

## ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Ваулина Артёма Александровича

«Несоизмеримые магнитные структуры и ближний магнитный порядок в редкоземельных интерметаллидах  $\text{Ho}_3\text{Co}$ ,  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  и  $R_5\text{Pd}_2$  ( $R = \text{Ho}, \text{Er}$ )», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 - Физика магнитных явлений

Изучение магнитных фазовых переходов и их влияния на поведение магнитных, электрических и тепловых свойств редкоземельных интерметаллидов на основе  $4f$ - и  $3d(4d)$ -металлов представляет значительный интерес для современной физики магнитных явлений. Конкуренция косвенных обменных взаимодействий, эффектов кристаллического поля и тепловых флуктуаций приводит к возникновению в бинарных редкоземельных интерметаллидах типа  $R_nT_m$  ( $R$ -редкоземельный элемент,  $T$ -атом переходного металла  $n : m > 2$ ) сложных магнитных фазовых диаграмм, пространственно-неоднородных магнитных состояний и несоизмеримых магнитных структур в области низких температур. В связи с этим диссертационная работа А.А. Ваулина, посвящена установлению роли несоизмеримых магнитных фаз в аномальном поведении магнитных, тепловых и электрических свойств редкоземельных интерметаллидов  $\text{Ho}_3\text{Co}$ ,  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  и  $R_5\text{Pd}_2$  ( $R = \text{Ho}, \text{Er}$ ), представляет существенный научный интерес, а актуальность проведенных исследований не вызывает сомнения.

Диссертационная работа Ваулина А.А. состоит из введения, шести глав, заключения с основными результатами, списка использованных обозначений и сокращений, списка публикаций автора по теме диссертации, благодарностей и списка цитированной литературы.

Введение содержит обоснование актуальности выбранной темы, постановку цели и задачи исследования, сформулированную научную новизну и практическую значимость работы, перечисляет полученные новые результаты работы, а также излагает положения, выносимые на защиту. Указаны места апробации работы и достаточно подробно описан личный вклад автора.

В первой главе приведен литературный обзор по тематике диссертационной работы. Подробно представлены основные подходы к анализу и описанию несоизмеримых магнитных структур, отмечены ключевые особенности используемого в исследовании подхода магнитных суперпространственных групп и изложена информация о структурных, магнитных, тепловых и электрических свойствах редкоземельных интерметаллидов  $\text{Ho}_3\text{Co}$ ,  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  и  $R_5\text{Pd}_2$  ( $R = \text{Ho}, \text{Er}$ ).

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных методов синтеза и исследования кристаллической и магнитной структуры поликристаллических интерметаллидов, а также методов измерения температурных и полевых зависимостей магнитных, тепловых и электрических свойств. Уделено внимание описанию рентгеновских, синхротронных и нейтронных дифрактометров, а также основных программных пакетов и алгоритмов анализа дифракционных данных.

Третья глава посвящена исследованию несоизмеримой магнитной структуры и

магнитных свойств соединения  $\text{Ho}_3\text{Co}$ . Дано количественное описание несоизмеримой магнитной структуры ниже температуры Нееля  $T_N = 22$  К и описано её поведение в низкотемпературной области. Построены магнитные фазовые диаграммы соединения  $\text{Ho}_3\text{Co}$  и обнаружена магнитная фаза «спинового проскальзывания» при температурах ниже 11 К. Дано объяснение механизма возникновения слабой спонтанной намагниченности ниже температуры 11 К в рамках модели фазы «спинового проскальзывания».

В четвертой главе приведены результаты измерений магнитной восприимчивости в стационарных и переменных магнитных полях, а также нейтронной дифракции соединения  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$ . Дано полное количественное описание несоизмеримой магнитной структуры, возникающей ниже температуры Нееля  $T_N = 32$  К. Впервые установлено, что в соединении  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  в парамагнитной области существуют корреляции ближнего магнитного порядка, сохраняющиеся вплоть до температур, двукратно превышающих температуру Нееля  $T_N$ . Сделан вывод о том, что ближний магнитный порядок может быть причиной аномального поведения электросопротивления, наблюдавшегося другими авторами в  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  в широком интервале температур выше температуры Нееля.

