

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Комлев Алексей Степанович

**Релаксация намагниченности в объектах различной
размерности на основе сплава FeRh**

Специальность 1.3.12 – Физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре магнетизма физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель *Перов Николай Сергеевич* – доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты *Терёшина Ирина Семёновна* – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики твердого тела физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Ховайло Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС»

Харин Евгений Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории конструкционных сталей и сплавов имени академика Н.Т. Гудцова (№7) Института металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Защита диссертации состоится «20» июня 2024 г. в 17 часов 20 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 8, криогенный корпус, конференц-зал.

E-mail: perov@magn.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3009>

Автореферат разослан «___» мая 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Т.Б. Шапаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Материалы, в которых наблюдаются магнитные фазовые переходы, изучаются более ста лет. Продолжающийся интерес со стороны ученых к подобным материалам объясним их важностью для практических применений. С одной стороны, ферромагнитное упорядочение в материалах существует в ограниченном диапазоне температур и одной из задач является увеличение температуры фазового перехода с сохранением магнитных свойств, например, в постоянных магнитах [1]. С другой стороны, вблизи температуры магнитного фазового перехода зачастую изменяются структурные, магнитные, транспортные и калорические свойства, что также представляет интерес для прикладных задач. Например, с использованием элементов на основе Gd и сплавов на основе LaFeSi реализовано несколько работоспособных прототипов твердотельных охлаждающих устройств, которые по некоторым параметрам превосходят газокompрессорные устройства охлаждения [2]. Также технология магнитного охлаждения нашла интерес в системах записи информации. В частности, применение технологии HAMR (Heat-assisted magnetic recording) позволяет уменьшить размер бита информации на жестком диске [3]. Согласно недавним работам, использование новых материалов с магнитным фазовым переходом первого рода в качестве элемента термомагнитного генератора, который преобразует тепловую энергию в электрическую, способно повысить конкурентоспособность данной технологии по сравнению с термоэлектриками [4]. Наблюдаемые эффекты колоссального магнитосопротивления, гигантской магнитострикции, магнитокалорического эффекта вблизи температуры магнитного фазового перехода активно используются в сенсорике и приборостроении, а внедрение функциональных материалов с их наличием определяет развитие современных технологий.

Однако, первопричина магнитных фазовых переходов, которые определяют вышеупомянутые эффекты, до сих пор полностью не ясна. Прогнозирование составов сплавов, которые обладали бы гигантскими значениями обозначенных эффектов в необходимом диапазоне температур, и прогнозирование поведения их свойств затруднительно. Следовательно, исследование физических свойств

материалов с магнитным фазовым переходом первого рода является **актуальной** задачей и для фундаментальной физики.

Существует множество материалов, обладающих магнитным фазовым переходом первого рода. Однако, с практической точки зрения для постановки эксперимента и последующего анализа результатов целесообразнее выбрать бинарный сплав с высокой намагниченностью насыщения и простой кристаллической структурой, у которого температура фазового перехода находится вблизи комнатной. Единственным объектом, который удовлетворяет всем этим требованиям, является бинарный сплав железа и родия. На данный момент существует множество работ, в которых продемонстрированы статические магнитные свойства этого материала [A2]. Однако, больший интерес вызывает исследование его динамических свойств, которые мало изучены. Во-первых, изучение кинетики фазового перехода позволит дополнить существующие феноменологические модели [5–7], описывающие фазовые переходы, с учетом обнаруженных особенностей. Во-вторых, большинство устройств, в конструкции которых используются детали из материала с магнитным фазовым переходом первого рода, работают в условиях циклических внешних воздействий. Поэтому изучение нестационарных процессов вблизи температуры магнитного фазового перехода первого рода в материалах с различной микроструктурой является **актуальной** задачей.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы являлось исследование особенностей кинетики магнитного фазового перехода в сплавах на основе FeRh (объемных образцах с различной микроструктурой, а также тонких пленках и наночастицах) для определения ключевых механизмов взаимосвязи микроструктурных особенностей и параметров магнитного фазового перехода, а также разработка феноменологических моделей, описывающих экспериментальные результаты нестационарного поведения намагниченности вблизи температуры фазового перехода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) Экспериментальные исследования структурных, магнитных и калорических свойств сплавов, тонких пленок и наночастиц сплава на основе FeRh вблизи температуры фазового перехода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние, определение характерных времен релаксации намагниченности. Анализ полученных экспериментальных данных;
- 2) Проведение микроскопических исследований процессов фазообразования вблизи температуры фазового перехода различными методами с целью выделения промежуточных этапов эволюции фазового перехода;
- 3) Разработка феноменологических моделей, описывающих экспериментальные данные температурных, полевых и временных зависимостей намагниченности в процессе фазового перехода первого рода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние с учетом конечной скорости нагрева или изменения внешнего магнитного поля;
- 4) Сопоставление результатов теоретических расчетов с результатами экспериментальных исследований поведения намагниченности вблизи температуры фазового перехода первого рода сплавов FeRh для определения границ применимости разработанных моделей;
- 5) Уточнение особенностей роста ферромагнитной фазы и изменения ее микромагнитной структуры, возникающих в процессе фазового перехода в тонких пленках и наночастицах по сравнению с объемными сплавами.

Достоверность результатов

Достоверность экспериментальных данных, содержащихся в диссертации, определяется использованием современного коммерческого научного оборудования и общепринятых методов обработки результатов, подтверждается воспроизводимостью при повторных измерениях, а также корреляцией основных закономерностей поведения физических свойств с опубликованными данными. Обоснованность применения предлагаемых феноменологических моделей и методик их численного расчета подтверждается использованием общеизвестных и широко используемых теоретических подходов к описанию рассматриваемых

физических явлений с определенными границами применимости, а также высокой степенью совпадения полученных данных при моделировании результатов с экспериментальными кривыми.

Положения, выносимые на защиту

1. Рост ферромагнитной фазы в процессе фазового перехода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние в сплаве FeRh осуществляется в несколько последовательных этапов, причем зарождение ферромагнитных кластеров происходит на поверхности образца и вдали от границ с другими кристаллографическими фазами, ограничение скорости роста ферромагнитной фазы обусловлено двумя механизмами: (i) возникновением локальных механических напряжений (ii) локальным изменением температуры.
2. Разработанная комбинированная феноменологическая модель, включающая в себя основные положения моделей Ландау, Бина и Родбелла количественно описывает поведение намагниченности изотропного материала в процессе фазового перехода первого рода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние в зависимости от внешнего магнитного поля, температуры с учетом конечной скорости изменения этих параметров.
3. Рост ферромагнитной фазы и изменение ее микромагнитной структуры в процессе магнитного фазового перехода первого рода в сплавах на основе FeRh при температурном воздействии происходят изотропно, в случае инициирования фазового перехода внешним магнитным полем наблюдается анизотропия данных процессов.
4. В наночастицах сплава на основе FeRh с размерами менее 20 нм ферромагнитное упорядочение сохраняется до гелиевых температур.

