

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Гречишко Ростислава Михайловича «Доменная структура ферромагнитных сплавов Гейслера и редкоземельных интерметаллических соединений в области магнитных фазовых переходов» представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений.

Интерметаллические магнитные сплавы на основе редкоземельных и переходных элементов, обладающие богатым набором температурных и магнитных фазовых превращений, широко востребованы в магнитной наноэлектронике, в частности для разработки магнито-электромеханических систем (МЭМС), создания запоминающих сред и элементов магнитной памяти, а также ряда других применений. Магнитные сплавы с памятью формы, которые в области мартенситных превращений по магнитострикционным характеристикам превосходят не только сплавы с гигантской магнитострикцией, но и пьезоэлектрические материалы, представляют особый практический интерес. Несмотря на большое количество работ по их изучению, интенсивно ведущихся начиная с 1970-х годов, целый ряд вопросов, связанных с взаимным влиянием структурных и магнитных превращений, особенно в области полей близких к критическим, оставался не до конца ясным. В частности оставалось невыясненным, каковы механизмы взаимодействия структурных и магнитных доменов в области мартенситного превращения, каковы их особенности при температурных изменениях, каковы необходимые и достаточные условия для формирования упорядоченных доменных структур в условиях двойникования кристалла и другие вопросы, которые требовали новых подходов в развитии магнитооптических и температурных методик измерения. В этой связи тема диссертации Р.М.Гречишко предстает несомненно актуальной.

Особенностью диссертационной работы является комплексное исследование структурных и магнитных доменов вблизи фазовых переходов ферромагнитных сплавов Гейслера и редкоземельных интерметаллических соединений на основе взаимодополняющих (комплементарных) методов термомагнитного анализа и оригинальных магнитооптических методов измерения и визуализации изображений, разработанных диссертантом. Здесь требовалось углубленное понимание процессов намагничивания, образования магнитной структуры объемных материалов и пленок и многообразия проявлений локальных и интегральных магнитооптических эффектов в

анизотропных средах в условиях пространственной неоднородности свойств кристалла и взаимовлияния поверхности и объема.

Первая глава диссертации является обзорной. В ней достаточно подробно освещены основные закономерности структурных превращений ферромагнетиков с памятью формы при вариации температуры, состава и внешних воздействий, в частности магнитного поля. В обзоре убедительно показано, что развитие комплексной экспериментальной базы и взаимодополняющих методов для исследования сложного температурного поведения магнитных сплавов в условиях взаимовлияния структурных и магнитных превращений является одним из необходимых путей изучения этой сложной проблемы.

Во второй главе описаны разработанные диссидентом методы изучения доменной структуры. Здесь описаны достаточно традиционные методы измерений намагниченности, восприимчивости, анизотропии, гистерезиса, основанные на холловских методах измерения магнитных полей рассеяния, оптических, магнитооптических, электромеханических и термомагнитных методах. Автор, однако, внес значительные усовершенствования в каждый из этих методов, благодаря чему была повышена чувствительность и надежность установок и разработанных методик, точность градуировки измерительных приборов. Диссидентом была создана основательная база для осуществления комплементарного подхода к наблюдению и исследованию структурных и магнитных фазовых превращений в интерметаллических сплавах переходных металлов и редкоземельных элементов. Особенный интерес представляет сочетание компьютерной обработки изображений, повышающих их контрастность и информативность, а также количественные методы определения визуализированных распределений. Последнее – использовалось, в частности, для количественного съема гистерезиса по изменению контраста редкоземельных сплавов и других целей. Оригинальным в работе является также применение нестандартных индикаторных пленок. Наряду с традиционными висмут содержащими пленками железо-иттриевого граната обсуждаются также тонкие пленки редкоземельных сплавов железа, позволяющие повысить разрешающую способность метода визуализации. Диссидентом показано, что магнитооптические индикаторные твердотельные пленки обеспечивают проведение качественного и количественного анализа микрораспределения магнитного поля причем в широком интервале значений поля.

Благодаря применению разработанных уникальных методик изучения процессов намагничивания диссиденту удалось получить целый ряд новых и интересных результатов из которых следует отметить следующие.

