

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

Диссертационная работа Мальцевой Виктории Евгеньевны посвящена экспериментальному исследованию структурных и магнитных свойств редкоземельных магнитотвердых материалов с высоким содержанием железа. Исследуемые магнитотвердые материалы крайне важны для их применения в технических устройствах, которые используются в качестве преобразователей энергии: электрической, магнитной, механической и других. Кроме того, исследуемые в работе магнитотвердые материалы могут быть востребованы для создания магнитных систем различного назначения.

Одним из современных подходов к созданию магнитов и/или магнитных систем с заданными функциональными характеристиками является изготовление постоянных магнитов сложной формы. Такие магниты и/или магнитные системы могут быть получены методом аддитивных технологий, к которым как раз и относится, используемый в данной работе метод селективного лазерного спекания. Помимо получения магнитов необходимой формы, аддитивные технологии являются ресурсосберегающими и позволяют значительно сократить время создания изделий, в том числе, с учетом постоянной миниатюризации тех или иных приборов и устройств.

Следует заметить, что селективное лазерное спекание для получения готовых изделий с магнитотвердыми свойствами является достаточно новым разрабатываемым в настоящее время методом. Его широкое применение ограничено тем, что в литературе практически отсутствуют данные о связи магнитных гистерезисных свойств магнитотвердых материалов с их микроструктурными особенностями, которые формируются при использовании метода селективного лазерного спекания. Многие исследователи из наиболее технологически развитых стран, таких как США, Германия, Япония, Китай и другие, предпринимают попытки создать новую технологию (которая пока еще не имеет аналогов) и получить с её помощью магнитотвердые материалы с магнитными гистерезисными свойствами как у спеченных магнитов. Однако, данная научно-технологическая задача пока далека от полного разрешения.

Диссертационная работа Мальцевой Виктории Евгеньевны посвящена прежде всего установлению основных закономерностей влияния структуры и фазового состава на

магнитные гистерезисные свойства быстрозакаленных сплавов, аналоги которых затем, использовались в качестве исходного магнитного материала для приготовления образцов с помощью аддитивных технологий. В работе установлена связь между магнитными гистерезисными свойствами образцов, получаемыми методом селективного лазерного спекания, и их микроструктурой. Определение процессов намагничивания и перемагничивания образцов, изготавливаемых методом селективного лазерного спекания, позволит в перспективе сформировать новые современные подходы как к проектированию, так и к изготовлению магнитов и магнитных систем специального назначения.

Структура диссертации

Диссертационная работа традиционно состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемых обозначений и сокращений, а также списка цитируемой литературы. Общая структура работы следующая: объём - 131 страница, 56 рисунков и 4 таблицы. Отдельные главы и части диссертационной работы согласованы между собой и представляют единый текст.

Оценка содержания диссертации

Во введении обоснована актуальность направления исследований, выполнена постановка цели и задач работы, обоснована теоретическая и практическая значимость работы, описана методология и методы исследования, показана научная новизна исследования и сформулированы положения, выносимые на защиту, раскрыта структура и объем диссертации.

В первой главе приведен обзор литературы по тематике исследования. Описаны традиционные и новые методы получения магнитотвердых материалов. Рассмотрены механизмы перемагничивания, которые имеют место в наноструктурированных быстрозакаленных сплавах и которые подробно представлены в литературе. Даны современные представления о процессах перемагничивания этих материалов. Рассмотрены особенности синтеза магнитотвердых материалов методами аддитивного производства.

Во второй главе обоснован выбор исследуемых образцов магнитотвердых материалов. Подробно описана методика получения быстрозакаленных сплавов, 3D-печати образцов и их термообработки. Также представлено подробное описание получения порошков для 3D-печати. Приведены описания пробоподготовки к рентгеноструктурному анализу и сканирующей электронной микроскопии. Рассмотрены основные подходы (магнитометрические) к определению механизмов формирования высококоэрцитивного состояния и перемагничивания образцов с учетом информации об их микроструктуре и фазовом составе, полученных на основе результатов измерений кривых намагничивания из терморазмагниченного состояния и предельных петель гистерезиса, зависимостей

обратимой магнитной восприимчивости от напряженности магнитного поля, зависимостей Келли. Описана методика моделирования процессов перемагничивания (в программе OOMMF) и приведены параметры, закладываемые для расчетов. Также описана методика расчетов (методом конечных элементов в программном пакете Comsol Multiphysics) распределения температуры и фаз вблизи поверхности образца в процессе селективного лазерного спекания.

