

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Уржумцева Андрея Николаевича «Высококоэрцитивное состояние и особенности перемагничивания нано- и микрокристаллических сплавов на основе соединений типа $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений.

Актуальность работы

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью поиска различных экспериментальных и теоретических подходов, позволяющих целенаправленно реализовывать максимально теоретически возможную коэрцитивную силу в постоянных магнитах на основе различных магнитотвердых материалов. Одним из таких возможных подходов является анализ процессов намагничивания и перемагничивания в реальных образцах постоянных магнитов и в материалах, используемых для их приготовления, чему и посвящено исследование, выполненное в диссертационной работе.

Оценка проведенного исследования и полученных результатов

Диссертационная работа Уржумцева А.Н. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка 147 использованных источников. Общий объем диссертации составляет 177 страниц, включая 82 рисунка.

Во введении автором обоснованы актуальность и научная новизна исследования, выбор образцов и методов исследования, сформулированы цели и задачи работы, представлены положения, выносимые на защиту, обозначены теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе изложен литературный обзор по теме исследования. В обзоре рассмотрены основные механизмы необратимого перемагничивания и факторы, приводящие к формированию коэрцитивной силы в магнитных материалах. Приведены выражения для коэрцитивной силы, получаемые в рамках различных моделей необратимого перемагничивания. Рассмотрена кристаллическая решетка, микроструктура, магнитные свойства и модели перемагничивания магнитотвердых сплавов $\text{Sm}(\text{Co,Fe,Cu,Zr})_z$ и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, которые широко используются для производства постоянных магнитов и являются объектами исследования в диссертационной работе.

Во второй главе подробно описан состав исследованных образцов и методы их получения. Описаны экспериментальные методики и оборудование, использованные для исследования микроструктуры и магнитных свойств образцов. Описаны основные подходы, примененные для анализа процессов перемагничивания в исследуемых материалах:

- измерение и анализ магнитной восприимчивости;
- измерение и анализ угловых зависимостей коэрцитивной силы;
- расчеты с использованием программного пакета Comsol Multiphysics;
- измерение и анализ построений Келли;
- измерение и анализ построений графиков $\Delta\sigma(H)$.

В третьей главе изложены результаты исследования микроструктуры и процессов перемагничивания в магнитотвердых материалах на основе спеченных порошков $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ с размерами порошинок 25-45 мкм. Получены: частные петли гистерезиса на основе которых приведены зависимости $\sigma(H)$, $\sigma_r(H)$ и коэрцитивной силы $H_c(H)$ от максимального намагничивающего поля H , графики Келли $\delta M(H)$, зависимости обратимой восприимчивости в поле $\chi(H)$ и остаточной восприимчивости $\chi(H = 0)$ после его выключения. Получены зависимости коэрцитивной силы $H_c(\theta)$ и релаксационной

коэрцитивной силы $H_c(\theta)$ от угла ориентации оси текстуры образца к размагничивающему полю. Представлены концепции механизмов высококоэрцитивного состояния в исследуемых образцах спеченных магнитотвердых материалов в зависимости от их микроструктуры. Предложен подход к дополнению модели Кондорского для описания угловых зависимостей коэрцитивной силы $H_c(\theta)$ в рамках механизма пиннинга, с учетом внутренних магнитных полей, создаваемых уже перемагнитившимися зернами образца. Показано, что предложенная модель показывает лучшее согласие с экспериментом в случае спеченных магнитотвердых материалов Nd-Fe-B. Полученные результаты косвенно подтверждают представления о том, что в спеченных микрокристаллических магнитотвердых материалах типа Nd-Fe-B ключевым механизмом высококоэрцитивного состояния является задержка смещения доменных границ, при этом, при углах более 70° между направлением внешнего магнитного поля и ближайшим направлением оси текстуры, превалирующим становится механизм обратимого вращения векторов намагниченности.

В четвертой главе представлены результаты исследования процессов перемагничивания изотропных и текстурированных нанокристаллических порошков сплава Nd-Fe-B марки MQA-38-14 с размерами зерен порядка 50 нм, полученных методом HDDR (Hydrogenation-Decomposition-Desorption-Recombination). Предложена модель перемагничивания порошка как в изотропном, так и текстурированном состоянии. Показано влияние текстуры на процессы намагничивания и перемагничивания в разных методиках анализа процессов перемагничивания. Установлено, что предложенный метод выявления превалирующего механизма формирования высококоэрцитивного состояния исходя из анализа обратимого вклада в намагниченность $\sigma(H) - \sigma_r(H)$ оказался чувствителен к текстуре исследуемого образца магнитотвердого материала и не применим к объектам с низкой степенью текстуры. Выявлено, что в процессе намагничивания нанокристаллического текстурированного сплава Nd-Fe-B (MQA) наблюдается тенденция к закреплению доменных стенок на границах зерен, при этом в процессе перемагничивания данного материала преобладает процесс, подобный задержке формирования зародыша перемагничивания, когда сформировавшийся зародыш перемагничивает значительный объем частицы материала.

В пятой главе изучены процессы перемагничивания в спеченных магнитотвердых соединениях $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Zr}, \text{Cu})_{6.3}$. Магнитометрические методы в соответствии с существующими моделями показывают, что пиннинг является не единственно возможным механизмом перемагничивания для данного класса высококоэрцитивных спеченных материалов. Показано наличие мультидоменных зерен в спеченных образцах на основе сплавов $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Zr}, \text{Cu})_{6.3}$. Предложена модель механизма перемагничивания, позволяющая объяснить всю совокупность свойств магнитотвердых материалов типа $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Zr}, \text{Cu})_z$. В целом, показано, что процессы перемагничивания в данных соединениях более сложны, чем механизм пиннинга.

