

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.133.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ
МЕТАЛЛОВ ИМЕНИ М.Н. МИХЕЕВА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИФМ УрО РАН)
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ
НАУК**

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 06.06.2025, №3

О присуждении Шитову Александру Владимировичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Магнитные свойства и микроструктура спеченных магнитов (Nd,Dy)-(Fe,Co)-B» по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений принята к защите 28.02.2025, протокол № 2, диссертационным советом 24.1.133.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук (ИФМ УрО РАН), Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 620108, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, приказы Минобрнауки РФ № 714/нк от 02.11.2012 и № 188/нк от 26.02.2015.

Соискатель Шитов Александр Владимирович, 1989 года рождения, в 2011 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ) по специальности «Физика». Шитов А.В. с 2020 года по 2024 год обучался в аспирантуре при ИФМ УрО РАН, в настоящее время работает в должности инженера-физика 1 категории на АО «Уральский

электромеханический завод», а также по совместительству – в должности младшего научного сотрудника в лаборатории перспективных магнитных материалов ИФМ УрО РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории перспективных магнитных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук Головня Оксана Александровна, старший научный сотрудник ФГБУН Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Официальные оппоненты:

1) Таскаев Сергей Валерьевич, доктор физико-математических наук, доцент, ректор ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», г. Челябинск;

2) Костюченко Надежда Викторовна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных гетероструктур и спинтроники для энергосберегающих информационных технологий Центра фотоники и двумерных материалов ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», г. Долгопрудный, Московская область

– дали положительные отзывы на диссертацию Шитова А.В.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»», г. Москва в своем положительном заключении, подписанным Савченко Александром Григорьевичем, доктором физико-математических наук, заведующим кафедрой физического материаловедения НИТУ МИСИС, Савченко Еленой Сергеевной, кандидатом физико-математических наук, доцентом, ученым

секретарем кафедры физического материаловедения, Лилеевым Алексеем Сергеевичем, доктором физико-математических наук, профессором кафедры физического материаловедения, ведущим экспертом по учебно-методической работе, Менушенковым Владимиром Павловичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом, старшим научным сотрудником кафедры физического материаловедения, Перминовым Александром Сергеевичем, кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры физического материаловедения указала, что «диссертационная работа Шитова Александра Владимировича на тему «Магнитные свойства и микроструктура спеченных магнитов (Nd,Dy)-(Fe,Co)-B» представляет собой законченную научную работу. По тематике, актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности сформулированных выводов диссертация соответствует п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с изменениями, утвержденными Постановлениями Правительства РФ, и пунктам 2, 3, 4 паспорта специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений, а ее автор, Шитов Александр Владимирович, безусловно заслуживает присвоения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений».

Соискатель имеет 21 опубликованную работу (11.4 печатных листов), в том числе по теме диссертации 15 работ, из них статей, опубликованных в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях, и входящих в Перечень ВАК – 8, тезисов докладов в материалах российских и международных конференций – 7.

В результате проведенных исследований автором была установлена связь между структурными и магнитными свойствами спеченных образцов (Nd,Dy)-(Fe,Co)-B с высокими гистерезисными характеристиками.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Влияние диффузионного отжига на гистерезисные свойства спеченных магнитов Nd-Fe-B / А. Г. Попов, Д. Ю. Василенко, Т. З. Пузанова,

А. В. Шитов, А. В. Власюга. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Metallovedenie. — 2011. Т. 111, №5. — С. 493-501.

2. Получение спеченных магнитов Nd-Fe-B без процесса прессования порошков / А. Г. Попов, А. В. Шитов, Е. Г. Герасимов, Д. Ю. Василенко, М. Ю. Говорков, Д. Ю. Братушев, В. П. Вяткин, К. Ю. Шуняев, Т. Л. Михайлова. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Metallovedenie. — 2012. — Т. 113, №4. — С. 352.

3. Микроструктура и свойства сплавов состава Nd-Fe-B, полученных методом «Strip Casting», и изготовленных из них постоянных магнитов / Д. Ю. Василенко, А. В. Шитов, А. В. Власюга, А. Г. Попов, Н. В. Кудреватых, Н. В. Печищева. – Текст: непосредственный // Metallovedenie и термическая обработка металлов. — 2014. — №11 (713) — С. 10-16.

