

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.

Актуальность работы

Для успешного использования постоянных магнитов (ПМ) в энергетике и, в частности, в ее активно развивающемся секторе зеленой энергетики, а также в области высокотемпературных приложений, необходимо обеспечить высокую коэрцитивную силу этих магнитных материалов. Однако текущие значения коэрцитивной силы, полученные для различных ПМ, все еще значительно ниже верхнего предела, рассчитанного теоретически и, как правило, достигают лишь 25% от их внутреннего потенциала. Это несоответствие известно как парадокс Брауна, который по-прежнему является важной темой в современных исследованиях по ПМ. Чтобы преодолеть этот порог и удовлетворить растущий спрос на магниты с более высокой коэрцитивной силой в различных областях применения, крайне важно понять причину такой большой разницы. В спеченных магнитах типа $Nd_2Fe_{14}B$ или $SmCo_5$ процесс перемагничивания обычно связан с образованием перемагничивающих магнитных доменов на дефекте поверхности монокристаллических зерен, где постоянная локальной анизотропии может быть значительно снижена. Следовательно, понимание влияния поверхностных дефектов на изменение намагниченности этих объектов становится весьма сложной задачей, учитывая множество факторов, которые могут способствовать образованию областей зарождения доменов обратного знака.

Таким образом, тема диссертационной работы является безусловно актуальной, как с точки зрения развития фундаментальных представлений о процессах перемагничивания приповерхностных и глубинных слоев магнитоодноосных высокоанизотропных материалов, так и для практического применения в технологиях создания постоянных магнитов.

Следует отметить, что диссертационное исследование выполнялось в соответствии с тематическими планами НИР по различным проектам, что несомненно, повышает ценность этого диссертационного исследования.

Структура и оценка содержания работы

Структура диссертационной работы включает в себя введение, три главы, выводы и список использованной литературы, состоящий из 110 источников. Материал изложен на 166 страницах, включает 3 таблицы и 101 рисунок.

Во введении обосновывается целесообразность и актуальность изучения трансформации во внешнем магнитном поле поверхностной доменной структуры передовых магнитоодноосных материалов для производства постоянных магнитов. Определяются цель и задачи работы, а также вносимые на защиту положения.

В первой главе представлен подробный и грамотно изложенный литературный обзор о кристаллической структуре и магнитных свойствах исследуемых материалов. Рассмотрено понятие доменной структуры и причины её возникновения, описана физика процесса намагничивания.

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

Достоинством диссертации являются продуманность и тщательность проведенных экспериментов, анализ их результатов на основе развитых теоретических и модельных представлений. Заслуживает внимания тот факт, что в методической части работы соискатель для выполнения поставленных перед ним задач использовал несколько различных методов исследования: разработанную на кафедре физики конденсированного состояния Тверского государственного университета методику регистрации и автоматического анализа изображений доменной структуры на оптическом микроскопе для построения кривой намагничивания поверхности, метод вибрационного магнитометра, магнитно-силовой микроскопии и расчетного моделирования методом конечных элементов в САПР COMSOL Multiphysics.

Основные экспериментальные результаты приводятся автором в третьей главе диссертации.

Достоверность научных положений и выводов, обсуждаемых в диссертации, подтверждается использованием тщательно аттестованных современными методами образцов монокристаллов SmCo_5 , $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, а также эпитаксиальной Bi -содержащей монокристаллической пленки феррит-гранатов (Vc -МПФГ) состава $(\text{Fe,Ga})_5\text{O}_{12}(\text{Gd,Bi,Lu})_3$, подробным описанием используемых в работе экспериментальных методов измерения физических параметров.

Степень обоснованности научных положений и достоверность полученных результатов

Результаты, представленные в диссертации, получены на основе экспериментов, проведенных на современном научном оборудовании, с использованием статистических методов обработки экспериментальных данных. Достоверность полученных результатов обеспечивалась набором взаимодополняющих экспериментальных методик, воспроизводимостью получаемых результатов и согласованием получаемых результатов с имеющимися в литературе данными других научных групп. Полученные результаты

исследований опубликованы в индексируемых журналах и апробированы на тематических международных конференциях.

Основные положения, выносимые на защиту, а также выводы и рекомендации, сделанные по главам, основаны на тщательном анализе литературных источников. Библиография включает необходимую для адекватного понимания часть публикаций в предметной области.