Научная новизна

На данный момент не существует первопринципной теории, которая описывала бы поведение намагниченности в процессе фазового перехода первого

рода. Следовательно, нельзя предсказать места локализации новой магнитной фазы и характер ее роста в процессе фазового перехода. Наличие взаимодействий между отдельными зародышами магнитной фазы путем теплопередачи, механическими напряжениями и магнитными диполь-дипольными взаимодействиями усложняет процессы анализа экспериментальных данных и выявления доминирующего механизма, определяющего кинетику фазообразования.

В данной работе представлены разносторонние экспериментальные данные, позволяющие проанализировать поведение магнитных, структурных, калорических, электронных свойств сплавов железа и родия с различными микроструктурными особенностями и выявить основные этапы роста ферромагнитной фазы в процессе фазового перехода. Выявление и визуализация микромагнитных особенностей на различных этапах роста магнитной фазы позволяют повысить достоверность выводов, сделанных при объяснении причин существования длительной релаксации намагниченности в процессе фазового перехода.

В диссертации впервые описываются особенности кинетики ферромагнитной фазы в сплавах FeRh с различной микроструктурой и приводятся объяснения подобного поведения. Предложена феноменологическая модель, созданная на основе модели фазовых переходов Ландау и модели Бина и Родбелла, которая позволяет описать полученные экспериментальные результаты и способна предсказать поведение температурных и полевых зависимостей намагниченности при воздействии конечных по длительности внешних воздействий вблизи температуры фазового перехода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние.

Также ранее были неясны причины отсутствия фазового перехода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние в наночастицах железа-родия с характерным размером менее 20 нм. В представленной работе путем всестороннего анализа магнитных свойств данного объекта в широком диапазоне температур был сделан вывод о причинах формирования того или иного магнитного упорядочения при различных температурах и внешних магнитных полях.

Практическая значимость

Большинство устройств, работа которых основана на использовании материалов с магнитным фазовым переходом первого рода, работают в условиях циклических внешних воздействий. Поэтому при помощи информации о взаимосвязи микроструктурных особенностей сплавов на основе FeRh с кинетикой фазообразования в процессе фазового перехода первого рода возможно определить подходы к оптимизации параметров магнитного фазового перехода путем изменения процесса синтеза. Стоит отметить, что сплавы на основе FeRh не используются в коммерческих разработках. Однако, данный сплав является одним из типичных представителей класса материалов с магнитным фазовым переходом первого рода. Поэтому, основные выводы, полученные в результате изучения его свойств, могут быть справедливы для остальных схожих коммерчески доступных материалов.

Предложенные феноменологические модели могут быть применимы для расчетов рабочих параметров и дальнейшей оптимизации конструктивных особенностей устройств, в которых материал с магнитным фазовым переходом первого рода используется в условиях циклических внешних воздействий. Разработанные в диссертации методики и полученные экспериментальные результаты представляют интерес для широкого круга специалистов. Они могут быть использованы в научно-исследовательских организациях, в частности, в МИРЭА, МГУ, ИФМ УрО РАН, ЦНИИЧерМет, ИМЕТ РАН, МИИТ, МИЭТ, МФТИ, ИФП РАН, ИФТТ РАН, ФИАН, ИОФАН, НИЦ Курчатовский институт, ИФ СОИ РАН и др., занимающихся разработкой и исследованием функциональных магнитных материалов с фазовыми переходами для криогенных устройств, электрогенераторов, запоминающих устройств, сенсоров и т.д.

Личный вклад автора

Формулировка цели и постановка задач проводились соискателем совместно с научным руководителем. Пробоподготовка образцов, написание протоколов проведения всех экспериментальных исследований и обработка экспериментальных данных осуществлялась автором работы. Экспериментальные данные о

температурном, полевом и временном поведении намагниченности в температурном диапазоне от 80 К до 800 К для всех образцов были получены диссертантом самостоятельно. Соискателем было выполнено построение феноменологических моделей и численные расчеты на их основе. Концептуализация общей модели и анализ полученных результатов проводились совместно с соавторами соответствующих опубликованных работ. Диссертант является первым автором публикаций по теме диссертации.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на 14 российских и международных конференциях, школах и воркшопах в виде стендовых, устных и on-line докладов: 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва, Россия, 2020), Уфимская осенняя математическая школа 2021 (Уфа, Россия, 2021), Workshop on i-Caloric Effects (Бразилия, 2021), XXII межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б. С. Ишханова "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине" (Москва, Россия, 2021), Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2021» (Москва, Россия, 2021), 5th Young Researchers in Magnetism (Испания, 2021), XXII Международная конференция «Новое в магнетизме и магнитных материалах» (Москва, Россия, 2021), Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2022» (Москва, Россия, 2022), Перспективные материалы и технологии (Москва, Россия, 2022), 2nd International Conference on Magnetism and Its Applications (ICMIA) (Бали, Индонезия, 2022), XXX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2023» (Москва, Россия, 2023), Дни калорики в Дагестане: функциональные материалы и их приложения (Дербент, Россия, 2023), Samarkand International Symposium on Magnetism SISM-2023 (Самарканд, Узбекистан, 2023), Китайско-российский форум аспирантов (Харбин, Китай, 2023).

По материалам диссертации опубликовано 5 научных статей, из которых 4 индексируются по базам данных Web of Science и Scopus.

Результаты диссертационного исследования были получены в рамках выполнения грантов РФФИ 22-22-00291 «Исследование механизмов роста ферромагнитной фазы в сплавах на основе FeRh», МОН 075-15-2021-1353 «Развитие синхротронных и нейтронных исследований и инфраструктуры для материалов энергетики нового поколения и безопасного захоронения радиоактивных отходов».

Структура и объем

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов, заключения, списка условных обозначений, списка литературы из 124 наименований. Общий объем работы составляет 123 страницы, включая 33 рисунка, 27 формул и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и определены задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, отмечается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также приводятся сведения об апробации результатов, личном вкладе автора и структуре диссертации.

В **первой главе** приводится информация о возможности практического применения функциональных материалов с магнитными фазовыми переходами, обсуждаются достоинства и недостатки каждой из технологий. Также кратко описаны существующие феноменологические теории, которые описывают поведение физических свойств вещества в процессе магнитного фазового перехода. Рассмотрены основные особенности квазистатических параметров магнитных фазовых переходов первого рода. Перечислены наиболее изученные составы материалов, в которых наблюдается фазовый переход типа порядок-порядок или порядок-беспорядок. Обсуждены отличительные особенности поведения намагниченности для каждого из типов фазового перехода. В частности, приведена основная информация о поведении структурных, магнитных, калорических, электронных свойств сплавов на основе FeRh вблизи температуры фазового перехода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние. Особое внимание уделяется релаксационному поведению намагниченности в объектах различной

размерности (объемные сплавы, тонкие пленки и наночастицы). На основе анализа опубликованных экспериментальных данных для подобных образцов, полученных методами вибрационной магнитометрии и XMCD (X-ray Magnetic Circle Dichroism) [8], сформулированы задачи по исследованию эволюции магнитного фазового перехода в объектах с различной микроструктурой.