4. Высокоэнергетические магниты (Nd,Dy)-(Fe,Co)-B с пониженным температурным коэффициентом индукции / А. Г. Попов, Д. А. Колодкин, В. С. Гавико, Д. Ю. Василенко, А. В. Шитов, А. В. Власюга, М. Ю. Говорков, Д. Ю. Братушев. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Metallovedenie. — 2017. — Т.118, №10. — С. 981-992.

5. Структура и свойства постоянных магнитов R-(Fe,Co)-B (R – Nd,Dy,Ho) с низким температурным коэффициентом индукции / Д. Ю. Василенко, Д. Ю. Братушев, А. Г. Попов, Д. А. Колодкин, А. В. Шитов. – Текст: непосредственный // Metallovedenie и термическая обработка металлов — 2018. — №8 (758). — С. 42-47.

6. Магнитные гистерезисные свойства и микроструктура высокоэнергетических магнитов (Nd,Dy)-Fe-B с низким содержанием кислорода / Д. Ю. Василенко, А. В. Шитов, Д. Ю. Братушев, К. И. Подкорытов, В. С. Гавико, О. А. Головня, А. Г. Попов. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Metallovedenie. — 2022. — Т. 122, №12. — С. 1261-1270.

7. Магнитные гистерезисные свойства и микроструктура высококоэрцитивных магнитов (Nd,Dy)-Fe-B с концентрацией Dy до 10 вес.% и низким содержанием кислорода / Д. Ю. Василенко, А. В. Шитов, А. Г. Попов,

В. С. Гавико, Д. Ю. Братушев, К. И. Подкорытов, О. А. Головня. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Металловедение. — 2022. — Т. 123, №2. — С. 158-168. 17

8. Применение активированного измельчения порошков при изготовлении магнитов Nd-Fe-B методом PLP / О. А. Головня, К. А. Кручинина, А. В. Протасова, Д. А. Колодкин, А. В. Шитов, Л. А. Сташкова, А. В. Огурцов, Д. В. Таранов. – Текст: непосредственный // Физика Металлов и Металловедение — 2023. — Т. 124, №5. – С. 347-356.

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов:

1. От Барташевича Михаила Ивановича, доктора физико-математических наук, профессора кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики Уральского федерального университета, г. Екатеринбург

Замечание 1: «На стр. 13 автореферата « $H_{сJ}$ резко возрастает в течение первого часа, а затем монотонно и практически линейно убывает со скоростью около 0.2 кЭ/ч (15.9 кА/м в час)». С чем связан рост $H_{сJ}$?»

2. От Ремпель Светланы Васильевны, кандидата физико-математических наук, доцента, ведущего научного сотрудника Института химии твердого тела УрО РАН, г. Екатеринбург.

Замечание 1: «В автореферате присутствуют опечатки».

Замечание 2: «В автореферате при описании шестой главы отсутствует информация, о способе формирования текстуры в исследуемых образцах, в частности, у образцов, свойства которых представлены на рисунке 7 автореферата».

Замечание 3: «Уточняющие вопросы к выводу номер 7: почему наличие в исходном пресс-порошке двух фракций приводит к снижению остаточной индукции в спеченном магните; каков диапазон средних размеров частиц порошка, а также средних размеров зерен в спеченных образцах для получения оптимальных магнитных характеристик исследованных составов?»

3. От От Уржумцева Андрея Николаевича, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики УрФУ, младшего научного сотрудника Отдела магнетизма твердых тел НИИ ФИМ Уральского Федерального Университета, г. Екатеринбург.

Замечание 1: «На рисунке 3 представлены неполные данные по температурным зависимостям, для некоторых составов отсутствуют части температурных диапазонов».

Замечание 2: «В тексте автореферата для исследуемых составов $(\text{Nd}_{0.75}\text{Dy}_{0.25})_{15.1}(\text{Fe}_{1-c}\text{Co}_c)_{78.4}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.3}\text{B}_{6.1}$, заявленных в научной новизне, с повышенным содержанием кобальта до $c = 0.36$ формульных единиц, не приводятся магнитные гистерезисные свойства и максимальное энергетическое произведение для спеченных образцов, указан только температурный коэффициент остаточной индукции α ».

Замечание 3: «В шестой главе не представлена количественная оценка степени текстуры получаемых спеченных образцов».

4. От Волегова Алексея Сергеевича, кандидата физико-математических наук, заведующего кафедрой магнетизма и магнитных наноматериалов Института естественных наук и математики Уральского Федерального Университета, г. Екатеринбург.

