

На правах рукописи

Синкевич Артем Игоревич

**МАГНИТОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПИЯ И ДОМЕННАЯ
СТРУКТУРА ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ $Y_2(Fe,Co)_{17}$ И ИХ ГИДРИДОВ**

Специальность 1.3.12 – Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Тверь – 2025

Работа выполнена на кафедре физики конденсированного состояния федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственной университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Пастушенков Юрий Григорьевич

Официальные оппоненты: **Ховайло Владимир Васильевич**,
доктор физико-математических наук, доцент,
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСИС», профессор кафедры
функциональных наносистем и
высокотемпературных материалов;

Панкратов Николай Юрьевич,
кандидат физико-математических наук,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова», старший
преподаватель кафедры общей физики и физики
конденсированного состояния

Ведущая организация: федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Балтийский федеральный
университет имени Иммануила Канта»

Защита состоится 5 сентября 2025 г. в 12:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.411.03 при ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет» по адресу: 170002, г. Тверь, Садовый пер., д. 35, ауд. 226.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Тверского государственного университета по адресу: 170100, г. Тверь, ул. Советская, д. 58 и в сети Интернет на сайте ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет» <https://dissertations.tversu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Е.В. Барабанова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Интерметаллические соединения R_2M_{17} (R – РЗМ, M – Fe, Co) представляют особый интерес в качестве функциональных магнитных материалов, обладающих высокими значениями магнитных характеристик – температуры Кюри, намагниченности насыщения, констант магнитокристаллической анизотропии, и использующихся для изготовления современных высокоэнергоемких постоянных магнитов. За последние шестьдесят лет данные соединения были подробно изучены в научной литературе [1-4]. Для них представлены исследования кристаллической структуры методами рентгеноструктурного анализа, нейтронографии и ядерного магнитного резонанса, а также магнитометрические и первопринципные исследования магнитных свойств, в частности, магнитокристаллической анизотропии. Исследования структурных и магнитных свойств соединений Y_2M_{17} с немагнитным иттрием в подрешетке также отражены в обозначенных работах. Результаты этих работ используются для сопоставления с исследованиями свойств соединений R_2M_{17} с целью выявления влияния магнитной РЗМ подрешетки на магнитные свойства соединений этого типа.

Из анализа литературных источников известно [1-4], что большинство соединений серии R_2M_{17} характеризуется магнитокристаллической анизотропией типа «легкая плоскость» в широком интервале температур, в том числе при комнатной температуре. Это ограничивает возможности их исследования и практического применения. Однако синтез квазибинарных соединений $R_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$, для которых часть одного 3d элемента в подрешетке заменяется другим, позволяет получать соединения, обладающие магнитокристаллической анизотропией типа «легкая ось» в широком интервале температур. Этому явлению было уделено внимание в ранних исследованиях конца прошлого века [5-7], в которых оно было впервые описано для различных соединений, в том числе для $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$, а также объяснено с точки зрения структурных особенностей замещения железом кобальта в 3d-подрешетке. Для квазибинарных соединений с иттрием $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ в этих работах были представлены результаты магнитометрических исследований: концентрационные зависимости намагниченности насыщения, констант магнитокристаллической анизотропии, температуры Кюри, а также температурные зависимости магнитных характеристик для некоторых соединений. Был продемонстрирован спин-переориентационный переход типа «легкая ось» - «легкая плоскость» для соединения $Y_2(Fe_{0.50}Co_{0.50})_{17}$ [5]. Однако комплексное исследование температурного поведения магнитокристаллической анизотропии серии, в том числе для образцов на краях одноосного концентрационного интервала, а также выявление спин-переориентационных переходов и их анализ в рамках модельных представлений и микромагнитных расчетов, представлены в литературе недостаточно.

Отдельно стоит отметить исследование магнитной доменной структуры соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$. В силу того, что данные соединения обладают магнитокристаллической анизотропией типа «легкая ось» в широком интервале

концентраций x , появляется возможность выявления магнитной доменной структуры на базисной плоскости соединений в данном концентрационном интервале. Такое исследование может быть интересно в рамках рассмотрения трансформации доменной структуры с изменением концентрации железа в подрешетке, а также для количественного микромагнитного анализа изучаемых соединений по полученным изображениям доменной структуры. Тем не менее, подобные исследования доменной структуры слабо представлены в литературе. Это может быть связано с тем, что доменная структура соединений серии $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ обладает низким контрастом и малым размером элементов структуры, что затрудняет её выявление. В связи с этим требуются дополнительные методы выявления магнитной доменной структуры, такие как метод иммерсии и магнитно-силовой микроскопии.

Синтез интерметаллических соединений с легкими атомами внедрения (водород, азот, углерод) является хорошо изученным методом влияния на магнитные характеристики соединения – намагниченность насыщения, магнитокристаллическую анизотропию (вплоть до изменения её типа), а также температурное поведение этих характеристик и температуру Кюри. Первые научные работы в этом направлении были посвящены соединениям со структурой $ThMn_{12}$, которые позднее дополнились большим количеством работ, посвященных соединениям R_2Fe_{17} [2, 4, 8-9]. В них обсуждались структурные свойства гидрированных и азотированных соединений, особенности заполнения атомами внедрения кристаллической решетки, а также влияние атомов внедрения на магнитные свойства соединений. Однако, несмотря на хорошую изученность вопроса для соединений R_2Fe_{17} , подобные исследования для квазибинарных соединений $R_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ не были подробно описаны в литературе.

Целью данной работы стало комплексное исследование магнитокристаллической анизотропии, спин-переориентационных переходов и магнитной доменной структуры исходных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и гидрированных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ соединений.

Основные задачи исследования:

1. Синтезировать и аттестовать исходные квазибинарные образцы серии $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ с $x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.18, 0.29, 0.41, 0.50, 0.53, 0.65, 0.76, 0.87$. Получить на их основе и аттестовать гидрированные образцы серии $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ в интервале $x = 0.03 - 0.65$.
2. Исследовать кристаллическую структуру полученных исходных и гидрированных соединений методом рентгенофазового анализа.
3. Провести магнитометрическое исследование магнитных свойств соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ в широком диапазоне температур. Выполнить комплексный анализ их магнитокристаллической анизотропии на основе экспериментальных данных с использованием теоретических моделей.
4. Сопоставить результаты структурных и магнитных исследований исходных и гидрированных соединений с целью выявления влияния гидрирования на кристаллическую структуру и магнитные свойства соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$.

5. На основе анализа температурных зависимостей констант магнитокристаллической анизотропии выявить спин-переориентационные переходы исследуемых соединений. Провести анализ обнаруженных переходов в рамках теоретических моделей и микромагнитных расчетов.

6. Исследовать магнитную доменную структуру соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ методом магнитооптического эффекта Керра. Сопоставить полученные изображения с целью выявления влияния процесса гидрирования на магнитную доменную структуру соединений. Провести микромагнитные расчеты поверхностной плотности энергии доменных границ на основе полученных изображений. Сопоставить результаты проведенных расчетов с теоретическими вычислениями для поверхностной плотности энергии 180° доменных границ.

7. Исследовать магнитную доменную структуру соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ методом магнитно-силовой микроскопии. Провести сопоставительный анализ полученных изображений полей рассеяния доменной структуры между парами «исходное соединение – гидрид», а также с полученными магнитооптическими изображениями. Исследовать возможность проведения микромагнитных расчетов на основе изображений полей рассеяния, полученных методом магнитно-силовой микроскопии. Разработать метод таких расчетов, учитывающий расстояние между магнитным зондом сканирующего микроскопа и поверхностью образца.

Теоретическая и практическая значимость.

Проведенные в рамках диссертационной работы исследования дополняют существующие представления о влиянии процесса гидрирования на структурные и магнитные свойства интерметаллических соединений. Проведенный качественный и количественный анализ магнитной микроструктуры вносит вклад в понимание процессов формирования доменной структуры низкоанизотропных магнетиков.

Примененный в рамках работы способ анализа температурного поведения магнитокристаллической анизотропии и спин-переориентационных переходов может быть использован в дальнейшем при исследовании одноосных ферромагнетиков.

