

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию РОДИОНОВА Владимира Владимировича «Магнитокалорический эффект магнитоэлектрических композитов на основе сплавов Fe-Rh», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений

Диссертационная работа Родионова В.В. посвящена комплексным экспериментальным и теоретическим исследованиям магнитных и магнитотепловых свойств магнитоэлектрических композитов на основе сплавов бинарной системы Fe-Rh и пьезоактивной керамики ЦТС. Внимание ученых к данным композитам обусловлено двумя основными причинами: во-первых, исследованиями магнитокалорических материалов с магнитоструктурным переходом первого рода, во-вторых, поиском новых функциональных магнитных материалов с управляемыми магнитными свойствами для различных практических приложений.

В литературе рассмотрены возможности управления температурным гистерезисом с помощью гидростатического давления, механических воздействий, магнитного поля, однако на сегодняшний день все эти решения далеки от возможности их использования в практических целях в связи со сложностью обеспечения соответствующих условий (высокого давления и т.д.). Одним из обещающих подходов на сегодняшний день является изготовление магнитоэлектрических композитов на основе магнитокалорических материалов, и управление температурным гистерезисом через их магнитоэлектрическое взаимодействие. Кроме того, магнитокалорические материалы могут дополнительно демонстрировать эластокалорический эффект, индуцированный растяжением (сжатием) пьезоэлектрической компоненты композита, изменяя тем самым суммарный калорический эффект.

Таким образом, тема диссертации является безусловно актуальной, как с точки зрения развития фундаментальных представлений о магнитных свойствах соединений системы Fe-Rh при приложении внешнего статического давления, так и для практического применения в технологиях твердотельного охлаждения.

Сформулированные цель и задачи работы отвечают критериям новизны, важны для понимания проблем, связанных с управлением магнитного и температурного гистерезисов, деградацией магнитокалорического эффекта (МКЭ), а также возможностью изменения величины МКЭ посредством различных немагнитных воздействий на материалы с магнитным фазовым переходом первого рода. Кроме того, подходы, основанные на использовании композитов, помогут в поиске и исследованиях новых материалов и методик для увеличения термодинамической эффективности калорических эффектов.

Достоверность научных положений и выводов, обсуждаемых в диссертации, подтверждается использованием тщательно аттестованных современными методами образцов сплавов системы Fe-Rh и изготовленных на их основе композитов, подробным описанием используемых в работе экспериментальных методов измерения физических параметров, приведенным во второй главе.

Представленная диссертация состоит из введения, пяти глав с основными результатами и выводами, списка литературы.

В первой главе работы представлен обзор современного состояния исследований в области изучения свойств магнитных материалов с фазовым переходом первого рода – как обладающих гигантским магнитокалорическим эффектом и потенциально применимых для твердотельного охлаждения, в частности – близких к экваторному сплавов Fe-Rh. Рассмотрен вопрос возможности управления температурным и магнитным гистерезисами в соединениях с фазовых

переходом первого рода с помощью внешних механических воздействий.

Украшением работы является широкий спектр экспериментальных методов, включающий высокотехнологические установки индукционной плавки по синтезу литых материалов, установки магнетронного распыления для получения тонкопленочных композитов, а также высокоточные промышленные установки аттестации образцов и уникальные измерительные системы для проведения исследований магнитных и магнитоэлектрических свойств. Использование современных методик исследования позволило получить детальную информацию о структуре, тепловых эффектах и магнитоэлектрическом взаимодействии в полученных композитах.

Основные экспериментальные результаты приводятся автором в третьей, четвертой и пятой главах диссертации. Среди научных результатов, имеющих важное научное значение, хотелось бы отметить следующие:

- Впервые показано, что в магнитоэлектрических композитах FeRh/ЦТС приложении постоянного механического напряжения со стороны пьезоактивного слоя приводит к уменьшению ширины температурного гистерезиса в магнитном материале. Так приложение постоянного электрического напряжения к слою ЦТС приводит к уменьшению ширины температурного гистерезиса до 3 К в двухслойном композите при  $U=25$  В и до 4 К в случае трехслойного композита при  $U=50$  В. Это объясняется механическим воздействием пьезоактивных слоев ЦТС, индуцирующим деформацию магнитной фазы Fe-Rh.
- Методом магнетронного распыления был изготовлен магнитоэлектрический композит, содержащий тонкопленочный слой Fe-Rh и подложку из ЦТС. Установлено, что в изготовленном ЦТС/FeRh композите с толщиной магнитоактивного слоя 50 нм прямой и обратный МЭ коэффициенты демонстрируют максимумы

в области температуры магнитного перехода. Полученные результаты подтверждают взаимосвязь магнитных и магнитоэлектрических свойств, характерных для слоистых мультиферроиков-композитов и может быть использовано для практических приложений.