Во **второй главе** приводится описание изучаемых образцов, экспериментальных методик исследования и предлагаются феноменологические теории, которые описывают полученные результаты.

В работе рассмотрены объемные сплавы состава $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$ с различным содержанием объемной доли парамагнитной гамма фазы (5% и 35%), объемный однофазный сплав $\text{Fe}_{50}\text{Rh}_{50}$, пленка толщиной 56 нм на подложке MgO состава $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$ и наночастицы $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$ с характерным диаметром 10 нм. Выбранный набор исследуемых образцов позволил изучить роль размерного фактора и микроструктурных особенностей сплава на параметры его магнитного фазового перехода. Объемные сплавы были переплавлены Алисой М. Чирковой в группе Prof. Oliver Gutfleisch (Дармштадт, Германия) в дуговой печи, затем отожжены в течение 72 ч при 1273 К в атмосфере аргона с последующей закалкой в воде. Первоначальная плавка образцов реализовывалась д.ф.-м.н. Н.В. Барановым (ИФМ, Екатеринбург, Россия). Пленочный образец был выращен группой Prof. Tomoyasu Taniyama (Нагоя, Япония) на монокристаллической подложке MgO (001) при температуре 773 К. После процесса выращивания пленка подвергалась последующему отжигу в течение 1.5 ч при температуре 893 К. Наночастицы железа-родия с оксидом железа на поверхности ($\text{FeRh}@\text{FeO}$) были синтезированы в группе д.х.н. П.В. Кривошапкина (ИТМО, Санкт Петербург, Россия) методом полиолового синтеза. Затем образец отжигался в течение 1 ч при 500 °С (скорость нагрева 50 град/мин) в атмосфере аргона.

С целью получения информации о зависимости магнитных свойств исследуемых объектов от их микроструктурных особенностей был выбран широкий круг экспериментальных методик, позволяющий охарактеризовать структурные, магнитные, калорические и электронные свойства образцов. Информация о структурных свойствах образцов была получена при помощи методик:

рентгеноструктурного анализа, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии с EDX анализом. Магнитные свойства изучены с использованием методов вибрационной магнитометрии, магнитосиловой и Керр микроскопии, измерений магнитосопротивления четырехточечным методом. Анализ процессов перемагничивания сплава в процессе фазового перехода был реализован с использованием T-FORC (Temperature-First Order Reversal Curve) анализа [9]. Оценка калорических свойств проведена на основе температурных зависимостей намагниченности при помощи соотношений Максвелла. Сверхтонкие параметры наночастиц исследованы методом Мёссбауэровской спектроскопии.

В диссертации предложена модель, способная в достаточно высоком согласии с экспериментом воспроизводить температурные зависимости намагниченности, измеренные с различной скоростью нагрева. Для этого свободная энергия магнетика записана с учетом теории фазовых переходов Ландау и модели Бина и Родбелла [5,7].

$$F = -MH + \frac{1}{2}\alpha(T - T_0 \left(1 - \beta \frac{v-v_0}{v_0}\right))M^2 + \frac{1}{4}BM^4 + \frac{1}{6}CM^6 - Pv \quad (1)$$

Где M – намагниченность, H – напряженность магнитного поля, T – температура, α – феноменологический параметр теории Ландау (константа), T_0 – температура фазового перехода недеформированной решетки, β – коэффициент пропорциональности между температурой фазового перехода и объемом кристаллической решетки, v – объем кристаллической решетки, v_0 – объем кристаллической решетки высокотемпературной фазы, P – давление, B, C – коэффициенты теории Ландау, слабо зависящие от температуры (их температурной зависимостью можно пренебречь). Также учитывается тот факт, что $\frac{v-v_0}{v_0}$ является функцией, линейно зависящей от давления и квадратично от намагниченности. С целью учета конечной скорости нагрева образца было применено уравнение Ландау-Халатникова [10], которое позволяет описать нестационарный процесс изменения намагниченности:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\Gamma' \frac{\partial F}{\partial M} \quad (2)$$

Где Γ' – кинетический коэффициент (предполагается константой при данном рассмотрении), который в том числе зависит от механических свойств материала. Дифференциальное уравнение (2) решалось при помощи метода Рунге-Кутты 4-го порядка, расчеты проводились в написанной на C++ программе. На основе предложенной модели было показано, что характерное время релаксации намагниченности вблизи температуры фазового перехода значительно увеличивается согласно следующей асимптотике:

$$\tau = \frac{1}{\Gamma' B M_0^2} = - \frac{1}{\Gamma' \alpha (T - T_0 (1 - \beta \frac{v - v_0}{v_0}))} \quad (3)$$

С целью подтверждения гипотезы о влиянии процесса релаксации механических напряжений в кристаллической решетке на длительную релаксацию намагниченности и качественного описания экспериментальных временных зависимостей намагниченности было положено начало в разработке феноменологической модели кинетики магнитного фазового перехода первого рода. За основу была взята цепочка упруго взаимодействующих атомов (180 штук), начальное положение которых соответствовало неравновесному состоянию. Отклонения положения атома от равновесного задавалось логнормальным распределением. Далее рассчитывалось положение каждого атома с течением времени. Шаг по времени был выбран таким образом, чтобы обеспечить сходимость результатов расчета. Подобная модель является классической для анализа фоновых свойств кристаллических структур [11]. Динамика одномерной системы атомов рассчитывалась с помощью программы на языке C++. В рамках рассматриваемой модели движение атома описывается уравнением:

$$m \ddot{x}_l - k_l (x_l - x_{l-1}) - k_l (x_l - x_{l+1}) = 0 \quad (4)$$

Где m – масса атома, x_l – координата положения атома в цепочке с номером l , k_l – коэффициент жесткости пружины между атомами l и $l - 1$. Величина межатомного расстояния рассматривалась как феноменологический критерий фазового перехода. Экспериментально известно, что параметр кристаллической решетки FeRh в антиферромагнитном и ферромагнитном состоянии различается. Поэтому в данной модели предполагалось, что равновесное положение атомов в кристаллической решетке необратимо изменится, как только расстояние между

двумя соседними атомами станет равным a_{FM} . Следовательно, уравнение (4) для атома, перешедшего в ферромагнитное состояние, изменится.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований структурных, магнитных и калорических свойств объемных сплавов и тонкой пленки сплава на основе железа-родия. В частности, получена информация об элементном составе и характерных размерах кристаллитов основной (α -фаза) и

