

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор по научной работе  
Федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Челябинский государственный  
университет»,  
д.ф.-м.н., профессор

В.Д. Бучельников  
 21.07.2016 года

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Гречишкина Ростислава Михайловича «Доменная структура ферромагнитных сплавов Гейслера и редкоземельных интерметаллических соединений в области магнитных фазовых переходов», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – физика магнитных явлений

Практическое использование ферромагнетиков, обнаружающих эффекты памяти формы и сверхупругости (сверхпластичности) напрямую связано с управлением этими эффектами с помощью магнитного поля. При этом уникальное сочетание целого ряда физических свойств подобных материалов позволяет получать принципиально новые структуры, перспективные для использования в различных областях современной науки и техники. Несмотря на то, что магнитные ферроики активно исследуются в течение последних 10–20 лет, существует ряд проблем, не нашедших удовлетворительного понимания и адекватного модельного описания. Изучение процессов формирования микро- и макроскопических свойств ферроидных материалов связано со значительными сложностями. Это в первую очередь обусловлено тем, что в магнитных ферроиках в качестве взаимодействующих факторов выступают скоррелированные ансамбли структурных и ферромагнитных доменов. В экспериментальном плане это вынуждает вести поиск альтернативных прямых и косвенных достаточно простых в реализации экспериментальных методов исследования как структурных, так и магнитных процессов фазовых превращений и их взаимного влияния друг на друга. В научном плане также остается открытым вопрос о развитии нового подхода к определению и анализу механизмов эволюции мартенситной и магнитной доменных структур при температурных воздействиях. Поэтому тема диссертационной работы Р.М. Гречишкина представляется весьма актуальной.

Диссертационная работа Р.М. Гречишкина посвящена разработке физических основ и практической реализации новой комплементарной методологии определения и анализа механизмов эволюции мартенситной и магнитной доменных структур при температурных воздействиях. По материалам диссертации опубликовано более 50 научных работ в ведущих российских и международных журналах. Результаты неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях и хорошо известны специалистам в нашей стране и за рубежом.

На основании большого объема проведенных экспериментальных исследований, их анализа, автором получен ряд новых, принципиально важных результатов, среди которых наиболее интересными, на наш взгляд, являются следующие:

1. Развитие новых подходов к реализации комплементарных методик по выявлению и исследованию магнитной и мартенситной доменных структур, анализу магнитных свойств ферромагнитных сплавов Гейслера и редкоземельных интерметаллических соединений.
2. Выявление и проведение анализа физической природы спонтанных спинориентационных переходов в интерметаллических соединениях с анизотропией «лёгкая плоскость»  $DyCo_{5.2}$ ,  $TbCo_{5.1}$  и  $Sm_2Fe_{17}$ , для которых установлены как общие черты, так и особенности эволюции доменной структуры в процессе перехода.
3. Установление взаимосвязи мартенситных и магнитных доменных структур в образцах ферромагнитных сплавов Гейслера. Показано разнообразие (ветвление, крестообразные пересечения, прослойки, торможение, фрагментация и др.) взаимодействий между мартенситными двойниками, протекающих в ходе структурных переходов.
4. Формулирование концепции термоуправляемых постоянных магнитов на основе двухподрешеточных ферримагнитных соединений.
5. Использование комбинации магнитооптического эффекта и эффекта двойного лучепреломления для реализации нового подхода к получению качественных оптических изображений магнитных и мартенситных структур.
6. Физическое обоснование необходимости учёта повышенного содержания структурных дефектов в поверхностных слоях образцов ферромагнитных сплавов Гейслера при проектировании устройств с использованием эффекта памяти формы.

Отметим, что полученные в работе результаты представляются достоверными, а выводы и основные положения, выносимые на защиту обоснованными. Это обеспечивается применением в работе апробированных экспериментальных методик,

воспроизводимостью полученных результатов и их соответствием основным законам физики магнитных явлений и известным литературным данным.