В рамках работы модифицирован метод цифрового обчета магнитооптических снимков доменной структуры, полученных на базисной плоскости образцов одноосных магнетиков методом полярного эффекта Керра. Создан метод расчета микромагнитных параметров соединений на основе изображений полей рассеяния их доменной структуры, полученных методом магнитно-силовой микроскопии. Предложенные методы могут использоваться в будущем для микромагнитного анализа изображений доменной структуры или полей рассеяния доменной структуры, полученных на базисной плоскости одноосных магнетиков.

Все представленные результаты были получены в рамках выполнения Государственного задания Минобрнауки РФ в сфере научной деятельности на 2023 – 2025 гг: «Разработка научных основ получения стабильных металлических

наночастиц и наносистем, управления микро- и наноструктурой объёмных фаз и поверхностных слоев металлических сплавов, диэлектрических и полупроводниковых монокристаллов: эксперимент, атомистическое и термодинамическое моделирование» (проект № 0817-2023-0006). Результаты исследований могут быть использованы в курсах лекций и лабораторных занятий по магнитным материалам в ТвГУ, МГУ им. В.М. Ломоносова, НИТУ МИСиС, УрФУ и других университетах.

Методология и методы исследования. Исходные образцы в рамках диссертационного исследования изготавливались методом высокочастотной индукционной плавки в среде чистого аргона. Гидрированные образцы подготавливались на основе исходных в потоке молекулярного водорода. Структурный и фазовый анализ образцов осуществлялся методами оптической микроскопии и рентгенофазового анализа. Полевые зависимости намагниченности образцов были получены индукционным методом исследования удельной намагниченности на автоматизированном вибрационном магнитометре. Доменная структура образцов исследовалась методами магнитооптического эффекта Керра и магнитно-силовой микроскопии. Обработка и анализ полученных экспериментальных результатов производились цифровыми средствами с применением методов статистического и численного анализа.

Объектами исследования в настоящей работе выступают квазибинарные интерметаллиды $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и соответствующие им гидриды $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Процесс гидрирования соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ в интервале концентраций железа $0.03 < x < 0.65$ не меняет типа кристаллической структуры и

приводит к увеличению объема элементарной ячейки кристаллической решетки, сопровождающемуся ростом параметра a и уменьшением параметра c . С замещением кобальта железом в 3d-подрешетке соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ увеличивается количество поглощаемого ими водорода и относительное изменение объема элементарной ячейки.

2. Гидрированные соединения $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ характеризуются магнитокристаллической анизотропией типа «легкая ось» в интервале концентраций железа $0.05 < x < 0.50$. Процесс гидрирования приводит к увеличению температуры Кюри во всем указанном диапазоне концентраций и первой константы магнитокристаллической анизотропии в диапазоне $0.29 < x < 0.50$.

3. Соединения $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и их гидриды $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ в интервале концентраций железа $0.05 < x < 0.50$ характеризуются магнитным фактором качества Q , близким к единице. На базисной плоскости образцов данных соединений формируется «кобальтоподобная» магнитная доменная структура с конфигурацией сильно разветвленных «звездочек».

4. Метод Боденбергера-Хуберта для расчета поверхностной плотности энергии доменных границ применим для изображений полей рассеяния магнитной доменной структуры, полученных с помощью магнитно-силовой микроскопии.

Степень достоверности 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 согласованностью получаемых результатов с имеющимися в литературе данными других научных групп. Полученные результаты исследований опубликованы в индексируемых научных журналах и апробированы на тематических международных конференциях.

Личный вклад автора. Приведенные в диссертации результаты экспериментов, проведенных в Тверском государственном университете, были получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автором лично получены приводимые в работе результаты вычислений и обработки экспериментальных данных. Предлагаемые в рамках диссертации новые методики обработки и анализа экспериментальных данных были разработаны автором диссертации совместно с соавторами. Разработанные в рамках диссертационного исследования цифровые алгоритмы и программные продукты были созданы лично автором работы. Постановка цели и задач исследования, обсуждение результатов эксперимента и обработки экспериментальных данных, формулировка выводов выполнялись автором совместно с научным руководителем. Научные работы, в которых отражены результаты диссертационного исследования, были написаны и подготовлены к публикации лично автором, либо при его непосредственном участии.

Апробация результатов исследования. Результаты работы были представлены автором в форме устных докладов на тематических всероссийских и международных конференциях: Курчатовский форум «Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» ФСНЭ-2024 (Москва, 21-23 октября 2024 года), I Всероссийская научно-техническая конференция «Постоянные магниты: Наука и Технологии. Производство. Применение» (Суздаль, 25-27 сентября 2024 года), XXIII Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков ВКС-23 (Тверь, 3-6 октября 2023 года), 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ в честь 115-летия Л.Д. Ландау (Москва, 3-8 апреля 2023 года), XXIII Международная конференция по постоянным магнитам (Суздаль, 27-30 сентября 2022 года), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019» (Москва, 8-12 апреля 2019 года), XXV Всероссийская научно-техническая конференция молодых учёных «Физика, химия и новые технологии», посвященная Международному году Периодической таблицы химических элементов XXV (Тверь, 28 марта 2019 года).

По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, 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.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных выводов и списка использованной литературы, состоящего из 128 источников. Материал изложен на 160 страницах, включает 15 таблиц и 61 рисунок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основная цель и задачи исследования, определен объект исследований, продемонстрированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о степени достоверности результатов, апробации работы, личном вкладе автора, структуре и объёме диссертации.

Первая глава посвящена обзору литературы. В разделах 1-3 рассмотрены особенности фазообразования, синтеза и кристаллической структуры соединений Y_2Fe_{17} , Y_2Co_{17} и квазибинарных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$. В разделах 4 и 5 рассмотрены магнитные свойства соединений Y_2Fe_{17} , Y_2Co_{17} и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$. В разделах 6 и 7 описано влияние легких атомов внедрения (H, N, C) на кристаллическую структуру и магнитные свойства соединения Y_2Fe_{17} .

Вторая глава посвящена объектам исследования и методикам проведения эксперимента. Исходные сплавы $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ ($x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.18, 0.29, 0.41, 0.50, 0.53, 0.65, 0.76, 0.87$) были получены методом индукционной плавки в атмосфере аргона. Гидрированные образцы $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ были подготовлены на основе исходных сплавов в диапазоне концентраций железа $0.03 < x < 0.65$ в

НИТУ МИСиС. Гидрирование проводилось при температуре 300°C в течение 15 часов в потоке молекулярного водорода со скоростью 0.037 литров в минуту при давлении 2 атм. Аттестация полученных образцов проводилась методами рентгенофазового анализа и оптической микроскопии. Рентгенофазовое исследование кристаллической структуры было проведено на дифрактометре ДРОН-7М с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения в ОАО НПЦ «Тверьгеофизика». Шлифы готовились как на произвольно ориентированных поверхностях, так и на ориентированных зернах сплавов. Шлифование и полировка образцов осуществлялась при помощи полировального станка Metapol 160E. Выявление микроструктуры поверхности образцов выполнялось методами химического и электрохимического травления.

Измерение полевых и температурных зависимостей намагниченности проводилось на автоматизированном вибрационном магнитометре. Высокотемпературные магнитные измерения были проведены в интервале температур от 300 до 923 К. Низкотемпературные магнитные измерения при температурах от 100 до 300 К были проведены в МГУ им. М.В. Ломоносова.

Магнитная доменная структура (ДС) образцов исследовалась методом магнитооптического эффекта Керра (МОЭК) на оптическом металлографическом микроскопе Neophot-30. Для выявления доменов использовались предельные увеличения $\times 2000$ и метод иммерсии. Регистрация полей рассеяния ДС образцов проводилась методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ) на базе сканирующего зондового микроскопа SolverNext (NT-MDT) с применением кантиллеров MFM-LM. Серии МСМ изображений были получены в фазовом режиме с применением двухпроходной методики и параллельного сканирования.

Третья глава посвящена исследованию кристаллической структуры, магнитокристаллической анизотропии (МКА) и спин-переориентационных переходов (СПП) соединений $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}$ и $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}\text{H}_y$.

