

## ОТЗЫВ

официального оппонента Таскаева Сергея Валерьевича на диссертационную работу Чжан Виктории Борисовны «Исследование структуры и магнитокалорических свойств гадолиния, тербия, диспрозия после гидрирования и редкоземельных фаз Лавеса», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Функциональные материалы, обладающие особыми физическими свойствами, являются предметом постоянного интереса ведущих научных групп, в связи с огромным потенциалом применения в различных отраслях промышленности. Редкоземельные металлы (РЗМ) и интерметаллиды на их основе - один из наиболее интересных классов соединений, показывающих целый спектр физических эффектов, таких как магнитострикция, магнитокалорический эффект, магнитное упорядочение и пр. Так, даже чистый гадолиний имеет один из самых высоких показателей магнитокалорического эффекта среди всех известных соединений, а сплавы на его основе являются основными исходными материалами для изготовления магнитных теплообменников охлаждающих устройств, работающих на магнитокалорическом эффекте (магнитных холодильников). Магнитное охлаждение, основанное на явлении магнитокалорического эффекта, можно рассматривать как перспективную технологию, которая в ближайшее время сможет соперничать с широко распространенной технологией парокомпрессионных холодильников, по крайней мере, в определенных приложениях или нишах рынка, например, в технологиях по сжижению газов.

Особое внимание ученых привлекают и интерметаллические соединения типа  $RT_2$  ( $R$  – металлы редкоземельной группы,  $T = \text{Fe, Co}$ ) со структурой фаз Лавеса с высокими значениями магнитокалорического эффекта и магнитострикции. Простота кристаллической структуры делает эти объекты модельными для проверки описания физических свойств существующими современными моделями и теориями. Несмотря на

определенные успехи в этой области, важные аспекты в исследовании физических эффектов до сих пор не решены: не ясно, какие механизмы ответственны за их величину, температуру фазовых переходов, при которой они наблюдаются в сложных многокомпонентных сплавах. В литературе практически не уделяется внимание изучению взаимосвязи магнитострикционного и магнитокалорического эффектов, возникающих в области магнитного упорядочения в этих соединениях. Научные статьи, опубликованные в международной реферируемой научной печати, как правило, посвящены исследованию только одного из этих эффектов. Установление же связей и закономерностей между ними позволило бы прогнозировать эффективные функциональные материалы и дало бы возможность проведения целенаправленного поиска новых материалов как для магнитострикторов, так и для магнитных рефрижераторов, работающих в области заданных температур и обладающих оптимальными рабочими характеристиками.

В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы Чжан Виктории Борисовны, посвященная исследованию упомянутых выше объектов, явлений и эффектов, несомненно, является актуальной и интересной.

Диссертационная работа посвящена комплексному исследованию кристаллической и электронной структуры, фазовых переходов, тепловых и магнитных свойств гидрированных образцов гадолиния, тербия и диспрозия, а также многокомпонентных сплавов со структурой фаз Лавеса ( $RR'R''(Co,T)_2$   $R = Tb, Dy, Ho; T=Al, Fe$ ).

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, изложена на 145 страницах машинописного текста, включая 91 рисунок и 28 таблиц. Список цитированной литературы содержит 200 наименований.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, приведена общая характеристика работы, сформулированы цель и задачи работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена литературному обзору основных экспериментальных и теоретических работ, касающихся выбранных объектов исследования. Диссертантом проделана большая работа с целью обосновать и доказать важность настоящего диссертационного исследования. Подобранная и проанализированная литература выглядит достаточно убедительной, а цели и задачи ясно сформулированы.

Во второй главе диссертации приводится информация о способах синтеза образцов и их аттестации, а также описываются используемые в работе методики и экспериментальные установки.

Все оригинальные результаты, полученные автором, подробно изложены в главах с третьей по пятую.

В третьей главе представлены результаты исследования температурных и полевых зависимостей намагниченности, электросопротивления, магнитокалорического эффекта, полученного прямым и косвенным методом, как для исходных, так и гидрированных образцов Gd, Tb и Dy.

Проделанная большая экспериментальная работа по аттестации и исследованию свойств полученных образцов, сравнению результатов с известными литературными данными, особенно для рафинированных РЗМ.

Четвертая и пятая главы диссертации посвящены комплексному исследованию свойств многокомпонентных замещенных составов с общей формулой  $Tb_x(Dy_{0.5}Ho_{0.5})_{1-x}(Co,T)_2$  ( $T=Fe,Al$ ), имеющих структуру типа фаз Лавеса. Представлены данные о структуре, тепловом расширении, теплоемкости, намагниченности, магнитострикции и магнитокалорического эффекта.