Пятая глава посвящена исследованию влияния внешнего магнитного поля на магнитные, структурные и электрические свойства соединения  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$ . На основании магнитометрических измерений делается вывод о том, что в  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  при температуре замерзания  $T_f = 27$  К возникает магнитное состояние типа кластерного стекла. Показано, что пространственно-неоднородное антиферромагнитное состояние является ключевой причиной аномального поведения электросопротивления в области низких температур. По результатам нейтронографического исследования магнитного состояния  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  подтверждено отсутствие дальнего магнитного порядка вплоть до температуры  $T = 1.5$  К. Также показано, что приложение внешнего магнитного поля подавляет пространственно-неоднородное магнитное состояние в  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  и индуцируется ферромагнитное состояние с дальним магнитным порядком. Этот переход сопровождается структурным фазовым переходом из кубической кристаллической структуры с пространственной группой  $Fd-3m$  в ромбоэдрическую кристаллическую структуру с пространственной группой  $R-3m$ .

В шестой главе изложены оригинальные результаты исследования магнитных, тепловых и электрических свойств изоструктурных бинарных соединений  $\text{Er}_5\text{Pd}_2$  и  $\text{Lu}_5\text{Pd}_2$ . Обнаружено, что соединение  $\text{Er}_5\text{Pd}_2$  обладает рекордными значениями объемной теплоемкости в области низких температур  $T < 50$  К. Проведена оценка различных вкладов в теплоемкость и тепловое расширение соединения  $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ . Проведенный анализ позволил установить, что комбинация эффектов ближнего антиферромагнитного порядка и эффекта Шоттки приводят к рекордным значениям объемной теплоемкости в области температур ниже 50 К.

В целом диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне. Среди наиболее ярких результатов, полученных в ходе выполнения работы, можно отметить следующие:

1) проведено полное количественное описание низкотемпературных несоизмеримых магнитных фаз соединений  $\text{Ho}_3\text{Co}$  и  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  с использованием формализма магнитных суперпространственных групп;

2) доказано существование ближнего антиферромагнитного порядка в  $\text{Ho}_7\text{Rh}_3$  вплоть до температур, вдвое превышающих температуру Нееля;

3) подтверждено отсутствие дальнего магнитного порядка в соединении  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  и обнаружен магнитоструктурный фазовый переход при приложении внешнего магнитного поля в области низких температур в состояние с дальним ферромагнитным порядком и ромбоэдрической кристаллической структурой;

4) обнаружена большая объемная теплоемкость в области низких температур в соединении  $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ , проведен анализ различных вкладов в теплоемкость и установлен механизм возникновения большого магнитного вклада.

Достоверность полученных в диссертации положений и выводов гарантируется использованием апробированных экспериментальных методик и современного оборудования, прошедшего метрологическую аттестацию и процедуру калибровки на стандартных образцах. Для анализа экспериментальных данных использовались апробированные методы и подходы, реализованные в программных пакетах, широко применяющихся международным научным сообществом для решения подобных задач. Выбор моделей и подходов для описания свойств редкоземельных интерметаллидов видится полностью обоснованным и верифицированным.

Основные результаты и выводы по работе достаточно надежно обоснованы. Результаты исследований опубликованы в виде 5 печатных работ в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК и индексируемых базами данных «Web of Science» и «Scopus», и многократно докладывались на научных конференциях на российских и международных конференциях различного уровня.

Результаты, полученные в настоящей работе, имеют существенную практическую значимость. Так, обнаружение и объяснение высокой объемной теплоемкости в области низких температур в  $\text{Er}_5\text{Pd}_2$  открывает возможности для использования этого материала в криогенной технике.

Диссертационная работа написана четким научным языком, хорошо и качественно оформлена. Тем не менее, к работе имеются следующие замечания:

1) Рис. 1.23 не упоминается в тексте диссертации. Поскольку представленные в работе температурные зависимости электрического сопротивления  $\rho$   $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  и  $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$  (рис. 5.5 и 6.14, соответственно) отличаются от данных, опубликованных в работе [102], было бы целесообразным подробно описать электрические свойства этих соединений.