Раздел 1 представляет результаты рентгенофазового исследования кристаллической структуры соединений $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}$ и $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}\text{H}_y$. Установлено, что соединения $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}$ кристаллизуются в ромбоэдрическую структуру типа $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ ($R\bar{3}m$) в интервале концентраций железа $0 < x < 0.18$ и гексагональную структуру типа $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$ ($P6_3/mmc$) в интервале $0.29 < x < 1$. Гидрирование исходных соединений $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}$ не вызывает изменений типа кристаллической структуры. Для исходных $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}$ и гидрированных $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}\text{H}_y$ соединений построены зависимости параметров решетки a и c , а также объема элементарной ячейки V от концентрации железа x в 3d-подрешетке (рисунок 1). Установлено, что процесс гидрирования исходных соединений $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}$ в интервале концентраций железа $0.03 < x < 0.65$ приводит к увеличению объема элементарной ячейки кристаллической решетки V , сопровождающемуся ростом параметра a и уменьшением параметра c . С замещением кобальта железом в 3d-подрешетке увеличивается количество поглощаемого водорода и относительное изменение объема элементарной ячейки $\Delta V/V$.

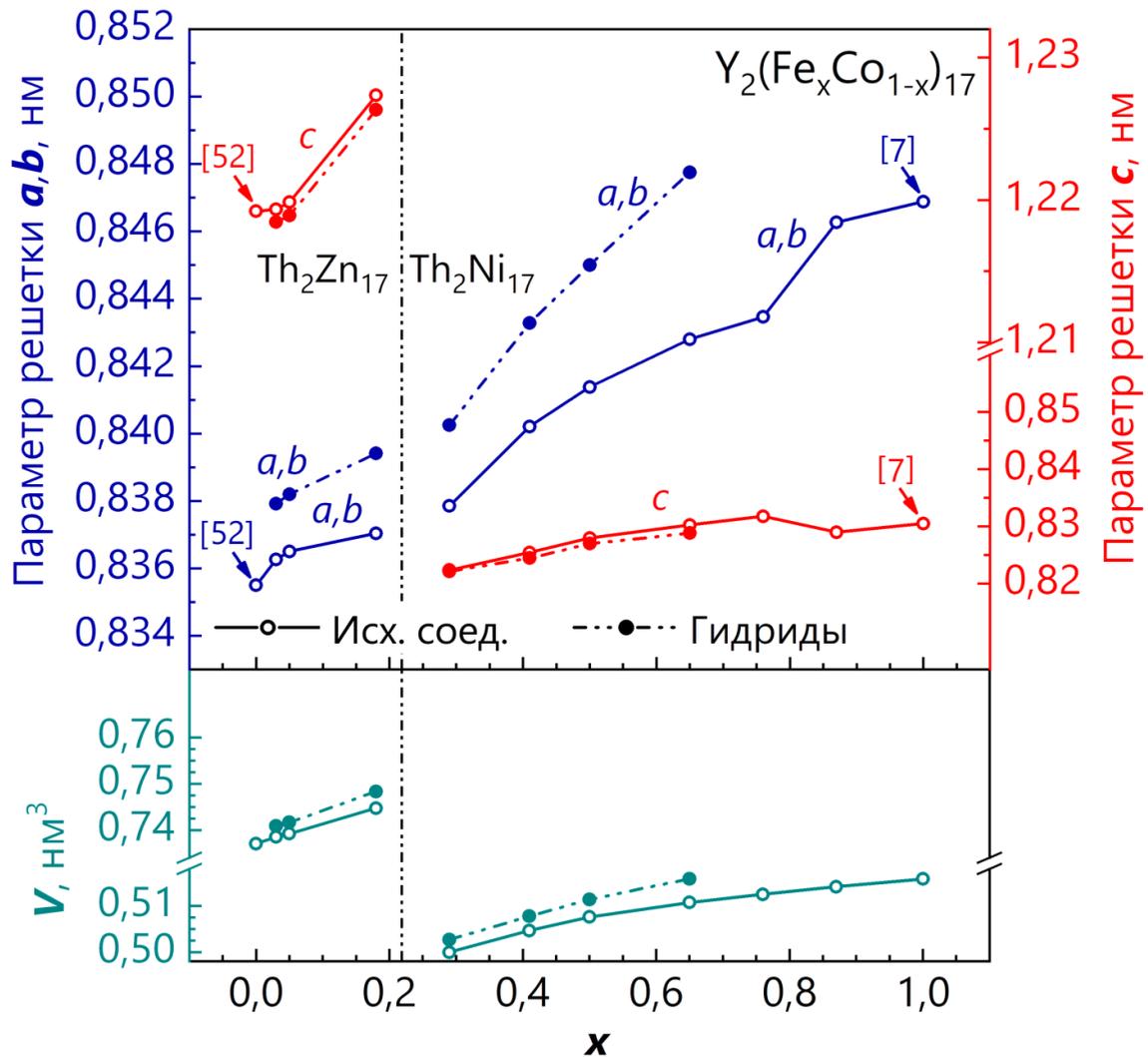


Рисунок 1. Концентрационные зависимости параметров решетки и объема элементарной ячейки для исходных соединений $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}$ и их гидридов $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}\text{H}_y$

Раздел 2 содержит феноменологический анализ функции энергии МКА кристаллов с цилиндрической магнитной симметрией (константы МКА третьего и более высоких порядков равны нулю). Выделены все возможные типы МКА (то есть комбинации легких и трудных направлений намагничивания), которые могут реализовываться в таких кристаллах, а также условия, накладываемые на константы МКА, при которых они реализуются. Записаны выражения для углов θ_0 ориентации осей легкого намагничивания (ОЛН) и осей трудного намагничивания (ОТН) для каждого выделенного типа МКА. Приведена диаграмма МКА для кристаллов с цилиндрической магнитной симметрией в координатах « $K_2 - K_1$ » [10], позволяющая упростить анализ типов МКА соединений и переходов между областями МКА. На диаграмме введена нумерация областей и типов МКА, используемая в дальнейшем в работе. Выражения для экстремумов функции энергии МКА проанализированы с теоретической точки зрения. Показано, что в точке перехода между областями МКА 2-3 или 5-6 при выполнении условия

$K_1 + K_2 = 0$ достигает наименьшего значения разница между абсолютными максимумом и минимумом энергии МКА. На диаграмму МКА нанесена дополнительная линия, соответствующая условию $K_1 + K_2 = 0$, которая разделяет области диаграммы 5 и 6 с различными типами ОН.

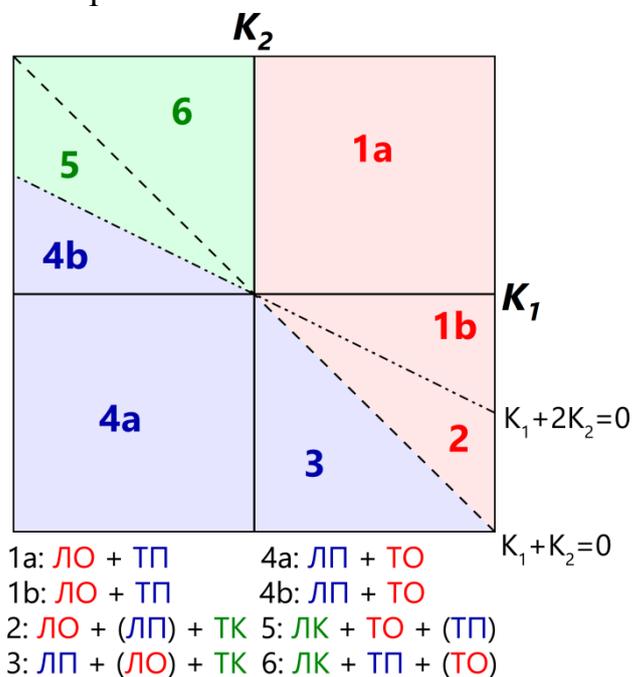


Рисунок 2. Диаграмма МКА кристаллов с цилиндрической магнитной симметрией

В разделе 3 приведены результаты магнитометрических исследований соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ ($x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.18, 0.29, 0.41, 0.50, 0.53$). Представлены полевые зависимости удельной намагниченности, снятые вдоль и перпендикулярно кристаллографической оси c в широком интервале температур от 100 до 923 К. На основе экспериментальных кривых намагничивания рассчитаны намагниченность насыщения, а также первая и вторая константы МКА соединений. Расчет констант МКА был произведен с помощью модифицированного метода Сексмита-Томсона с учетом размагничивающего фактора образца [11]. В разделе приведены описание применяемого метода расчета и используемые выражения. По результатам расчетов построены концентрационные и температурные зависимости удельной намагниченности насыщения, первой и второй констант МКА для исходных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ (рисунок 3) и гидрированных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ (рисунок 4) соединений.