Научная новизна

1. В результате исследования доменной структуры на поверхности монокристаллов SmCo_5 в микросекундном импульсном магнитном поле в широком диапазоне амплитуд впервые обнаружена и выделена как отдельный тип разветвлённая дендритная структура радиально расположенных от центра зарождения доменов.

2. Проведены исследования процессов перемагничивания магнитоодноосных монокристаллов разной толщины и пленочных образцов методами вибрационного магнитометра и анализа трансформации поверхностной доменной структуры в квазистатических и динамических магнитных полях. Экспериментально установлена взаимосвязь трансформации микромагнитной структуры в объёме и на поверхности исследуемых объектов с процессами их перемагничивания.

3. Впервые в ходе численного моделирования методом конечных элементов для изотропных и высокоанизотропных магнетиков с помощью разработанной модели индукционного принципа измерения намагниченности (вибрационный магнитометр) для образцов различной формы построены кривые намагничивания, пространственные распределения намагниченности, индукции и напряженности полей внутри и снаружи моделируемых объектов. На основе рассчитанных закономерностей распределения намагниченности в объёме построены зависимости фактора размагничивания от приведенной к значению при насыщении намагниченности.

4. Впервые в результате сопоставления профилей полей рассеяния поверхностной доменной структуры магнитоодноосных монокристаллов, полученных методами магнитно-силовой микроскопии и численного моделирования, определены линейные размеры минимальных элементов поверхностной ДС.

Практическая значимость

В работе разработан ряд уникальных экспериментальных методик по наблюдению трансформации доменной структуры магнетиков в статических и динамических магнитных полях, усовершенствована установка измерения намагниченности методом вибрационного магнитометра, позволяющая проводить эксперименты в квазистатических и/или переменных полях.

Результаты исследований могут быть востребованы в курсах лекций по магнитным материалам в ЧелГУ, ТвГУ, МГУ им. В.М. Ломоносова, НИТУ МИСИС, УрФУ и других университетах.

Научная значимость

В ходе выполнения диссертационной работы расширены 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, магнитосиловой 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.

Степень завершенности работы и качество ее оформления

Диссертация Дунаевой Г.Г. представляет законченную научно-исследовательскую работу. Постановка задач исследования, методики их реализации, полученные результаты изложены с необходимой степенью подробности. Диссертация написана четким и понятным языком, хорошо оформлена.

Апробация результатов и публикации

Результаты работы прошли апробацию на известных международных конференциях по тематике исследования. 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 других рецензируемых изданиях.

Вопросы и замечания по содержанию работы

В работе сделано интересное предположение о магнитострикционном механизме воздействия переменного поля на релаксационные процессы

дефектной структуры монокристаллов, неравновесное состояние которой вызвано изменением магнитоупругой энергии при изменении внешнего магнитного поля. Следовало бы на основе магнитострикционных свойств исследуемых составов провести оценку данного вклада в процессы смещения доменных границ при перемагничивании.

1) В работе приведены расчеты фрактальной размерности (ФР) доменной структуры, рассчитанные в программе Gwyddion методом подсчета кубов. Несмотря на то, что полученные зависимости значений ФР хорошо согласуются с видом и распределениями доменов на микрофотографиях поверхности исследуемых образцов, однако их значение не должны превышать 2. В рамках данной работы речь идёт о фрактальной размерности контура доменной структуры, поэтому для расчета ФР необходимо использовать следующее уравнение связи (исходя из утверждения, что ФР поверхности соответствует кластерной размерности трёхмерных агрегатов):

$$D_L = D_f - 1$$

2) В работе нет указания на температуру, при которой проводились исследования доменной структуры.

3) К сожалению, работа не лишена грамматических и стилистических ошибок.

4) Выводы диссертации базируются на большом экспериментальном материале и сомнений не вызывают. Однако они громоздки.

Заключение

Сделанные замечания никак не влияют на положительную оценку диссертационной работы Дунаевой Г.Г. Работа выполнена на отличном научном и экспериментальном уровне, полученные результаты обладают научной новизной, а также имеют четкую практическую значимость. Все перечисленное выше позволяет утверждать, что обозначенные в работе цели достигнуты, задачи исследования решены, а положения, выносимые на защиту, доказаны.

Автореферат адекватно 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, Таскаев Сергей Валерьевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Ректор ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,
доктор физико-математических наук,
доцент

Таскаев Сергей Валерьевич

Адрес: 54001, Челябинская обл., г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, д.129
Телефон (мобильный) +7-919-314-00-00,
Адрес электронной почты: s.v.taskaev@gmail.com

21 апреля 2025г.