«УТВЕРЖДАЮ»
Зам. директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
«Институт радиотехники и
электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук»
доктор физико-математических наук

_____ С.В. Зайцев-Зотов
«14» января 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Антоновой Е.С. «Температурная трансформация доменной структуры монокристаллов интерметаллических соединений R_2Fe_{17} (R = Tb, Dy, Ho, Er)», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Физика магнитных явлений.

Диссертационная работа Антоновой Екатерины Сергеевны посвящена анализу микромагнитной структуры гексагональных магнетиков с магнитной кисталлографической анизотропией типа плоскость осей легкого намагничивания (ПОЛН) на основе систематического исследования доменной структуры монокристаллических образцов интерметаллических соединений R_2Fe_{17} (R = Gd, Tb, Dy, Ho) в широком интервале температур и магнитных полей магнитооптическими методами и методами магнитно-силовой микроскопии. Актуальность такого исследования связана с тем, что интерес к материалам стехиометрии 2:17 в последние годы вырос по ряду причин. С одной стороны, более эффективную замену магнитотвердым материалам (МТМ) на основе соединения $Nd_2Fe_{14}B$, несколько десятилетий найти не удается. Поэтому вместе с поиском новых высокоанизотропных фаз специалисты занимаются улучшением свойств известных МТМ. Весьма активно ведутся работы в области материалов типа Sm-Zr-Co-Cu-Fe, наногетерогенная структура которых образована фазами стехиометрии 2:17, по границам которой находится фаза стехиометрии 1:5. Если микромагнитная структура фаз RCo_5 и R_2Co_{17} хорошо известна, то доменная структура (ДС)

соединений типа R_2Fe_{17} исследована недостаточно, что затрудняет анализ процессов перемагничивания в этих материалах и совершенствование технологических решений для улучшения их функциональных характеристик. Малое число работ, в которых изучается микромагнитная структура соединений R_2Fe_{17}, объясняется как техническими проблемами, такими как относительная сложность получения однофазных монокристаллических образцов соединений R_2Fe_{17}, так и отсутствием практического интереса к этим соединениям. Дело в том, что соединения R_2Fe_{17} имеют невысокие температуры Кюри (T_C) и магнитокристаллическую анизотропию (МКА) типа ПОЛН во всем температурном интервале магнитного упорядочения, за исключением соединения с Lu. Однако, в последние годы появилась возможность повышения T_C соединений R_2Fe_{17} и изменения их типа МКА при введении водорода, углерода и азота, также в них обнаружен значительный магнитокалорический эффект (МКЭ) вблизи комнатных температур. Если учесть, что максимальные величины МКЭ наблюдаются при фазовых переходах первого рода, а именно в области таких переходов в магнетиках обнаруживается МКА типа ПОЛН и недавно показана возможность получения энергоемких МТМ на основе магнетиков с таким типом МКА, то актуальность темы работы Антоновай Е.С. не вызывает сомнений. Кроме того, изучение ДС плоскостных магнетиков имеет самостоятельный научный и практический интерес в связи с широким внедрением в практику поиска новых МТМ экспресс-методов, в основе которых лежит количественный анализ ДС новых магнитных фаз.

Рецензируемая диссертация имеет традиционную структуру и включает введение, обзор литературы, описание методики эксперимента и две главы, представляющие оригинальные результаты. Общий объем диссертации – 134 страницы, она содержит 59 рисунков, 2 таблицы и список цитированной литературы из 145 наименований. По материалам диссертации опубликовано 6 научных статей, в том числе 3 статьи – в изданиях, рекомендованных ВАК. Материалы диссертации докладывались на научных конференциях разного уровня, включая международные, и хорошо известны специалистам.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, аргументированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава содержит обзор научной литературы по кристаллической структуре и магнитным свойствам интерметаллических соединений R_2Fe_{17}. Особое внимание уделено анализу данных по магнитной доменной структуре гексагональных магнетиков с различными типами МКА. Приведены сведения о

первых исследованиях ДС в области сверхнизких температур. Показана ограниченность использованного подхода к изучению ДС в низкотемпературной области. Значительное место уделено исследованиям ДС материалов с МКА типа ПОЛН. Отмечено, что ДС гексагональных магнетиков с плоскостным типом анизотропии исследована только методом порошковых фигур Акулова-Биттера, который не позволяет проводить температурные исследования ДС в магнитном поле. В заключительной части главы приведены данные по существующим моделям ДС магнетика с типом анизотропии плоскость осей легкого намагничивания и сделаны выводы по обзору.