Температурная зависимость первой константы МКА K_1 для исходных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и гидрированных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ соединений имеет схожий вид. Для соединений в интервале концентраций железа $x = 0.18 - 0.50$ характерно уменьшение значений K_1 с ростом температуры, что для соединений с $x = 0.41, 0.50$ приводит к СПП. Для исходных и гидрированных соединений с концентрацией железа $x = 0.05$ значения K_1 растут с ростом температуры с точкой перехода от отрицательных значений к положительным ниже комнатной температуры и максимумом при $T \sim 550$ К и $T \sim 750$ К для исходного и

гидрированного соединений, соответственно. Для исходного и гидрированного соединений с концентрацией железа $x = 0.53$ наблюдается аналогичное поведение, но с точкой перехода от отрицательных к положительным значениям K_1 при комнатной температуре. Для исходного соединения $Y_2(Fe_{0.03}Co_{0.97})_{17}$ характерна очень слабая МКА типа «легкая ось». В результате гидрирования значения первой константы МКА для данного соединения увеличиваются, и наблюдается зависимость $K_1(T)$, аналогичная соединениям с $x = 0.18 - 0.50$.

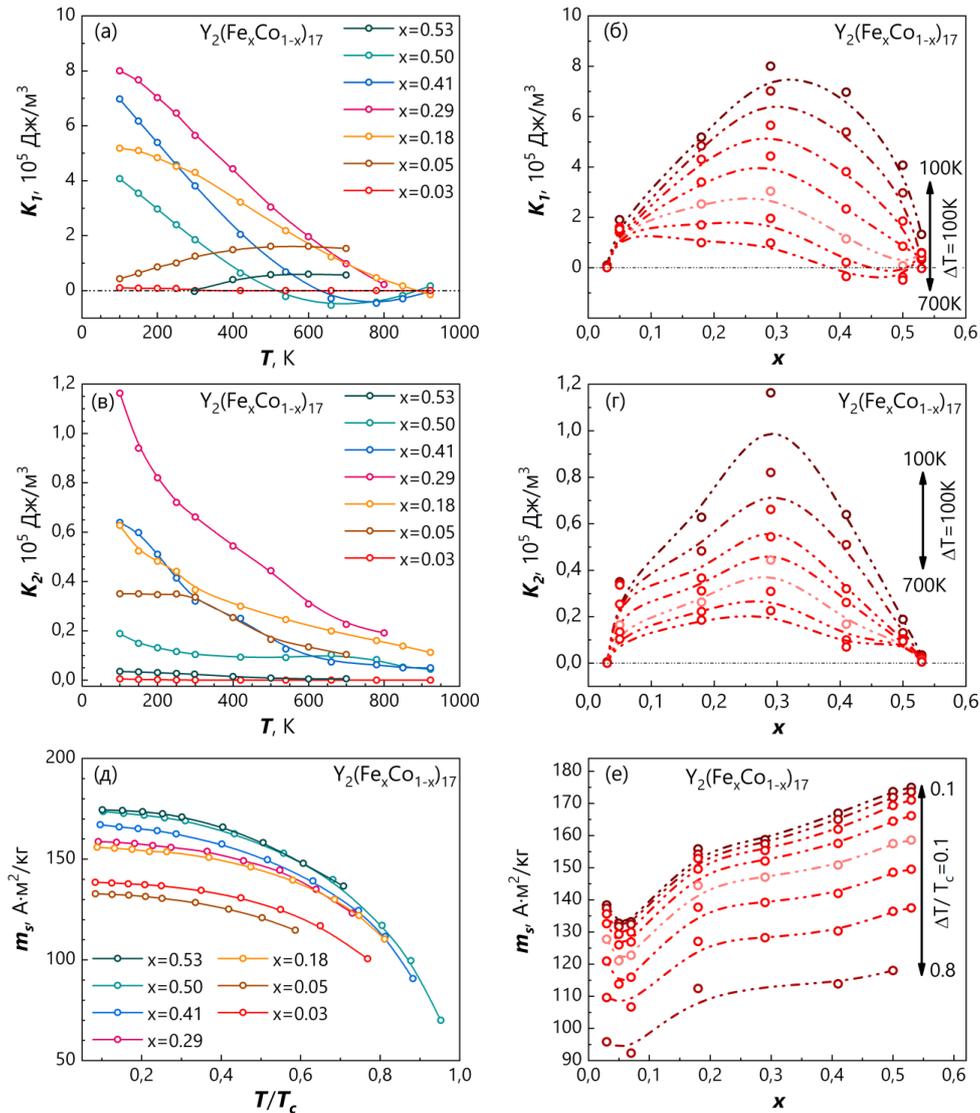


Рисунок 3. Магнитные параметры исходных соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$: температурные (д) и концентрационные (е) зависимости намагниченности насыщения; температурные (а, в) и концентрационные (б, г) зависимости первой и второй констант МКА

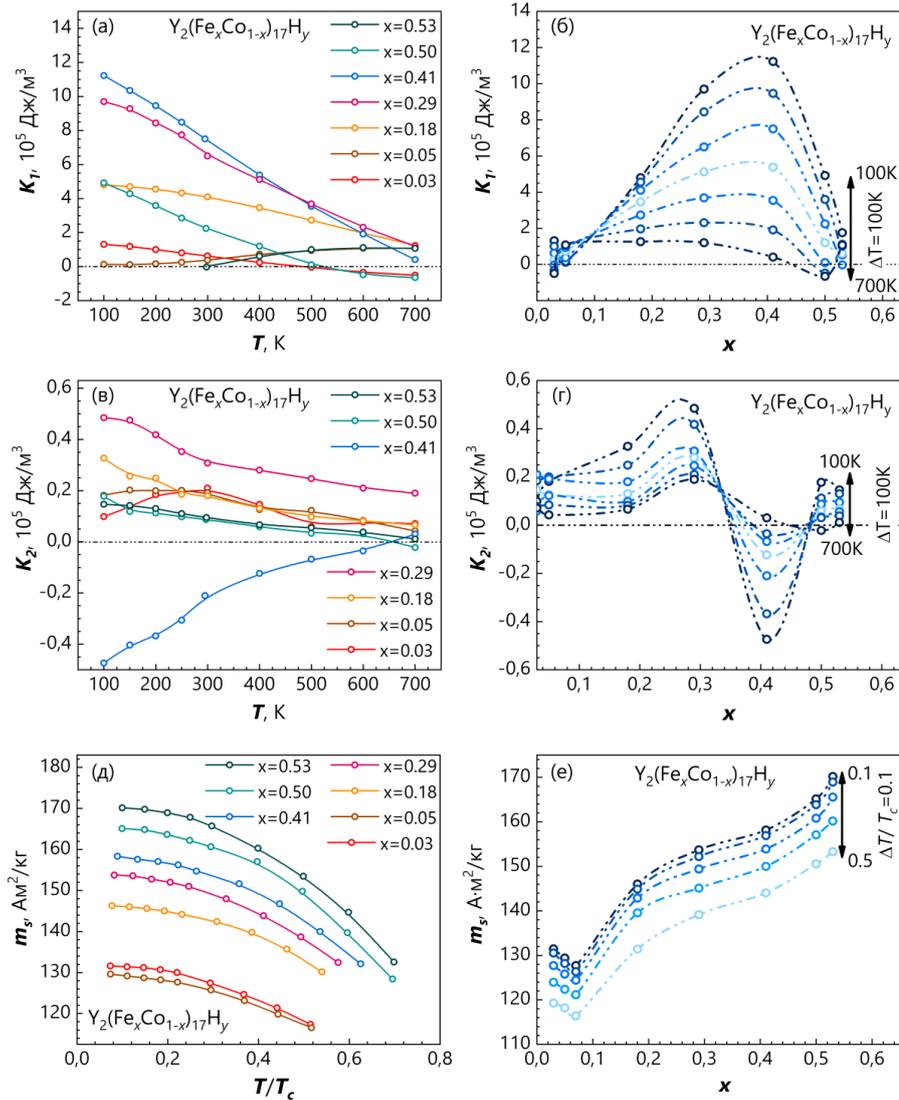


Рисунок 4. Магнитные параметры гидрированных соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$: температурные (д) и концентрационные (е) зависимости намагниченности насыщения; температурные (а, в) и концентрационные (б, г) зависимости первой и второй констант МКА

Концентрационная зависимость первой константы МКА $K_1(x)$ исходных соединений имеет максимум в точке $x = 0.29$ и минимумы при $x = 0.03$ и 0.53 . В результате гидрирования максимум на данной зависимости смещается вправо и наблюдается для соединения $Y_2(Fe_{0.41}Co_{0.59})_{17}H_y$.

