

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Мальцевой Виктории Евгеньевны «Магнитные гистерезисные свойства магнитотвердых материалов, синтезированных методом селективного лазерного спекания», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений

Актуальность и перспектива использования результатов работы

Новая энергетическая парадигма заключается в более широком использовании возобновляемых источников энергии и увеличении внимания к энергоэффективности в общем энергобалансе жизненного цикла. Эта парадигма ускорила исследования в области энергосберегающих технологий и подстегнула разработку новых функциональных материалов, составляющих основу новых энергосберегающих технологий. Среди новых функциональных материалов, магнитные материалы играют важнейшую роль в улучшении эффективности и производительности устройств для генерации и преобразования электроэнергии, а также они исключительно важны для других секторов экономики, потребляющих большое количество энергии. В рамках этой новой энергетической парадигмы основное внимание исследователей во всем мире сосредоточено на разработке новых, ресурсосберегающих высокоэффективных магнитных материалов как для приборостроения, так и для устройств генерации и преобразования энергии. Эти материалы в ближайшем будущем должны заместить их менее эффективные и более дорогостоящие аналоги.

В настоящее время редкоземельные постоянные магниты, на основе $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и $\text{Sm}_2(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_{17}$ фаз, являются критически важными компонентами в таких областях применения, как генераторы для электросетей (особенно при использовании возобновляемых источников энергии) и электродвигатели в условиях растущей электрификации транспорта. Чтобы удовлетворить растущие требования со стороны производителей, постоянно ведется работа по улучшению ключевых магнитных свойств и новых технологий производства постоянных магнитов.

Технологии аддитивного производства, такие как селективное лазерное спекание (СЛС), открывают новые возможности для производства компонентов со сложной геометрией и оптимизированной топологией, которые трудно или невозможно получить с помощью традиционных процессов. Кроме того, СЛС обеспечивает функциональную интеграцию и индивидуально подобранные микроструктуру и свойства.

При производстве постоянных магнитов особый интерес представляет текстурированная микроструктура для достижения наилучших магнитных свойств (остаточной индукции B_r и максимального энергетического произведения $(BH)_{\max}$). Постоянные магниты с высокой степенью текстуры (около 98%) традиционно производятся методом порошковой металлургии. Достижение высокой степени текстуры в СЛС является серьезной проблемой.

Стоит отметить, что микроструктура образцов, изготовленных с помощью технологии СЛС, всегда является результатом плавления и затвердевания материала в расплаве, полученном с помощью лазера. Следовательно, направленное затвердевание расплава внутри ванны является определяющим фактором для получения текстурированной микроструктуры. Для получения микроструктуры с анизотропными свойствами необходимо, чтобы происходил столбчатый дендритный рост. Для контролирования затвердевания в расплаве необходимо точно настраивать множество параметров, которые зависят в том числе и от кристаллической структуры материала, условия подложки, а также размера и формы ванны расплава. Поэтому отработка режимов производства постоянных магнитов по технологии СЛС критически важна, чтобы получать материалы с необходимой микроструктурой, обуславливающей величину магнитных характеристик. Установление указанной связи, а также определение процессов перемагничивания структур, изготавливаемых методом селективного лазерного спекания, позволит в перспективе пересмотреть подходы к проектированию и изготовлению магнитных систем.

Таким образом, тема диссертационной работы является безусловно актуальной, как с точки зрения развития фундаментальных представлений о физике процессов перемагничивания магнитотвердых материалов, так и для практического применения в технологиях производства постоянных магнитов.

Следует отметить, что диссертационное исследование выполнялось в соответствии с тематическими планами НИР по различным проектам, что несомненно, повышает ценность этого диссертационного исследования.

Сформулированные цель и задачи работы отвечают критериям новизны, важны для понимания механизмов высококоэрцитивного состояния нанокристаллических сплавов на основе фазы типа $Nd_2Fe_{14}B$, в том числе и синтезированных их образцов методом селективного лазерного спекания, что в перспективе может привести к разработке новых технологий получения постоянных магнитов сложных форм с заданными рабочими характеристиками.

Структура диссертации

Представленная диссертация состоит из введения, четырех глав с основными результатами и выводами, списка литературы, состоящего из 92 источников. Общий объем диссертации – 131 страница, включая 56 рисунков и 4 таблицы.

Во введении сформулированы цель и задачи, решаемые в диссертационной работе, а также вносимые на защиту положения, обоснована их актуальность, новизна и практическая значимость.

В первой главе сделан литературный обзор по теме исследования. Подробно представлены сведения о традиционных и новых методах получения магнитотвердых материалов. Рассмотрены механизмы перемагничивания в наноструктурированных быстрозакаленных сплавах, представленные в литературе. Приведены современные представления о процессах перемагничивания этих материалов.

Во второй главе описаны методики получения исследуемых нанокристаллических соединений и условия термических обработок образцов. Представлено подробное описание получения порошков для 3D-печати. Описаны методы аттестации полученных образцов и исследования их кристаллической структуры с помощью рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии.