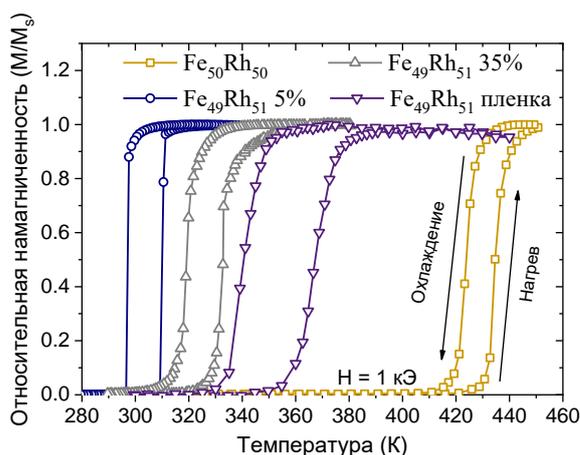
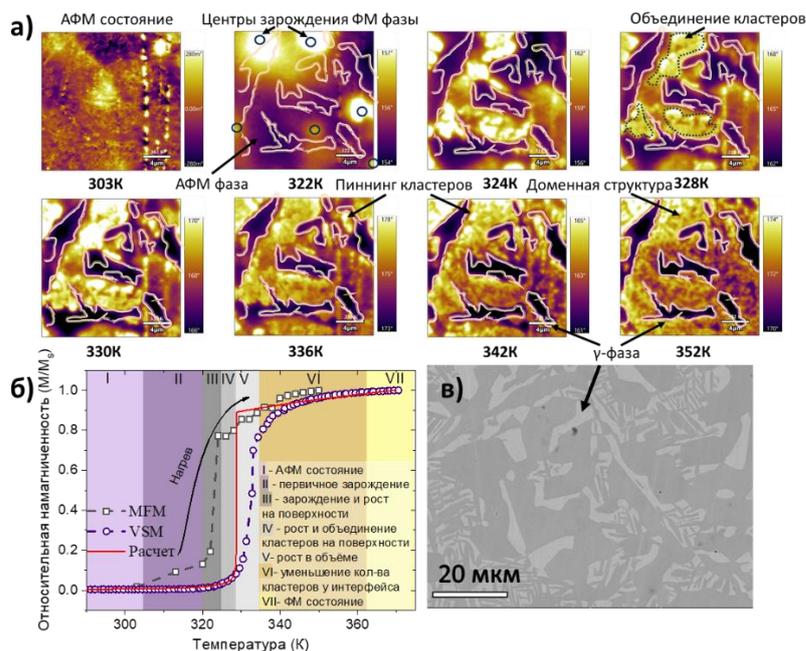


Рисунок 1. Температурные зависимости намагниченности для объемных сплавов и тонкой пленки FeRh в поле 1 кЭ [A1, A5].

дополнительной (γ -фаза) фаз. Проанализировано поведение температуры фазового перехода, ширины температурного гистерезиса, намагниченности и изменения энтропии выбранных образцов. На Рисунке 1 представлены температурные зависимости намагниченности изучаемых образцов. Основными механизмами, приводящими к изменению температуры фазового перехода и ширины температурного гистерезиса намагниченности являются: различное распределение механических напряжений (закалочных и на интерфейсах) [12] и наличие отклонения элементного состава сплавов от номинальных [13]. На основании полученных данных четко прослеживается тенденция к уширению температурного гистерезиса в объемных сплавах с увеличением объемной доли γ -фазы. На интерфейсе между α - и γ -фазами возникают дополнительные механические напряжения, которые приводят к увеличению температуры фазового перехода и к уширению температурного гистерезиса. Из результатов полевых зависимостей намагниченности были сделаны оценки эффективных констант анизотропии, которые использованы для оценок размеров однодоменных кластеров и скорости релаксации суперпарамагнитных

частиц. Предполагается, что вариации в величинах эффективных констант анизотропии могут быть связаны с изменением среднего размера кристаллитов и различного количества кристаллических дефектов в образцах. Описанные



результаты представлены в публикациях [A1, A5].

Визуализация процессов роста ферромагнитной фазы в процессе фазового перехода реализована при помощи магнитносиловой микроскопии (Рисунок 2).

Установлено, что эволюция

ферромагнитной фазы в процессе фазового перехода проходит в несколько этапов : (i) первичное зарождение ферромагнитных кластеров на поверхности

Рисунок 2. а) МСМ-изображения поверхности образца Fe₄₉Rh₅₁ (35%), полученные при разных температурах (в процессе нагрева). Снимки сделаны из одного и того же места. Места локализации парамагнитной γ -фазы обозначены светлыми линиями. б) Температурные зависимости намагничивания двухфазного образца, полученные методами MFM, VSM и расчетные данные (при нагреве со скоростью нагрева 2 К/мин). в) СЭМ-изображение поверхности образца Fe₄₉Rh₅₁ (35%). Основная (α) фаза отмечена темно-серым цветом, парамагнитная γ -фаза — светло-серым. Исследуемые участки образца на СЭМ и МСМ изображениях не совпадают.

сплава, которые локализуются вдали от границ с другими кристаллографическими фазами или в местах с незначительными закалочными напряжениями, (ii) зарождение и рост ферромагнитных кластеров на поверхности сплава, (iii) рост и объединение ферромагнитных кластеров на поверхности сплава, (iv) прорастание ферромагнитной фазы с поверхности в объем сплава, (v) уменьшение количества антиферромагнитных кластеров, локализованных вблизи кристаллических дефектов. Низкотемпературная область модельной кривой (до резкого увеличения намагниченности) хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными на вибрационном магнитометре. При данных температурах доминируют процессы зарождения и роста ферромагнитной фазы, при которых ферромагнитные кластеры слабо взаимодействуют друг с другом. Поэтому модель

Ландау, в которой профиль свободной энергии содержит два локальных минимума, соответствующих двум магнитным состояниям, адекватно описывает экспериментальные данные. Описанные результаты представлены на конференции SISIM-2023 [T10].

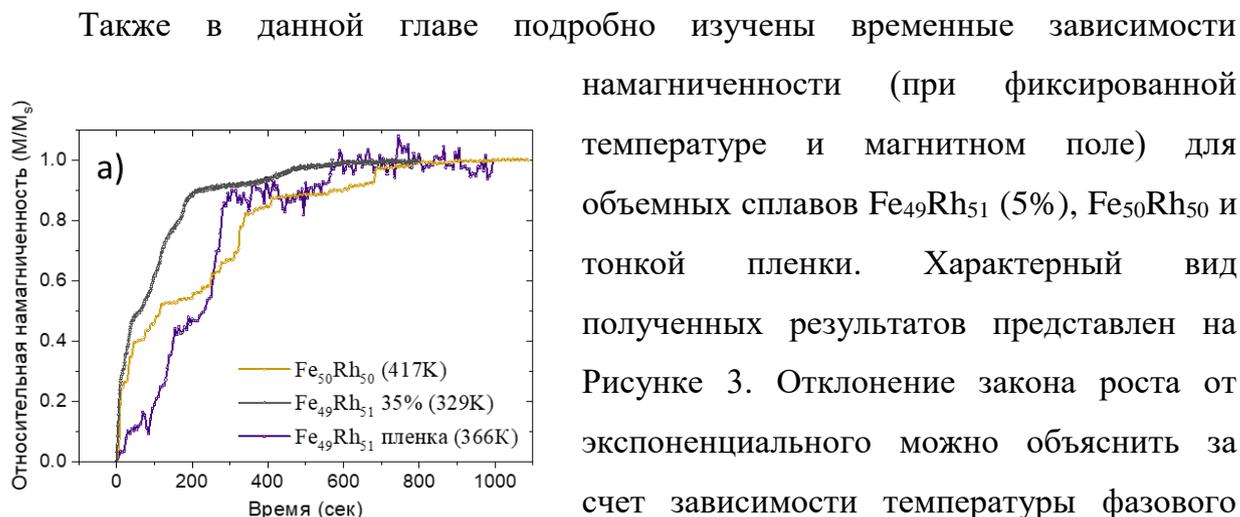


Рисунок 3. Характерный вид временных зависимостей намагниченности для различных образцов FeRh в поле 1 кЭ. [A5]