2) Как в случае  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$ , так и в случае  $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$ , поведение электрического сопротивления во внешних магнитных полях (восстановление металлического характера  $\rho$  в зависимости от температуры) отнесено к магнитной подсистеме. Несмотря на то, что оба соединения являются изоструктурными и обладают

магнитным состоянием типа кластерного стекла при низких температурах, соединение  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  демонстрирует дополнительную аномалию на температурной зависимости  $\rho$  при  $T \sim 10$  К (рис. 5.5). В работе не обсуждается, чем может быть обусловлена эта аномалия. Также в диссертационной работе не обсуждаются возможные причины отличия кривых  $\rho(T)$  измеренные для  $\text{Ho}_5\text{Pd}_2$  и  $\text{Er}_{4.8}\text{Pd}_2$  в нулевом магнитном поле (рис. 5.5 и 6.14) от данных, ранее опубликованных в работе [102].

Отмеченные замечания не носят принципиальный характер и не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку работы.

Диссертация Ваулина А.А. представляет собой цельное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Основные представленные к защите результаты являются новыми, актуальными и заслуживают общей положительной оценки работы. Материалы диссертации представляют интерес для исследователей, работающих в области физики магнитных явлений. Качественные и количественные результаты работы могут быть использованы при анализе новых магнитных явлений и новых перспективных магнитных материалов.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 2 «Положения о присуждении учёной степени», предъявленным к кандидатским диссертациям, а её автор Ваулин Артём Александрович безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

Профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

доктор физико-математических наук

Ховайло Владимир Васильевич

18 сентября 2023 г.

Почтовый адрес: 119049, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1

Тел.: +7(926)3743260

E-mail: khovaylo@misis.ru

ПОДПИСЬ  
Проректор по  
и общим вопросам  
НИТУ МИСИС

РЯЮ

М. Исаев

С отчётом о выполнении

27.09.2023 г.

Ваулин А.А.

Сведения об официальном оппоненте

1	ФИО (полностью)	Ховайло Владимир Васильевич
2	Дата рождения (полная)	06.08.1969
3	Гражданство	Российская Федерация
4	Ученая степень (с указанием шифра специальности научных работников, по которой защищена диссертация)	д.ф.-м.н. по специальности 01.04.11 Физика магнитных явлений
5	Ученое звание (по кафедре, специальности)	Доцент по кафедре
6	Место работы:	
	Почтовый индекс, адрес, web-сайт, электронный адрес организации	119049, г. Москва, Ленинский проспект 4, стр. 1; <a href="https://misis.ru">https://misis.ru</a> , <a href="mailto:kancela@misis.ru">kancela@misis.ru</a>
	Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
	Ведомственная принадлежность организации	Министерство образования и науки Российской Федерации
	Тип организации	Автономное учреждение
	Наименование подразделения	Кафедра функциональных наносистем и высокотемпературных материалов
	Должность	Профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов
7	Основные публикации в области диссертационного исследования:	
	<p>1. E.A. Yarygina, Ph.N. Klevets, O.A. Kosmachev, Yu.A. Fridman, Vladimir Khovaylo "Effect of an external magnetic field on the phase states and dynamic properties of the strongly anisotropic antiferromagnet" <i>Journal of Magnetism and Magnetic Materials</i> <b>565</b>, 170238 (2023); DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.170238</p> <p>2. Chunyue Dou, Xiaoguang Xu, Ke Yang, Chexin Li, Tanzhao Zhang, Zhiqiang Zhu, Xiaoyi Zhao, Kangkang Meng, Yong Wu, Jikun Chen, Ming Yang, V.V. Khovaylo, and Yong Jiang "Unconventional magnetoresistive behavior near magnetic compensation temperature in ferrimagnetic <math>Mn_{2.21}Ru_{0.86}Ga</math> films" <i>Applied Physics Letters</i> <b>121</b>, 182403 (2022); DOI: 10.1063/5.0123392</p> <p>3. A.P. Kamantsev, Yu.S. Koshkidko, S.V. Taskaev, V.V. Khovaylo, A.V. Koshelev, J. Cwik, V.G. Shavrov "Inverse magnetocaloric effect and kinetic arrest behavior in as-cast <math>Gd_2In</math> at cryogenic temperatures" <i>Journal of Superconductivity and Novel Magnetism</i> <b>35</b>, 2181–2186 (2022); DOI: 10.1007/s10948-022-06336-z</p> <p>4. Yu.S. Koshkid'ko, E.T. Dilmieva, A.P. Kamantsev, J. Cwik, K. Rogacki, A.V. Mashirov, V.V. Khovaylo, C. Salazar Mejia, M.A. Zagrebin, V.V. Sokolovskiy, V.D. Buchelnikov, P. Ari-Gur, P. Bhale, V.G. Shavrov, V.V. Koledov "Magnetocaloric effect and magnetic phase diagram of Ni-Mn-Ga Heusler alloy in steady and pulsed magnetic fields" <i>Journal of Alloys and Compounds</i> <b>904</b>, 164051 (2022); DOI: 10.1016/j.jallcom.2022.164051</p> <p>5. W. Liu, E. Bykov, S. Taskaev, M. Bogush, V. Khovaylo, N. Fortunato, A. Aubert, H. Zhang, T. Gottschall, J. Wosnitza, F. Scheibel, K. Skokov, O. Gutfleisch "A study on rare-earth Laves phases for magnetocaloric liquefaction of hydrogen" <i>Applied Materials Today</i> <b>29</b>,</p>	