Достоинством диссертации являются продуманность и тщательность проведенных экспериментов, анализ их результатов на основе развитых теоретических и модельных представлений – рассмотрены магнитометрические подходы к определению механизмов высококоэрцитивного состояния и перемагничивания, в том числе из измерений предельных петель гистерезиса из терморазмагниченного состояния, построения и анализа обратимых магнитных восприимчивостей, построения и анализа кривых Келли. Заслуживает внимания тот факт, что в методической части работы соискатель для выполнения поставленных перед ним задач использовал несколько различных методов исследования: магнитометрия (вибрационный магнитометр и СКВИД-магнетометр), расчетного моделирования методом конечных элементов в САПР COMSOL Multiphysics и микромагнитного моделирования в программе OOMMF.

Основные экспериментальные результаты приводятся автором в третьей и четвертой главах диссертации.

В третьей главе рассматриваются экспериментальные результаты исследований, полученные посредством проведения магнитных измерений, СЭМ, РСА, а также моделирования процессов перемагничивания быстрозакаленных сплавов на основе фазы $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

В четвертой главе рассматриваются процессы перемангничивания в изотропных магнитотвердых материалах, изготовленных методом селективного лазерного спекания.

Каждая глава диссертации сопровождается кратким заключением. В конце диссертации сформулированы общие выводы, которые отражают наиболее важные результаты работы в целом.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность научных положений и выводов, обсуждаемых в диссертации, подтверждается использованием тщательно аттестованных современными методами образцов сплавов системы РЗМ-Fe-B, подробным описанием используемых в работе экспериментальных методов измерения физических параметров и получения образцов, приведенным во второй главе.

Результаты работы прошли апробацию на известных международных конференциях по тематике исследования. Основные результаты диссертации опубликованы в 4 печатных работах в научных рецензируемых журналах, а также 37 докладах.

Оценка содержания диссертации

Основные положения, выносимые на защиту, а также выводы и рекомендации, сделанные по главам, основаны на тщательном анализе литературных источников. Библиография включает значительную и основную часть публикаций в указанных областях. Постановка задач исследования, методики их реализации, полученные результаты изложены с необходимой степенью подробности.

Работа написана грамотным научным языком, аккуратно оформлена. Особенно хотелось бы отметить высокое качество подготовки графического материала. Данные представлены в логической последовательности, стиль изложения и оформление соответствуют уровню требований, предъявляемых к кандидатским диссертациям.

Вопросы и замечания

Подводя итог оценки данной диссертационной работы, можно сказать, что результаты данной работы отвечают принятым критериям **научной значимости, новизны и достоверности**.

Можно отметить некоторые недостатки и пожелания:

1. При формулировках названия диссертации и некоторых положений и выводов соискателю следовало бы указать тип фазы, для которой выполнены все исследования.

2. Несомненно гистерезисные свойства и намагниченность являются ключевыми параметрами, определяющими функциональное применение магнитного материала, однако механические свойства так же крайне важны. Для корректного сравнения технологий 3D печати магнитотвердых материалов методом селективного лазерного спекания с

традиционной технологией спекания следовало бы измерить плотность изготовленных образцов.

3. Согласно тексту диссертационной работы ключевым параметром, сравнение с которым используется при формулировках выводов о механизмах коэрцитивности полученных магнитотвердых материалов, является ширина доменной границы. Однако в тексте отсутствует какая-либо информация о данном параметре для объектов исследований.

4. Крайне информативным методом исследования для установления типа взаимодействия между частицами в образце магнитотвердого материала, используемым в работе, является метод построения кривых $\delta M(H)$ по методике Келли. Представляется интересным проведения данных построений не только для быстрозакаленных образцов сплавов системы (Nd,Pr) – Fe- В, которые выполнены в работе, но и для спеченных методом селективного лазерного спекания образцов.

5. К сожалению, работа не лишена стилистических ошибок, так в подписях к рисункам 25 и 27 указано, что приведены предельные петли намагничивания, при этом на графиках показаны кривые размагничивания.

6. Особенно интересными представляются результаты магнитных измерений гистерезисных свойств полученных методом селективного лазерного спекания образцов в виде частей массивов Хальбаха, приведенные в последней части диссертации. Коэрцитивная сила образцов после отжига составила 4 кЭ. Однако в дальнейшем автором не приводится объяснения причины уменьшения значения коэрцитивной силы спеченного образца по сравнению с текстурированным порошком MQA, из которого и был произведен объект исследования.

Отмеченные вопросы и замечания не снижают положительного восприятия работы диссертанта и высокого уровня проведенных исследований, а также не оказывают влияния на общую положительную оценку диссертационной работы Мальцевой В.Е.

Общая оценка работы

Диссертация Мальцевой В.Е. представляет законченную научно-исследовательскую работу. Постановка задач исследования, методики их реализации, полученные результаты изложены с необходимой степенью подробности. Диссертация написана четким и понятным языком, хорошо оформлена.

Материал, представленный в работе, прошел достаточную апробацию в публикациях в рецензируемых изданиях и представлен на ведущих конференциях по

данному направлению исследований. Автореферат полностью отражает содержание и структуру диссертации, а также ее ключевые аспекты.

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений, а сама работа по своему научному содержанию, значению и достоверности результатов полностью соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор, Мальцева Виктория Евгеньевна заслуживает присуждения ей степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, доцент
заведующий кафедрой
физики конденсированного состояния
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»,

Карпенков Алексей Юрьевич



«5» мая 2025 г.

Контактная информация:

Тел.: +7 (4822) 58-55-83,

e-mail: Karpenkov.AY@tversu.ru

170100, Российская Федерация, г. Тверь, ул. Желябова, 33

