

ОТЗЫВ

официального оппонента

Алиева Ахмеда Магомедовича на диссертационную работу Аникина Максима Сергеевича «Магнитные и магнитокалорические свойства квазибинарных соединений с тяжелыми РЗМ типа RT_2 ($T = Fe, Co, Ni$)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Актуальность темы: Диссертационная работа Аникина Максима Сергеевича «Магнитные и магнитокалорические свойства квазибинарных соединений с тяжелыми РЗМ типа RT_2 ($T = Fe, Co, Ni$)» посвящена определению причин возникновения уширенных пиков магнитного вклада в теплоемкость и магнитокалорического эффекта в соединениях типа $R(T_{1-x}Fe_x)_2$, и установлению зависимости этих свойств от концентрации железа (x) и атомного номера редкоземельного элемента – R . В работе исследованы кристаллическая структура, магнитные свойства, высокополевая восприимчивость, теплоемкость и магнитокалорические свойства (адиабатическое изменение температуры и изотермическое изменение энтропии) соединений $R(Co-Fe)_2$, где $R = Gd, Dy, Ho, Er, Gd(Ni-Fe)_2$ и $Gd(Ni-Co)_2$. Адиабатическое изменение температуры (ΔT_{ad}) измеряется прямым методом, а также рассчитывается на основе термодинамических соотношений из данных по намагниченности и теплоемкости. Из полученных результатов установлены зависимости структурных параметров, особенностей магнитных и магнитотепловых свойств от концентрации железа (x) и атомного номера редкоземельного элемента в исследованных соединениях.

Для создания холодильных машин, работающих в широкой области температур, необходимы материалы, обладающие значительной величиной магнитокалорического в широкой области температур. Одним из способов получения таких магнитокалорических материалов является создание композитов из нескольких материалов, с относительно близкими значениями МКЭ и температур максимума эффекта. Конструктивно холодильные машины будут значительно проще, если в качестве рабочего материала будут использоваться однофазные материалы, а не композиты. Именно этим можно объяснить большой интерес к исследованию соединений, изученных в данной диссертационной работе, так как на родственных квазибинарных соединениях $R(T-Fe)_2$, где $T = Al, Co, Ni$, ранее был обнаружен МКЭ платообразной формы, наблюдаемый в широкой области

температур. Для создания более эффективных и дешевых магнитокалорических материалов необходимо установить механизм, приводящий к возникновению значительного МКЭ в широкой области температур. Таким образом, поставленные в диссертационной работе задачи являются одними из важнейших в области изучения магнитокалорического эффекта как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. **Во введении** описана актуальность работы, сформулирована цель работы и задачи, положения, выносимые на защиту и апробация работы. **Первая глава** посвящена обзору литературы по МКЭ и соединениям со структурой фаз Лавеса. В ней кратко описана термодинамика магнитокалорического эффекта и критерии, по которым можно оценить их перспективу как рабочего материала магнитных холодильных устройств. Приведена информация по кристаллической структуре и магнитном упорядочении в соединениях типа RT_2 . **Во второй главе** описаны методики синтеза, аттестации и исследования магнитных и магнитотепловых свойств образцов. **В третьей главе** описаны результаты исследования кристаллической структуры, температуры Кюри, намагниченности и высокополевой восприимчивости соединений $R(\text{Co-Fe})_2$, по результатам которых обнаружено возникновение дополнительного пика на температурных зависимостях высокополевой восприимчивости. Представлены результаты исследования магнитной структуры образца $\text{Ho}(\text{Fe}_{0.12}\text{Co}_{0.88})_2$ нейтронографическим методом. **В четвертой главе** представлены результаты исследования температурных зависимостей теплоемкости и магнитокалорического эффекта соединений $R(\text{Co-Fe})_2$. По результатам которых было обнаружено наличие уширения пиков на температурных зависимостях МКЭ. Проведена оценка применимости соединений $R(\text{Co-Fe})_2$ как материалов для изготовления рабочих тел магнитных холодильных устройств, и предложены три состава для работы в МХМ по циклу Эриксона. **В пятой главе** описана кристаллическая структура, магнитные свойства, теплоемкость и МКЭ соединений $\text{Gd}(\text{Ni-T})_2$, где $T = \text{Fe}, \text{Co}$. Показано, что на соединениях с Ni особенности магнитных и магнитотепловых свойств аналогичны для $R(\text{Co-Fe})_2$. **В заключении** приведены обобщенные результаты и выводы по диссертационной работе. Даны рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

Полученные данные об кристаллической структуре и об особенностях магнитных свойств, высокополевой восприимчивости, теплоемкости и магнитокалорического эффекта соединений $R(\text{Co-Fe})_2$, где $R = \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}$ и $\text{Gd}(\text{Ni-Fe})_2$ имеют большую **научную значимость**.

На мой взгляд, наибольший интерес представляют следующие результаты работы, которые характеризуют ее научную значимость:

1. Обнаружение на температурных зависимостях изменения магнитной части энтропии – $\Delta S_m(T)$ и адиабатического изменения температуры (ΔT_{ad}) квазибинарных соединений с железом уширения максимумов магнитокалорического эффекта и появление дополнительного низкотемпературного максимума с ростом концентрации Fe. Установление разной природы МКЭ в области T_C и низкотемпературного максимума.

