

## 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 темы исследования**

Актуальность тематики диссертационной работы Уржумцева А.Н. «Высококоэрцитивное состояние и особенности перемагничивания нано- и микрокристаллических сплавов на основе соединений типа  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  и  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ » определяется выбором в качестве цели работы проблемы оценки механизмов высококоэрцитивного состояния в современных магнитотвердых материалах и постоянных магнитах на их основе, которая в настоящее время не нашла окончательного решения. Без более глубокого понимания механизмов формирования гистерезисных свойств невозможно решать такие важные задачи, как получение магнитотвердых материалов, постоянных магнитов с заданными свойствами и повышение их максимального энергетического произведения. Весьма удачным для решения поставленной цели является выбор в качестве объектов исследования магнитотвердых сплавов на основе интерметаллических соединений  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  и  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , ставших в последние десятилетия основой для создания уникальных постоянных магнитов, нашедших широкое практическое применение. Хотя данные магнитотвердые материалы многие годы активно исследуются известными научными группами, проблема реализации в постоянных магнитах на их основе энергетического произведения, близкого к теоретическому пределу, остается до настоящего времени не решенной. В значительной степени это связано с недостаточно глубоким пониманием особенностей процессов перемагничивания в них. Выбор в работе таких объектов исследования является интересным еще и потому, что, согласно устоявшимся представлениям, для магнитов на основе соединения  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  доминирующим механизмом магнитного гистерезиса признан механизм задержки образования и роста доменов обратного знака, а для магнитов на основе соединения  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  – механизм задержки смещения доменных границ. Хотя классические модели протекания процессов перемагничивания в магнитах различных типов на основе соединений  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  и  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  в основном разработаны еще в прошлом столетии, остается еще много нерешенных вопросов и неоднозначных трактовок при обсуждении процессов

перемагничивания в рассматриваемых материалах. Число таких вопросов в последние годы только возрастает в связи с созданием новых технологий получения и, соответственно, появлением новых типов постоянных магнитов, а также и более совершенных методов анализа структурного состояния вещества.

Поэтому детализация механизмов формирования высокой коэрцитивной силы в перечисленных выше материалах с использованием новых возможностей, которые дает современное научное оборудование, является весьма актуальным.

### **Оценка проведенного исследования и полученных результатов**

В работе Уржумцева А.Н. выполнено комплексное систематическое исследование механизмов перемагничивания магнитотвердых материалов на основе соединений  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  и  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  в мелкодисперсном и спеченном виде. Несомненным достоинством работы является то, что объектами исследования стали коммерческие магнитотвердые материалы, такие как сплавы на основе фазы  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  марок N35, N48, N48SH, а также  $\text{Sm}(\text{Co}_{0,796-x}\text{Fe}_{0,177}\text{Cu}_x\text{Zr}_{0,027})_{6,63}$ , предоставленные предприятием ООО «ПОЗ-Прогресс». Кроме того, исследованы нанокристаллические сплавы Nd-Fe-B марки MQA-38-14, полученные методом HDDR фирмой Magnaquench Ltd. Как известно, в большинстве исследований объектами являются лабораторные образцы постоянных магнитов. Важные эксплуатационные характеристики коммерческих материалов, как правило, уступают лабораторным образцам. Поэтому весьма важно выявить причины таких различий, что не только полезно технологам, но и необходимо для более полного понимания природы этих различий.

Анализ диссертационной работы Уржумцева А.Н. позволяет сделать вывод о том, что подход к решению поставленных задач, выбранный в рецензируемой диссертационной работе, можно назвать системным.

**Первая глава** диссертации в значительной степени отражает формирование представлений о природе и механизмах магнитного гистерезиса. Приведены сведения об актуальных моделях высококоэрцитивного состояния и методах выявления в материалах доминирующего механизма коэрцитивной силы. Рассмотрены наиболее известные модели процессов перемагничивания: Е.И.Кондорского, Стонера-Вольфарта, Кнеллера-Хавига и ряд других.