В третьей главе диссертации, касающейся ориентационных переходов в высокоанизотропных сплавах, исследованы особенности изменения магнитных доменов в области спиновой переориентации. Здесь диссидентанту удалось отделить поверхностные эффекты наведенной анизотропии, возникающей в результате подготовки поверхности методом шлифовки от явлений температурной переориентации оси анизотропии в объеме кристалла. Получены оценки параметров магнитных сплавов, которые на момент исследования имели несомненный характер новизны. Диссидентантом было установлено, в частности, что в редкоземельных одноосных интерметаллических соединениях $DyCo_{5,2}$ и $TbCo_{5,1}$ со спонтанными спин-переориентационными переходами спонтанный переход из одноосной в угловую фазу происходит по схеме: лёгкая плоскость – угловая фаза – лёгкая ось. В этой же главе приведены интересные данные исследования влияния режимов гидрирования и азотирования на фазовый состав и толщину азотированного слоя высококоэрцитивных порошков сплавов на основе бинарного интерметаллического соединения Sm_2Fe_{17} и его квазибинарных модификаций. Исследования с помощью эффектов Керра и порошковых осадков качественных изменений доменной структуры в сочетании с рентгенофазовым и терромагнитным анализом позволили в деталях оценить кинетику реакции азотирования этих соединений и особенности связанных с ними спин-ориентационных переходов.

В четвертой главе описываются результаты экспериментального исследования мартенситной и магнитной доменных структур в моно-, поли- и нанокристаллических образцах сплавов Гейслера $Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga$ и $Co_{2+x}Ni_{1-x}Ga$. Здесь в полной мере проявились достоинства комплементарного подхода к анализу фазовых превращений. С применением метода терромагнитного анализа (ТМА) изучены перестройка и изменение объёма мартенситной фазы и сопровождающиеся изменения магнитного состояния образца. Было установлено, что в области гистерезиса мартенситных превращений существенную роль оказывают дефекты кристаллической решётки как на процесс смещения фазовой границы мартенсит – аустенит, так и на перестройку доменов в мартенситном состоянии образца. Методы светлопольной оптической микроскопии позволили диссидентанту исследовать особенности структурных изменений образцов на шлифах поверхности вплоть до количественной оценки структурных изменений по наблюдению локальных искажений алмазных рисок. С помощью поляризационной оптической микроскопии удалось определить ориентацию двойниковых доменов. Применение цифровых методов обработки магнитооптических изображений позволило Гречишкуну Р.М. наблюдать магнитную доменную структуру, несмотря на наличие выраженного мартенситного рельефа поверхности, что является уникальным

достижением диссертанта. Детальные визуальные наблюдения магнитной доменной структуры сплавов Гейслера проведены диссидентом с помощью индикаторных гранатовых пленок, которые позволили установить взаимную ориентацию доменов относительно границ двойников как в объемных, так и нанокристаллических материалах, а также установить особенности ее поведения в магнитном поле. Диссидентом установлено, что основные закономерности формирования и взаимодействия взаимосвязанных структур мартенситных и магнитных доменов моно-, поли- и нанокристаллических ферромагнитных сплавов Гейслера $\text{Co}_{2+x}\text{Ni}_{1-x}\text{Ga}$ и $\text{Ni}_{2+x}\text{Mn}_{1-x}\text{Ga}$ подобны друг другу – доменная структура непрерывна в пределах нанокристалита и образует 90 градусные соседства на границах двойников с разным направлением тетрагональных осей. Диссидентом показано, что изменения мартенситной и магнитной доменных структур ферромагнитных сплавов Гейслера в области структурных и магнитных фазовых переходов осуществляются под влиянием дефектов кристаллической решетки и описываются идеализированной трёхмерной моделью кооперированной мартенситной и модулированной магнитной доменной сверхструктуры.

Последняя глава посвящена некоторым приложениям высокоанизотропных сплавов. В этой главе показано, что редкоземельные соединения с температурно- зависимыми свойствами позволяют управлять как абсолютными значениями, так и направлениями магнитного потока в магнитных устройствах, для сенсорной техники и микро- и нано-электромеханических систем. В частности, автором предложен оригинальный температурный датчик, основанный на температурной компенсации намагниченности сплава Gd-Co-Cu. Достоинством этого датчика является отсутствие гистерезисных явлений в магнитном поле и симметрия характеристик при переходе через точку компенсации. Он перспективен для дистанционной индукционной диагностики на большом расстоянии от чувствительного элемента (магнита). Сплавы Nd-Co-Fe-Al могут служить переключателями магнитного потока в микромеханических устройствах благодаря явлению температурной переориентации легкой оси. Предложен также ряд магнитооптических методов выявления дефектов вблизи поверхности магнитных металлов и постоянных магнитов, основанный на цифровых методах обработки.