Научная новизна и практическая значимость работы

В качестве основной новизны работы хотелось бы отметить комплексный подход к исследованию процессов намагничивания, примененный в диссертации. Автором использованы 5 методов анализа процессов перемагничивания на одних и тех же образцах. Четыре экспериментальных метода, основанных на различных магнитных измерениях и их анализе: измерение и анализ магнитной восприимчивости; измерение и анализ угловых зависимостей коэрцитивной силы; измерение и анализ построений Келли; измерение и анализ построений графиков $\Delta\sigma(H)$ и один теоретический с использованием микромагнитного моделирования в рамках программного пакета Comsol Multiphysics. Это позволило получить следующие новые результаты.

Показано, что при эквивалентных значениях остаточной намагниченности и максимального энергетического произведения, но различных величинах коэрцитивной силы спеченных образцов Nd-Fe-B, превалирующим механизмом перемагничивания может выступать как задержка смещения доменных стенок, так и задержка зародышеобразования.

Показаны различия между размагниченными термически и внешним магнитным полем состояниями спеченных образцов на основе соединения типа $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. В терморазмагниченном состоянии в нанокристаллических ячейках основной фазы $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ образцов $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Zr}, \text{Cu})_z$ присутствуют незакрепленные доменные границы, при размагничивании внешним полем наличие таких доменных границ не установлено.

Предложена модель перемагничивания спеченных образцов составов $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Zr}, \text{Cu})_z$, учитывающая роль обогащенной цирконием фазы. Отличие данной модели от общепринятой заключается в том, что фаза, обогащенная Zr, выступает не только в роли места задержки доменной границы, но также в качестве места формирования зародыша перемагничивания. Показано, что процессы перемагничивания в таких образцах не могут быть корректно описаны в рамках модели одного механизма перемагничивания.

Предложено дополнение модели Кондорского, состоящее в учете магнитостатического взаимодействия между зёрнами. Предложенное дополнение приводит к улучшению аналитического описания экспериментально получаемых зависимостей коэрцитивной силы магнитотвердых материалов, в которых основным механизмом высококоэрцитивного состояния является задержка смещения доменных стенок, от угла между осью текстуры и направлением размагничивающего поля.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов для получения высококоэрцитивного состояния в постоянных магнитах на основе различных магнитотвердых материалов.

Вопросы и замечания

- 1.) В работе имеются опечатки. В частности, в названии Главы 5 в разделе Научная новизна и в других частях текста указываются, что получены результаты для сплавов с $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Zr}, \text{Cu})_z$ со стехиометрией 1:6.5-8.5, хотя в работе исследованы только два сплава со стехиометрией 1:6.63 типа $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Zr}, \text{Cu})_{6.63}$ с разным соотношением Co, Fe, Zr.
- 2.) В тексте не приведен химический состав сплавов N35, N48, N48SH и MQA-38-14.
- 3.) Наиболее важной областью для применения сплавов $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_z$ является область температур значительно выше комнатной. Именно для высокотемпературных применений эти сплавы и предназначены. Известно также, что в сплавах $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_z$ происходит изменение механизма перемагничивания от задержки смещения доменных границ (пиннинга) при комнатных температурах до зародышеобразования при температурах выше комнатной. Автором диссертации проведены исследования процессов перемагничивания в сплавах $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_{6.3}$ только при комнатной температуре. В связи с этим возникает вопрос. Можно ли на основе полученных результатов спрогнозировать свойства сплавов $\text{Sm}(\text{Co}, \text{Fe}, \text{Cu}, \text{Zr})_{6.3}$ при температурах выше комнатной или необходимо провести анализ процессов перемагничивания с использованием применяемых автором методик при более высоких температурах?
- 4.) В Главах 3 и 5 для исследования использовались образцы постоянных магнитов, изготовленные на предприятии ООО «ПОЗ-Прогресс» (г. Верхняя Пышма). В связи этим возникает вопрос. Можно ли на основе проведенных исследований предложить предприятию какие-нибудь рекомендации по улучшению магнитных свойств производимых предприятием магнитов?

5.) На мой взгляд одно из положительных качеств диссертационной работы заключается в использовании комплексного подхода к исследованию процессов намагничивания, примененного в диссертации. Автором использованы 5 методов анализа процессов перемангничивания на одних и тех же образцах. Четыре экспериментальных метода, основанных на различных магнитных измерениях и их анализе и один теоретический с использованием микромагнитного моделирования. В связи с этим возникает вопрос - какие методы анализа процессов перемангничивания являются наиболее информативными по мнению автора, ведь использование всех методов является весьма трудоемким занятием?

В целом, высказанные замечания не влияют на общий высокий научный уровень представленных в диссертационной работе результатов, а вопросы носят скорее дискуссионный и рекомендательный характер.

Общее заключение

Диссертационная работа Уржумцева А.Н. соответствует требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней УрФУ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, поскольку является цельной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития физики магнитных явлений. Полученные в диссертационной работе Уржумцева А.Н. результаты опубликованы в статьях, включенных в список ВАК и индексируемых в международных базах Scopus или Web of Science. Работа прошла апробацию на международных и всероссийских конференциях с личным участием автора. Тематика диссертации соответствует паспорту специальности: 1.3.12 – Физика магнитных явлений, а ее автор Уржумцев Андрей Николаевич заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией перспективных магнитных материалов,
ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения
Российской академии наук

Герасимов Евгений Германович



25 ноября 2022 года

Контактная информация:

Тел.: +7 (343) 3783693, e-mail: gerasimov@imp.uran.ru
620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

Подпись заведующего лабораторией перспективных магнитных материалов ФГБУН
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской
академии наук

Е.Г. Герасимова удостоверяю:

И.о. ученого секретаря ИФМ УрО РАН



А.М. Поволожко