Во второй главе приведено описание экспериментальных методов, использованных для решения задач работы. Образцы для исследований получены методом индукционной плавки и аттестованы методами рентгеноструктурного, термического магнитного, энергодисперсионного и металлографического анализов. Измерения полевых и температурных зависимостей намагниченности в магнитных полях до 50 кЭ и в интервале температур от 5 K до 350 K проведены на SQIUD-магнетометре Quantum Design MPM 5-S. Подготовка образцов для исследований ДС вначале проводилась по стандартной методике. На заключительной стадии подготовки использовались различные методы удаления напряжений из поверхностного слоя образца (электрохимическое травление, применение специальных эмульсий вместо алмазных паст, ионная бомбардировка поверхности шлифа и др.). Большое внимание уделялось контролю полученных ориентаций поверхности шлифа, который проводился методом Лауэ в организации, где выполнялась работа, так и других научных организациях, например, в Макс-Планк-Институте физики твердого тела, г. Штутгарт (Германия).

Третья глава работы содержит результаты исследований температурной трансформации ДС соединений R_2Fe_{17} на базисной плоскости образцов монокристаллов R_2Fe_{17}. Показано что в ДС интерметаллидов Ho_2Fe_{17} и Dy_2Fe_{17} в области низких температур обнаруживаются кроме 180-градусных ДГ границы 120-градусного и 60-градусного типа. На примере соединения Tb_2Fe_{17}, обладающего наибольшей магнитострикцией из исследованной группы соединений, выявлено влияние магнитоупругого вклада в МКА на ДС магнетика с МКА типа ПОЛН. По результатам экспериментальных данных, приведенных в третьей главе, сделаны выводы о том, каким образом соотношение величин естественной МКА в базисной плоскости и магнитоупругого вклада в МКА влияют на характер ДС гексагонального магнетика с МКА типа ПОЛН.

Четвертая глава работы содержит анализ ДС на призматической плоскости (120) монокристаллического образца Ho_2Fe_{17}. Показаны микрофотогорафии ДС, выявленной при комнатной температуре методом магнитно-силовой микроскопии, на основании которых сделан вывод о влиянии остаточных напряжений в поверхностном слое образца на характер ДС. Далее приведены результаты исследования температурной трансформации ДС на плоскости (120) в магнитном поле, показавшие возможность появления в двухфазной ДС соединения Ho_2Fe_{17} третьей магнитной фазы, намагниченность которой M_3 составляет с намагниченностью исходных фаз M_1 и M_2 углы 120 и 60 градусов. Проведен сопоставительный анализ температурных изменений коэрцитивности ДГ, начальной магнитной восприимчивости соединения и поля появления в двухфазной магнитной структуре третьей магнитной фазы. Полученные данные использованы для построения модели ДС магнетика с МКА типа плоскость осей легкого намагничивания. Основные домены в таком магнетике разделены доменными границами, плоскости которых перпендикулярны гексагональной оси кристаллической решетки. В заключительной части четвертой главы в рамках концепции фаз Нееля анализируются общие закономерности и различия в процессах трансформации ДС при перемагничивании в магнитном поле многоосных магнетиков, в которых уже имеются все возможные магнитные фазы, имеется меньшее число фаз, чем возможных направлений легкого намагничивания, и в процессе изменения типа анизотропии в области ориентационных фазовых переходов различной природы. Последний параграф главы содержит краткий анализ возможного влияния обнаруженных в работе особенностей процессов температурной и полевой трансформации ДС в магнетиках с МКА типа ПОЛН на процессы перемагничивания в многокомпонентных МТМ типа Sm-Zr-Co-Cu-Fe.

К наиболее интересным новым результатам работы следует отнести следующие.

1. В результате впервые выполненных температурных исследований ДС соединений R_2Fe_{17} в термически размагниченном состоянии и в присутствии магнитного поля в микромагнитной структуре гексагональных магнетиков с МКА типа плоскость осей легкого намагничивания обнаружены доменные соседства не только 180-градусного типа, но и 120- и 60-градусного типа.
2. На основании полученных картин ДС уточнена модель ДС магнетика, обладающего типом анизотропии плоскость осей легкого намагничивания в термически размагниченном состоянии, и выполнен

анализ ее трансформации при температурном изменении констант МКА и изменении магнитного поля. Показано, что в термически размагниченном состоянии в монокристаллических образцах интерметаллических соединений R_2Fe_{17} в отсутствие внешних воздействий и локальных механических напряжений формируется двухфазная ДС, ОЛН в которой определяется формой образцов и ориентацией осей кристаллической решетки по отношению к поверхности наблюдения.

