

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Гамзатова Адлера Гудретдиновича

на диссертационную работу Кузнецова Александра Сергеевича на тему
«Магнитные фазовые переходы и магнитокалорический эффект в соединениях на основе
Dy и Mn в сильных магнитных полях»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности
1.3.12 – «Физика магнитных явлений»

Общая характеристика работы

Современное развитие физики твердого тела и материаловедения сопровождается активным поиском магнитных материалов с выраженными функциональными свойствами, что обусловлено перспективами их применения в технологии твердотельного магнитного охлаждения. В этой связи особый интерес представляет исследование рабочих тел, способных демонстрировать значительный магнитокалорический эффект в широком температурном диапазоне — от комнатных до низких или даже криогенных температур. Одним из возможных подходов является использование композитных систем, однако применение однофазных материалов представляется более предпочтительным ввиду простоты их синтеза и применения для установок магнитного охлаждения. Этим объясняется устойчивый интерес к соединениям с фазовыми переходами второго рода. Вместе с тем многочисленные исследования показывают, что материалы с фазовыми переходами первого рода, способны демонстрировать гигантские значения магнитокалорического эффекта вследствие одновременной перестройки магнитной и кристаллической подсистем, но основной проблемой в рамках циклического охлаждения являются необратимые потери на гистерезис вследствие структурной перестройки.

Изложенное выше обуславливает актуальность диссертационной работы Кузнецова А.С., посвященной решению важной научной задачи: экспериментальному исследованию магнитных фазовых переходов, структурных, магнитных и магнитокалорических свойств соединений на основе Dy и Mn в условиях сильных магнитных полей. Автором исследованы системы материалов с фазовыми переходами второго рода (DyNi_2 , DyAl_2) и фазовыми переходами первого рода (Mn_5Si_3 , $\text{Mn}_{1.75}\text{Cu}_{0.25}\text{Sb}$), представляющие интерес как с фундаментальной, так и прикладной составляющей их потенциального применения. В литературе сведения о прямых измерениях магнитокалорического эффекта для подобных материалов в области криогенных температур и сильных магнитных полей остаются ограниченными. В этой связи выполненное исследование восполняет пробел и обладает научной новизной.

Диссертация логически структурирована и включает введение, четыре главы, заключение и список литературы.

Краткое содержание работы.

Во введении аргументирована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследования, обозначены элементы научной новизны, практической значимости и основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер и содержит анализ современного состояния исследований в области магнитных и магнитоструктурных фазовых переходов. Рассмотрены термодинамические основы магнитокалорического эффекта, методы его прямого и косвенного определения, а также обобщены литературные данные по магнитным и структурным свойствам интерметаллидов $DyMe_2$, соединения Mn_5Si_3 и твердых растворов на основе Mn_2Sb . В завершение главы корректно обозначены нерешенные вопросы, определившие направления дальнейших исследований.

Во второй главе подробно описаны объекты исследования, методики синтеза и аттестации образцов, а также экспериментальные подходы к измерению магнитных и магнитокалорических свойств. Описана оригинальная экспериментальная методика прямого измерения магнитокалорического эффекта экстракционным способом и анализ влияния паразитных эффектов, включая токи Фуко.

Третья глава посвящена исследованию соединений $DyNi_2$ и $DyAl_2$. На основании температурных и полевых зависимостей намагниченности определены параметры магнитного упорядочения. Представлены результаты прямых измерений адиабатического изменения температуры (ΔT_{ad}) и изотермического выделения/поглощения тепла (ΔQ) в магнитных полях до 14 Тл. Проведен сравнительный анализ охлаждающей способности, что позволяет объективно оценить перспективность данных соединений как рабочих тел магнитных холодильных устройств. В завершении главы дается теоретическая интерпретация результатов магнитных и магнитокалорических свойств в рамках модели Иное-Шимизу для анализа магнитных фазовых переходов.

В четвертой главе изложены результаты по соединениям Mn_5Si_3 и $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$. По результатам измерений намагниченности, построены магнитные фазовые $\mu_0 H-T$ диаграммы, выявлены особенности метамагнитоструктурного фазового перехода и эффект кинетической блокировки антиферромагнитной фазы соединения $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$. Установлены критические поля существования промежуточной антиферромагнитной фазы в Mn_5Si_3 с неколлинеарной магнитной структурой и показан гистерезисный характер соответствующих фазовых превращений. Приведены данные знакопеременного магнитокалорического эффекта (ΔT_{ad}) в соединении Mn_5Si_3 и результаты циклических испытаний соединения $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$, имеющие практическую значимость. Проведен сравнительный анализ охлаждающей способности и сделаны выводы относительно потенциального применения материалов. В завершении главы, приводится теоретическая интерпретация результатов магнитных и магнитокалорических свойств в рамках модели Иное-Шимизу.