**Вторая глава** содержит основные сведения об исследуемых образцах, способах их получения, термообработках и базовых магнитных свойствах. Представлен детальный обзор методик аттестации микроструктуры исследуемых образцов, трактовки результатов магнитных измерений и моделирования. Указан перечень измерительного оборудования для каждого этапа исследования.

**Третья, четвертая и пятая** главы работы содержат результаты комплексного исследования процессов намагничивания и перемагничивания спеченных магнитотвердых материалов на основе соединения  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , порошков нанокристаллических сплавов Nd-Fe-B марки MQA-38-14 и спеченных материалов состава  $\text{Sm}(\text{Co}_{0,796-x}\text{Fe}_{0,177}\text{Cu}_x\text{Zr}_{0,027})_{6,63}$  на основе соединения  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ .

В качестве положительного момента следует отметить, что все три главы, в которых содержатся полученные автором экспериментальные данные и выполнено их обсуждение, имеют одинаковую структуру. В начале каждой главы дается детальная характеристика микроструктуры исследуемых в главе материалов, выявленная методами сканирующей электронной микроскопии, в том числе построены картины распределения элементов в фазовых составляющих исследованных образцов на основе данных энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Далее в главах приводятся результаты магнитных измерений, выполненные не только с использованием практически всех известных методов анализа механизмов процессов намагничивания и перемагничивания в магнитных материалах, но и предложенных автором данного диссертационного исследования.

Анализ полученных результатов магнитных измерений с использованием известных и специально разработанных магнитометрических методик дополнен в работе элементами моделирования, что вместе со сведениями о характере микроструктуры исследуемых объектов дало возможность автору сформировать выводы и положения диссертационной работы о природе процессов намагничивания и перемагничивания в рассматриваемых магнитотвердых материалах и постоянных магнитах.

Такой комплексный подход позволил также расширить представления о методах выявления механизма высококоэрцитивного состояния применительно к объектам, имеющим большое число особенностей в микроструктуре, что позволяет рассчитывать на применение предложенных автором методик к широкому кругу образцов постоянных магнитов.

### **Достоверность представленных результатов**

Достоверность приведенных в работе результатов обеспечивается применением современного высокоточного измерительного оборудования, такого как рентгеновский дифрактометр Bruker B8 Advance, сканирующие электронные микроскопы Tescan Mira3 LMU и Zeiss Supra 40, вибрационный магнитометр КВАНС – 1, гистерезиограф Magnet-Physik Permagraph L, измерительные установки Quantum Design MPMS XL 7 EC и Quantum Design PPMS DynaCool с опцией Vibrating Sample Magnetometer. Результаты, полученные различными методами, согласуются между собой и объясняются

в рамках предложенных моделей перемагничивания. Подход к анализу результатов магнитометрических методов объединен в общую концепцию и применен к разным по механизму высококоэрцитивного состояния образцам магнитотвердых материалов.

### **Научная новизна и практическая значимость работы**

Научная новизна полученных в работе результатов обусловлена не только системностью комплексного подхода автора, выбранного для достижения цели работы, но и выбором в качестве объектов исследования не лабораторных модельных объектов, а промышленно получаемых магнитотвердых сплавов и постоянных магнитов на их основе. Такие объекты имеют более сложную микроструктуру, чем исследуемые обычно лабораторные образцы, что, естественно, должно находить отражение в особенностях процессов перемагничивания.

В результате такой постановки задачи в работе показано, что процессы намагничивания и перемагничивания изученных в работе спеченных магнитотвердых материалов значительно отличаются от имевшихся ранее представлений.

Для работы с такими сложными объектами, как промышленно изготавливаемые магнитотвердые материалы, автор предложил и обосновал новые подходы к оценке механизма перемагничивания, базирующиеся на измерении кривых намагничивания и зависимостей остаточной намагниченности от напряженности предварительно приложенного магнитного поля, а также обратимой восприимчивости из термически размагниченного состояния.