	<p>101624 (2022); DOI: 10.1016/j.apmt.2022.101624</p> <p>6. E. Bykov, W. Liu, K. Skokov, F. Scheibel, O. Gutfleisch, S. Taskaev, V. Khovaylo, D. Plakhotskiy, C. Salazar Mejia, J. Wosnitza, T. Gottschall “Magnetocaloric effect in the Laves-phase <math>\text{Ho}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Al}_2</math> family in high magnetic fields” <i>Physical Review Materials</i> <b>5</b>, 095405 (2021); DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.5.095405</p> <p>7. E. Bykov, W. Liu, K. Skokov, F. Scheibel, O. Gutfleisch, S. Taskaev, V. Khovaylo, D. Plakhotskiy, C. Salazar Mejia, J. Wosnitza, T. Gottschall “Magnetocaloric effect in the Laves-phase <math>\text{Ho}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Al}_2</math> family in high magnetic fields” <i>Physical Review Materials</i> <b>5</b>, 095405 (2021); DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.5.095405</p> <p>8. V. Bhardwaj, A. Bhattacharya, S. Srivastava, V. Khovaylo, J. Sannigrahi, N. Banerjee, B. Mani, R. Chatterjee “Strain driven emergence of topological non-triviality in YPdBi thin films” <i>Scientific Reports</i> <b>11</b>, 7535 (2021); DOI: 10.1038/s41598-021-86936-2</p> <p>9. S.V. Taskaev, V.V. Khovaylo, M.N. Ulyanov, D.S. Bataev, A.A. Basharova, M.V. Kononova, D.V. Plakhotskiy, M.Yu. Bogush, D.A. Zherebtsov, “Magnetic and magnetocaloric properties of as-cast <math>\text{Gd}_2\text{In}</math>” <i>Letters on Materials</i> <b>11</b>, 104 (2021); DOI: 10.22226/2410-3535-2021-1-104-108</p> <p>10. S. Taskaev, V. Khovaylo, M. Ulyanov, D. Bataev, A. Basharova, M. Kononova, D. Plakhotskiy, M. Bogush, M. Gavrilova, D. Zherebtsov, Z. Hu, “Scaling magnetic and magnetocaloric properties of <math>\text{GdAl}_2</math> by Erbium substitution” <i>Chelyabinsk Physical and Mathematical Journal</i> <b>5</b>, 635 (2020); DOI: 10.47475/2500-0101-2020-15423</p>	
8	Контактный телефон	+7 926 374-32-60
9	Адрес электронной почты	khovaylo@misis.ru

  
 В.В.Ховайло  
22.06.2023

дата

