

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Семаидой Ашрафом Масудом Абделхади на тему **«Особенности формирования высококоэрцитивного состояния в нанокompозитах на основе гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ и быстрозакалённого сплава системы Nd-Fe-B, полученных методом высокоэнергетического измельчения»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», состоявшейся в НИТУ «МИСиС» 21.12.2022 г.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» 17.10.2022 г., протокол № 5.

Диссертация выполнена 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 руководитель – кандидат физико-математических наук Савченко Александр Григорьевич, заведующий кафедрой физического материаловедения НИТУ «МИСиС».

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ «МИСиС» (протокол № 5 от 17.10.2022 г.) в составе:

1. **Панина Лариса Владимировна** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры технологии материалов электроники НИТУ «МИСиС» – председатель комиссии;
2. **Калошкин Сергей Дмитриевич** – доктор физико-математических наук, профессор, директор ИНМиН НИТУ «МИСиС»;
3. **Ховайло Владимир Васильевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ «МИСиС»;
4. **Перов Николай Сергеевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой магнетизма Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова;
5. **Менушенков Алексей Павлович** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твёрдого тела и наносистем Института лазерных и плазменных технологий Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

В качестве ведущей организации утверждено Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт металлургии и**

материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), г. Москва.

Экспертная комиссия отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- заложены теоретические и практические основы процессов получения методом высокоэнергетического измельчения и последующего отжига перспективных магнитотвёрдых материалов, в том числе нанокпозиционных, находящихся в обменно-связном состоянии, на основе гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$;
- установлены закономерности влияния частичного замещения Sr на Nd на фазово-структурное состояние и магнитные гистерезисные свойства наноструктурированных порошков гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$;
- установлены закономерности изменения фазового состава и магнитных гистерезисных свойств в процессе высокотемпературного отжига механоактивированных порошков исходного состава $(1-x)\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/x\text{Co}$, а также условия получения двухфазных нанокпозитов на основе $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ с сильной обменной связью между кристаллитами образующихся магнитотвёрдой и магнитомягкой фаз;
- отработана методика высокоэнергетического помола (механоактивации) с добавлением ПАВ быстрозакалённых сплавов системы Nd-Fe-B (на примере быстрозакалённого сплава $\text{Nd}_{9,6}\text{Fe}_{80,3}\text{Zr}_{3,7}\text{B}_{6,4}$), в результате которой получены находящиеся в обменно-связном состоянии нанокпозиционные порошки с высокими гистерезисными характеристиками;
- разработана методика компьютерного микромагнитного моделирования в субзёрненном масштабе на поликристаллических моделях с использованием программного пакета OOMMF процессов перемагничивания магнитных нанокпозитов, а также выполнен сравнительный анализ полученных в работе расчётных и экспериментальных данных (кривых намагничивания, параметров петель магнитного гистерезиса, распределение полей перемагничивания dM/dH) магнитных нанокпозитов из порошков $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ и механоактивированных порошков сплава $\text{Nd}_{9,6}\text{Fe}_{80,3}\text{Zr}_{3,7}\text{B}_{6,4}$, включая определение условий и механизмов их магнитного твердения.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- установлены новые закономерности формирования разных фаз и набрана большая база данных по структурному и соответствующему магнитному состоянию нанокпозитов на основе магнитотвёрдых фаз феррита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ и со структурой типа $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, в том числе допированных разными элементами;