Для температурной и концентрационной зависимостей второй константы МКА K_2 наблюдаются те же закономерности, что и для первой константы МКА, как для исходных, так и для гидрированных соединений. Исключением является соединение $Y_2(Fe_{0.41}Co_{0.59})_{17}H_y$, для которого знак второй константы МКА K_2 изменился после гидрирования.

В разделе 4 представлены результаты анализа влияния гидрирования на магнитные свойства соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$. Сопоставлены концентрационные зависимости удельной намагниченности насыщения и первой константы МКА для

исходных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и гидрированных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ соединений при температуре 300 К (рисунок 5 (а, б)).

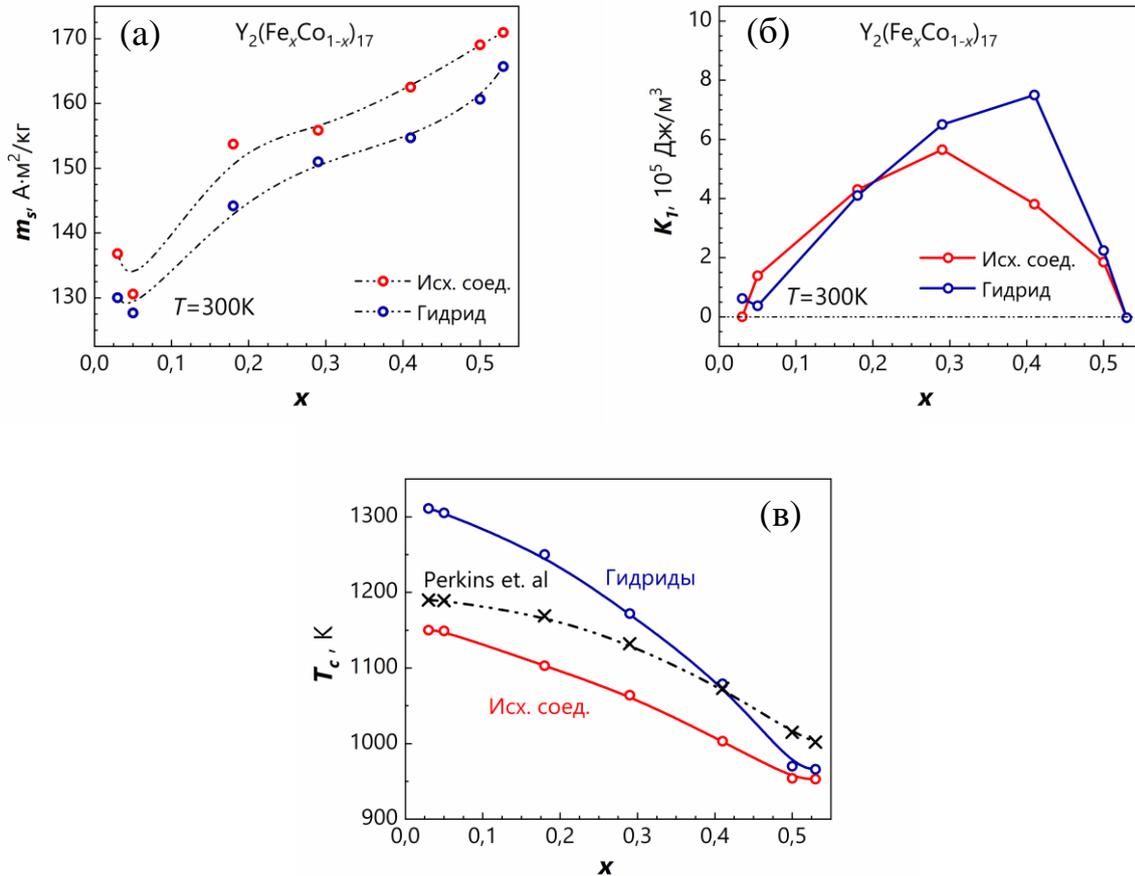


Рисунок 5. Сопоставление значений намагниченности насыщения (а) и первой константы МКА (б) соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ при температуре 300К до и после гидрирования. Сопоставление оценочных значений температуры Кюри соединений до и после гидрирования (в)

Из сопоставления зависимостей выявлено, что процесс гидрирования исходных соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ в интервале концентраций железа $0.03 < x < 0.53$ вызывает небольшое уменьшение намагниченности насыщения соединений. Это явление может быть объяснено уменьшением параметра c решетки (рисунок 1), который напрямую влияет на гантели Co-Co и Fe-Fe в подрешетке $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$, ответственные за магнитный момент в данном соединении. Из сопоставления концентрационных зависимостей $K_1(x)$ исходных и гидрированных соединений установлено, что для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ в интервале концентраций $0.29 < x < 0.53$ процесс гидрирования вызывает увеличение значения первой константы МКА соединений.

Температурные зависимости удельной намагниченности насыщения исходных (рисунок 3(д)) и гидрированных (рисунок 4(д)) соединений были проанализированы в рамках теоретической модели Кузьмина [12] с целью оценки температуры Кюри соединений. На основе полученных оценочных значений температуры Кюри была построена концентрационная зависимость $T_c(x)$ для

исходных и гидрированных соединений (рисунок 5(в)). Установлено, что для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ в интервале концентраций железа $0.03 < x < 0.53$ процесс гидрирования вызывает рост значений температуры Кюри соединений. Данное явление можно объяснить общим увеличением объема элементарной ячейки кристаллической решетки в результате гидрирования, что для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ приводит к усилению обменного взаимодействия и увеличению температуры Кюри.

Раздел 5 посвящен анализу температурных зависимостей констант МКА и СПП соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и их гидридов. Кривые $K_{1,2}(T)$ были проанализированы в рамках теоретической модели Акулова-Зенера-Карра [13-15]. В разделе приведено подробное описание модели и используемых выражений.

Из анализа температурных кривых $K_{1,2}(T)$ выявлены СПП для исходных и гидрированных соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ с $x = 0.03, 0.05, 0.41, 0.50, 0.53$. Обнаруженные СПП были проанализированы в рамках теоретических выражений, приведенных в разделе 2. Построены температурные зависимости угла ориентации ОЛН θ_0 в областях перехода. На рисунке 6 приведены несколько примеров кривых $\theta_0(T)$.