В заключении систематизированы основные выводы и обобщены результаты выполненной работы.

Научная новизна и достоверность результатов.

К числу наиболее значимых результатов, определяющих **научную новизну** диссертации, относятся:

- Проведены прямые измерения температурных зависимостей адиабатического изменения температуры $\Delta T_{ad}(T)$ и изотермического выделения/поглощения тепла $\Delta Q(T)$ в соединении $DyAl_2$, выполненные в области температур магнитного ФП в магнитных полях величиной до 14 Тл;

- Выполнены прямые измерения величины адиабатического изменения температуры ΔT_{ad} в соединениях Mn_5Si_3 и $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$ в области температур магнитных ФП в магнитных полях величиной до 10 Тл. Установлено, что величина ΔT_{ad} соединения Mn_5Si_3 претерпевает инверсию знака. Определена температура инверсии (T_{in});
- Выполнена теоретическая интерпретация экспериментальных кривых теплоемкости соединения Mn_5Si_3 в рамках линейной комбинации функций Зоммерфельда и Дебая. Определена температура Дебая (Θ_D) и коэффициент электронной теплоемкости (γ). Установлена доля вкладов электронной, фононной и магнитной подсистем в полную величину теплоемкости;
- Уточнены значения критических магнитных полей на магнитной фазовой $\mu_0 H, T$ – диаграмме соединения Mn_5Si_3 , при которых существует промежуточная антиферромагнитная фаза (АФ1') с неколлинеарной магнитной структурой. Установлено, что переход из АФ1' в некопланарную антиферромагнитную (АФ1) структуру сопровождается полевым гистерезисом;
- Исследована циклическая стабильность обратного МКЭ в соединении $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$ и установлена его частотная зависимость в магнитном поле величиной 5 Тл. Показано, что увеличение частоты включений с 0,20 до 0,25 Гц в области температур магнитного ФП приводит к повышению степени деградации эффекта на 10-14%.

Достоверность результатов работы обеспечивалась применением традиционных и современных методик, использованием высокочистых исходных металлов, воспроизводимостью экспериментальных данных и их согласованностью с известными литературными сведениями. Обработка и теоретическая интерпретация результатов выполнена с применением признанных физических и математических моделей.

Основные результаты работы докладывались на 11 профильных конференциях всероссийского и международного уровня. По результатам диссертации опубликовано 5 научных статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, а также входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК и индексируемых базой данных RSCI.

Практическая значимость результатов.

Практическая ценность диссертационного исследования определяется результатами прямых измерений магнитокалорических свойств соединений $DyAl_2$, $DyNi_2$, Mn_5Si_3 и $Mn_{1.75}Cu_{0.25}Sb$ в сильных магнитных полях. Эти результаты позволяют количественно оценивать рабочие характеристики материалов с фазовыми переходами первого и второго рода и использовать их при проектировании устройств магнитного охлаждения. Сменяемость знака магнитокалорического эффекта в Mn-содержащих соединениях, открывает возможности для управления магнитным состоянием в функциональных устройствах.

Содержание работы соответствует паспорту специальности 1.3.12 – «Физика магнитных явлений».

Замечания и рекомендации.

К работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В тексте диссертации встречаются ошибки, связанные с оформлением как текстового, так и графического материала. В разделе 1.2.3 нет единого стиля подписей к рис. 1.5. (стр. 29), они даны как на английском, так и на русском языках. Встречаются различия в оформлении десятичных чисел через точку или запятую, например «до 1.8 Тл» на стр. 90 и там же «от 0 до 1,8 Тл».
2. Во второй главе на стр. 69 приводится подраздел 2.4.5, посвящённый оценке потерь на вихревые токи в зависимости от скорости развертки магнитного поля. Действительно, это один из важных вопросов, требующих внимания при экспериментальных исследованиях влияния частоты (скорости развёртки магнитного поля) на величину МКЭ. Однако в подразделе 2.4.5 с помощью формулы 2.11 проведены оценки потерь на вихревые токи ΔQ_e для меди, и по этим результатам очень сложно сделать выводы относительно рассматриваемых в диссертационной работе магнитокалорических сплавов, для которых сопротивление на несколько порядков больше, чем для меди. Следовательно, и потери на вихревые токи для этих сплавов будут пренебрежимо малы.
3. На рис. 4.9. приведены экспериментальные и рассчитанная на основании уравнения (2.6) температурные зависимости энтропии магнитного вклада $S_{\text{mag}}(T)$ для Mn_5Si_3 . Видно, что величина $S_{\text{mag}}(T)$ полученная из экспериментальных данных теплоемкости несколько выше, чем теоретический предел $14,3 \text{ Дж (моль К)}^{-1}$. Как правило для большинства магнитных материалов значения $S_{\text{mag}}(T)$ полученные из экспериментальных данных бывают заметно ниже, чем теоретический предел. С чем это может быть связано? К примеру для сплава DyNi_2 (Рис. 3.6, стр. 80), наблюдается хорошее согласие с общей тенденцией данных из литературы для магнитных материалов, т.е. $S_{\text{теор}} > S_{\text{эксп}}$.
4. На рис. 4.26 (стр. 134) для сплава $\text{Mn}_{1,75}\text{Cu}_{0,25}\text{Sb}$ показана заметная деградация величины адиабатического изменения температуры $|\Delta T_{\text{ад}}|$ при двух температурах 68 и 76 К при циклическом приложении магнитного поля 5 Тл. Кроме того, получена сильная зависимость степени деградации от частоты 0,2 и 0,25 Гц. Данный результат скорее всего связан с методическими недоработками эксперимента. Возможно, это связано с дрейфом температуры при циклическом приложении поля (не соответствии температуры образца с общей температурой ячейки). Как в эксперименте контролируется температура образца? Контролируется непосредственно температура образца или контролируется температура ячейки?

