

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
ДУНАЕВОЙ Галины Григорьевны
на тему «Взаимосвязь процессов перемагничивания и трансформации
доменной структуры на поверхности и в объёме магнитоодноосных
магнетиков», по специальности 1.3.12. - Физика магнитных явлений.

Диссертационная работа Дунаевой Г.Г. посвящена исследованиям, целью которых является установление взаимосвязи между процессами перемагничивания и преобразования доменной структуры (ДС) на поверхности и в объёме одноосных ферромагнетиков SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

Домены являются связующим звеном между микроструктурой образца заданной формы и его макроскопическими магнитными свойствами, такими как анизотропия, поле насыщения и магнитострикция. Процессы возникновения, формирования и исчезновения доменов во многом определяют магнитные свойства ферромагнетиков как магнитных материалов. Эта связь доменной структуры с целым рядом физических явлений, с одной стороны, способствует изучению ДС, так как является источником все более полных сведений о доменах и доменных границах, а с другой стороны, раскрывает новые черты самих указанных явлений и расширяет тем самым области их практического применения. Таким образом доменная структура является ключом к пониманию макроскопических магнитных свойств в ненасыщенном состоянии.

Механизм коэрцитивной силы зародышеобразования отвечает за улучшенные магнитотвердые свойства наиболее мощных современных спеченных постоянных магнитов $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и SmCo_5 . Следовательно, характеристики поверхности, в частности шероховатость отдельных зерен/кристаллов, могут оказывать значительное влияние на процесс перемагничивания. Понимание влияния поверхностных дефектов на изменение намагниченности этих объектов становится весьма сложной задачей, учитывая множество факторов, которые могут способствовать образованию очагов зарождения доменов обратного знака.

Таким образом, тема диссертационной работы является безусловно актуальной, как с точки зрения развития фундаментальных представлений о формировании доменной структуры высокоанизотропных магнитоодноосных магнитных материалов, так и для технологий производства постоянных магнитов.

Сформулированные цель и задачи работы отвечают критериям новизны, важны для понимания представлений о влиянии тонкого поверхностного слоя на процессы перемагничивания магнитоодноосных высокоанизотропных материалов для создания постоянных магнитов.

Основные положения, выносимые на защиту, а также выводы и рекомендации, сделанные по главам, основаны на анализе полученных результатов в совокупности с данными литературных источников.

Результаты, полученные с помощью современных экспериментальных методов, среди которых вибрационная магнитометрия, атомно- и магнитно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия и магнитооптическая микроскопия, были сопоставлены с данными микромагнитного моделирования, выполненного в пакете COMSOL Multiphysics, что свидетельствует о высокой степени достоверности полученных данных, а также о высокой квалификации соискателя.

Представленная диссертация состоит из введения, трех глав с основными результатами и выводами, списка литературы. Материал изложен на 166 страницах, включает 3 таблицы и 101 рисунок.

Во **введении** обоснованы актуальность и целесообразность изучения трансформации в магнитном поле доменной структуры на поверхности и в объёме одноосных высокоанизотропных монокристаллических и пленочных образцов магнитных материалов. Сформулированы цель и задачи работы, а также выносимые на защиту положения.

В **первой** главе представлен актуальный анализ научной литературы по о кристаллической структуре и магнитным свойствам исследуемых материалов. Рассмотрено понятие доменной структуры и причины её возникновения, описана физика процесса намагничивания.

Вторая глава посвящена методике проведения эксперимента. Представлено описание используемых в работе материалов, оборудования, методов получения образцов и методик исследования химического состава, микроструктуры, доменной структуры и магнитных свойств.

Особенную ценность в работе представляют разработанный ряд уникальных экспериментальных методик наблюдения трансформации доменной структуры магнетиков в статических и/или динамических магнитных полях, а также установка измерения намагниченности методом вибрационного магнитометра, позволяющая проводить эксперименты в квазистатических и/или переменных полях.

Основные экспериментальные результаты приводятся автором в третьей главе диссертации. Среди научных результатов, имеющих важное научное значение, хотелось бы отметить следующие:

1. На основании исследований конфигураций ДС на поверхности и в объеме монокристаллов до и после воздействия мили- и микро-импульсных полей, сонаправленных с осью легкого намагничивания образцов, показано, что процессы перемагничивания монокристалла $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ носят безгистерезисный характер. В случае соединения SmCo_5 , обладающего меньшей шириной и большой энергией ДГ, которая может легче закрепляться на структурных неоднородностях реального кристалла, после воздействия микросекундного поля с длительностью спада импульсного сигнала до 15 мкс и амплитудой более 1 Тл на поверхности была обнаружена и выделена как отдельный тип неравновесная разветвленная дендритная структура доменов, названная «морозный узор». При этом в объеме формируется нерегулярная беспорядочная ДС, подтверждающая, что процессы задержки смещения ДГ происходят во всем объеме.

2. В результате сопоставления исследований полей рассеяния поверхностной доменной структуры на базисной плоскости магнитоодноосных монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, полученных методами оптической, магнитно-силовой микроскопии и численного моделирования, установлено, что минимальными элементами поверхностной доменной структуры массивных монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ являются дополнительные конусообразные домены с диаметром основания 2,0 мкм и высотой 2,0 мкм, а также 0,6 мкм и высотой 0,6 мкм, соответственно.