Замечание 1: «На рисунке 1 в диапазоне содержаний редкоземельных элементов 29.4 – 29.8 вес. % в спеченных образцах, образец с добавкой диспрозия имеет большее значение остаточной намагниченности и максимального энергетического произведения, чем образец без диспрозия. Какова причина такой необычной зависимости? Насколько воспроизводимы свойства получаемых образцов?».

Замечание 2: «Каков механизм увеличения коэрцитивной силы образцов в результате диффузионного отжига? Меняются ли толщина и состав межзеренной прослойки в результате отжига?».

5. От Чупракова Станислава Александровича, кандидата физико-математических наук, научного сотрудника лаборатории диффузии Института физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург.

Замечание 1: «В шестой главе обсуждается влияние текстурующих импульсов на значения остаточной индукции и коэрцитивной силы по намагниченности. Указана величина и длительность импульса – 6.5 мс. Было ли исследовано влияние длительности импульса на перечисленные выше характеристики?».

Замечание 2: «Автор приводит достаточно подробное описание кривых размагничивания по индукции $B(H)$ спечённых образцов с содержанием Dy 8.4 и 10.3 вес. %, но сам график не представлен в тексте автореферата. Полагаю, этот график есть в тексте диссертационной работы».

6. От Мельникова Сергея Александровича, кандидата физико-математических наук, научного руководителя лаборатории металлургических процессов АО «ГИРЕДМЕТ», г. Москва.

Замечание 1: «В автореферате присутствуют опечатки».

Замечание 2: «В автореферате отсутствует информация, почему выбран достаточно узкий интервал (1370-1430°C) температур расплава сплавов, изготавливаемых методом «strip casting», исследованных в третьей главе».

Замечание 3: «При описании в автореферате результатов исследований в главе 3 соискатель утверждает, что при использовании «strip casting» «...дендритные зерна основной фазы $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ при этом становятся более дисперсными». Однако, как оценивали дисперсность зерен в сплаве не приведено».

7. От Заяц Полины Александровны, кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории низкоразмерных спиновых систем Института физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург.

Замечание 1: «В автореферате присутствуют опечатки».

Замечание 2: «При описании исследований в главе 4 используется фраза «В результате такого дополнительного легирования в межзеренном пространстве магнита с увеличенной концентрацией Ga вместо ферромагнитной фазы $(\text{Nd,Dy})(\text{Fe,Co})_2$ образуется парамагнитная фаза $(\text{Nd,Dy})(\text{Fe,Co,Ga})_2$ ». Чем, по мнению автора, вызвана необходимость легирования магнитов $(\text{Nd,Dy})-(\text{Fe,Co})-\text{Cu}-\text{Ga}-\text{V}$ дополнительным количеством галлия?»

Выбор официальных оппонентов доктора физико-математических наук С.В. Таскаева и кандидата физико-математических наук Н.В. Костюченко, а также ведущей организации Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»», г. Москва, обосновывается публикациями оппонентов, тематикой структурного подразделения ведущей организации, относящимися к сфере исследований, которым посвящена диссертация.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований установлено следующее:

1. Установлено, что более высокие значения остаточной индукции в спеченных образцах из сплавов, полученных методом полосового литья, по сравнению с образцами, изготавливаемыми из сплавов, полученных методом разлива в изложницу, обнаружены при повышении температуры расплава сплавов от 1370 до 1430 °С.
2. Показано, что на величину коэрцитивной силы спеченных образцов сплавов $(\text{Nd}_{0.75}\text{Dy}_{0.25})_{13.9}(\text{Fe}_{1-c}\text{Co}_c)_{79.8}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{6.1}$ может оказывать влияние состав формирующихся в тройных стыках зерен магнитомягких фаз типа $(\text{Nd,Dy})(\text{Fe,Co,Ga})_2$. Увеличение концентрации галлия (Ga) до 0.3 позволяет при концентрации кобальта 0.15 достигать значений коэрцитивной силы 21 кЭ при величине температурного коэффициента индукции $-0.06 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ в интервале температур от 23 до 140 °С.
3. Получено, что увеличение концентрации диспрозия до $d = 0.3$ в сплавах $(\text{Nd}_{1-d}\text{Dy}_d)_{13.7}\text{Fe}_{79.4}\text{Co}_{1.1}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.1}\text{B}_{5.5}$, выплавленных по методу полосового литья, вызывает изменение состава основной фазы $(\text{Nd,Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и появление в спеченных образцах оксидов $(\text{Nd,Dy})\text{O}_y$ и $(\text{Nd,Dy,Fe,Co,Cu,Ga})\text{O}_y$, локализуемых в тройных стыках зерен и соединяющихся с межзеренными границами, что приводит к увеличению коэрцитивной силы спеченных образцов с 12 до 32 кЭ при снижении значений остаточной индукции с 14.5 до 11.5 кГс.