Диссертация состоит из введения, литературного обзора, четырех глав, содержащих оригинальный материал, заключения, списка цитируемой литературы из 169 наименований и содержит 234 страниц печатного текста, 139 рисунков.

**Во введении** сформулированы задачи, решаемые в диссертационной работе, обоснована их актуальность, новизна и практическая значимость.

**В первой главе** сделан литературный обзор по теме исследования. Подробно описаны широкие перспективы использования мартенситных превращений в металлических сплавах, привлекающие большое внимание исследователей в последние десятилетия. Рассмотрены механизмы поведения доменной структуры при ориентационных фазовых переходах. Показано, что опубликованные по данному направлению работы немногочисленны и носят фрагментарный характер, что затрудняет построение соответствующих физических моделей и теорий.

**Вторая глава** содержит описание методологии магнитооптических исследований доменной структуры и магнитных свойств. Особое внимание уделяется развитию разработанного автором комплементарного подхода к выявлению и анализу механизмов эволюции взаимодействующих ансамблей мартенситной и магнитной доменных структур при температурных воздействиях. Дано физическое обоснование и подробное описание авторских решений измерительных установок для магнитооптической визуализации мартенситных и магнитных доменных структур, микро- и макромасштабных проявлений магнитных полей рассеяния.

**В третьей главе** представлены новые полученные автором экспериментальные результаты по исследованию доменной структуры и магнитных свойств интерметаллических соединений с анизотропией «лёгкая плоскость»  $DyCo_{5.2}$ ,  $TbCo_{5.1}$  и  $Sm_2Fe_{17}$  с плоскостной магнитной анизотропией.

Особо можно отметить успешное преодоление экспериментальных трудностей по выявлению основной доменной структуры в базисной плоскости гексагонального соединения  $TbCo_{5.1}$ . Представляет интерес сравнение результатов физической модели доменных границ, являющихся энергетически наиболее выгодными при отсутствии дефектов кристаллической решётки и внутренних напряжений, с экспериментальными данными.

Проведенные эксперименты по эволюции доменной структуры на базисной плоскости  $DyCo_{5.2}$  при различных температурах, соответствующих состояниям «лёгкая плоскость» и «лёгкая ось» позволяют прояснить ряд факторов, влияющих как на форму и размеры

доменов, так и на ограничение разрешенных типов доменных границ в промежуточном состоянии магнетиков со спин-переориентационными фазовыми переходами. Теоретическое рассмотрение данных моделей является чрезвычайно сложным ввиду большого количества действующих факторов.

**Четвертая глава** посвящена изучению мартенситных свойств и структуры поликристаллических сплавов Гейслера  $Ni_{2+x}Mn_{1-x}Ga$ ,  $Co_{2+x}Ni_{1-x}Ga$ ,  $Cu_2MnAl$ ,  $Gd_5(Ge_{1-x}Si_x)_4$  с различными значениями  $x$  от 0,12 до 0,19. Удачное сочетание метода термомагнитного анализа, прямого наблюдений магнитной и мартенситной доменных структур, а также использование индикаторных магнитных пленок, позволило автору выявить неизвестные ранее характерные особенности в магнитном поведении этих кристаллов.

В частности, установлена и проанализирована взаимосвязь внутренних подструктур мартенситных и магнитных доменов, проведены количественные оценки деформаций. Показана зависимость характера доменной структуры от предыстории образца (в какой фазе – аустенитной или мартенситной – осуществлялась предварительная подготовка образца). Используемая автором модель для описания межфазных границ, дала возможность провести соответствие наблюдавшихся картин ветвления и измельчения мартенситных доменов с ориентаций кристаллических осей в зёдрах.

