

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.05.16
по диссертации Бельтюковой Марии Александровны
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Диссертация «Формирование структуры и свойств концентрационно-неоднородного порошкового сплава системы Fe-Cr-Co-Mo с добавками Sm, Zr, Cu для точного приборостроения» по специальности 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки) принята к защите 23 октября 2024 г. (протокол заседания № 5) диссертационным советом Д ПНИПУ.05.16, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от 05 октября 2022 г. № 92-О в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым - четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. N 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. N 1792-р.

Соискатель – Бельтюкова Мария Александровна, 1995 года рождения, в 2019 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по программе магистратуры 22.04.02 Металлургия, в 2023 году окончила очное обучение в аспирантуре того же университета по направлению подготовки 22.06.01 Технологии материалов.

Диссертация выполнена на кафедре «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель – Оглезнева Светлана Аркадьевна, доктор технических наук (05.16.06 Порошковая металлургия и композиционные материалы), доцент, Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермского национального исследовательского политехнического университета», профессор кафедры «Механика композиционных

материалов и конструкций».

Официальные оппоненты:

Гасанов Бадрудин Гасанович – доктор технических наук (05.02.01 - Материаловедение), профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, профессор кафедры «Автомобили и транспортно-технологические комплексы»;

Разумов Николай Геннадьевич – доктор технических наук (2.6.5 - Порошковая металлургия и композиционные материалы), Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Петра Великого», профессор НОЦ «Конструкционные и функциональные материалы».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», город Ростов - на - Дону. Отзыв ведущей организации утвержден 19 ноября 2024 г. профессором Ефременко Инессой Николаевной, проректором по научной исследовательской работе и инновационной деятельности Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донского государственного университета (ДГТУ)», заслушан 7 ноября 2024 г. на заседании кафедры «Материаловедение и технологии материалов», подписан кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Металловедение и технологии материалов» Егоровым Максимом Сергеевичем. В своем положительном заключении Егоров Максим Сергеевич указал, что представленная работа по форме и содержанию отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842, и порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 28.05.2024 №27-О, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что оппонент Разумов Н.Г. - доктор наук по специальности 2.6.5 - Порошковая металлургия и композиционные материалы, Гасанов Б.Г. - доктор наук по смежной специальности 2.6.17. - Материаловедение. Оба оппонента имеют публикации в области порошковых материалов. в том числе, магнитных (п.27 а Положение о совете), официальная ведущая организация широко известна своими достижениями в области порошковых материалов. в том числе, магнитных (п.27 б Положение о

совете), имеется научная школа, где работают известные специалисты в соответствующем направлении.

На диссертацию поступило 10 отзывов, все положительные. Отзывы поступили от: д-ра физ-мат. наук, проф. Амосова А.П., заведующего кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» Самарского государственного технического университета; д-ра техн. наук, проф. Еремеевой Ж.В., куратора кафедры порошковой металлургии и функциональных покрытий Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»; д-ра техн. наук, проф. Яковлева Г.И., заведующего кафедрой «Строительные материалы, механизация и геотехника» Ижевского государственного технического университета им. Калашникова; д-ра техн. наук, проф. Ильюшенко А.Ф., директора ГНУ «Института порошковой металлургии им. академика О.В. Романа», и канд. техн. наук, доц. Савича В.В., первого заместителя директора по науке ГНУ «Института порошковой металлургии им. академика О.В. Романа»; д-ра техн. наук, проф. Шайдуровой Г.И., главного химика ПАО НПО «Искра», и канд. техн. наук Васильева И.Л., заместителя технического директора – главного технолога ПАО НПО «Искра»; д-ра техн. наук, доц. Ноздрина И.В., профессора кафедры «Металлургия черных металлов и химических технологий» Сибирского государственного индустриального университета; канд. техн. наук Генераловой К.Н., ведущего инженера – технолога завода особо чистого кварца ПАО «Пермской научно-производственной приборостроительной компании»; канд. техн. наук Копарулина И.Г., главного инженера проекта ОРНБ АО «Чепецкий механический завод»; канд. техн. наук Устюхина А.С., младшего научного сотрудника лаборатории физикохимии поверхности и ультрадисперсных материалов Института металлургии и материаловедения РАН им. А.А. Байкова; канд. техн. наук Зиганьшина И.Р., начальника бюро материалов для аддитивных технологий отдела композиционных материалов Отделения главного металлурга, АО «ОДК-Авиадвигатель».

По теме диссертации соискателем опубликовано 10 научных трудов, в том числе 5 работ – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени, из них 4 работы – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. **Мариева (Бельтюкова) М.А., Шацов А.А.** Прогнозирование концентрационной неоднородности порошковых магнитотвердых сплавов на основе

системы Fe-Cr-Co-Mo и влияние добавок Sm на их магнитные свойства / М. А. Мариева (Бельтюкова), А. А. Шацов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. –2023.–Т.17, №1. – С.12–20: **(ВАК, K1)**

Marieva (Belytkova) M.A., Shatsov A.A. Prediction of the concentration inhomogeneity of powder magnetic hard alloys- based on the Fe-Cr-Co-Mo system and the effect of Sm additions on their magnetic properties. Powder Metallurgy and Functional Coatings. – 2023; 17(1):12-20. **(Web of Science, Scopus)**.