большим содержанием γ -фазы ферромагнитная фаза преимущественно возникает за счет процесса ее зарождения, а не за счет процессов роста, как происходит в однофазном образце. Как следствие, в образцах с различной микроструктурой изменяется характерное время релаксации намагниченности. Все исследуемые образцы продемонстрировали увеличение характерного времени релаксации до нескольких сотен секунд вблизи температуры фазового перехода, как предсказывалось уравнением (2). Описанные результаты представлены в публикации [A5].

Результаты моделирования временной зависимости доли ферромагнитной фазы в цепочке атомов продемонстрировали качественное согласие с экспериментальными данными. Анализ расчетных данных показывает, что наиболее значительные и быстрые скачки намагниченности (в начале процесса релаксации) связаны с зарождением ферромагнитной фазы. Размер возникающих ферромагнитных кластеров зависит от начальных условий. Увеличение среднего отклонения атомов (начального) от положения равновесия (аналогично увеличению температуры на эксперименте) приводит как к увеличению среднего размера возникающих кластеров, так и к увеличению скорости появления новых кластеров. Также повышение температуры приводит к полной неразличимости процессов зарождения и роста фаз. В начальный момент времени эти процессы практически неразделимы, так как они протекают одновременно. Задержка роста ферромагнитной фазы (появление ступеней) в середине процесса релаксации предположительно связана с появлением механических напряжений в областях между двумя ферромагнитными кластерами, которые релаксируют вдоль цепочки атомов. Поэтому требуется некоторое время, чтобы в этой области произошла необходимая флуктуация положения атома, приводящая к переходу в ферромагнитное состояние. Следует отметить, что по результатам моделирования слияние ферромагнитных кластеров происходит только на заключительной стадии фазового перехода. Одномерная модель не выявила закономерностей, которые указывали бы на то, что зарождение ферромагнитной фазы будет формироваться преимущественно с края цепочки. Возможно, трехмерная модель фазового перехода покажет, что зарождение фазы происходит с поверхности образца, как показали

экспериментальные работы [14,15]. Данные результаты были представлены на конференции “Дни калорики 2023” [Т9].

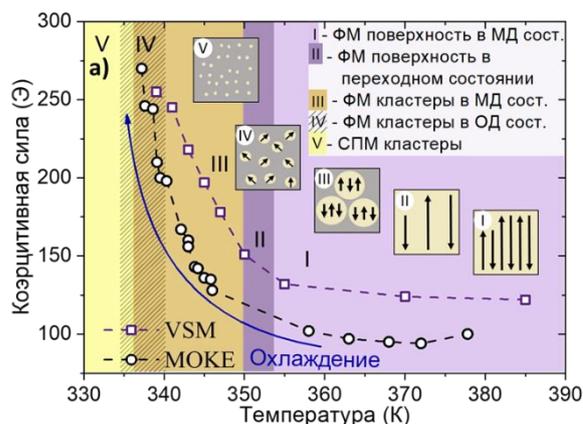


Рисунок 4. а) Температурная зависимость коэрцитивной силы пленки. Измерения проводились с помощью VSM и МОКЕ при охлаждении из ферромагнитного состояния в антиферромагнитное. Разными цветами обозначены температурные интервалы, в которых образец находится в разных магнитных состояниях. На вставке указан тип магнитного состояния в каждой области. На вставке схематически показано магнитное состояние образца при различных температурах (вид пленки сверху). Ферромагнитная фаза отмечена желтым цветом, антиферромагнитная фаза — серым. Стрелки внутри ферромагнитной фазы показывают направление намагниченности внутри магнитного домена. Обозначения: ФМ – ферромагнитный, МД – многодоменный, ОД – однодоменный, СПМ – суперпарамагнитный. [A5]

перехода, определенной из результатов вибрационной магнитометрии по сравнению с результатами Керр магнитометрии. Данный факт объясним наличием механических напряжений со стороны подложки, которые приводят к увеличению температуры фазового перехода той части пленки, которая находится ближе к интерфейсу с подложкой. Из данных коэрцитивной силы и величины эффективной константы анизотропии был оценен размер однодоменных ферромагнитных кластеров в пленке. Их размер составляет около 20 нм. Это значение коррелирует с опубликованными результатами, где использовались другие экспериментальные методики [15,16]. Дополнительные сведения о процессе изменения магнитной структуры в процессе фазового перехода были

В четвертой главе представлены результаты изучения особенностей поведения магнитных свойств тонких пленок в процессе фазового перехода. Из анализа результатов Керр магнитометрии и вибрационной магнитометрии для тонкой пленки были отделены друг от друга процессы перемагничивания на поверхности и в объеме. На Рисунке 4 приведены температурные зависимости коэрцитивной силы, полученные разными методами. Увеличение коэрцитивной силы при охлаждении объясняется уменьшением размеров ферромагнитных кластеров до около однодоменного состояния [A1]. Важным результатом является наличие более высокой температуры фазового

получены при помощи T-FORC анализа. Полученная диаграмма позволила определить температурные режимы, при которых можно реализовать в пленке преимущественно однодоменное состояние ферромагнитных кластеров. Описанные результаты представлены в публикации [A1]. Подробно проанализированы полевые зависимости сопротивления тонкой пленки при различных температурах. Температурные условия измерений выбраны таким образом, чтобы создать в образце различное объемное соотношение ферромагнитной и антиферромагнитной фаз, а затем по результатам магнитосопротивления выявить характер роста ферромагнитной фазы при изменении внешнего магнитного поля. В результате было определено, что эволюция фазового перехода, инициированного магнитным полем и температурой различна. При полевом воздействии микромагнитная структура ферромагнитной фазы находится преимущественно в однодоменном состоянии, также значимую роль играют магнитострикционные эффекты. Описанные результаты представлены в публикации [A3].