**В пятой главе** описаны примеры практического применения научных результатов диссертации.

Особый интерес, на наш взгляд, представляют следующие применения:

- использование стробоскопической визуализации поля вихревых токов в качестве метода неразрушающего контроля качества неферромагнитных токопроводящих материалов;
- создание датчика температуры с использованием в качестве задающего элемента ферримагнитных высококоэрцитивных соединений на основе тройных сплавов  $GdCo_{5-x}Cu_x$ .
- разработанная автором методика, объединяющая оптические и магнитные измерения, позволяющая использовать МОИП для визуализации неоднородных магнитных полей, локализованных в областях пространства с характерными размерами порядка единиц микрометров. Достоверность данной методики в работе подтверждена расчетами распределения магнитных полей.

Оценивая работу в целом, необходимо подчеркнуть ее целостность, взаимосвязь между различными разделами и удачный подбор материалов для изучения. Проведенные исследования существенно развиваются возможности проведения качественных и количественных оценок параметров полей рассеяния магнитной доменной структуры, позволяют объяснить физические причины взаимосвязи мартенситных и магнитных доменов, заключающиеся в различии их внутренней структуры и существовании

кооперированной модулированной сверхструктурой. Ряд полученных результатов имеет важное практическое значение.

Работа Р.М. Гречишкина не свободна от недостатков. Отметим некоторые из них.

1. В диссертации методом термомагнитного анализа исследованы температуры Кюри различных материалов, в то же время отсутствует информация как о точности измерений температуры при термомагнитном анализе, так и об имеющихся справочных данных по температурам Кюри изучаемых соединений.
2. Исследование доменной структуры с использованием феррит-гранатовых одноосных и планарных плёнок представлены независимо друг от друга. На наш взгляд было бы интересно увидеть сравнительные количественные оценки значений коэффициентов преобразования для разных типов плёнок, включая отсутствующие в диссертации данные по использованию металлических плёнок.
3. Наряду с решением вопроса о наблюдении собственной доменной структуры планарных феррит-гранатовых индикаторных плёнок несомненный интерес представляли бы исследования, связанные с поведением этой структуры во внешних полях. Судя по общей постановке эксперимента такие возможности у диссертанта, несомненно, были.
4. Работа написана хорошим языком, но в отдельных местах встречаются неточности, оговорки и погрешности стиля. Например, рисунки 2.6 (с. 62 диссертации) и 4.10 (с. 146 ) дублируют друг друга

Отмеченные выше недостатки не меняют общую положительную оценку работы. Работы, вошедшие в диссертацию, широко известны мировой научной общественности. Следует отметить, что исследования, результаты которых нашли отражение в данной диссертационной работе, являются достаточно крупным вкладом в развитие нового экспериментального подхода к изучению магнитных материалов и имеют важное прикладное значение. Полученные в работе новые оригинальные результаты являются экспериментально обоснованными и согласуются с модельными представлениями.

Диссертация Гречишкина Р.М. является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на современном уровне и содержащей новые решения актуальных задач, имеющих важное научное и прикладное значение. Достоверность результатов и обоснованность выводов не вызывают сомнений. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Полученные данные могут быть использованы в работе лабораторий и научных центров, занимающихся исследованиями магнитных материалов.

Диссертация по актуальности избранной темы, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в работе, их достоверности и новизне соответствует критериям Положения о присуждении учёных степеней (п.9 –

п.14), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Гречишkin Р.М., заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Отзыв заслушан и обсужден на объединенном заседании семинара кафедры физики конденсированного состояния и кафедры радиофизики и электроники Челябинского государственного университета 21 ноября 2016 г., протокол № 12.

Бычков Игорь Валерьевич,  
доктор физ.-мат. наук, профессор  
заведующий кафедрой радиофизики и электроники  
ФГБОУ ВО «Челябинский  
государственный университет»  
специальность 01.04.07 – Физика  
конденсированного состояния

И.В. Бычков

454001, г. Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129  
Телефон: 8 (351) 799-71-62  
e-mail: bychkov@csu.ru