2. Выявление, что ширина температурного интервала полумаксимума МКЭ в соединениях $R(T_{1-x}Fe_x)_2$ увеличивается как с ростом величины внешнего магнитного поля, так и с ростом содержания железа (x). Увеличение атомного номера R- элемента при неизменном содержании железа (x), также расширяет интервал полумаксимума МКЭ.

3. Для всех исследованных соединений типа $R(T_{1-x}Fe_x)_2$ произведены расчеты хладоемкости – (q) и величины ΔT_{FWHM} . При этом обнаружено, что величины q и ΔT_{FWHM} некоторых превышают аналогичные параметры для металлического Gd, что позволяет их отнести к разряду перспективных магнитокалорических материалов.

4. Результаты нейтронографического исследования соединения $Ho(Co_{0.88}Fe_{0.12})_2$, которые показывают, что магнитный момент редкоземельной подрешетки с ростом температуры разупорядочивается быстрее чем 3d- подрешетка.

Достоверность полученных результатов обеспечивалась за счет аттестации образцов современными методами. Измерением структуры, магнитных и магнитотепловых свойств с использованием современных методик и оборудования. Согласованностью результатов измерений между собой и с литературными данными (при наличии последних).

Результаты диссертационной работы Аникина Максима Сергеевича кроме большой научной, имеют и **практическую значимость**. В работе произведен расчет хладоемкости всех синтезированных образцов, и показано, что хладоемкость некоторых из них превышает данный параметр металлического Gd. Эти результаты, особенно в части установления механизма уширения магнитокалорического эффекта, могут найти практическое применение.

По теме диссертационной работы Аикин Максим Сергеевич **опубликовал** 7 научных статей в зарубежных журналах, индексируемых в системах Scopus и Web of Science и входящих в перечень ВАК. **Апробирование** результатов работы не вызывает сомнения, основные результаты докладывались автором на многих международных и всероссийских конференциях и симпозиумах.

Данная диссертационная работа хорошо структурирована и логически связана между собой. Полученные результаты полностью соответствуют поставленной цели и задачам. Автореферат корректно отражает содержание и результаты работы.

По работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. На температурных зависимостях изменения магнитной части энтропии $\Delta S_m(T)$ квазибинарных соединений с железом обнаружено уширение максимумов $\Delta S_m(T)$ с ростом концентрации Fe, и появляется дополнительный низкотемпературный максимум. При этом автор утверждает, что полученные результаты указывают на разную природу МКЭ в области точки Кюри и в области низкотемпературного максимума. С учетом того, что в большинстве исследованных в работе составах наблюдаются фазовые переходы второго рода, проведение скейлингового анализа результатов МКЭ могло бы четче показать различие природы МКЭ в этих областях. Кроме того, такой анализ позволил бы установить температурные границы областей с разными механизмами МКЭ, зависимости этих границ от магнитного поля и химического состава исследуемых материалов.

2. Сравнение прямых измерений МКЭ и рассчитанных по приведенной в диссертации формуле (4.4.), стр. 76, показывает, что расчётные значения превышают результаты прямых измерений. Обычно для фазовых переходов второго рода прямые и косвенные оценки довольно хорошо совпадают. Значительные расхождения, наблюдаемые почти для всех приведенных в диссертации результатов, могут указывать на некоторые систематические ошибки при прямых измерениях или при расчёте. Кроме того, некорректным выглядит само сравнение: прямые измерения выполнены в поле 1.75 Тл, а расчетные данные приведены для поля 1.5 Тл.

3. Температуры Кюри исследованных образцов в диссертационной работе оценены несколькими способами. Непосредственно значения T_C в работе для каких-то расчетов не используются, но необходимо отметить, что определение T_C как точки максимумов МКЭ, или точки, выше которой МКЭ резко снижается, является некорректным.

4. Имеются некоторые замечания по оформлению диссертационной работы. В подписи к таблице 3.1. приведено 4 параметра, а в самой таблице – только два из них. Во многих случаях в подписях к рисункам указано, что приведены цветные рисунки, когда как на самом деле приведены черно- белые рисунки. Согласно тексту диссертации, список трудов автора составляет 6 статей, а согласно автореферату - 7. Указанные недочеты не носят принципиального характера и не снижают общий высокий научный уровень диссертационной работы М.С. Аникина.

Однако возникшие вопросы и сделанные замечания не снижают общей положительной оценки полученных в работе результатов и не влияют на высокий научный уровень диссертационной работы М.С. Аникина.

Считаю, что диссертационная работа Аникина Максима Сергеевича «Магнитные и магнитокалорические свойства квазибинарных соединений с тяжелыми РЗМ типа RT_2 ($T = Fe, Co, Ni$)» полностью удовлетворяет требования п.9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Аникин Максим Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией Физики низких температур и магнетизма ФГБУН «Институт физики им. Х.И. Амирханова» Дагестанского научного центра РАН, кандидат физико-математических наук

« 1 » июня 2018 г.

Алиев Ахмед Магомедович

Почтовый адрес: 367015, г. Махачкала, ул. Магомеда Ярагского, 94

Телефон: +7 98

E-mail: lowtemp@mail.ru

Подпись заведующего лабораторией, к.ф.-м.н. Алиева А.М заверяю:

Ученый секретарь ФГБУН «Институт физики им. Х.И. Амирханова»
Дагестанского научного центра РАН, к.ф.-м.н.



Ибаев Ж.Г.