- Предложена теоретическая модель на базе уравнения Ландау-Халатникова, на основании которой рассмотрено поведение магнитных свойств и описание температурного гистерезиса магнитоэлектрических композитов при приложении электрического поля.

Научная новизна работы заключается в экспериментальных и теоретических исследованиях эффекта приложения постоянного механического напряжения со стороны пьезоактивного слоя эффекта в двухслойных и трехслойных слоистых магнитоэлектрических композитах Fe-Rh/ЦТС, в ходе которых было установлено, что напряжения со стороны пьезоактивного слоя приводит к уменьшению ширины температурного гистерезиса в магнитном материале. В дополнение к этому предложена теоретическая модель на базе уравнения Ландау-Халатникова, на основании которой рассмотрено поведение магнитных свойств и описание температурного гистерезиса магнитоэлектрических композитов при приложении электрического поля.

Основные результаты диссертации были доложены на 5 международных конференциях и опубликованы в 6 статьях во всероссийских и зарубежных реферируемых печатных изданиях, рекомендованных ВАК.

В целом работа производит благоприятное впечатление, однако, можно отметить некоторые недостатки:

1. В четвертой главе работы используя экспериментальные результаты исследований магнитных свойств, полученные для двухслойного композита FeRh/ЦТС, проведена оценка

эффективности системы, основанной на использовании мультикалорического эффекта. В качестве сравнения приведены расчеты для простого цикла Брайтона, температурный диапазон которого в системах охлаждения, основанных на МКЭ, ограничен величиной эффекта рабочего тела. Было бы полезно проанализировать циклы с расширенным диапазоном охлаждения сравнимым с традиционными парокompрессионными холодильниками, например каскадные или регенеративные циклы охлаждения. Помимо этого соискателю следовало бы рассмотреть циклы с учетом особенностей материалов, используемых в качестве рабочего тела (например, температурный гистерезис).

2. В пятой главе работы представлены результаты исследований структуры, магнитных свойств и магнитоэлектрического взаимодействия пленочных композитов  $\text{Fe}_{48}\text{Rh}_{52}/\text{ЦТС}$ . Однако в тексте отсутствуют данные по измерению МКЭ полученных композитов. Согласно цели диссертации следовало бы привести данные магнитотепловых свойств пленочных композитов для оценки влияния внешнего давления со стороны пьезоактивного слоя на необратимость трансформации магнитной подсистемы.

Отмеченные недостатки не уменьшают ценности диссертации, которая выполнена на достаточно высоком научном уровне, и носят скорее пожелания для дальнейших исследований.

Диссертация Родионова В.В. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на современном уровне. Достоверность результатов и обоснованность выводов не вызывают сомнений. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Полученные в работе результаты могут быть использованы в работе лабораторий, научно-исследовательских центров и на предприятиях, занимающихся исследованием и производством функциональных магнитных материалов.

Считаю, что представленная диссертационная работа В.В. Родионова «Магнитокалорический эффект магнитоэлектрических композитов на основе сплавов Fe-Rh» по актуальности, научной новизне, большому объему выполненных теоретических и экспериментальных исследований и по практической значимости их результатов отвечает всем требованиям пунктов 9–14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. № 842), а ее автор Родионов В.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Доцент кафедры физики конденсированного состояния  
физико-технического факультета

Тверского государственного университета,

кандидат физ.-мат. наук

А.Ю. Карпенков

*26. 11. 2018*

г. Тверь, 170002, Садовый пер., д.35

Телефон: 7(4822) 58-55-83

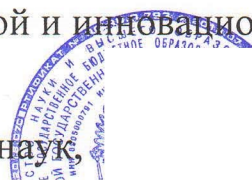
E-mail: karpenkov.ay@tversu.ru

Подпись Карпенкова А.Ю. заверяю

Проректор по научной и инновационной  
деятельности ТвГУ,

доктор технических наук,

профессор



И.А. Каплунов