Научная новизна работы заключается в уточнении представления о влиянии тонкого поверхностного слоя на процессы перемагничивания магнитоодноосных высокоанизотропных материалов для создания постоянных магнитов. В результате исследований доменной структуры на поверхности монокристаллов SmCo_5 в микросекундном импульсном магнитном поле в широком диапазоне амплитуд впервые обнаружена и выделена как отдельный тип неравновесная разветвленная дендритная структура доменов, названная «морозный узор». В ходе численного моделирования методом конечных элементов для изотропных и высокоанизотропных магнетиков с помощью разработанной модели индукционного принципа измерения намагниченности вибрационного магнитометра для образцов различной формы построены кривые намагничивания, пространственные распределения намагниченности, индукции и напряженности полей внутри и снаружи моделируемых объектов. Рассчитанные закономерности распределения намагниченности в объеме позволили построить зависимости

фактора размагничивания от приведенной к значению при насыщении намагниченности. В результате сопоставления исследований полей рассеяния поверхностной доменной структуры на базисной плоскости магнитоодноосных монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, полученных методами оптической, магнитно-силовой микроскопии и численного моделирования, установлено, что минимальными элементами поверхностной доменной структуры массивных монокристаллов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ являются дополнительные конусообразные домены с диаметром основания 2,0 мкм и высотой 2,0 мкм, а также 0,6 мкм и высотой 0,6 мкм, соответственно. На основании данных исследований уточнена модель доменной структуры одноосного магнетика.

Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах, из них 6 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных, приравниваемых к журналам перечня ВАК, и 1 статья в другом рецензируемом издании.

Работа написана грамотным научным языком, корректно оформлена. Особенно хотелось бы отметить высокое качество подготовки графического материала. Данные представлены в логической последовательности, стиль изложения и оформление соответствуют уровню требований, предъявляемых к кандидатским диссертациям.

В целом работа производит очень благоприятное впечатление, однако, можно задать некоторые вопросы и сделать замечания:

1. В работе автор сообщает, что для того, чтобы в процессах намагничивания и размагничивания ферромагнитного монокристалла SmCo_5 в последовательно изменяющемся поле наблюдать равновесную доменную структуру, «к образцам необходимо прикладывать переменное поле постоянной амплитуды в диапазоне 30-60 мТл с частотой 50 Гц, соосное оси легкого намагничивания». В работе не приводятся данные о том, варьировалась ли частота переменного поля и как ее значение влияет на результат перемагничивания.

2. Автор повсеместно использует понятие «равновесная доменная структура» при сравнении результатов размагничивания монокристаллов по различным протоколам. Из экспериментальных изображений доменов, полученных в работе, видно, что на базисной плоскости одноосных монокристаллов в размагниченном состоянии всегда присутствуют дополнительные домены типа «звездочки», и при этом площади доменов противоположного знака одинаковы, что свидетельствует о размагниченном состоянии. Возможна ли какая-то количественная оценка того на сколько именно

«идеальна» равновесная доменная структура, сформировавшаяся на поверхности монокристалла после очередного цикла перемагничивания - возможно ли определить степень ее неравновесности? Какие особенности в структуре доменов на базисной плоскости одноосного монокристалла первыми укажут на то, что формирование магнитной структуры поверхности прошло в неравновесных условиях?

3. В связи с большим количеством измерений и множеством циклов перемагничивания, которым подвергались исследуемые монокристаллы, было бы информативно упомянуть в работе о том, влияет ли магнитная предыстория образцов на каждый последующий результат.

4. Ход кривых намагничивания, построенных на основе магнитооптических изображений доменов с разных участков поверхности шлифа, отличается друг от друга, что, как показано в работе, связано со сложным распределением полей размагничивания образца в объеме. Представляется интересным построить кривую намагничивания, полученную на основе интегральных данных со всей поверхности шлифа? Каким будет ход полевой зависимости намагниченности, построенной по данным о трансформации доменной структуры всей поверхности шлифа, по сравнению с кривыми намагниченности, зарегистрированными на центральной и прикраевой областях образца в форме усеченной сферы?

Отмеченные замечания не уменьшают ценности диссертации, которая выполнена на достаточно высоком научном уровне, и носят скорее пожелания для дальнейших исследований.

Диссертация Дунаевой Г.Г. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на современном уровне. Достоверность результатов и обоснованность выводов не вызывают сомнений. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Дунаевой Галины Григорьевны соответствует паспорту специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений по физико-математическим наукам по пунктам: 3. Экспериментальные исследования магнитных свойств и состояний веществ различными методами, установление взаимосвязи этих свойств и состояний с химическим составом и структурным состоянием, выявление закономерностей их изменения под влиянием различных внешних воздействий; 6. Моделирование свойств и физических явлений в материалах с различными видами магнитного упорядочения, а также в

композитных структурах на их основе; отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям в соответствии с п. п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 №842), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12-Физика магнитных явлений.

Я, Каминская Татьяна Петровна, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Научный сотрудник кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Московский государственный университета имени М.В. Ломоносова»,
кандидат технических наук,
доцент

Каминская Татьяна Петровна

Адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские годы, МГУ им.М.В.Ломоносова, д.1,
стр.2, Физический факультет
Телефон +7 (495) 939-43-07,
Адрес электронной почты: ktp53@mail.ru

Подпись научного сотрудника кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Московский государственный университета имени М.В. Ломоносова» Т.П.Каминской заверяю:

И.о. декана
Физического факультета МГУ
Профессор

Белокуров В.В.

22 апреля 2025г.