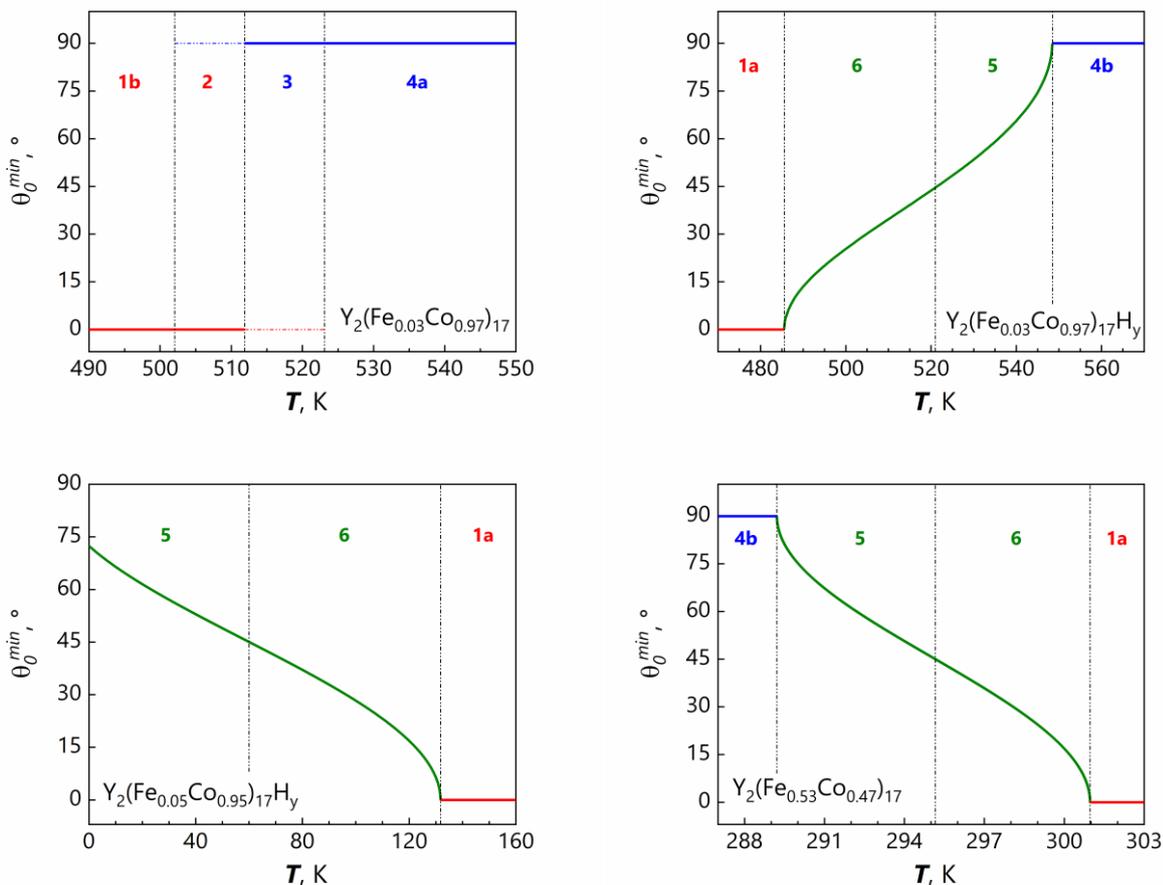


Рисунок 6. Примеры температурных зависимостей угла θ_0 между направлением ОЛН и осью c кристалла для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ с СПП

Показано, что для соединений $Y_2(Fe_{0.03}Co_{0.97})_{17}$ и $Y_2(Fe_{0.41}Co_{0.59})_{17}H_y$ спин-переориентационный переход реализуется в виде одного фазового перехода

первого рода с резким скачком угла θ_0 от 0 до $\pi/2$ между областями 2 и 3 диаграммы МКА (рисунок 2). Для исходного и гидрированного соединения с $x = 0.05$ при абсолютном нуле наблюдается МКА типа «легкий конус» с углом ориентации ОЛН 32° и 72° , соответственно. Рост температуры для данных соединений вызывает переход от области 6 с МКА типа «легкий конус» к области 1а с МКА типа «легкая ось» при $T \approx 37$ К и $T \approx 132$ К, соответственно. Для всех прочих соединений, для которых был выявлен спин-переориентационный переход, он реализуется в виде двух фазовых переходов второго рода с плавным поворотом угла θ_0 от $\pi/2$ до 0 и переходом между областями диаграммы МКА 4b-5-6-1а (либо в обратную сторону). Установлено, что минимум угла между направлениями ОЛН и ОТН реализуется в точке перехода между областями МКА 2-3 или 5-6 при выполнении условия $K_1 + K_2 = 0$.

Раздел 6 посвящен микромагнитному анализу соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и их гидридов. Приведены теоретические выражения для расчета поверхностной плотности энергии 180° доменных границ (ДГ) γ кристаллов с цилиндрической магнитной симметрией. Всего приведено пять аналитических выражений для различных типов МКА и шесть выражений для границ между областями диаграммы МКА.

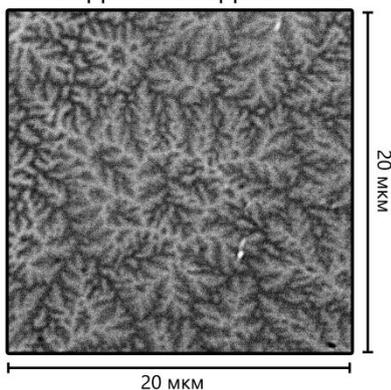
На основе теоретических выражений построены температурные зависимости поверхностной плотности энергии ДГ $\gamma(T)$ в температурном диапазоне $0 < T < T_c$, в том числе в точках СПП. Установлено, что в точке перехода между областями МКА 2-3 или 5-6 при выполнении условия $K_1 + K_2 = 0$ реализуется локальный минимум энергии ДГ кристаллов с цилиндрической магнитной симметрией. Характер данного минимума зависит от типа перехода – для перехода 5-6 наблюдается плавный минимум, плавность которого зависит от величины второй константы МКА K_2 , в то время как для перехода 2-3 наблюдается острый минимум при любом значении K_2 . Величина энергии ДГ в точке локального минимума для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ больше нуля, что свидетельствует о наличии ДС для данных соединений во всем температурном диапазоне $0 < T < T_c$. Абсолютный минимум энергии ДГ, равный нулю, реализуется при выполнении условия $K_1 = K_2 = 0$, которое для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ достигается только в точке $T = T_c$.

Четвертая глава посвящена исследованию доменной структуры соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ ($x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.18, 0.29, 0.41, 0.50$).

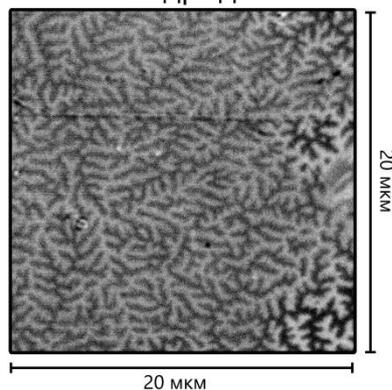
Раздел 1 представляет магнитооптическое исследование доменной структуры соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$. Для образцов с концентрацией железа $0.05 < x < 0.50$ методом МОЭК выявлена ДС с конфигурацией сильно разветвленных «звездочек». Пример магнитооптических изображений ДС представлен на рисунке 7 Конфигурация ДС внутри указанного концентрационного интервала была сопоставлена между образцами с различной концентрацией железа x , а также между парами «исходный образец – гидрид». Качественные отличия в конфигурации ДС выявлены только для образцов с $x = 0.05, 0.50$.



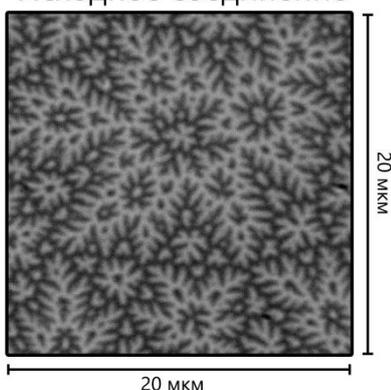
Исходное соединение



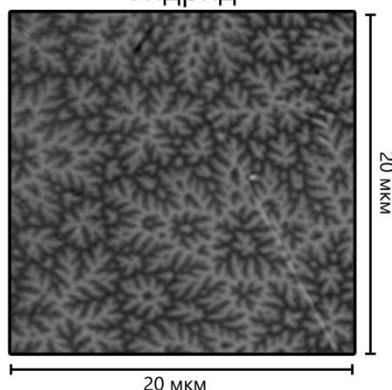
Гидрид



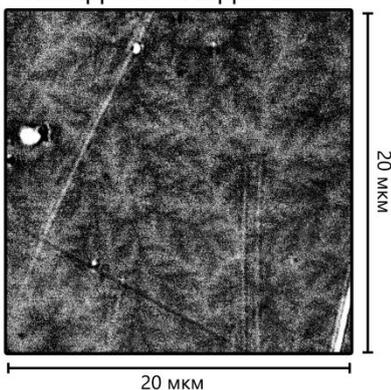
Исходное соединение



Гидрид



Исходное соединение



Гидрид

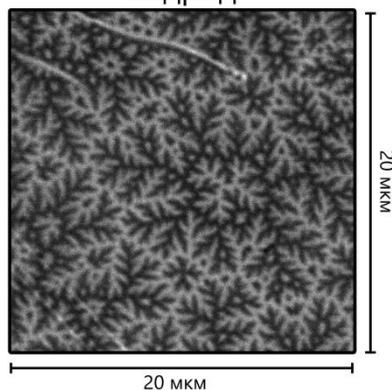


Рисунок 7. Примеры магнитооптических снимков ДС пар «исходное соединение – гидрид» серии $\text{Y}_2(\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x})_{17}$

Выявленная конфигурация ДС образцов, а также её визуальные изменения при приближении к краям интервала концентраций железа x , соответствующего МКА типа «легкая ось», объяснены с точки зрения соотношения энергии МКА и собственной энергией размагничивания соединения – магнитного фактора

качества Q . Построена концентрационная зависимость фактора качества $Q(x)$. Установлено, что соединения $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ в интервале концентраций железа $0.05 < x < 0.50$ характеризуются магнитным фактором качества Q в диапазоне от 0.06 до 0.86. Согласно [16], такие соединения относятся к категории материалов с сопоставимыми значениями энергии анизотропии и собственной энергии размагничивания. Для них характерна ДС с конфигурацией сильно разветвленных «звездочек». Самым известным примером подобных соединений является кобальт с фактором качества $Q = 0.35$, поэтому в рамках работы выявленная ДС названа «кобальтоподобной».