В статье соискателем представлены результаты научной работы по определению концентрационной неоднородности Cr, Co, Mo, Sm после 12 различных режимов спекания сплава 22Х15К4МС с добавкой Sm 0,5% (масс.). Описана предложенная соискателем модель диффузионной гомогенизации гребневых сплавов, позволяющая численно оценивать влияние режимов спекания на концентрационную неоднородность. Показано влияние добавок самария на магнитные характеристики сплава (вклад автора 70 %).

2. **Бельтюкова, М.А.,** Оглезнева С.А. Влияние добавки KC25ДЦ на стабильность магнитных свойств и механические характеристики сплава на основе системы Fe-Cr-Co-Mo / М.А. Бельтюкова, С.А. Оглезнева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение. Материаловедение. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 57-65; **(ВАК, K2)**

Соискателем представлены результаты исследования влияния добавки редкоземельного сплава на температурную стабильность и механические свойства порошкового магнитотвердого сплава на основе системы Fe-Cr-Co-Mo., в частности, получены температурные коэффициенты разработанных сплавов (TK) магнитной индукции (TK(Br), % / 0C), коэрцитивной силы (TK(Hc), % / 0C) и магнитной энергии (TK(BH)max, % / 0C) при повышенных температурах; определена концентрация добавки, оказывающая положительное влияние, на механическую прочность и стабильность магнитных свойств сплава 22Х15К4МС (вклад автора 60 %).

3. **Бельтюкова М.А.** Шацов А.А. Особенности фазовых превращений, формирования микроструктуры и магнитных свойств гистерезисного сплава на основе системы Fe-Cr-Co-Mo легированного Sm, Zr и Cu / М. А. Мариева (Бельтюкова), А. А. Шацов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. –2024. –Т.18, №4. –С.35-44; **(ВАК, K1)**

Belytkova M.A., Shatsov A.A. Phase transformation, microstructure formation, and magnetic properties of a hysteresis alloy based on the Fe-Cr-Co-Mo system doped with Sm, Zr, and Cu. Powder Metallurgy and Functional Coatings. – 2024; 18(4): 35-44. **(Web of Science, Scopus)**.

Соискателем представлены результаты исследования микроструктуры, кинетики превращений, фазового состава и магнитных свойств сплавов на основе системы Fe-Cr-Co-Mo с добавкой редкоземельного магнита KC25ДЦ. Установлена немонотонная зависимость магнитных свойств от концентрации добавки. Определена концентрация KC25ДЦ, позволяющая повысить магнитные свойства и коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса (вклад автора 80 %).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана экспериментальная методика, позволяющая численно оценивать и прогнозировать уровень концентрационной неоднородности при варьировании температуры в интервале 1250-1380 °С, времени спекания 1-8 ч сплава системы Fe-Cr-Co-Mo с добавкой 0,5% Sm, с целью получения требуемых магнитных свойств;

установлен асимптотически логарифмически нормальный закон распределения концентраций Cr, Co, Mo в сплаве 22Х15К4МСЧ с 0,5% Sm в интервале температур спекания 1250-1380 °С, позволяющий получать сплав с заданным уровнем концентрационной неоднородности;

доказана перспективность легирования сплавов на основе системы Fe-Cr-Co-Mo добавкой KC25ДЦ на основе соединения редкоземельного металла Sm с Co.

показан механизм трансформации микроструктуры в процессе термической и термомагнитной обработки, заключающийся в спинодальном распаде α твердого раствора на фазы α_1 и α_2 и ориентации зерен добавки KC25ДЦ вдоль направления приложения магнитного поля, приводящего к возникновению магнитной анизотропии. Показано, что в сплавах, содержащих менее 2,9% KC25ДЦ, эффект от добавки на микроструктуру недостаточен, а с добавкой более 4,4% эффект избыточен, что связано с влиянием двух конкурирующих факторов: малого количества и низкой анизотропии поля фаз, образовавшихся при концентрации KC25ДЦ менее 2,9% и пористости, оказывающей отрицательное влияние на магнитные и механические свойства при концентрации добавки выше 4,4% KC25ДЦ;

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана роль Sm и его соединений в улучшении физико-механических свойств сплава системы Fe-Cr-Co-Mo, показано их влияние на пористость, микроструктуру, кинетику превращений и фазовый состав порошковых магнитов сплава 22Х15К4МС при различных концентрациях;

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих базовых методов исследования, в том числе определение