В результате обнаружено, что при аналогичных значениях остаточной намагниченности и максимального энергетического произведения исследованных в работе магнитотвердых материалов типа Nd-Fe-B, имеющих различную величину коэрцитивной силы, превалирующим механизмом перемагничивания может выступать как задержка смещения доменных границ, так и задержка зародышеобразования.

Предложена модель перемагничивания спеченных образцов составов Sm(Co, Fe, Zr, Cu)<sub>6,5-8,5</sub>, по новому учитывающая роль обогащенной цирконием фазы, которая может быть не только центром задержки доменной границы, но и местом формирования зародыша перемагничивания.

Усовершенствована модель Е.И.Кондорского, в которую включен учет влияния магнитостатического взаимодействия между зернами, что улучшило аналитическое описание экспериментально получаемых зависимостей коэрцитивной силы магнитотвердых материалов, имеющих в качестве доминирующего механизма высококоэрцитивного состояния задержку смещения доменных границ.

Перечисленные выше новые научные результаты имеют не только научную, но и высокую практическую значимость, так как высококоэрцитивные магнитотвердые материалы являются функциональными материалами,

нашедшими широкое применение не только в наукоемких и высокотехнологичных устройствах специального назначения, но и в бытовой технике, автомобилестроении и др. Более глубокое понимание процессов перемагничивания таких материалов открывает пути их дальнейшего совершенствования и определяет перспективные направления работ в области поиска новых, более совершенных магнитотвердых материалов и постоянных магнитов.

### **Рекомендации и замечания**

Диссертационную работу Уржумцева А.Н. можно считать завершённым исследованием, в котором в полной мере реализованы поставленные цель и задачи. Вместе с тем по работе можно сделать следующие замечания и рекомендации, которые желательно учесть при дальнейшей работе.

1. Выбор для обзора литературы по теме диссертации формы исторической справки нельзя назвать удачным в силу сложности затронутых в работе проблем и многочисленности и неоднозначности мнений различных научных групп на природу гистерезисных процессов в рассматриваемых группах материалов. Такой выбор не позволил автору не включить в обзор избыточную для данной работы информацию и избежать отдельных неточностей при изложении.
2. В работе рассмотрены промышленно выпускаемые магнитотвердые материалы, что делается достаточно редко. Работа бы только выиграла, если бы автор уделил большее внимание природе различий в магнитных гистерезисных свойствах исследованных материалов и лабораторных образцов близких по составу постоянных магнитов.
3. В диссертации присутствуют стилистические ошибки и опечатки, к сожалению, их достаточно много. Например, в таблице 1 на стр. 32 в качестве единицы измерения намагниченности указан Тесла.

Отмеченные замечания в значительной степени носят характер пожеланий автору и не влияют на достоверность полученных автором результатов, справедливость сформулированных в работе положений и общую положительную оценку диссертационной работы Уржумцева А.Н.

### **Общее заключение**

Диссертация Уржумцева А.Н. является квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне по актуальной тематике, содержит новые научные результаты, имеющие фундаментальную и прикладную значимость. Полученные в диссертационной работе результаты опубликованы в 3 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus. Работа прошла хорошую апробацию на 14 авторитетных международных и всероссийских научных конференциях с личным участием


автора диссертации. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации.

Профиль диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений. В целом, диссертационная работа Уржумцева А.Н. «Высококоэрцитивное состояние и особенности перемангничивания нано- и микрокристаллических сплавов на основе соединений типа  $Nd_2Fe_{14}B$  и  $Sm_2Co_{17}$ » удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней УрФУ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
физики конденсированного состояния  
ФГБОУ ВО «Тверской государственной  
университет»

Пастушенков Юрий Григорьевич



29 ноября 2022 г.

Контактная информация:

Тел.: +7 (910) 648-66-89,  
e-mail: Pastushenkov.YG@tversu.ru  
170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.

Подпись заведующего кафедрой физики конденсированного состояния  
ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»  
Ю.Г.Пастушенкова удостоверяю:

Подпись заведующего кафедрой физики конденсированного состояния  
ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет»  
Пастушенкова Ю.Г. удостоверяю:

Врио ректора



Смирнов С.Н