3. В рамках концепции фаз Неля проведен анализ общих закономерностей и различий в процессах трансформации ДС при перемагничивании в магнитном поле многоосных магнетиков, в которых уже имеются все возможные магнитные фазы, имеется меньшее число фаз, чем возможных направлений легкого намагничивания, и в процессе изменения типа анизотропии в области спонтанных и индуцированных магнитным полем ориентационных фазовых переходов.

Практическая значимость работы также не вызывает сомнений, так как поиск путей совершенствования постоянных магнитов, магнитокалорических и других функциональных магнитных материалов связан с необходимостью более глубокого понимания процессов трансформации микромагнитной структуры при перемагничивании и изменении температуры в магнетиках с различными, в том числе, плоскостным, типами МКА. Кроме того, понимание особенностей распределения намагниченности в магнетиках с МКА типа ПОЛН важно в экспресс-методах поиска магнитоодноосных высокоанизотропных фаз, что позволит уверенно отличить в поликристаллических образцах эти фазы от фаз с плоскостным типом анизотропии.

Достоверность полученных в работе результатов достигается за счет применения всесторонней структурной аттестации исследовавшихся образцов, использованием современного высокоточного измерительного оборудования, тщательным контролем ориентации поверхностей образцов, на которых выполнены наблюдения ДС, согласованием полученных результатов с уже имеющимися в литературе данными, представлением и обсуждением результатов на научных мероприятиях разного уровня, а также их опубликованием в рецензируемых научных международных и российских журналах.

В качестве замечаний по рецензируемой диссертационной работе можно указать следующие:

1. В диссертационной работе не приводятся данные о температурном поведении констант магнитострикции и константы МКА в базисной плоскости,

в области температур 10 – 110 К, хотя они используются при анализе температурного поведения ДС. Эти данные автору следовало привести.

2. Для анализа изменения характера ДС соединения Ho_2Fe_{17} в работе использован подход, предложенный Неелем в теории фаз, однако автор ограничился только качественным описанием, количественные оценки в рамках данной теории проведены не были.

3. В диссертационной работе говориться о тщательном контроле ориентации поверхностей образцов, на которых выполнялись наблюдения доменной структуры. Было бы полезным показать ориентацию основных кристаллографических осей на микрофотографиях ДС, приведенных на рисунках 3.1-3.5, 4,8.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку работы и ее научную и практическую значимость.

Диссертация логично построена, ее структура и содержание соответствуют цели и задачам исследования. Работа ясно изложена и достаточно хорошо оформлена за исключением небольшого числа опечаток и стилистических неточностей. Личный вклад автора в диссертационную работу не вызывает сомнения. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских организациях и вузах, занимающихся исследованиями в области физики магнитных явлений, физики конденсированного состояния и проблем материаловедения, в частности в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Тверском государственном университете, Институте физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН и др.

Диссертация Антоновой Екатерины Сергеевны «Температурная трансформация доменной структуры монокристаллов интерметаллических соединений R_2Fe_{17} (R = Tb, Dy, Ho, Er)» является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены новые результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области экспериментальных исследований магнитной доменной структуры. По актуальности темы исследования, научной новизне, практической значимости и достоверности полученных результатов, обоснованности выводов и положений, представленная диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Антонова Екатерина Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 - физика магнитных явлений.

Отзыв на диссертационную работу Екатерины Сергеевны Антоновой обсужден и одобрен на научно-квалификационном семинаре «Физика твердого тела, магнитных и акустических явлений» ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (протокол № 1/2019 от 10 января 2019 г.)

Председатель семинара,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией
магнитных явлений в микроэлектронике
ФГБУН «Институт радиотехники и
электроники имени В.А. Котельникова
Российской академии наук»
125009, г. Москва, ул. Моховая 11/7
Тел.: +7 (495) 629-35-06
E-mail: Shavrov@cplire.ru

Шавров Владимир Григорьевич

Секретарь семинара,
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
магнитных явлений в микроэлектронике
ФГБУН «Институт радиотехники и
электроники имени В.А. Котельникова
Российской академии наук»
125009, г. Москва, ул. Моховая 11/7
Тел.: +7 (495) 629-35-06
E-mail: kotov.slava@gmail.com

Котов Вячеслав Алексеевич