

«УТВЕРЖДАЮ»

Исполняющий обязанности ректора
Балтийского федерального университета
имени Иммануила Канта,
кандидат физико-математических наук,
доцент

М.В. Демин

« 10 » июля 2025г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Синкевича Артема Игоревича
на тему «Магнитокристаллическая анизотропия и доменная структура
интерметаллидов $Y_2(Fe,Co)_{17}$ и их гидридов», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.12. - Физика магнитных явлений

Актуальность работы

Магнитокристаллическая анизотропия (МКА) является одной из важнейших характеристик магнитного материала, которой уделяется отдельное внимание в случае потенциальной возможности использования изучаемого материала для изготовления современных высокоэнергоемких постоянных магнитов. С практической точки зрения важным является как тип, так и величина констант магнитокристаллической анизотропии соединения. В таком случае особое внимание уделяется способам усиления одноосной магнитокристаллической анизотропии соединения, таким как: отклонение от стехиометрии, замещение одних атомов другими в составе, использование легких атомов внедрения, и другие. В то же время с фундаментальной точки зрения наиболее интересными являются граничные и комплексные случаи, в которых функция энергии магнитокристаллической анизотропии соединения ведет себя наиболее сложным образом.

В представленном диссертационном исследовании оба обозначенных аспекта изучения магнитокристаллической анизотропии раскрыты на примере соединений системы Y_2M_{17} ($M - Fe, Co$). В качестве способов управления магнитокристаллической анизотропией соединений рассматриваются и изучаются синтез квазибинарных соединений, в которых часть одного элемента в 3d-подрешетке заменено другим, а также синтез соединений с легкими атомами внедрения (водород). В то же время в качестве примеров сложного поведения магнитокристаллической анизотропии рассматриваются соединения с индуцированными температурой фазовыми переходами, а также соединения на

границах концентрационных диапазонов, соответствующих одноосной и плоскостной магнитокристаллической анизотропии. Для обозначенных соединений проведен комплексный анализ их магнитокристаллической анизотропии с точки зрения теоретических моделей, а также рассмотрено её влияние на микромагнитную структуру исследуемых составов.

Таким образом, в диссертационном исследовании раскрыты как практически, так и теоретически значимые аспекты изучения магнитокристаллической анизотропии рассматриваемых материалов. Это позволяет заключить, что представленная работа является актуальной.

Следует отметить, что диссертационное исследование выполнялось в соответствии с тематическими планами НИР по различным проектам, что повышает его ценность.

Структура и оценка содержания работы

Структура диссертационной работы включает в себя введение, четыре главы, основные выводы и список цитированной литературы, состоящий из 128 источников. Материал изложен на 160 страницах, включает 15 таблиц и 61 рисунок.

Во введении сформулированы цель и задачи, решаемые в диссертационной работе, а также вносимые на защиту положения, обоснована их актуальность, новизна и практическая значимость.

В первой главе сделан литературный обзор по теме исследования. Автором рассмотрены особенности фазообразования, кристаллической структуры и магнитных свойств соединений $R_2(Fe,Co)_{17}$ и $R_2Fe_{17}H_x$, а также определены направления, недостаточно подробно изученные в научной литературе.

Во второй главе описаны методики синтеза исследуемых соединений и их гидридов, условия термических обработок образцов, представлены методы аттестации полученных образцов с помощью рентгеновской дифракции, оптической микроскопии. Описаны используемые в работе экспериментальные методики исследования кристаллической структуры, магнитных параметров и микромагнитной структуры соединений.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию кристаллической структуры, магнитных характеристик и спин-переориентационных переходов соединений $Y_2(Fe,Co)_{17}$ и их гидридов.

В первом разделе третьей главы представлены результаты рентгенофазового исследования и их анализ.

Во втором разделе описан феноменологический анализ функции энергии МКА кристаллов с цилиндрической магнитной симметрией, результаты которого в последующем применены в работе для описания экспериментальных кривых намагничивания, спин-переориентационных переходов и микромагнитных расчетов.

В третьем разделе приведены результаты магнитометрического исследования исходных и гидрированных соединений $Y_2(Fe,Co)_{17}$, дано

подробное описание полученных результатов и его сопоставление с уже имеющимися в литературе данными.

В четвертом разделе проведен анализ экспериментальных данных в рамках теоретических моделей, а также выявлен эффект гидрирования на исследуемые образцы на основе сопоставления концентрационных зависимостей магнитных параметров для исходных и гидрированных соединений.

В пятом разделе проведен комплексный анализ магнитокристаллической анизотропии и спин-переориентационных переходов соединений $Y_2(Fe,Co)_{17}$ и их гидридов.

Шестой раздел представляет результаты теоретических микромагнитных расчетов на основе проведенного экспериментального исследования. В нем представлены температурные зависимости микромагнитного параметра поверхностной плотности энергии доменных границ и дается их анализ.

Четвертая глава работы представляет выделенное отдельно количественное и качественное исследование магнитной доменной структуры соединений $Y_2(Fe,Co)_{17}$ и их гидридов.

В первом разделе описаны особенности получения изображений магнитной доменной структуры методом магнитооптического эффекта Керра, а также представлены экспериментальные снимки и их анализ.

Во втором разделе описан процесс получения изображений полей рассеяния магнитной доменной структуры с помощью метода магнитно-силовой микроскопии. Приводятся особенности экспериментального изучения полей рассеяния, а также сопоставления полученных изображений и экспериментальными магнитооптическими изображениями доменной структуры.

Третий раздел содержит детализированное описание применяемых в работе методов количественных расчетов микромагнитных параметров как на основе магнитооптических, так и на основе магнитно-силовых изображений.

