистатические и динамические процессы перемагничивания полидисперсных нанокристаллических сплавов с учетом межзеренного обменного и магнито статического взаимодействий и термических флуктуаций магнитных моментов зерен. Этот новый программный продукт сочетает плюсы метода конечных разностей (быстрота счета) и метода

конечных элементов (возможность выбора ячейки в форме произвольного полиэдра).

Рецензируемая работа не свободна от отдельных недостатков.

1. В основные выражения микромагнетизма входит константа обменного взаимодействия A , измеряемая в единицах эрг/см либо Дж/м. Автор использует параметр обменного взаимодействия измеряемый в единицах эрг/см². Пересчет полученных зависимостей от силы обменной связи к величинам A представляется весьма желательным. К сожалению, автор дает формулу для такого пересчета только для случая простой кубической решетки, указывая на сложности пересчета в прочих случаях.
2. Предположение об однородной намагниченности в пределах кристаллита, необходимое для замены кристаллитов макроспинами, выглядит правдоподобно для случая сильной обменной связи, поскольку направление намагниченности здесь слабо неоднородно в масштабах образца и практически однородно на масштабах много больше размера кристаллита. Для слабой обменной связи резкое изменение направления вектора намагниченности в соседних кристаллитах может приводить к необходимости учета неоднородности намагниченности внутри кристаллитов.
3. Методы определения микромагнитных констант сплавов, предложенные в работе, используют ряд дополнительных параметров, которые определяются экспериментально (размер кристаллита, ширина распределения по размеру), размагничивающий фактор. Ошибки в определении этих параметров приведут к неопределенности в оценках по предложенным методам. К сожалению, оценки этих ошибок не приводятся. Применение размагничивающего фактора в виде конкретной величины является оправданным только для однородных образцов эллипсоидальной формы. Удовлетворяют ли измеряемые образцы этому требованию?

Общий вывод

Анализ диссертации Болячника А.С. позволяет сделать заключение о достаточно высоком научном уровне и практической значимости полученных в ней результатов. Работа обладает четкой структурой, материал подается автором в логической последовательности, продиктованной поставленной целью и раскрывающими ее задачами. Математический аппарат используется соискателем корректно. Выполненные расчеты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Результаты работы хорошо опубликованы и прошли всестороннюю апробацию на российских и международных конференциях.

В целом, считаем, что работа Болячника 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 указанной выше специальности.

Отзыв на диссертацию обсужден на семинаре лаборатории физики магнитных плёнок и одобрен на семинаре отдела физики магнитных явлений (протокол №5 от 12 марта 2019 г).

руководитель семинара отдела Физики магнитных явлений,

доктор физико-математических наук, профессор,

зав. лабораторией физики магнитных плёнок _____

Исхаков Рауф Садыкович

Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения

Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38

Тел. +7(391) 243-26-35

Факс +7(391)243-89-23

E-mail: rauf@iph.krasn.ru

Подпись заведующего лабораторией физики магнитных плёнок д.ф.-м.н.,
проф. Исхакова Р.С. заверяю.

уг. секретарь



Р *А.О. Злотников*