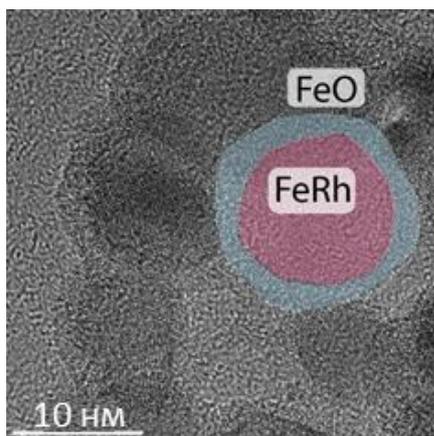


Рисунок 5. Изображение наночастицы FeRh@FeO с выделенными зонами ядра и оболочки. [A4]

Из анализа микроскопических исследований с EDX анализом и рентгеноструктурных данных следует, что в процессе синтеза сформировалась желаемая кристаллическая структура типа CsCl, толщина оксидного слоя железа не превышает 1 нм при среднем размере частиц 10.58 нм. Расчетный параметр ОЦК решетки равен $a=b=c=2.984(22) \text{ \AA}$. Это значение очень близко к справочным данным (2.99 \AA) для Fe₅₀Rh₅₀. Небольшое сжатие кристаллической решетки может быть объяснено наличием оксидного слоя на поверхности.

С целью характеристики магнитных свойств были измерены ZFC-FC кривые и петли гистерезиса в температурном диапазоне от 4.2 К до 700 К в различных магнитных полях (100 Э, 1кЭ, 10кЭ). Примеры полученных зависимостей приведены

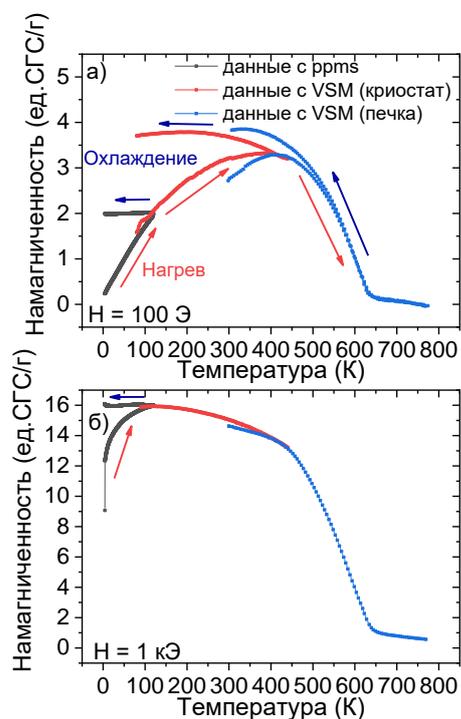


Рисунок 6. Температурные зависимости намагниченности наночастиц в полях а) 100 Э, б) 1 кЭ [A4]

на Рисунке 6. Вблизи гелиевых температур образец находился преимущественно в антиферромагнитном упорядочении. Температурный гистерезис в насыщающем поле 1 кЭ, который наблюдается вблизи температуры 50 К (Рисунок 6 б), является прямым свидетельством этого факта. Петли гистерезиса, измеренные ниже 50 К подтверждают эту информацию. Большинство частиц переходят из антиферромагнитного состояния в ферромагнитное при последующем нагреве. Следует отметить, что для данного образца достаточно трудно выделить конкретную температуру фазового перехода, так как частицы разного размера переходят в ферромагнитное состояние при разных температурах [17,18]. Исходя из результатов намагниченности, измеренных в поле 100 Э, следует, что при 400 К образец преимущественно находится в суперпарамагнитном состоянии. Значение температуры Кюри (под термином температура Кюри в данном случае имеется ввиду не истинная температура Кюри в отсутствии магнитного поля, а измеренная в поле 100 Э) для наночастиц согласуется с данными для объемных сплавов. Наличие слоя оксида железа на поверхности частиц является одной из причин уменьшения их намагниченности насыщения по сравнению с объемными сплавами.

Для дополнительного изучения фазового состава и магнитных свойств наночастиц композита FeRh@FeO были проведены Мёссбауэровские исследования на ядрах ^{57}Fe (при температурах 300 К и 80 К). В обоих случаях спектры демонстрируют сложную сверхтонкую структуру, которая характеризуется совокупностью нескольких хорошо разрешённых резонансных линий с различными интенсивностями. Для расшифровки обоих спектров наночастиц композита

FeRh@FeO использовалась совокупность квадрупольного дублета, синглета и релаксационного секстета в модели многоуровневой суперпарамагнитной релаксации [19]. Одновременное наличие парциальных спектров атомов Fe в сплаве FeRh в виде релаксационного секстета и суперпарамагнитного синглета обусловлено широким распределением наночастиц FeRh@FeO по размерам от 6 до 16 нм. Релаксационный секстет соответствует частицам с большим размером, а суперпарамагнитный синглет относится к частицам меньших размеров. В общем случае вид релаксационного спектра при данной температуре зависит как от скорости релаксации R , так и от отношения энергии магнитной анизотропии к тепловой энергии (α'). Чем меньше размер частиц, тем меньше энергия магнитной анизотропии и больше скорость релаксации. Релаксационный секстет соответствует частицам с большими размерами, для которых время релаксации сравнимо с временем жизни ядра ^{57}Fe в возбужденном состоянии $\sim 10^{-7}$ с, а суперпарамагнитный синглет относится к частицам меньших размеров, для которых время релаксации меньше времени ларморовской прецессии $\sim 10^{-8}$ с спина ядра вокруг вектора сверхтонкого магнитного поля на ядре. С понижением температуры уменьшается число атомов железа в суперпарамагнитных частицах и соответственно увеличивается их число в частицах, находящихся в релаксационном состоянии судя по изменению соотношения интенсивностей парциальных спектров атомов Fe релаксационного секстета и суперпарамагнитного синглета. Применение модели многоуровневой суперпарамагнитной релаксации позволило оценить средние значения энергии магнитной анизотропии E_{ma} частиц, находящихся в релаксационном состоянии при 300 и 80 К: $(21.1 \pm 1.2) \cdot 10^{-21}$ Дж и $(6.9 \pm 0.7) \cdot 10^{-21}$ Дж. Оценка величины эффективной константы анизотропии для железо-родиевого ядра наночастиц совпала с проведенной оценкой этого параметра для объемных сплавов. Описанные результаты представлены в публикации [A4].

В конце диссертационной работы приводятся **основные результаты, заключение, список условных обозначений**, а также **список литературы**.

Основные результаты

1. Исследованы структурные, магнитные и калорических свойства объемных сплавов, тонких пленок и наночастиц сплава FeRh вблизи температуры

фазового перехода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние, определены характерные времена релаксации намагниченности при температурах вблизи фазового перехода первого рода. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в сплавах с большим количеством кристаллических дефектов преобладают процессы зарождения ферромагнитной фазы, что приводит к росту характерного времени релаксации. В общем случае было выделено два механизма, обуславливающие ограничение скорости роста ферромагнитной фазы: (i) переход кристаллической решетки из антиферромагнитной в ферромагнитную фазу сопровождается возникновением локальных механических напряжений, которые приводят к увеличению температуры фазового перехода, (ii) при переходе области сплава из антиферромагнитной фазы в ферромагнитную происходит локальное уменьшение температуры на величину магнитокалорического эффекта. В случае наночастиц релаксационные процессы намагниченности обусловлены суперпарамагнитным эффектом.