В третьей главе представлены результаты комплексного экспериментального исследования свойств, полученные посредством проведения рентгеноструктурного анализа (РСА), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), а также магнитометрических измерений, быстрозакаленных сплавов на основе фазы $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. В работе исследовались быстрозакаленные сплавы достехиометрического (22 масс. % Pr), стехиометрического (26 масс. % Pr) и застехиометрического (30 масс. % Pr) составов. Приведены результаты моделирования процессов перемагничивания в исследуемых образцах.

В четвертой главе также представлены результаты комплексного экспериментального исследования свойств изотропных однослойных и объемных магнитотвердых материалов, изготовленных методом селективного лазерного спекания, при котором спекание лазером производилось за один цикл (однослойные) и спекание лазером проводилось несколько раз с добавлением порошка (объемные). Особое внимание, безусловно, уделено синтезу образцов. При синтезе образцов варьировались сразу несколько параметров: мощность лазерного излучения, диаметр пучка лазерного луча, скорость смещения пятна лазерного луча и другие. Максимальные значения коэрцитивной силы достигнуты для однослойных образцов: $H_C = 19,5$ кЭ непосредственно после спекания и $H_C = 23$ кЭ после дополнительных термообработок. Для установления основных механизмов формирования высококоэрцитивного состояния проведено моделирование процессов теплопереноса и фазовых превращений в образцах, полученных в результате селективного лазерного спекания.

В пятой главе описаны результаты экспериментального исследования магнитных гистерезисных свойств текстурированных порошков (образцы марки MQA) и изготавливаемых из них текстурированных образцов методом селективного лазерного спекания. Приведены оценки текстуры исходных магнитотвердых порошков, а также показаны результаты 3D-печати. Основное внимание уделено определению ключевых механизмов перемагничивания в исследованных образцах. Установлено, что именно комбинация двух механизмов: задержки формирования зародыша перемагничивания и задержки смещения доменных границ, является преобладающей для всех образцов, включая образцы, изготовленные методом селективного лазерного спекания.

Необходимо отметить, что описанные выше результаты получены и представлены впервые, что, безусловно, обеспечивает научную новизну данной диссертационной работы.

Вопросы и замечания

1. Диссертант сделал очень хороший обзор литературных данных, однако в работе отсутствует заключение по литературному обзору.

2. В работе, в которой исследуются магнитные гистерезисные свойства магнитотвердых материалов, практически не уделяется никакого внимания таким характеристикам, как остаточная намагниченность и максимальное энергетические произведение.

3. Объем работы выполнен достаточно большой, однако личный вклад автора выделен не в полной мере.

4. Не ясно, как контролировалась однородность образцов, полученных в результате применения селективного лазерного спекания. Возможно ли получение образцов с полностью воспроизводимыми свойствами или свойства будут отличаться?

5. Почему в работе не использовались такие информативные методы, как атомно- и магнитносиловая микроскопия? Какие методы использованы для оценки текстуры в образцах?

6. Замечание по организации текста диссертации сводится к отсутствию выводов по первым двум главам, отсутствием информации о температурах, при которых проводились исследования магнитных свойств, а также использование неопределенных фраз «распушение» магнитных моментов, распределение по коэрцитивностям зерен, механизмы перемагничивания представляют собой что-то среднее между задержкой смещения доменных границ и зародышеобразованием и др.

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

Общая оценка работы

Диссертация Мальцевой В.Е. содержит результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном уровне с применением современных методов исследования. Все научные положения, основные выводы и рекомендации, сформулированные автором, вполне обоснованы. Представленные в работе Мальцевой В.Е. результаты являются оригинальными и отвечают принятым критериям **научной значимости, новизны и достоверности.**

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 её автор, Мальцева Виктория Евгеньевна заслуживает присуждения ей степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
по специальности 01.04.11. – Физика магнитных явлений,
ведущий научный сотрудник кафедры
физики твердого тела физического факультета
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»,

Терёшина Ирина Семёновна

« 12 » мая 2025 г.

Контактная информация:

Тел.: +7 (495) 939-42-43,

e-mail: tereshina@physics.msu.ru

Адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова д. 1, строение 2, Физический Факультет

Подпись ведущего научного сотрудника кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», И.С. Терёшиной заверяю:

И.о. декана
физического факультета МГУ,
профессор



Белокуров В.В.