- в соответствии с проблематикой диссертации (1) определены обладающие научной новизной значения удельной намагниченности насыщения σ_s Nd-замещённой фазы гексаферрита $\text{Sr}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$ ($0 \leq x \leq 0.5$), а также проведены оценки соответствующих величин эффективной константы анизотропии (K_{eff}), поля магнитной анизотропии (H_a) и поля анизотропии формы (H_d); (2) проведена оценка нижнего предела для значения удельной намагниченности насыщения σ_N фазы типа $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ в исследованных механоактивированных порошках $\text{Nd}_{9.6}\text{Fe}_{80.3}\text{Zr}_{3.7}\text{B}_{6.4}$, которая оказалась равной $108.0 \pm 2.5 \text{ A} \cdot \text{м}^2/\text{кг}$;
- проведена модернизация и, с использованием полученных в работе экспериментальных данных, подтверждена методика микромагнитного моделирования в субзёрненном масштабе на поликристаллических моделях обменно-связных двухфазных нанокомпозитов, обеспечившая получение новых результатов по теме диссертации, в частности, соискателем показано, что для нанокомпозитов $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ максимальное значение $(BH)_{\text{max}} = 10.8 \text{ кДж/м}^3$ может быть получено, когда размеры зёрен магнитотвёрдой ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) и магнитомягкой (Fe_3O_4) фаз составляют около 10 нм, а объёмная доля магнитомягкой фазы $V_s = 30 \%$.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- определены перспективы использования вместо сложных химических методов синтеза процесса высокоэнергетического помола смесей порошков-прекурсоров номинальных составов $(1-x)(\text{SrCO}_3 + 6\text{Fe}_2\text{O}_3) + x\text{Co}$, где $x = 0.1, 0.2$ и 0.3 , и последующего высокотемпературного отжига для получения двухфазные нанокомпозитов на основе феррита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ с сильной обменной связью между кристаллитами образующихся магнитотвёрдой и магнитомягкой фаз;
- установленные режимы синтеза из порошков-прекурсоров методами высокоэнергетического помола наноструктурированных порошков гексаферрита стронция, в том числе легированных различными редкоземельными металлами, магнитных нанокомпозитов на основе $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ и наноструктурированных порошков на основе быстрозакалённых сплавов системы Nd-Fe-B в обменно-связном состоянии могут быть использованы при разработке нового поколения материалов для постоянных магнитов;
- определены составы и режимы обработки наноструктурированных порошков гексаферрита $\text{Sr}_{1-x}\text{Nd}_x\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$, а также порошков обменно-связных нанокомпозитов $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ с высокими магнитными гистерезисными свойствами, которые могут быть использованы при получении материалов для магнитной записи информации, поглощения и

- преобразования энергии электромагнитного излучения, в биомедицине, а также для изготовления магнитов с полимерной связкой (магнитопластов);
- разработанная и апробированная соискателем методика механоактивации с добавлением ПАВ быстрозакалённых сплавов системы Nd-Fe-B, в результате которой получены находящиеся в обменно-связном состоянии нанокмпозиционные порошки с высокими гистерезисными характеристиками открывает перспективы расширения исследований в направлении повышения магнитных гистерезисных свойств быстрозакалённых сплавов на основе системы Nd-Fe-B и, тем самым, способствовать снижению содержания в них дорогостоящих легирующих элементов;
 - создана численная модель для микромагнитного моделирования в субзёрненном масштабе процессов перемагничивания магнитных нанокмполитов, которая может стать мощным и надёжным инструментом, позволяющим существенно ускорить, за счёт сокращения необходимого количества дорогостоящих, трудо- и энергоёмких экспериментов, процесс разработки нового поколения нанокмпозиционных магнитотвёрдых материалов с высокими, в том числе, наперёд заданными гистерезисными характеристиками.

Достоверность научных результатов соискателя подтверждается их воспроизводимостью при выполнении экспериментов, проведением исследований на современном оборудовании, функционирование которого основано на различных физических принципах, взаимодополняющих друг друга (рентгенография, просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия и гравиметрический анализ, измерения магнитных гистерезисных свойств на вибрационном магнитометре), применением проверенных, признанных мировым научным сообществом методик исследования, сопоставлением полученных данных с известными литературными данными, публикациями в высокорейтинговых рецензируемых журналах.

Личный вклад соискателя состоит в том, что результаты, составившие основу диссертации, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор лично проводил эксперименты и занимался обработкой результатов большинства экспериментов, разработал численную модель, освоил и осуществил компьютерное микромагнитное моделирование процессов перемагничивания магнитных нанокмполитов, провёл сравнительный анализ полученных в работе расчётных и экспериментальных данных.

Основные результаты диссертации Семаида Ашрафа Масуда Абделхади **опубликованы** в 3 научных статьях в изданиях, входящих в рекомендуемый перечень ВАК РФ и индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web

of Science, а также в 3 тезисах докладов в сборниках трудов научных конференций.

Пункт 2.6 «Положения присуждения ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук НИТУ «МИСиС» соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Семаиды Ашрафа Масуда Абделхади соответствует критериям п. 2 «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ «МИСиС», так как в ней на основании выполненных автором исследований **установлены** закономерности формирования высококоэрцитивного состояния в наноструктурированных порошках на основе феррита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, а также в нанокпозиционных механоактивированных порошках быстрозакалённого сплава системы Nd-Fe-B.

Учитывая вышесказанное, результаты, полученные в данной работе, обладают несомненной научной новизной, имеют большое научное и практическое значение.

Экспертная комиссия приняла решение **о возможности присуждения** Семаиде Ашрафу Масуду Абделхади ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

При проведении тайного голосования Экспертная комиссия в количестве 4 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовала: за 4, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



Л.В. Панина

21.12.2022г.