Для соединений $Y_2(Fe_{0.50}Co_{0.50})_{17}$ и $Y_2(Fe_{0.05}Co_{0.95})_{17}H_y$ методом МОЭК не удалось получить детализированное изображение ДС с мельчайшими вложениями. Это может быть объяснено тем, что данные образцы характеризуются слишком низким значением фактора качества. Для зависимости $Q(x)$ была обозначена условная граница $Q \sim 0.19$, ниже которой не удалось выявить вложения ДС методом МОЭК.

Раздел 2 посвящен исследованию ДС соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ ($x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.18, 0.29, 0.41, 0.50$) методом МСМ. Приведены серии МСМ изображений полей рассеяния ДС соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ с варьирующейся высотой подъема зонда над образцом z . Описаны особенности экспериментального получения МСМ серий – выбор размера области сканирования, плотности точек, паразитные эффекты. Показано, что методом МСМ удастся выявить детализированные изображения полей рассеяния ДС с мельчайшими вложениями для образцов $Y_2(Fe_{0.50}Co_{0.50})_{17}$ и $Y_2(Fe_{0.05}Co_{0.95})_{17}H_y$, для которых не удалось сделать этого методом МОЭК. Для исходного и гидрированного образца с концентрацией железа $x = 0.03$ не удалось выявить «кобальтоподобную» ДС ни методом МОЭК, ни методом МСМ. Данное соединение характеризуется напряженной ДС.

В **разделе 3** приведены алгоритмы цифровых постобработок и количественного анализа изображений ДС, полученных методом МОЭК, и изображений полей рассеяния ДС, полученных методом МСМ. Приводится описание метода микромагнитных расчетов на основе изображений ДС, предложенного Боденбергером и Хубертом [17].

Для магнитооптических изображений ДС приводится алгоритм бинаризации изображений и последующей цифровой постобработки. Для наиболее точных количественных расчетов должны использоваться изображения, полученные на максимально достижимом увеличении в 2000 раз. Описан алгоритм цифрового расчета средней ширины доменов D , представляющий собой модернизированный цифровой метод случайных секущих. Приводятся особенности выбора направлений случайных секущих при цифровой обработке.

Для МСМ изображений полей рассеяния подробно исследуется возможность их использования для расчетов средней ширины доменов и поверхностной плотности энергии ДГ по методу Боденбергера-Хуберта. Предложен и детально описан цифровой алгоритм количественных расчетов, включая корректировку

рассчитываемых значений с учетом высоты подъема зонда над образцом и обработку шумов.

Раздел 4 представляет результаты количественных расчетов средней ширины доменов и поверхностной плотности энергии ДГ на основе магнитооптических изображений ДС и на основе серий МСМ изображений полей рассеяния ДС, полученных на базисной плоскости образцов одноосных магнетиков $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$. Рассчитанные значения были сопоставлены с теоретическими значениями поверхностной плотности энергии 180° ДГ, рассчитанными в разделе 6 главы 3. Показано, что результаты теоретических расчетов и количественного анализа изображений ДС для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ хорошо согласуются в интервале $0.18 < x < 0.41$ для снимков ДС, полученных методом МОЭК, и во всем исследованном интервале $0.05 < x < 0.50$ для МСМ изображений полей рассеяния ДС. По результатам сопоставления можно заключить, что расчеты средней ширины доменов и поверхностной плотности энергии ДГ методом Боденбергера-Хуберта могут быть проведены на основе МСМ изображений полей рассеяния ДС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен полнопрофильный рентгенофазовый анализ соединений серии $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ ($x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.18, 0.29, 0.41, 0.50, 0.53, 0.65, 0.76, 0.87$) и их гидридов $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ ($x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.18, 0.29, 0.41, 0.50, 0.53, 0.65$). Установлено, что соединения $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ кристаллизуются в ромбоэдрическую структуру типа Th_2Zn_{17} в интервале концентраций железа $0 < x < 0.18$ и гексагональную структуру типа Th_2Ni_{17} – в интервале $0.29 < x < 1$. Процесс гидрирования исходных соединений в интервале $0.03 < x < 0.65$ не вызывает структурных переходов и приводит к увеличению параметра решетки a , уменьшению параметра решетки c и росту объема элементарной ячейки V . Относительное увеличение объема элементарной ячейки кристаллической решетки $\Delta V/V$ линейно возрастает с увеличением концентрации железа в 3d-подрешетке.

2. Выполнены систематические исследования полевых и температурных зависимостей удельной намагниченности исходных соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и их гидридов $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ ($x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.18, 0.29, 0.41, 0.50, 0.53$). Показано, что гидрирование соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ приводит к росту температуры Кюри для составов в диапазоне концентраций железа $0.03 < x < 0.53$, а также к увеличению значений первой константы магнитокристаллической анизотропии для составов с $0.29 < x < 0.50$.

3. Из анализа температурного поведения констант магнитокристаллической анизотропии (K_1, K_2) на основе теоретических моделей выявлены спин-переориентационные переходы в исходных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и гидрированных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ соединениях с концентрацией железа $x = 0.03, 0.05, 0.41, 0.50, 0.53$. Показано, что при выполнении условия $K_1 + K_2 = 0$ достигается наименьшая разница между абсолютным минимумом и максимумом

энергии магнитокристаллической анизотропии, равная $|K_1|/4$, а также минимум угла между осями легкого и трудного намагничивания, равный $\pi/4$.

4. Проанализировано температурное поведение поверхностной плотности энергии доменных границ $\gamma(T)$ соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$. Показано, что величина γ для кристаллов с цилиндрической магнитной симметрией достигает локального минимума при выполнении условия $K_1 + K_2 = 0$. Установлено, что для кристаллов с цилиндрической магнитной симметрией энергия доменных границ достигает своего абсолютного минимума, равного нулю, только при выполнении условия $K_1 = K_2 = 0$, что для соединений $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ реализуется лишь при условии $T = T_c$.

5. Показано, что соединения $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ в интервале концентраций железа $0.05 < x < 0.50$ характеризуются значениями магнитного фактора качества $Q \sim 1$. Методом оптической и магнитно-силовой микроскопии проведены исследования магнитной доменной структуры исходных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ и гидрированных $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ соединений ($x = 0.03, 0.05, 0.07, 0.18, 0.29, 0.41, 0.50$). На базисной плоскости образцов соединений с $0.05 < x < 0.50$ выявлена «кобальтоподобная» магнитная доменная структура с конфигурацией сильно разветвленных «звездочек».

6. Показано, что количественные расчеты средней ширины доменов D и поверхностной плотности энергии доменных границ γ могут быть проведены на основе изображений полей рассеяния магнитной доменной структуры, полученных на базисной плоскости массивных одноосных ферромагнетиков методом магнитно-силовой микроскопии. Предложен алгоритм количественных расчетов D и γ с учетом высоты подъема магнитного зонда сканирующего микроскопа над поверхностью образца.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

В журналах, индексируемых в международных базах данных, приравниваемых к перечню ВАК:

A1. **Sinkevich, A.I.** Magnetic properties of the $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ compounds / A.I. Sinkevich, M.B. Lyakhova, A.Y. Karpenkov, E.M. Semenova, D.Y. Karpenkov, Y.G. Pastushenkov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2024. – V. 88. – I. 5. – P. 793-797.