2. Проведена визуализация процессов фазообразования вблизи температуры фазового перехода при помощи магнитосиловой и Керровской микроскопии. Было установлено, что эволюция ферромагнитной фазы в процессе фазового перехода проходит в несколько этапов : (i) первичное зарождение ферромагнитных кластеров на поверхности сплава, которые локализуются вдали от границ с другими кристаллографическими фазами или в местах с незначительными закалочными напряжениями, (ii) зарождение и рост ферромагнитных кластеров на поверхности сплава, (iii) рост и объединение ферромагнитных кластеров на поверхности сплава, (iv) прораствание ферромагнитной фазы с поверхности в объем сплава, (v) уменьшение количества антиферромагнитных кластеров, локализованных вблизи кристаллических дефектов, при этом микромагнитное состояние ферромагнитной фазы в процессе ее роста изменяется от суперпарамагнитного через однодоменное до многодоменного. Размер ферромагнитных кластеров, которые находятся в однодоменном состоянии оценивается в 20 нм.
3. Разработана феноменологическая модель, описывающая в хорошей степени согласованности с экспериментальными данными температурные зависимости

намагниченности в процессе фазового перехода первого рода из антиферромагнитного в ферромагнитное состояние с учетом конечной скорости нагрева. Анализ данных показал, что модель применима для изотропных материалов, в которых можно пренебречь процессами взаимодействия отдельных ферромагнитных кластеров.

4. Разработана феноменологическая модель, качественно воспроизводящая основные особенности временных зависимостей намагниченности сплава FeRh при фиксированных внешних условиях вблизи температуры фазового перехода первого рода. Из полученных результатов следует, что при увеличении температуры начинают доминировать процессы роста ферромагнитной фазы.
5. Проведено сопоставление результатов численных оценок с результатами экспериментальных исследований поведения намагниченности вблизи температуры фазового перехода первого рода сплавов FeRh. Из анализа полученных данных было определено, что для корректной интерпретации экспериментальных данных необходимо учитывать релаксацию механических напряжений внутри кристаллической решетки, магнитные взаимодействия между ферромагнитными кластерами и между кластерами и антиферромагнитной матрицей.
6. Определены особенности роста ферромагнитной фазы и изменения ее микромагнитной структуры, возникающие в процессе фазового перехода в тонких пленках. Микромагнитная структура ферромагнитных кластеров в тонких пленках имеет меньшее количество доменов в случае инициирования магнитного фазового перехода внешним магнитным полем по сравнению с температурным воздействием.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

- A1. Aleksei S Komlev, Dmitriy Y Karpenkov, Dmitry A Kiselev, Tatiana S Pina, Alisa Chirkova, Radel R Gimaev, Takamasa Usami, Tomoyasu Taniyama, Vladimir I Zverev, Nikolai S Perov, Ferromagnetic phase nucleation and its growth evolution in FeRh thin

films / Journal of Alloys and Compounds. — 2021. — Vol. 874. — P. 159924. (SJQ Q1 IF: **6.2** , DOI: 10.1016/j.jallcom.2021.159924);

A2. А. С. Комлев, Р. А. Макарьин, Р. Р. Гимаев, В. И. Зверев, Магнитотепловые свойства тяжелых редкоземельных металлов и сплавов на основе Fe–Rh / Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2022. — № 5. — С. 1–22. (SJQ Q3 IF: **0.536** , DOI: 10.3103/S0027134922050083);

A3. Aleksei S. Komlev, Rodion A Makarin, Viktoria E Maltseva, Vladimir I Zverev, Alexey S Volegov, Nikolai S Perov ,Magnetoresistance features at the magnetic field-induced phase transition in ferh thin films / JOURNAL OF MATHEMATICAL AND FUNDAMENTAL SCIENCES. — 2023. — Vol. 55, no. 1. — P. 16–28. (SJQ Q3 IF: **0.58** , DOI: 10.5614/j.math.fund.sci.2023.55.1.2);

A4. A.S. Komlev, E. A. Koroleva, I. D. Shabalkin, V.S. Rusakov, D.I. Komleva, T. Yu. Kiseleva, A. Yu. Degtyarenko, V.I. Zverev, R. Gimaev, E. Y. Gerasimov, N.S. Perov, P. V. Krivoschapkin, Temperature-induced mixed magnetic states in FeRh@FeO composite nanoparticles / Materials Chemistry and Physics. — 2024. — Vol. 314. — P. 128855. (SJQ Q1 IF: **4.9** , DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128855);

Иные публикации:

Препринты:

A5. A.S. Komlev, R.A. Makarin, T.S. Ilina, D.A. Kiselev, A.M. Chirkova, N.A. Kulesh, A.S. Volegov, V.I. Zverev, N.S. Perov, 3D time-resolved analysis of the evolution metamagnetic phase transition in FeRh system / Arxiv. — 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.15984>.

Тезисы докладов, опубликованные в рамках апробации результатов диссертации:

T1. А. С. Комлев, Н. С. Перов Особенности фазового перехода в тонких пленках FeRh // ТРУДЫ 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ. — Фундаментальная и прикладная физика. — МФТИ Москва Москва: 2020.

T2. А. С. Комлев, Р. А. Макарьин, Н. С. Перов Моделирование методом молекулярной динамики магнитного фазового перехода в сплаве FeRh //

Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании: спутник Международной научной конференции Уфимская осенняя математическая школа-2021. — 2021С. 34.

T3. А. С. Комлев Влияние геометрии FeRh систем на эволюцию фазового перехода // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2021. — Москва: ООО МАКС Пресс, 2021.

T4. A. S. Komlev, A. M. Chirkova, and N. S. Perov. The collective effect of the FeRh ferromagnetic phase growth during a metamagnetic phase transition. In IEEE Spanish Chapter - CEMAG, 5th Young Researchers in Magnetism, Spain, 2021. — P. 17–17.

T5. А. С. Комлев Механизмы роста ферромагнитной фазы в соединениях FeRh // Материалы Международного молодежного научного форума Ломоносов-2022. — Москва: ООО МАКС Пресс, 2022. — С. 530–530.

T6. A. S. Komlev, R. A. Makaryin, T. S. Ilina, D. A. Kiselev, V. I. Zverev, and N. S. Perov. The ferromagnetic phase growth mechanisms in FeRh alloys. // Book of Abstracts VIII Euro-Asian Symposium Trends in MAGnetism August 22–26, 2022, Kazan, Russia. — Vol. 1. — Kazan, Russia: 2022. — P. 508–509.

T7. N. S. Perov, A. S. Komlev, R. A. Makarin, D. Y. Karpenkov. Research approaches to the search for mechanisms of magnetic phase transition in FeRh -based alloys. // Booklet_ICMIA_2022 (program and book of abstracts). — Sebelas Maret University: 2022. — P. p.5–p.5.

T8. А. С. Комлев, В. И. Зверев, Н. С. Перов Релаксация намагниченности FeRh сплавов вблизи фазового перехода // Сборник трудов конференции НМММ-24. — 2021. — С. 509–512.