плотности, пористости, твердости, механических и магнитных свойств, метод дифференциально-сканирующей калориметрии, оптической микроскопии, рентгеноструктурный анализ; метод оценки концентрационной неоднородности с целью дальнейшего построения модели гомогенизации; использованы современные приборы контроля: гистерезисограф «Permagraph L» с программным обеспечением PERMA и программы для исследования микроструктуры на микроскопах (Atlas и SIAMS-800);

определены оптимальные условия, при которых возможно достижение повышенных магнитных и механических свойств в сплаве 22Х15К4МС с добавкой КС25ДЦ: концентрация вводимой добавки, способ ее введения, плотность, пористость, уровень концентрационной неоднородности;

установлена причина ухудшения свойств сплава с добавкой свыше 4,4 % КС25ДЦ в сплаве 22Х15К4МС, заключающаяся в повышении пористости 2,7 – 4,2%, коагуляции и укрупнении фаз добавки;

изучен механизм фазовых превращений сплава 22Х15К4МС с добавкой КС25ДЦ при нагреве и охлаждении, и **установлено** влияние параметров термической и термомагнитной обработки на структуру и свойства магнитотвердого порошкового сплава, что позволило повысить уровень магнитных и механических свойств,

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

создана и апробирована модель гомогенизации сплава системы Fe-Cr-Co-Mo с добавкой Sm, позволяющая прогнозировать концентрационную неоднородность порошковых магнитотвердых сплавов по заданным режимам спекания и обеспечивать требуемый уровень магнитных свойств;

разработаны новые технологические режимы и этапы получения и обработки порошковых магнитотвердых сплавов системы Fe-Cr-Co-Mo с добавкой КС25ДЦ, улучшающие его магнитные, механические и эксплуатационные характеристики (заявка на патент №2023107329).

показано, что введение 2,9 % КС25ДЦ добавки позволяет улучшить H_c , кА/м на 40 %, B_r на 15 % выше чем у сплава без добавки 22Х15К4МС и в 1,5 раза, превосходящего его по характеристикам прочности;

представлены рекомендации по условиям эксплуатации и данные по температурной стабильности магнитных свойств сплава 22Х15К4МС с различной концентрацией добавки КС25ДЦ при повышении температуры с 20 до 150 °С, которые показывают, что влияние добавки на температурный коэффициент остаточной магнитной индукции $TK(B_r)$ имеет немонотонный характер и зависит от

температуры испытаний;

установлено, что сплавы с концентрацией добавки от 1,47 до 2,9 и от 5,9 до 8,8 удовлетворяют требованиям по температурной стабильности коэрцитивной силы для материалов, применяемых в приборостроении при изготовлении деталей точных приборов;

представлены результаты испытаний роторов из сплавов 22Х15К4МС и 22Х15К4МСЧ (сплав с 2,9% КС25ДЦ) в составе гиromотора ДНГ. По результатам испытаний выявлено, что сплав 22Х15К4МСЧ, содержащий 2,9% добавки КС25ДЦ в сравнении с исходным сплавом без добавки имеет более высокие пусковой момент и момент вращения при синхронной скорости.

Результаты диссертационного исследования рекомендуется использовать в научно-исследовательских и промышленных организациях, разрабатывающих магнитные материалы, а также в теории и практике физического материаловедения.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

экспериментальные результаты получены на сертифицированном оборудовании, показана воспроизводимость результатов в различных условиях;

теория построена на фундаментальных основах порошковой металлургии и материаловедения, и согласуется с ранее опубликованными работами других авторов, а также результатами экспериментов;

идея базируется на анализе существующих проблем порошковых магнитных сплавов и возможности их решения путем разработки новых составов и технологий;

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике; использованы современные методики сбора и обработки исходной информации и сравнительные испытания свойств разработанных материалов, проведена статистическая обработка данных.

Личный вклад соискателя состоит в анализе научных данных по теме исследования, сравнении представленных подходов, подготовке и проведении экспериментов лично автором или при его непосредственном участии, сборе, систематизации и анализе экспериментальных данных; подготовке основных публикаций по теме диссертации.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ЦНИПУ, утвержденным

приказом ректора ПНИПУ от 28 мая 2024 г. № 27-О: в ней изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в области получения магнитотвердых материалов с повышенными магнитными и механическими характеристиками, имеющие важное значение для развития отрасли прецизионного приборостроения страны.

На заседании «25» декабря 2024 г. диссертационный совет Д ПНИПУ.05.16 принял решение присудить **Бельтюковой Марии Александровне** ученую степень кандидата технических наук (протокол заседания № 6).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 16, против присуждения ученой степени – 0, воздержавшихся – нет.

Председательствующий на заседании,
заместитель председателя диссертационного совета
Д ПНИПУ.05.16,
доктор технических наук, профессор

~~/Симонов Ю.Н./~~

Ученый секретарь диссе
Д ПНИПУ.05.16,
кандидат технических наук

Кульметьева В.Б. /

«28» декабря 2024 г.