Среди большого экспериментально-теоретического материала хотелось бы отметить следующие результаты, дающие весьма важную и крайне полезную информацию для дальнейших исследований:

- найдена анизотропия магнитокалорического эффекта, характерная для рафинированного гадолиния и не наблюдающаяся в тербии и диспрозии;

- найдены составы, демонстрирующие значительный по величине магнитокалорический эффект в области фазовых переходов первого рода с достаточно слабым полевым и температурным гистерезисом, что важно для их практического использования;

- любые попытки повысить температуру Кюри в исследованных сплавах приводят, как правило, к снижению величины магнитокалорического эффекта. Одновременно с этим наблюдается и снижение магнитострикционного эффекта;

- проведен расчет из первых принципов электронной структуры некоторых исходных соединений типа  $(RR'R'')Co_2$ , а также соединений с замещениями в подрешетке кобальта  $(RR'R'')(Co,Al)_2$ . В последних фиксируется повышение плотности электронных состояний на уровне Ферми;

- установлено, что сплавы  $Tb_x(Dy_{0.5}Ho_{0.5})_{1-x}Co_2$  демонстрируют гигантскую магнитострикцию, индуцированную внешним магнитным полем. Экспериментально подтверждена зависимость величин объемной магнитострикции и магнитокалорического эффекта.

Обнаруженные в диссертационном исследовании особенности структуры и магнитокалорических свойств соединений со структурой фаз Лавеса будут способствовать дальнейшему прогрессу в данной области науки.

**Достоверность результатов** проведенных исследований обеспечивается проведенной на должном уровне аттестацией объектов исследования, использованием современного оборудования и сопоставлением полученных результатов с известными в литературе данными.

Результаты проделанной работы будут иметь **практическую ценность** при разработке устройств и датчиков работающих на магнитострикционном и магнитокалорическом эффектах.

По материалам диссертационной работы автором опубликовано 8 научных статей в ведущих рецензируемых российских и зарубежных журналах, рекомендованных ВАК. Результаты работы докладывались и обсуждались с ведущими специалистами, как на всероссийских, так и международных конференциях. Автореферат диссертации адекватно отражает содержание диссертационной работы.

По диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. На стр.13-14 констатируется, что магнитный материал, подходящий для применения в качестве рабочего тела должен иметь, в частности, высокие значения хладоемкости и эта величина важна для практического применения, однако это не совсем так. Действительно, с одной стороны этот параметр (Relative Cooling Power или связанный с ним Refrigeration Capacity) описывает сколько тепла может быть гипотетически передано в идеальном цикле охлаждения, однако на практике все гораздо сложнее. Передача тепла в системе с большим значением этих параметров, но малым значением магнитокалорического эффекта сталкивается с проблемой длительной температурной релаксации системы, что сводит на нет практическое применение таких материалов.

2. Для выполнения условия адиабатичности процесса при измерении магнитокалорического эффекта, изменение магнитного поля должно происходить достаточно быстро (в идеале - мгновенно). Возможно ли считать выполненным это условие при указанных скоростях установления магнитного поля в электромагнитах, на которых измерялся магнитокалорический эффект прямым методом (MagEq MMS 901 ~ 3 сек, биттеровский магнит ~ 30 сек)?

3. Дифрактограмма дистиллированного гадолиния (стр. 66) содержит непроиндицированные пики (на углах близких к 30 и 45 градусам) по интенсивности превышающие интенсивность минимальных по величине, но

индицированных пиков (например, 202 или 104). Относятся ли они к гадолинию?

4. Результаты, полученные с помощью метода атомно-силовой микроскопии являются (по сути) констатирующими и не содержат какого-либо анализа или выводов, непосредственно связанных с темой исследования.

5. Автором были рассчитаны температурные зависимости коэффициентов разложения  $a(T)$ ,  $b(T)$ ,  $c(T)$  полинома Гинзбурга-Ландау (1.20), основываясь на экспериментальных данных, однако не приводится описание методики этого расчета. Описание этого подхода, на мой взгляд, было бы полезно привести в диссертации.

6. Стр. 102, рис. 4.17. При увеличении концентрации тербия более 0.5 величина магнитокалорического эффекта в сплавах  $Tb_x(Dy_{0.5}Ho_{0.5})_{1-x}Co_2$  перестает изменяться. Какова возможная причина такого поведения?

7. К сожалению, текст диссертации содержит множественные стилистические и технические опечатки, а также отклонения от общепринятого оформления результатов (в частности, в обозначении функций, переменных, формул и т.д.), которые являются результатом недостаточно внимательной подготовки материала.

Высказанные замечания не снижают научной ценности диссертационной работы и не влияют на общее положительное впечатление. Диссертационная работа Чжан В.Б. заслуживает высокой положительной оценки, поскольку она выполнена на профессиональном уровне и является законченной научно-исследовательской работой. Диссертация по содержанию, предмету, целям и результатам исследований полностью соответствует избранной специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Чжан Виктории Борисовны «Исследование структуры и магнитокалорических свойств гадолия, тербия, диспрозия после гидрирования и редкоземельных фаз Лавеса» полностью удовлетворяет требованиям п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Чжан В.Б. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07. – Физика конденсированного состояния.

Декан физического факультета,  
профессор кафедры физики  
конденсированного состояния,  
доктор физико-математических наук

С.В. Таскаев

«16» мая 2017 г.

Подпись С.В. Таскаева заверяю.

/Начальник отдела кадров.



**О. В. ЖЕЛТЫШЕВА**  
ЗАМ. НАЧАЛЬНИКА  
ОТДЕЛА КАДРОВ

Адрес: 454001, УрФО, Челябинская обл., г. Челябинск, ул. Братьев  
Кашириных, д. 129

Телефон: +7-919-314-0000

e-mail: [tsv@csu.ru](mailto:tsv@csu.ru)