T9. А. С. Комлев, А. М. Чиркова, М. С. Селезнев, А. Р. Ващенко, А. С. Волегов, Н. А. Кулеш, Р. А. Макарьин, Н. С. Перов. Этапы роста ферромагнитной фазы при магнитном фазовом переходе первого рода на примере сплава FeRh// Сборник тезисов Дни калорики в Дагестане: функциональные материалы и их приложения. 27–31 мая 2023 года. г. Дербент, Дагестан, Россия. — Челябинский государственный университет Челябинск: 2023. — С. 60–62.

T10. A. S. Komlev, R. A. Makarin, M. S. Seleznev, A. R. Vashchenkova, T. S. Ilina, A. M. Chirkova, N. A. Kulesh, A. S.4. Volegov, D. A. Kiselev, and N. S. Perov. The metamagnetic phase transition evolution in FeRh system // Book of abstracts of Samarkand International Symposium on Magnetism (SISM-2023). 2 – 6 July 2023, Samarkand, Uzbekistan. — Samarkand: 2023. — P. 34–34.

Список цитируемой литературы

1. I.S. Gavrikov, D.Y. Karpenkov, M.V. Zheleznyi, A.V. Kamynin, E.S. Khotulev, A.I. Bazlov. Effect of Ni doping on stabilization of Sm (Co_{1-x}Fe_x)₅ compound: thermodynamic calculation and experiment // Journal of Physics: Condensed Matter. IOP Publishing. — 2020. — Vol. 32. — P. 425803.
2. T. Gottschall, K.P. Skokov, M. Fries, A. Taubel, I. Radulov, F. Scheibel, D. Benke, S. Riegg, O. Gutfleisch, Making a Cool Choice: The Materials Library of Magnetic Refrigeration // Advanced Energy Materials. — 2019. — Vol. 9. — P. 1901322. <https://doi.org/10.1002/aenm.201901322>.
3. X. Wang, K. Gao, H. Zhou, A. Itagi, M. Seigler, E. Gage, HAMR recording limitations and extendibility // IEEE Transactions on Magnetics. — 2013. — Vol. 49. — P. 686–692.
4. D. Dzekan, A. Waske, K. Nielsch, S. Fähler, Efficient and affordable thermomagnetic materials for harvesting low grade waste heat // APL Materials. — 2021. — Vol. 9. — P. 011105. <https://doi.org/10.1063/5.0033970>.
5. R.A. Makarin, M.V. Zheleznyi, D.Y. Karpenkov, Generalized model of the magnetostructural phase transition in La(Fe, Si)₁₃ compounds under the simultaneous action of temperature, magnetic field and pressure // Челябинский Физико-Математический Журнал. — 2023. — Vol. 8. — P. 280–291.
6. D.S. Rodbell, C.P. Bean, Some Magnetic First-Order Transitions // Journal of Applied Physics. — 1962. — Vol. 33. — P. 1037–1041. <https://doi.org/10.1063/1.1728593>.
7. Мушников Н.В. Магнетизм и магнитные фазовые переходы: учебное пособие. Издательство Уральского университета, 2017.
8. J.R. Massey, R.C. Temple, T.P. Almeida, R. Lamb, N.A. Peters, R.P. Campion, R. Fan, D. McGrouther, S. McVitie, P. Steadman, C.H. Marrows, Asymmetric magnetic relaxation behavior of domains and domain walls observed through the FeRh first-order

- metamagnetic phase transition // *Phys. Rev. B.* — 2020. — Vol. 102. — P. 144304.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.144304>.
9. Т.Ю. Киселева, А.С. Комлев, Г.П. Марков, В.Э. Павлов, Метод FORC: теоретические основы и практическое применение для исследования магнитных композитов природного и искусственного происхождения, ИФЗ РАН, Москва, 2022.
 10. R. Costa, E. Lovell, R. Almeida, R. Pinto, L.F. Cohen, A.M. Pereira, J.P. Araujo, J.H. Belo, Landau theory-based relaxational modelling of first-order magnetic transition dynamics in magnetocaloric materials // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2023. — Vol. 1.
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/acbe4e>.
 11. Ashcroft N.W., Mermin N.D. *Solid state physics*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
 12. A. Chirkova, F. Bittner, K. Nenkov, N.V. Baranov, L. Schultz, K. Nielsch, T.G. Woodcock, The effect of the microstructure on the antiferromagnetic to ferromagnetic transition in FeRh alloys // *Acta Materialia*. — 2017. — Vol. 131. — P. 31–38.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.04.005>.
 13. A.S. Komlev, R.A. Makarin, K.P. Skokov, A.M. Chirkova, R.R. Gimaev, V.I. Zverev, N.V. Baranov, N.S. Perov. Tuning Magnetocaloric Effect in Ternary FeRh-Based Alloys by Slight Doping // *Metall Mater Trans A*. — 2023. — Vol. 54. — P. 3683–3690. <https://doi.org/10.1007/s11661-023-07138-1>.
 14. H. Kumar, D.R. Cornejo, S.L. Morelhao, S. Kycia, I.M. Montellano, N.R. Alvarez, G. Alejandro, A. Butera, Strain effects on the magnetic order of epitaxial FeRh thin films // *Journal of Applied Physics*. — 2018. — Vol. 124. — P. 085306.
 15. T.P. Almeida, D. McGrouther, R. Temple, J. Massey, Y. Li, T. Moore, C.H. Marrows, S. McVitie, Direct visualization of the magnetostructural phase transition in nanoscale FeRh thin films using differential phase contrast imaging // *Phys. Rev. Materials*. — 2020. — Vol. 4. — P. 034410. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.034410>.
 16. M. Grimes, N. Gurung, H. Ueda, D.G. Porter, B. Pedrini, L.J. Heyderman, T. Thomson, V. Scagnoli, X-ray investigation of long-range antiferromagnetic ordering in FeRh // *AIP Advances*. — 2022. — Vol. 12. — P. 035048. <https://doi.org/10.1063/9.0000320>.
 17. A. Biswas, S. Gupta, D. Clifford, Y. Mudryk, R. Hadimani, R. Barua, V.K. Pecharsky, Bulk-like first-order magnetoelastic transition in FeRh particles // *Journal of Alloys*

- and Compounds. — 2022. — Vol. 921. — P. 165993.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165993>.
18. X. Ye, N. Fortunato, A. Sarkar, H. Geßwein, D. Wang, X. Chen, B. Eggert, H. Wende, R.A. Brand, H. Zhang, H. Hahn, R. Kruk, Creating a Ferromagnetic Ground State with Tc Above Room Temperature in a Paramagnetic Alloy through Non-Equilibrium Nanostructuring // *Advanced Materials*. — 2022. — Vol. 34. — P. 2108793.
<https://doi.org/10.1002/adma.202108793>.
19. D.H. Jones, K.K.P. Srivastava, Many-state relaxation model for the Mossbauer spectra of superparamagnets // *Phys. Rev. B*. — 1986. — Vol. 34. — P. 7542–7548.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.34.7542>.