

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Уржумцева Андрея Николаевича «**Высококоэрцитивное состояние и особенности перемагничивания нано- и микрокристаллических сплавов на основе соединений типа $Nd_2Fe_{14}B$ и Sm_2Co_{17}** », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений

Актуальность и перспектива использования результатов работы

Редкоземельные магнитотвердые материалы вызывают повышенный интерес, особенно с точки зрения понимания процессов перемагничивания, необходимого для разработки новых перспективных составов и модификации уже известных, поиска способов контролируемого получения требуемых магнитных свойств, а также развития существующих и новых технологий для получения высокоэнергоемких постоянных магнитов. Применение уточненных знаний о процессах перемагничивания возможно в наиболее актуальном сегодня направлении, а именно, при получении магнитотвердых материалов методами аддитивных технологий.

Расширение наших представлений о процессах перемагничивания является несомненно важной задачей. На сегодняшний день уже имеются несколько основных моделей, однако часто проявляется и их несогласованность. Противоречия возникают из-за применения разных подходов к исследованию и интерпретации получаемых экспериментальных результатов. Сложности вызывает обобщение результатов микроскопии, магнитометрических методов и численного моделирования. Для дальнейшего развития технологической базы для производства постоянных магнитов важно детальное понимание процессов намагничивания и перемагничивания в них, а также выделение ключевых факторов, влияющих на механизмы формирования высокой коэрцитивности. По данной причине диссертационная работа Уржумцева А.Н., направленная на изучение механизмов формирования высококоэрцитивного состояния в магнитотвердых материалах, является крайне актуальной.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, перспективы дальнейшей разработки темы и списка использованных источников. Части диссертации хорошо согласованы и представляют единый текст. Общий объем диссертации – 177 страниц, включая 82 рисунка и 3 таблицы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность полученных экспериментальных результатов обеспечивается применением современного высокоточного измерительного оборудования и программных пакетов для обработки данных. Представленные в диссертации выводы хорошо согласуются с результатами экспериментов. Полученные результаты не противоречат современным представлениям о процессах перемагничивания.

Оценка содержания диссертации

Диссертантом четко сформулирована цель научной работы и подобраны объекты исследования. Данное исследование является полезным, как с точки зрения фундаментальной значимости, так и практической. Для достижения заявленной цели

последовательно решаются логически выстроенные задачи комплексной аттестации исследуемых образцов, определения их состава и микроструктурного состояния, последующее детальное исследование магнитных гистерезисных свойств и их интерпретация с применением элементов моделирования. По окончании рассмотрения каждого типа магнитов предложена модель, учитывающая механизмы как намагничивания, так и перемагничивания.

Основные результаты исследования отражены в трех оригинальных главах. Наиболее значимой по объему можно выделить **третью главу** диссертации, в которой рассмотрены процессы перемагничивания в спеченном микрокристаллическом магнитотвердом материале на основе фазы $Nd_2Fe_{14}B$. В этой главе показано, что в похожих по составу и структуре образцах магнитотвердого материала могут реализовываться различные механизмы высококоэрцитивного состояния в зависимости от дефектности микроструктуры образца: образцы со значительным числом дефектов внутри зерен намагничиваются в больших полях и им свойственен механизм задержки смещения доменных границ при перемагничивании, в то время как в случае практически полного отсутствия дефектов, определяющим становится механизм задержки зародышеобразования. В этой главе предложен метод косвенной оценки механизма перемагничивания на основе анализа зависимостей обратимой магнитной восприимчивости от напряженности магнитного поля. Сравнение величины начальной обратимой магнитной восприимчивости и восприимчивости при приложенном намагничивающем поле, близком по напряженности к коэрцитивной силе, позволяет получить вполне определенные представления о механизме перемагничивания данного материала.

В главе предложен и опробован **новый** подход для установления механизмов перемагничивания, основанный на оценке обратимого вклада в остаточную намагниченность. Показано наличие аномалий на полевой зависимости обратимой части намагниченности как при намагничивании, так при размагничивании. Представлен **оригинальный** подход к оценке механизма перемагничивания, основанный на анализе частных петель гистерезиса. Продемонстрированы результаты анализа частных петель гистерезиса, измеренных из терморазмагниченного состояния при пошаговом увеличении намагничивающего поля, которые показывают, что зависимости намагниченности и остаточной намагниченности от напряженности магнитного поля образцов из спеченного сплава Nd-Fe-B, полученные из частных петель, не являются монотонными. Этот довольно необычный на первый взгляд результат получил разумное объяснение и обусловлен особенностями формирования собственного размагничивающего поля в процессе намагничивания. Степень уменьшения максимальной намагниченности на частных петлях гистерезиса определяется механизмом перемагничивания. В случае задержки смещения доменных границ упомянутая особенность проявляется в гораздо меньшей степени, чем в случае задержки зародышеобразования.

