

## ОТЗЫВ

официального оппонента  
на диссертационную работу Паукова Михаила Алексеевича  
**«Магнитные и магнитотепловые свойства гидрированных материалов на  
основе редкоземельных металлов»**, представленную на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Активность в исследовании магнитных свойств и магнитных явлений в редкоземельных металлах, сплавах и соединениях на их основе с годами не только не снижается, а, наоборот, возрастает, поскольку выдающиеся свойства этих материалов превзойти очень сложно. Высокая исследовательская активность обусловлена несколькими объективными факторами. С одной стороны методики исследования структурных, магнитных, механических и других свойств материалов непрерывно совершенствуются благодаря прогрессу в науке и технике. С другой стороны область применения редкоземельных металлов и их сплавов, к примеру, с 3d – переходными металлами постоянно расширяется, охватывая все более новые отрасли производства. Меняются условия эксплуатации отдельных материалов. Возникает потребность не только в новых материалах, но и в совершенствовании уже известных и хорошо зарекомендовавших себя магнитных материалах. Среди последних всемирно известное соединение  $Nd_2Fe_{14}B$ , на основе которого в настоящее время получены постоянные магниты с энергетическим произведением до 60 МГс·Э. А также редкоземельный металл гадолиний, который сегодня является основным материалом для рабочих тел магнитных рефрижераторов и тепловых насосов. Особый интерес к этим и другим объектам на основе редкоземельных металлов приводит к тому, что научное сообщество проводит регулярные конференции, посвященные как прикладным, так и фундаментальным аспектам исследования, в том числе с применением самых новейших методик. Активно обсуждаются свойства материалов, подвергнутых различным обработкам (с целью воздействия на их структуру и свойства) изменение состава не только с помощью атомов замещения, но и атомов внедрения, таких как водород, азот, углерод и др. К сожалению, многие вопросы (фундаментальные и прикладные), связанные с изменением свойств материалов в результате гидрирования, остаются либо не изученными, либо изучались лишь фрагментарно.

В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы Паукова М.А., посвященная комплексному исследованию структуры, магнитных и магнитотепловых свойств гидрированных материалов на основе редкоземельных металлов, является несомненно актуальной.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка цитируемой литературы. Оригинальные результаты данной работы изложены в трех главах. Весь текст работы изложен на 115 страницах, включая 71 рисунок и 17 таблиц. Список литературы состоит из 122 наименований.

Во введении достаточно четко сформулированы цель исследования, решаемые в диссертационной работе задачи и основные научные результаты, которые выносятся на защиту.

Первая глава является литературным обзором по заявленной теме диссертации. Следует отметить, что обзор, содержащий основные результаты предшествующих исследований, получился достаточно полным и дает возможность понять и оценить новизну планируемых в работе исследований. Особое внимание уделяется особенностям кристаллической структуры того или иного объекта, а также расположению атомов легких элементов внедрения (водорода и азота) в пустотах кристаллической решетки, что крайне важно при анализе изменения свойств этих объектов. В данной главе представлено сравнительно исследование магнитных свойств исходных соединений и их гидридов с разным содержанием водорода. Для двух подрешеточных магнетиках продемонстрировано влияние гидрирование на свойства как подрешетки железа (в соединениях с немагнитными редкими землями), так и подрешетки редкоземельного металла. Дана исчерпывающая информация о магнитокалорическом эффекте и наиболее перспективных материалах, об магнитокалорической анизотропии и обменных взаимодействиях. В связи с развитием современной методики измерения намагниченности в сильных и сверхсильных магнитных полях, в работе даны не только полученные экспериментальные кривые для наиболее близких материалов, но и основные теоретические методы обработки этих кривых.

Во второй главе дано описание технологии приготовления исходных образцов, их аттестация различными методами, процедура гидрирования, аттестация образцов после наводороживания, используемая аппаратура и основные методы исследования, как структуры, так и магнитных и магнитотепловых свойств. Перечислены все основные объекты исследования: редкоземельных металл гадолиний и его твердые растворы внедрения  $GdH_x$ , а также интерметаллические соединения с тулием и их гидриды  $TmFe_{11}TiH_x$ ,  $Tm_2Fe_{17}H_x$ ,  $Tm_2Fe_{14}BH_x$ , а также соединения с неодимом и их гидриды  $(Nd, Tm)_2Fe_{14}BH_x$ ,  $(Nd, Er)_2Fe_{14}BH_x$ ,  $(Nd, Ho)_2Fe_{14}BH_x$  и  $(Nd, Pr)_2Fe_{14}BH_x$ .

В третьей главе представлены результаты комплексного исследования магнитокалорических и магнитострикционных свойств монокристаллических образцов гадолиния и его твердого раствора  $GdH_{0.15}$  в области магнитных фазовых переходов в полях приблизительно до 2 Т. Обсуждены основные

закономерности изменения магнитных свойств, связанные с введением водорода в кристаллическую решетку исходного монокристаллического образца гадолиния.

Четвертая глава посвящена сравнительному высокополювому исследованию намагниченности  $M(H)$  гидридов  $TmFe_{11}TiH_x$  и  $Tm_2Fe_{17}H_x$  с максимально возможным для данных классов соединений содержанием водорода ( $x = 1.1$  и  $5.5$ , соответственно), а также проверки стабильности полученных гидридов с течением времени. Проведена теоретическая обработка полученных кривых  $M(H)$ , установлено влияние гидрирования на параметры кристаллического поля и обменных параметров, характеризующий обменные взаимодействия между подрешетками железа и редкой земли.