A2. **Sinkevich, A.I.** The magnetocrystalline anisotropy of $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}H_y$ compounds / A.I. Sinkevich, A.Y. Karpenkov, M.B. Lyakhova, E.M. Semenova, D.Y. Karpenkov, R.A. Makarin // Physica B: Condensed Matter. – 2025. – V. 696. – P. 416637.

A3. **Sinkevich, A.I.** The energy of 180° domain walls of uniaxial crystals with the different magnetocrystalline anisotropy type / A.I. Sinkevich, M.B. Lyakhova, E.M. Semenova // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2024. – V. 610. – P. 172560.

A4. **Sinkevich, A.I.** Domain structure of $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ compounds and their hydrides: qualitative and quantitative analysis / A.I. Sinkevich, S.D. Smetannikova,

E.M. Semenova, A.Yu. Karpenkov, D.Yu. Karpenkov, Yu.G. Pastushenkov // Crystallography Reports. – 2024. – V. 69. – P. S52-S60.

A5. Semenova, E.M. Magnetic domain structure of $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ compounds / E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, **A.I. Sinkevich**, A.Y. Karpenkov, Y.G. Pastushenkov // IEEE Magnetics Letters. – 2020. – V. 11. – P. 1-5.

A6. **Sinkevich, A.I.** Processing and analysis of lift height-dependent magnetic force microscopy images of bulk uniaxial crystals / A.I. Sinkevich, E.M. Semenova, G.G. Dunaeva, A.Yu. Karpenkov, M.B. Lyakhova, S.D. Smetannikova // Crystallography Reports. – 2025. – V. 70. – I. 3. – P. 158-165.

A7. Гусева А.М. Анализ параметров доменной структуры монокристаллов $RFe_{11}Ti$ ($R = Y, Gd, Ho, Er$) по данным магнитно-силовой микроскопии / А.М. Гусева, **А.И. Синкевич**, С.Д. Сметанникова, Е.М. Семенова, Ю.Г. Пастушенков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – №16. – С. 85-95.

Монографии:

A8. Ляхова, М.Б. Анализ типов магнитокристаллической анизотропии одноосных кристаллов / М.Б. Ляхова, **А.И. Синкевич** // Тверь: Тверской государственный университет, 2024. – 237 с. ISBN: 978-5-7609-2009-6.

Патенты и свидетельства на программный продукт:

B1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025660323 Российская Федерация. Программа для определения типа и величины магнитокристаллической анизотропии одноосных магнетиков: №2025660323: заявл. 11.04.2025: опубл. 23.04.2025 / **А.И. Синкевич**, С.Д. Сметанникова, М.Б. Ляхова, А.Ю. Карпенков; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет».

B2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023688785 Российская Федерация. Программа для расчета констант магнитокристаллической анизотропии: №2023686958: заявл. 07.12.2023: опубл. 25.12.2023 / **А.И. Синкевич**, Е.М. Семенова; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет».

B3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023688786 Российская Федерация. Программа для обработки и анализа изображений магнитной доменной структуры, полученных на оптическом микроскопе: №2023686990: заявл. 07.12.2023: опубл. 25.12.2023 / **А.И. Синкевич**, Е.М. Семенова; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет».

B4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020661938 Российская Федерация. Программа для обработки и анализа изображений магнитной доменной структуры, полученных на магнитно-силовом микроскопе: №2020661011: заявл. 28.09.2020: опубл. 05.10.2020 / **А.И. Синкевич**,

А.Ю. Карпенков, Е.М. Семенова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет».

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудреватых, Н.В. Спонтанная намагниченность, магнитокристаллическая анизотропия и анизотропная магнитострикция редкоземельных соединений на основе железа и кобальта / Н.В. Кудреватых // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. – Екатеринбург, 1994.
2. Brennan, S. Anisotropy of easy-plane Y_2Fe_{17} , $Y_2Fe_{17}N_3$ and Sm_2Fe_{17} / S. Brennan, R. Skomski, O. Cugat, J.M.D. Coey // Journal of magnetism and magnetic materials. – 1995. – V. 140. – P. 971-972.
3. Kou, X.C. Magnetic anisotropy and magnetic phase transitions in R_2Fe_{17} with $R = Y, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm$ and Lu / X.C. Kou, F.R. De Boer, R. Grössinger, G. Wiesinger, H. Suzuki, H. Kitazawa, et al // Journal of Magnetism and magnetic materials. – 1998. – V. 177. – P. 1002-1007.
4. Kajitani, T. Neutron diffraction study on Y_2Fe_{17} and $Y_2Fe_{17}N_x$ ($x = 2.1-2.6$) / T. Kajitani, Y. Morii, T. Iriyama, H. Kato // Physica B: Condensed Matter. – 1995. – V. 213. – P. 294-296.
5. Perkins, R.S. The magnetocrystalline anisotropy of $Y_2(Co_{1-x}Fe_x)_{17}$ / R.S. Perkins, H. Nagel // Physica B+C. – 1975. – V. 80. – I. 1-4. – P. 143-152.
6. Inomata, K. NMR Study of $Y_2(Fe_xCo_{1-x})_{17}$ and $Y(Fe_yCo_{1-y})_5$ / K. Inomata // Japanese Journal of Applied Physics. – 1976. – V. 15. – I. 5. – P.821-824.
7. Chen, H. Magnetic anisotropy phase diagrams of $R_2(Co_{1-x}Fe_x)_{17}$ compounds ($R = Y, Pr, Sm, Gd, Dy, Er$) / H. Chen, W.W. Ho // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1989. – V. 78. – I. 2. – P. 203-207.
8. Isnard, O. Neutron diffraction study of the structural and magnetic properties of the $R_2Fe_{17}H_x$ (D_x) ternary compounds ($R = Ce, Nd$ and Ho) / O. Isnard, S. Miraglia, J.L. Soubeyroux, D. Fruchart, A. Stergiou // Journal of the Less Common Metals. – 1990. – V. 162. – I. 2. – P. 273-284.
9. Nikitin, S.A. Effect of interstitial hydrogen and nitrogen on the magnetocrystalline anisotropy of Y_2Fe_{17} / S.A. Nikitin, E.A. Ovtchenkov, A.A. Salamova, V.N. Verbetsky // Journal of alloys and compounds. – 1997. – V. 260. – I. 1-2. – P. 5-6.
10. Coey, J.M.D. Magnetism and magnetic materials / J.M.D. Coey // Cambridge University Press, 2010.
11. Lyakhova, M.B. Analysis of magnetization curves and magnetocrystalline anisotropy of uniaxial ferromagnets / M.B. Lyakhova, O.V. Zhdanova // Metal Science and Heat Treatment. – 2017. – V. 58. – P. 587-593.
12. Kuz'min, M.D. Shape of Temperature Dependence of Spontaneous Magnetization of Ferromagnets: Quantitative Analysis / M.D. Kuz'min // Physical review letters. – 2005. – V. 94. – I. 10. – P. 107204.

13. Акулов, Н.С. Ферромагнетизм / Н.С. Акулов // Москва-Ленинград: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1939. – 188 с.
14. Zener, C. Classical theory of the temperature dependence of magnetic anisotropy energy / C. Zener // *Physical Review*. – 1954. – V. 96. – I. 5. – P. 1335.
15. Carr Jr, W. J. Temperature dependence of ferromagnetic anisotropy / W.J. Carr Jr // *Physical Review*. – 1958. – V. 109. – I. 6. – P. 1971.
16. Coey, M. Handbook of Magnetism and Magnetic Materials / M. Coey, S. Parkin // Springer, Cham, 2021.
17. Bodenberger, R. Zur Bestimmung der Blochwandenergie von einachsigen Ferromagneten / R. Bodenberger, A. Hubert // *Physica status solidi (a)*. – 1977. – V. 44. – I. 1. – P. K7-K11.

Подписано в печать 04.07.2025. Формат $60 \times 84^{1/16}$.
Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ № 170.
Издательство Тверского государственного университета.
Адрес: 170100, г. Тверь, Студенческий пер. 12, корпус Б.
Тел.: (4822) 35-60-63.