В **четвертой главе** представлены результаты исследования механизмов перемагничивания нанокристаллического магнитотвердого материала Nd-Fe-B, полученного методом HDDR, сплава марки MQA. Размер зерен данного материала таков, что он может оказывать сильное влияние на процессы перемагничивания, а,

следовательно, и дополнять уже имеющиеся представления об особенностях процессов перемагничивания в материалах на основе практически важного соединения $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

В диссертации с помощью использованных магнитометрических методов показано, что в таком материале возникает сильное магнитоэлектрическое взаимодействие между доменами в отдельных зернах, что приводит к затрудненному намагничиванию образцов. В работе получен образец с хорошей парамагнитной изоляцией зерен путем инфильтрации сплава легкоплавкой добавкой Nd-Co-Cu. Проведенная процедура привела к увеличению коэрцитивной силы.

В пятой главе рассмотрены процессы перемагничивания в магнитотвердом материале $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Zr}, \text{Cu})_z$. Применение магнитометрических методов оценки (подробно рассмотренных в предыдущих главах) позволило предположить, что в исследуемом материале в терморазмагниченном состоянии могут присутствовать незакрепленные доменные границы.

Предложена модель, в рамках которой в рассматриваемых материалах на основе соединения $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ перемагничивание протекает за счет двух основных механизмов, а именно, задержки возникновения зародышей и задержки смещения доменных стенок между соседними зёрнами. Представлена графическая интерпретация предложенной модели процессов перемагничивания.

Вопросы и замечания

1. Представленный в работе метод определения наличия свободных доменных стенок и факта их закрепления или исчезновения, в состоянии остаточной намагниченности из зависимостей обратимой магнитной восприимчивости под действием переменного возбуждающего поля, хотя и является логически обоснованным и хорошо согласуется с представлениями в рамках работы, является исключительно косвенным, что не позволяет однозначно установить факт их присутствия. Для большей достоверности его необходимо подкрепить результатами прямых наблюдений доменных стенок, например, методами Керр микроскопии.

2. В работе хотя и используются как микроструктурные исследования, так и исследования магнитных свойств заявленных образцов, однако при обсуждении полученных результатов эти данные рассматриваются отдельно друг от друга. Следует отметить, что подобные исследования могли бы быть выполнены на одних и тех же образцах, для получения важной информации и стать взаимодополняющими.

3. Хотелось бы получить более расширенную информацию о текстурированных образцах, как они были получены, как оценивалась степень текстуры и т.п.

4. Список литературы только частично сделан по ГОСТу и не отражает полностью всех достижений, имеющихся в области данного исследования.

5. В работе имеются стилистические ошибки и опечатки, повтор текста. Кроме того, имеются общеизвестные факты, которые представляются как результат. Например, «Полученные результаты подтверждают, что механизмы перемагничивания сложно разделить однозначно». Много странных словосочетаний – «...можно представить гипотезу...», «...наталкивает на мысль...», «...довольно наглядно...» и др.

Отмеченные вопросы и замечания не снижают положительного восприятия работы диссертанта и высокого уровня проведенных исследований, а также, безусловно, не оказывают влияния на общую положительную оценку диссертационной работы Уржумцева А.Н.

Общая оценка работы

В целом можно сказать, что диссертация Уржумцева А.Н. является логически завершенным исследованием, в котором решаются актуальные научные задачи, обусловленные потребностями современной научно-технической сферы. Работа Уржумцева А.Н. полностью удовлетворяет критериям, представляемым к диссертационным работам. 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, 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, Уржумцев Андрей Николаевич, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник кафедры
физики твердого тела физического факультета
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова»,

Терёшина Ирина Семёновна



01 декабря 2022 г.

Контактная информация:

Тел.: +7 (495) 939-42-43,

e-mail: tereshina@physics.msu.ru

Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2

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

И.о. декана
Физического факультета МГУ



Белокуров В.В.