В пятой главе приводятся высокополювые исследования намагниченности  $M(H)$  исходных образцов и их гидридов  $(Nd,Tm)_2Fe_{14}BH_x$ ,  $(Nd,Er)_2Fe_{14}BH_x$  и  $(Nd,Ho)_2Fe_{14}BH_x$ . В ряде составов удалось наблюдать явление, индуцированного внешним магнитным полем ферромагнитного состояния. Произвести оценки межподрешеточного обменного параметра, используя значения как первого, так и второго критического поля. В системе  $(Nd,Pr)_2Fe_{14}BH_x$  произвести исследования влияния гидрирования на магнитные и магнитокалорические свойства в области магнитных фазовых переходов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

**Результаты, представляющие наибольший интерес.** Среди целого ряда новых и значимых результатов, впервые полученных автором диссертации, можно отметить следующие:

1. Обнаружено, что введение незначительного ( $\sim 0.15$  ат.%) водорода приводит к ярко выраженной анизотропии магнитокалорического эффекта в монокристалле гадолиния.

2. Наблюдение перехода «ферримагнетик – ферромагнетик», возникающий при гидрировании соединений типа  $R_2Fe_{14}B$  ( $R$  – редкоземельный элемент) за счет уменьшения обменных взаимодействий между редкой землей и железом.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается использованием современной экспериментальной базы ведущих научных центров, апробированных теоретических моделей.

**Научная новизна** диссертационной работы Паукова М.А. определяется тем, что при ее выполнении использованы твердые растворы водорода в гадолинии  $GdH_x$  и гидриды с максимальным содержанием водорода  $TmFe_{11}TiH_x$ ,  $Tm_2Fe_{17}H_x$  в монокристаллическом состоянии. Впервые выполнены исследования исходных соединений и их гидридов  $(Nd,Tm)_2Fe_{14}BH_x$ ,  $(Nd,Er)_2Fe_{14}BH_x$ ,  $(Nd,Ho)_2Fe_{14}BH_x$  в сильных магнитных полях до 60-80 Тл. Впервые проведено исследование влияния водорода на структуру, морфологию

поверхности, магнитные и магнитокалорические свойства соединений  $(\text{Nd,Pr})_2\text{Fe}_{14}\text{BH}_x$ .

**Практическая ценность.** Работа Паукова М.А. имеет также высокую практическую значимость. В частности, обнаружено влияние гидрирование на магнитокалорические и магнитоотрицательные свойства монокристалла гадолиния, что необходимо учитывать при использовании водород-содержащих сред в магнитных рефрижераторах и тепловых насосов. Данные теоретических расчетов параметров кристаллического поля и обменного параметра в исследованных соединениях важны и полезны для моделирования магнитных свойств и поиска новых составов с заранее заданными свойствами. Весьма полезны для практики могут быть данные о влиянии водорода на свойства соединений со структурой  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Водородная обработка сплавов - это один из технологических этапов получения высокоэнергетических постоянных магнитов на основе интерметаллического соединения  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  с добавками таких элементов, как, например, гольмий и празеодим.

Диссертационная работа имеет, на мой взгляд, **следующие недостатки:**

1. На рис. 3.2.1 (стр. 65) приведен профиль нанокристаллического гадолиния. Этот рисунок совершенно не информативен, никак не описан в тексте диссертации. Также не понятно, с какой части образца этот профиль был снят и какой физический смысл расстояний (в нанометрах), отложенных по оси X и Y.

2. На мой взгляд, изображение на стр. 47 было бы целесообразно оформить в виде рисунка с подрисуночной подписью.

3. В разделе 2.6 при описании метода измерений намагниченности в СКВИДе было бы также полезно привести описание метода измерения намагниченности в PPMS (Physical Properties Measurement System) и ошибку измерений в этих приборах.

4. Нумерация рисунков, где используется под-подраздел (например, рис. 1.5.4.1) мне не представляется удачной.

Отмечу, что эти замечания носят технический характер и совершенно не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы Паукова М.А.

Диссертация представляет собой законченное квалификационное исследование в актуальном и практически важном направлении современной физики. Тема диссертационной работы и полученные в ней результаты полностью отвечают пунктам 1,3-5 паспорта специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений ВАК РФ.

Работа прошла хорошую апробацию. Основные результаты диссертации доложены на отечественных и международных конференциях, опубликованы в

13 статьях в зарубежных и российских, входящих в перечень ВАК, журналах. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что по объему выполненных исследований, новизне и практической ценности полученных результатов диссертационная работа Паукова Михаила Алексеевича «Магнитные и магнитотепловые свойства гидрированных материалов на основе редкоземельных металлов» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (п. II. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г. с изменениями от 21 апреля 2016 г. № 335), а ее автор, Пауков Михаил Алексеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук

(01.04.11 – физика магнитных явлений),

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

Ховайло Владимир Васильевич

Адрес: Ленинский проспект, д. 4, 119049, г. Москва

Телефон (рабочий): +7(926)374-32-60

Адрес электронной почты: khovaylo@misis.ru

Подпись Ховайло Владимира Васильевича заверяю

Проректор по безопасности и

общим вопросам НИТУ «МИСиС»

 И. М. Исаев