4. Установлено, что путем вариации концентрации кобальта и гольмия в спеченных образцах сплавов $(\text{Nd}_{0.64-h}\text{Dy}_{0.36}\text{Ho}_h)_{16}(\text{Fe}_{1-c}\text{Co}_c)_{77.5}\text{Cu}_{0.1}\text{Ga}_{0.3}\text{B}_{6.1}$, изготовленных методом разлива в изложницу, получены значения температурного коэффициента остаточной индукции в пределах от $-0.02 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ до $+0.009 \text{ \%}/^\circ\text{C}$ в интервале температур $27 - 120 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Показано, что увеличение коэрцитивной силы (до 60 %) при незначительном снижении остаточной индукции (не более 2 %) спеченных образцов сплава $\text{Nd}_{14.7}\text{Fe}_{79.2}\text{B}_{6.1}$ в процессе отжига в контакте с диспрозий-содержащими порошками связано с формированием на поверхности зерен $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ слоя, обогащенного диспрозием.

Научная и практическая значимость исследования обоснована тем, что определено влияние концентрации диспрозия (Dy) на микроструктуру, гистерезисные характеристики, температурные коэффициенты остаточной индукции и коэрцитивной силы магнитных материалов (Nd,Dy)-(Fe,Co,Cu,Ga)-B, что позволяет получать спеченные образцы с рабочей температурой вплоть до $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Определены концентрации легирующих элементов кобальта (Co) и гольмия (Ho), необходимые для достижения значений температурного коэффициента остаточной индукции вплоть до $-0.02\%/^\circ\text{C}$ в интервале температур $27 - 120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что установленное в работе влияние диспрозия и кобальта на микроструктуру, гистерезисные характеристики и значения температурных коэффициентов остаточной индукции спеченных образцов позволяет получать магниты с высокими характеристиками для двигателей, используемых в ветроэнергетике и авиации.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается использованием метрологически аттестованного оборудования и апробированных методик изготовления и аттестации образцов, надежной воспроизводимостью результатов, применением

разнообразных современных взаимодополняющих методов исследования. Результаты исследований согласуются между собой, а также с имеющимися литературными данными.

Личный вклад соискателя состоит в изготовлении спеченных образцов магнитных материалов, определении основных магнитных характеристик при комнатной и повышенной температурах, а также расчете температурных коэффициентов коэрцитивной силы и остаточной индукции спеченных образцов, в проведении исследований магнитных свойств, результаты которых представлены в диссертационной работе.

Постановка цели и задач исследования, а также подготовка публикаций и тезисов докладов проводилась автором совместно с научным руководителем к.ф.-м.н. О.А. Головной и соавтором к.ф.-м.н. А.Г. Поповым. Все результаты, приведенные в диссертации, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии. Исследования методом сканирующей электронной микроскопии выполнены совместно с соавтором К.В. Подкорытовым, обработка результатов выполнена автором лично. Рентгенографические исследования были выполнены соавтором к.ф.-м.н. В.С. Гавико. Исследование температурных зависимостей магнитной восприимчивости было выполнено лично автором.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, посвящённую установлению связи между структурными и магнитными свойствами спеченных образцов $(\text{Nd,Dy})-(\text{Fe,Co})-\text{B}$ с высокими гистерезисными характеристиками, и соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» в редакции, утвержденной Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с последующими изменениями.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

На заседании 06.06.2025, проведённом в очном режиме, диссертационный совет принял решение присудить Шитову Александру Владимировичу учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации 1.3.12. Физика магнитных явлений, 5 докторов наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, 7 докторов наук по специальности 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту – нет, проголосовали: за – 16, против – нет, «воздержался» – 1.

Председатель диссертационного совета,
доктор физ.-м



 В.В. Устинов

Ученый секретарь диссертационного со
доктор физ.-мат. наук

 Б. Чарикова

9 июня 2025 г.