

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Савченко Александра Григорьевича «Закономерности формирования высококоэрцитивного состояния в микро- и нанокристаллических магнитотвёрдых материалах на основе сплавов системы Nd-Fe-B», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния и состоявшейся в НИТУ МИСИС 25 июня 2024 года

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 18 марта 2024 года, протокол № 18.

Диссертация выполнена в научно-исследовательской лаборатории постоянных магнитов и на кафедре физического материаловедения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС), Министерство образования и науки Российской Федерации.

Научный консультант – Лилеев Алексей Сергеевич, доктор физико-математических наук, ведущий эксперт по учебно-методической работе кафедры физического материаловедения НИТУ МИСИС.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол № 18 от 25 июня 2024 г.) в составе:

1. Калошкин Сергей Дмитриевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Института новых материалов и нанотехнологий НИТУ МИСИС – председатель комиссии.
2. Мухин Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической физики и квантовых технологий НИТУ МИСИС.
3. Ховайло Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС.
4. Конюхов Юрий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС.
5. Перов Николай Сергеевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой магнетизма Отделения физики твёрдого тела Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.
6. Зверев Владимир Игоревич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной ядерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».
7. Мушников Николай Варфоломеевич – доктор физико-математических наук, директор федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

В качестве ведущей организации утверждено федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук, г. Черноголовка.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- сформулированная система ключевых требований к составам и структуре материалов, а также способы их реализации на практике при получении магнитотвердых материалов, содержащих редкоземельные металлы, с экстремально высокими гистерезисными свойствами, – разработанная научная концепция формирования магнитных гистерезисных свойств позволяет выявить корреляции между структурными и гистерезисными характеристиками и механизмы, оказывающие критическое влияние на уровень достигаемых магнитных свойств;

- предложена метастабильная диаграмма системы Nd-Fe и схема фазовых превращений в сплавах Nd-Fe, позволившая разделить эффекты «магнитного» и «фазово-структурного» твердения, а также объяснить сложное поведение коэрцитивной силы магнитов Nd-Fe-B после низкотемпературных отжигов;

- разработан и запатентован *«метод смесей»*, предлагаемый к промышленному внедрению для получения магнитотвердых материалов с экстремально высокими гистерезисными свойствами;

- установлены закономерности влияния содержания бора и неодима, а также легирующих элементов на склонность к аморфизации, кинетику кристаллизации, фазовый состав, структуру и магнитные гистерезисные свойства быстрозакаленных сплавов Nd-Fe-B;

- в результате экспериментальных исследований и микромагнитного анализа магнитных гистерезисных свойств порошков быстрозакаленного сплава на основе неодима, показано что их высокая коэрцитивная сила при температурах до 150⁰С достигается совместным влиянием эффектов закрепления доменных границ и трудностью зарождения доменов обратной намагниченности, а при более высоких температурах – процессами зарождения доменов обратной намагниченности;

- впервые построенные и проанализированные диаграммы *«температура обработки – фазовый состав – магнитные гистерезисные свойства»* позволили установить закономерности изменения фазово-структурного состояния и гистерезисных свойств быстрозакалённого сплава Nd_{10,4}Zr_{4,0}Fe_{75,1}Co_{4,1}B_{6,4} после термообработок.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- разработаны научные основы поиска новых композиций спечённых постоянных магнитов на основе сплавов системы Nd-Fe-B с экстремально высокими гистерезисными характеристиками, а также экономно легированных, работающих при низких температурах;

- предложены и апробированы на практике способ и принципы выбора систем легирования сплавов Nd-Fe-B, основу которых составляет инжиниринг границ и *«декорирование»* поверхности зёрен магнитотвёрдой фазы;

- показано, что применение регрессионных методов для анализа экспериментально полученных зависимостей коэрцитивной силы от температуры в рамках расширенного микромагнитного подхода позволяет судить о характере и степени значимости различий и сходства микромагнитных параметров магнитов из сплавов Nd-Fe-B разного состава и различных систем легирования;

результаты анализа процессов намагничивания и перемагничивания спеченных постоянных магнитов на основе сплавов системы Nd-Fe-B, позволили установить, что высоко коэрцитивное состояние в микрокристаллическом состоянии контролируется процессами зарождения доменов обратной намагниченности.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что полученные в работе результаты могут стать научной основой эффективных технологических решений и разработки новых композиций микрокристаллических спечённых магнитов с улучшенными свойствами, которые возможно осуществить на оборудовании существующих или планируемых к созданию производственных предприятиях. Важным практическим результатом можно считать экспериментально установленные закономерности влияния замещения Fe атомами Al, Co, Cr, Cu, Mo, Ti, V или Zr в достехиометрическом сплаве Nd-Fe-B на фазовый состав литых сплавов, а также на различный характер кристаллизации быстрозакалённых порошков и коэрцитивную силу. Ещё одним практически важным результатом являются данные по влиянию различных систем легирования на гистерезисные свойства МТМ на основе сплавов систем R-Fe-B, где R – РЗМ, Dd, MM или их смеси, получаемых «методом смесей», которые могут быть использованы при разработке новых композиций спечённых магнитов с улучшенными гистерезисными характеристиками, или для повышения эксплуатационных характеристик выпускаемых спечённых магнитов.

Достоверность результатов исследования обеспечена научно обоснованным выбором принципов создания оптимальных композиций и технологии получения высокоэнергетических и/или высококоэрцитивных микрокристаллических спечённых магнитов на основе сплавов системы Nd-Fe-B, их экспериментальной верификацией на широком спектре составов, использованием современных методов исследования и высокоточных приборов при изучении фазового состава, структуры и магнитных свойств сплавов, обработкой полученных результатов с использованием специализированного программного обеспечения. Получен большой объём экспериментальных данных с использованием современных высокоточных и высокочувствительных методов анализа и испытаний, произведена их корректная обработка и интерпретация, имеет место согласованность полученных результатов с результатами других научных групп, опубликованных в литературе по теме работы, и их непротиворечивость современным материаловедческим положениям.

Личный вклад соискателя состоит в:

- формулировке общей концепции, анализе состояния вопроса по теме работы, в формулировке целей и постановке задач, составлении плана проведения исследований и испытаний, в проведении научных экспериментов на всех этапах работы, в получении, обработке, анализе и обобщении результатов, формулировании выводов;

- определении направления разработки композиций, включая определение оптимальных систем и способов легирования, методов получения магнитотвердых материалов, постановке задач исследований, выборе объектов исследований и основных методик проведения экспериментов;

- разработке и обосновании новой порошковой технологии для высокоэнергетических и/или высококоэрцитивных спечённых магнитов на основе сплавов системы Nd-Fe-B.

По теме диссертационной работы опубликовано 56 печатных работ, из которых 47 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ (40 – в базах Web of Science/Scopus; 3 – патента).

Пункт 2.6 «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС» соискателем ученой степени **не нарушен**.

Диссертация Савченко А.Г. соответствует критериям раздела 2 «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСиС», так как в ней на основании выполненных автором исследований разработаны научно-технологические подходы к созданию оптимальных структурно-фазовых состояний, обеспечивающих разработку высококоэрцитивных магнитотвердых материалов, соответствующих лучшим мировым образцам. Совокупность научно-практических результатов позволяет развивать новое направление создания материалов для современных постоянных магнитов с высоким уровнем функциональных характеристик, внедрение которых внесет значительный вклад в научно-техническое развитие РФ.

Экспертная комиссия приняла решение присудить А.Г. Савченко ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Результаты голосования: при проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 6 человек, участвовавших в заседании, из 7 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 6 человек, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии

С.Д. Калошкин

25.06.2024 г.