Представленные вопросы и замечания не снижают общей положительной оценки выполненного исследования как актуальной научной работы. Автореферат диссертации соответствует требованиям пункта 25 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», его содержание полностью отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа А.С. Кузнецова представляет собой завершённое научное исследование, выполненное на высоком экспериментальном и методическом уровне. Полученные результаты обладают научной новизной и практической значимостью, а содержание диссертации полностью соответствует требованиям пп. 9-11, 13-14 Постановления Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г (в текущей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Считаю, что автор работы Кузнецов А.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 — «Физика магнитных явлений».

Официальный оппонент,

кандидат физико-математических наук (специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»), ведущий научный сотрудник Института физики им. Х.И. Амирханова - обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Дагестанского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

«21» 02 2026 г. *Гамзатов* Гамзатов Адлер Гудретдинович

Контактная информация:

Институт физики им. Х.И. Амирханова – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Дагестанский федеральный исследовательский центр РАН»

Адрес: 367003, Россия, г. Махачкала, ул. М. Ярагского, 94.

Телефон: +7 (968) 695-00-20

e-mail: gamzatov_adler@mail.ru

Я, Гамзатов Адлер Гудретдинович, даю согласие на включение своих персональных данных, содержащихся в настоящем отзыве, в документы, связанные с защитой диссертации Кузнецова Александра Сергеевича, и их дальнейшую обработку.

Гамзатов Гамзатов Адлер Гудретдинович

Подпись Гамзатова А.Г. заверяю



Гамзатов А.Г.

Список основных публикаций (в области оппонируемой диссертации) за последние 5 лет в рецензируемых научных журналах

1. **Гамзатов А. Г.**, Кадырбардеев А. Т., Алиев Г. М., Абдуразаков Р. Р., Маркелова М. Н., Батдалов А. Б., Алиев А. М. Магнитотранспортные, теплофизические и магнитокалорические свойства манганита $\text{La}_{0.8}\text{Ag}_{0.1}\text{MnO}_3$ в магнитных полях до 8 Т //Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64. – №. 7. – С. 891-896.
 2. Aliev A. M., **Gamzatov A. G.** Magnetocaloric effect in manganites in alternating magnetic fields //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Т. 553. – С. 169300.
 3. **Gamzatov A. G.**, Batdalov A. B., Aliev A. M. Collapse of the inverse magnetocaloric effect in the $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{13}$ alloy in cyclic magnetic fields //Physics of Metals and Metallography. – 2024. – Т. 125. – №. 12. – С. 1303-1308.
 4. **Гамзатов А. Г.**, Батдалов А. Б., Хизриев Ш. К., Мухучев А. М., Алиев А. М., Камели, П. Теплоемкость, теплопроводность и магнитокалорический эффект в сплаве Гейслера $\text{Ni}_{47}\text{Mn}_{40}\text{Sn}_{13}$ //Физика твердого тела. – 2022. – Т. 64. – №. 12. – С. 2094-2099.
 5. **Gamzatov A. G.**, Aliev A. M., Yen P. D. H., Hau K. X., Kamaludinova K. E., Thanh T. D., Yu S. C. Magnetocaloric effect in $\text{La}_{0.2-x}\text{Pr}_x\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ manganites: Direct and indirect measurements // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2019. – Т. 474. – С. 477–481.
 6. **Gamzatov A. G.**, Khizriev S. K., Aliev A. M. Direct and inverse magnetocaloric effect in a $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{Al}_2\text{Sn}_{13}$ Heusler-alloy ribbon sample //Physics of Metals and Metallography. – 2022. – Т. 123. – №. 4. – С. 392-396.
- Aliev A. M., **Gamzatov A. G.**, Alisultanov Z. Z. Phase shift in AC magnetocaloric effect measurements as an indicator of the order of magnetic phase transitions //Physical Review B. – 2024. – Т. 110. – №. 6. – С. L060402.