Четвертый раздел представляет результаты количественного анализа изображений и их сопоставление с теоретическими расчетами микромагнитных параметров.

В конце диссертации сформулированы общие выводы, которые отражают наиболее важные результаты работы в целом.

Достоверность научных положений и выводов, обсуждаемых в диссертации, подтверждается использованием тщательно аттестованных современными методами образцов $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$, подробным описанием используемых в работе экспериментальных методов исследования магнитных параметров и магнитной микроструктуры.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

На основании большого объема проведенных экспериментальных исследований и их анализа автором получен ряд **новых** результатов, среди которых наиболее интересными, на наш взгляд являются следующие:

Рассмотрено влияние легких атомов внедрения (водорода) на кристаллическую структуру и магнитные свойства квазибинарных

интерметаллидов $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$. Представлены особенности изменения магнитных параметров для соединений с различной концентрацией железа в 3d-подрешетке.

Представлены результаты анализа спин-переориентационных переходов в исходных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и гидрированных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ соединениях в рамках теоретических моделей. Получены температурные зависимости поверхностной плотности энергии доменных границ для всех исследованных составов.

Методами оптической и магнитно-силовой микроскопии выявлена доменная структура на базисной плоскости образцов одноосных магнетиков $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и их гидридов, относящихся к низкоанизотропным материалам с магнитным фактором качества, близким к единице. Описаны особенности конфигурации доменной структуры соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ в зависимости от величины константы магнитокристаллической анизотропии.

Предложен метод расчета средней ширины доменов и поверхностной плотности энергии доменных границ на основе изображений полей рассеяния магнитной доменной структуры, полученных методом магнитно-силовой микроскопии.

Научная значимость полученных результатов

Предложенные в работе методы анализа магнитокристаллической анизотропии, индуцированных температурой фазовых переходов, а также микромагнитной структуры соединений могут быть использованы в будущем при исследовании перспективных ферромагнитных материалов. Используемые методы являются комплементарными. их результаты дополняют друг друга и позволяют провести наиболее комплексный и подробный анализ магнитокристаллической анизотропии и микромагнитной структуры соединений.

Степень обоснованности и достоверности научных положений

Основные положения, выносимые на защиту, а также выводы и рекомендации, сделанные по главам, основаны на подробном анализе литературных источников.

Результаты исследования были апробированы на тематических всероссийских и международных научных конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, из них 7 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных, приравниваемых к журналам перечня ВАК, 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и 1 монография.

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

Основные вопросы и замечания по содержанию диссертации

1. В выражении Боденбергера-Хуберта для расчета поверхностной плотности энергии доменных границ используется полуэмперический коэффициент $\beta = 0,31$. По словам авторов исходного исследования, данный коэффициент может быть применен для высокоанизотропных соединений с магнитным фактором качества $Q > 1$ ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, SmCo_5), обладающих конфигурацией магнитной доменной структуры типа «звездочки». Как отмечается самим автором диссертации, в его работе исследуются низкоанизотропные соединения $\text{Y}_2(\text{Fe,Co})_{17}$ с магнитным фактором качества $Q \sim 1$. Следует провести корректировку данного коэффициента для низкоанизотропной магнитной доменной структуры.

2. Известно, что вычисления констант магнитокристаллической анизотропии по методу Сексмита-Томсона для низкоанизотропных образцов могут иметь значительную погрешность. Добавление доверительного интервала для кривых первой и второй константы МКА поможет определить, являются ли наблюдаемые закономерности в областях, близких к смене знака констант, подлинными, или просто колебаниями внутри диапазона погрешности.

3. При расчете средней ширины доменов на основе изображений полей рассеяния доменной структуры, полученных методом магнитно-силовой микроскопии, автором применяется гипотеза о том, что количество локальных экстремумов вдоль линии сканирования при приближении к поверхности образца стремится к количеству доменных границ вдоль этой линии. Однако правдивость данной гипотезы не обсуждается автором в работе. Данное утверждение может быть неверно для сложных магнитных доменных структур.

4. Задачу получения МСМ изображений полей рассеяния магнитной доменной структуры на любой высоте подъема над поверхностью образца z можно решить в рамках микромагнитного моделирования. Рассматривал ли автор работы такой подход как дополнение или альтернативу к проведенному экспериментальному исследованию полей рассеяния с помощью сканирующего зондового микроскопа?

Однако сделанные замечания не снижают теоретической и практической значимости выполненных исследований, а полученные в диссертации результаты соответствуют поставленным целям.

Заключение

Диссертационная работа Синкевича Артема Игоревича на тему «Магнитокристаллическая анизотропия и доменная структура интерметаллидов $\text{Y}_2(\text{Fe,Co})_{17}$ и их гидридов» по актуальности поставленных задач, научной новизне, объему, уровню опубликованных работ, практической значимости, достоверности полученных результатов и степени обоснованности выводов 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; и отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям в соответствии с п.п. 9-14 «Положения о присуждения 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.

Отзыв составлен и принят на основании анализа диссертации, автореферата и публикаций соискателя, обсуждения доклада Синкевича А.И. на заседании Ученого Совета образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий» БФУ им. И. Канта 8 июля 2025 года, протокол № 26.

Руководитель образовательно-научного кластера
«Институт высоких технологий»,
доктор физико-математических наук, профессор

А.В. Юров

Секретарь Учёного совета
Образовательно-научного кластера
«Институт высоких технологий»

М.В. Тарачков

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта» (БФУ им. И. Канта)

Адрес: 236016, г. Калининград, ул. А. Невского, 14

Тел.: (4012) 595-597, факс: (4012) 465-813

Адрес электронной почты: post@kantiana.ru

8 июля 2025г.