В диссертации имеются следующие недостатки.

1. В обзоре много говорится о свойствах сплавов Гейслера, но практически отсутствует обзор механизмов магнитного влияния на температуру мартенситного перехода. Кроме того, для характеристики магнитных и структурных свойств магнитных сплавов важны не только статические, но и динамические параметры сплавов, связанные с динамикой перестройки доменов, что не отражено в диссертации. Это могло бы

существенно дополнить понимание картины взаимовлияния магнитной и кристаллической подсистем сплавов Гейслера в области фазовых превращений.

2. При термомагнитном анализе фазового состава ферромагнитного сплава Гейслера в области мартенситных превращений для количественного анализа требуется знание температурного изменения парциальных восприимчивостей, величина которых существенно может зависеть от состава и дефектности образца, т.е. от его индивидуальности, что ограничивает универсальность метода.

3. Имеются неточности в подписях к рисункам, например на стр.108 указано, что автором впервые обнаружена анизотропия 6 го порядка в одноосном TbCo_{5.1}. Однако из приведенного результата на рис.3.1 (развертка измерений анизометра) не очень ясно - какова величина и тип анизотропии, т.к. количественный анализ приведенной развертки не приведен. На рис. 3.2 отсутствует ссылка на работу с которой идет сравнение. Из текста не ясно - каким методом проведены измерения в цитированной работе. Может стоило сравнить результаты измерений намагничивания того же образца разными методами. При описании схемы измерения магнитного поля с помощью четырех сверхпроводящих датчиков на рисунке 2.1 на стр 53 диссертации допущены неточности в обозначении осей и компонент магнитного поля.

Указанные недостатки не снижают положительного впечатления о диссертации в целом. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, написана логически последовательно и понятным языком. По существу, она определяет основы комплементарного исследования структурных и магнитных фазовых превращений в сплавах Гейслера и высокоанизотропных редкоземельных соединениях с переходными металлами, а также указывает новые возможности их практического применения.

Достоверность результатов диссертационной работы основана на тщательной отработке методик и калибровке измерительных устройств разработанных в процессе подготовки диссертации экспериментальных установок, корреляции полученных экспериментальных результатов с результатами работ экспериментаторов из других научных организаций и результатами теоретических работ. Материалы диссертации обсуждались более чем на 25 российских и международных конференциях и семинарах различного уровня, подробно опубликованы (50 работ) и защищены патентами (6 патентов). Они получили признание у специалистов и цитировались в литературе.

Содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации

Практическая ценность диссертации определяется прежде всего разработкой новых эффективных методик исследования процессов перемагничивания и реализацией методик в виде действующих экспериментальных установок. Ряд устройств, разработанных для

магнитооптических установок, имеют самостоятельную практическую значимость. Полученные в работе результаты вносят существенный вклад в понимание механизмов перемагничивания в условиях взаимодействия магнитных доменов со структурными доменами в области фазовых превращений сплавов с памятью формы. Это расширяет возможности практического применения этих сплавов. На основании результатов проведенных исследований процессов перемагничивания пленок предложены и защищены авторскими свидетельствами на изобретения и патентами новые магнитооптические устройства: магнитные сенсоры температуры, магнитооптические способы количественной визуализации и топографирования магнитных полей.

Результаты работы могут быть использованы в ИРЭ РАН, ФТИ им. А. Ф.Иоффе РАН, ИОФ РАН, ИФМ УРО РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова и др.

Диссертация Гречишко Р.М. «Доменная структура ферромагнитных сплавов Гейслера и редкоземельных интерметаллических соединений в области магнитных фазовых переходов» является законченной квалификационной работой и по актуальности, достоверности, научной новизне, теоретической и практической значимости отвечает требованиям п.9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых ВАК к работам, представленным на соискание ученой степени доктора наук (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.13 с изменениями от 21.04.2016 г. №335), а ее автор заслуживает присуждения ему искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент

главный научный сотрудник

кафедры физикиnanoструктур

ФГАОУ ВО «НИУ «МИЭТ»

доктор физико-математических наук,

профессор

А.Ф. Попков

e-mail: afpopkov@inbox.ru

адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, дом 1.

тел.: 8 915 385 4364

Подпись А. Ф. Попкова заверяю

Ученый секретарь ФГАОУ ВО «НИУ «МИЭТ»

К.т.н., профессор

Н. М. Ларионов