

Отзыв официального оппонента Харина Евгения Васильевича на диссертацию **Комлева Алексея Степановича** на тему "Релаксация намагниченности в объектах различной размерности на основе сплава FeRh" по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Актуальность темы диссертации Комлева А.С. связана с целым рядом причин, имеющих как прикладное, так и научное значение. Прикладное, техническое значение магнитных фазовых переходов является бесспорно важным для применения магнитокалорического эффекта в холодильной технике, колоссального магнитосопротивления и топологического эффекта Холла в спинтронике. Научное значение этой проблемы связано с недостаточной детальностью экспериментальных данных и в целом вытекает из нерешённости задач по разработке моделей, описывающих фазовые переходы. Поэтому поставленная в диссертации цель работы – 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 – является одним из важных путей решения вышеуказанной научной проблемы. Задачи исследования, поставленные и решённые в диссертационной работе, показали, что эта цель может быть успешно выполнена.

Основная идея диссертации Комлева А.С. заключается в изучении фазового перехода ферромагнетик-антиферромагнетик  $\alpha' \leftrightarrow \alpha''$ , сопровождающегося изменением параметра кристаллической решётки упорядоченного твёрдого раствора  $\alpha'$  в сплаве FeRh вблизи эквиатомного состава, при изменении температуры. Оригинальность подхода автора к проработке этой идеи охватывает широкий диапазон структур сплава: массивные однофазный сплав Fe<sub>50</sub>Rh<sub>50</sub> и двухфазные сплавы Fe<sub>49</sub>Rh<sub>51</sub> с

различным содержанием объемной доли парамагнитной  $\gamma$ -фазы (5 и 35%), плёнка  $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$  толщиной 56 нм на подложке MgO и наночастицы  $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$  размером 10 нм. Наглядно показаны стадии фазового перехода на поверхности сплава с помощью магнитно-силовой микроскопии. Даны количественные параметры фазового перехода и проанализированы физические модели этого процесса. Проведены структурные измерения параметров ферромагнитной и антиферромагнитной фаз.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных результатов, заключения, списка условных обозначений, списка литературы и благодарностей; включает 123 страницы текста, 33 рисунка, 27 формул и 3 таблицы. Список литературы содержит 124 наименования.

Первая глава носит обзорный характер. Обзор достаточно полный, особо следует отметить тщательность описания применений магнитных фазовых переходов. Во второй главе описаны объекты и методы исследования. В третьей главе приведены результаты измерений структурных параметров и магнитных свойств в процессе магнитного фазового перехода. Четвёртая глава посвящена микромагнитной структуре плёнок в процессе магнитного фазового перехода. Пятая глава описывает наночастицы в процессе магнитного фазового перехода. Наглядно продемонстрировано влияние структуры сплава на параметры магнитного фазового перехода.

Наиболее значимыми результатами диссертации являются следующие положения:

1. Рост ферромагнитной фазы в процессе фазового перехода антиферромагнетик $\rightarrow$ ферромагнетик в сплаве FeRh осуществляется в несколько последовательных этапов, причем зарождение ферромагнитных кластеров происходит на поверхности образца и вдали от границ с другими кристаллографическими фазами.

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 антиферромагнетик $\rightarrow$ ферромагнетик.

3. Рост ферромагнитной фазы и изменение её 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.

Новыми научными результатами, полученными автором, являются следующие положения:

1. 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.

2. 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 антиферромагнетик→ферромагнетик.

3. Путём всестороннего анализа магнитных свойств наночастиц FeRh размером менее 20 нм в широком диапазоне температур был сделан вывод о причинах формирования ферромагнитного упорядочения при температурах жидкого азота.

Достоверность полученных результатов подтверждается проведением представленных в работе экспериментальных исследований с использованием современных и апробированных методик. Результаты, представленные в диссертации, не противоречат экспериментальным и теоретическим данным других исследователей, опубликованным в открытой печати.

К сути сделанных в работе выводов замечаний у оппонента нет. Однако работа не свободна от недостатков:

1. На равновесной диаграмме Fe-Rh вблизи эквиатного состава парамагнитная  $\gamma$ -фаза существует при температуре выше 1300°C. Исследованные в работе сплавы были отожжены в течение 72 часов при 1000°C, однако содержание  $\gamma$ -фазы в них достигает 35%. Почему отжиг не привёл к нормализации закалённого состояния?

2. В подразделе 3.4 (а также в Основных результатах) при обсуждении результатов магнитно-силовой микроскопии сказано, что ферромагнитная фаза зарождается в местах с незначительными закалочными напряжениями. Как было измерено распределение закалочных напряжений по поверхности образца?

3. Из фазовой диаграммы «Давление-Температура» для экваторного сплава FeRh хорошо известно, что с ростом давления увеличивается температура фазового перехода антиферромагнетик→ферромагнетик. На этом основан анализ результатов, представленных на рис. 14 диссертации, показывающих, что с увеличением остаточных напряжений (за счёт увеличения доли  $\gamma$ -фазы либо за счёт возникновения сжимающих напряжений, которые всегда существуют в плёнках после осаждения) увеличивается температура фазового перехода. Однако это не объясняет результат для однофазного массивного образца FeRh на рис. 14: почему в нём самая высокая температура фазового перехода?

4. В 3 главе для определения эффективной магнитной анизотропии  $K_{eff}$  кристаллитов был использован закон приближения намагниченности к насыщению в форме закона Акулова. Однако хорошо известно, что поле в несколько кЭ (рис. 16 диссертации) может быть недостаточным для наблюдения закона Акулова в виде  $M \sim H^2$  в нанокристаллических сплавах (в данном случае величина  $K_{eff}$  в таблице 2 для плёнки FeRh косвенно это подтверждает). Была ли проверена применимость закона Акулова (линеаризация) с помощью перестроения кривых намагничивания в координатах  $M - H^2$  (Э<sup>2</sup>)?

5. В 5 главе на рис. 32 приведены петли гистерезиса наночастиц FeRh. Как был учтён размагничивающий коэффициент частиц?

Указанные недостатки не носят принципиального характера и не затрагивают основного содержания диссертационной работы.

По теме диссертации автором опубликовано 15 работ, из них 4 – в рецензируемых изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, в которых материалы диссертации отражены достаточно полно.

Результаты диссертации многократно докладывались на российских и международных конференциях и хорошо известны специалистам.

Автореферат и публикации автора точно и полностью отражают

полученные в диссертационной работе результаты.

Общее заключение по диссертации:

Диссертационная работа отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям №5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Соискатель Комлев Алексей Степанович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений».

Старший научный сотрудник лаборатории конструкционных сталей и сплавов им. акад. Н.Т. Гудцова

ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

канд. техн. наук

Харин Евгений Васильевич

05.06.2024

119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Телефон +7(499)135-96-63

Адрес электронной почты ekharin@imet.ac.ru

Подпись Е.В. Харина удостоверяю

Учёный секретарь ИМЕТ РАН, канд. техн. наук



О.Н. Фомина