

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по науке и
инновациям

Пермского национального
исследовательского
политехнического университета,
доктор физ.-мат. наук, доцент

Швейкин А.И.

2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический
университет»

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Формирование структуры и свойств концентрационно-неоднородного порошкового сплава системы Fe-Cr-Co-Mo с добавками Sm, Zr, Si для точного приборостроения» выполнена на кафедре «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Бельтюкова Мария Александровна работала в ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» в должности начальника лаборатории порошковой металлургии и термической обработки.

В 2019 году окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный

исследовательский политехнический университет» по направлению 22.04.02
Металлургия.

В 2023 году окончила аспирантуру очной формы обучения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 22.06.01 «Технологии материалов» (период обучения: с «01» октября 2019 г. по «30» июня 2023 г.).

Научный руководитель - доктор технических наук, доцент Оглезнева Светлана Аркадьевна, работает профессором кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций», руководителем Научного центра порошкового материаловедения Пермского национального исследовательского политехнического университета (научный руководитель до 01.02.2023 - доктор технических наук, профессор Шацов Александр Аронович, работал профессором кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов»).

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- соискателем выполнена постановка проблемы, цели и задач, выбор объекта и предмета исследования;
- проведено теоретическое исследование особенностей формирования микроструктуры, магнитных и механических свойств магнитотвердых сплавов систем Fe-Cr-Co и Sm-Co в зависимости от их химического состава, способа получения и обработки, проведены численные и натурные эксперименты;
- предложена и применена модель гомогенизации, позволяющая численно оценивать и прогнозировать уровень концентрационной неоднородности при варьировании температуры и времени спекания сплава системы Fe-Cr-Co-Mo с добавкой Sm 0,5% (масс);

- предложен состав порошкового магнитотвердого сплава, содержащего две взаимодействующие магнитные системы Fe-Cr-Co-Mo и Sm-Co, и режим его старения с приложением внешнего магнитного поля, что в совокупности позволяет повысить уровень его магнитных и механических свойств.

2. Научная новизна диссертационного исследования заключается в:

- Впервые установлен асимптотически логарифмически нормальный закон распределения концентраций Cr, Co, Mo в сплаве 22Х15К4МСЧ с добавкой Sm 0,5% (масс.) в интервале температур спекания 1250-1380 °С, позволяющий получать сплав с заданным уровнем концентрационной неоднородности.
- Разработана модель гомогенизации, позволяющая численно оценивать и прогнозировать уровень концентрационной неоднородности при варьировании температуры и времени спекания сплава системы Fe-Cr-Co-Mo с массовой долей добавки 0,5% Sm.
- Предложен механизм трансформации морфологии (формы и размеров) фаз в процессе старения, заключающийся в спинодальном распаде $\alpha \rightarrow \alpha_1 + \alpha_2$ и перераспределении компонентов добавки КС25ДЦ вдоль направления приложения магнитного поля, приводящего к возникновению магнитной анизотропии формы, возникающей из-за тонких вытянутых фаз Fe-Co и Fe-Cr и магнитной анизотропии поля включений фазы SmCo в сплаве с концентрацией добавки КС25ДЦ 2,9%. Показано, что в сплавах, содержащих менее 2,9% КС25ДЦ 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 анизотропией поля фаз, образовавшихся при концентрации КС25ДЦ менее 2,9% и пористости, оказывающей отрицательное влияние на магнитные и механические свойства при концентрации добавки выше 4,4% КС25ДЦ.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность результатов подтверждается большим статистическим объемом экспериментальных данных, современными методиками

обработки экспериментальных данных, согласованностью полученных результатов с данными других исследователей. Формулирование гипотез и их верификация осуществлялись на основе известных положений общей физики, металловедения, порошковой металлургии и математического анализа. В работе применялись современные вычислительные программные продукты. Для прогнозирования параметров спекания использовали Wolfram Alpha: Computational Intelligence.

4. Практическая и теоретическая значимость диссертационного исследования

Разработаны материалы с повышенным уровнем физико-механических свойств по сравнению со сплавом, не содержащим добавку КС25ДЦ. Установлена связь между концентрацией добавки КС25ДЦ, морфологией фаз и свойствами магнитотвердого порошкового сплава. Результаты исследования предназначены для практического применения в прецизионном приборостроении при разработке двигателей ДНГ.

- Получена модель гомогенизации сплава системы Fe-Cr-Co-Mo с добавкой 0,5% Sm, позволяющая прогнозировать режимы спекания и концентрационную неоднородность сплавов.
- В сплаве 22X15K4MCЧ с добавкой Sm 0,5% (масс.) определены значения коэффициентов вариации концентраций элементов (V). Для Cr V находился в интервале от 0,17 до 0,09, для Co от 0,3 до 0,06, для Mo от 0,52 до 0,16. Полученные значения V Cr, Co, Mo обеспечивают возможность для практического применения в гироскопах.
- Установлен химический состав сплава, с содержанием добавки КС25ДЦ 2,9%, позволяющий получать повышенные магнитные свойства: коэрцитивную силу до 55,6 кА/м, остаточную магнитную индукцию до 1,33 Тл, максимальную магнитную энергию до 41 кДж/м³ и коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса до 0,87.

- Впервые разработан композиционный порошковый магнитотвердый сплав, содержащий две взаимодействующие магнитные системы Fe-Cr-Co-Mo и Sm-Co и режим его старения с приложением внешнего магнитного поля, что в совокупности с разработанным составом обеспечивает прирост: Hс, кА/м на 43%, Вг на 15% выше чем у сплава без добавки 22Х15К4МС и в 1,5 раза, превосходящего его по характеристикам прочности.
- Получены новые технологические схемы создания активной части ротора ДНГ из сплава 22Х15К4МСЧ, позволяющие повысить момент вращения двигателя, включающие прессование, спекание, ТО и ТМО, механическую обработку (заявка на патент №2023107329, протокол измерений №69/64-2-п ПАО ПНППК).

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы Бельтюковой Марией Александровной опубликовано 10 научных работ, в том числе 4 статьи – в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени, в том числе 3 статьи – в издании, индексируемом в международных базах цитирования Scopus, Web of Science. В тексте диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах по теме диссертационного исследования.

Основные научные труды, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК (по специальности 2.6.5):

1. **Мариева (Бельтюкова) М. А.** Управление гистерезисными свойствами в порошковых сплавах на основе системы Fe-Cr-Co / М. А. Мариева (Бельтюкова), А. А. Шацов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2021. – Т. 15, № 3. – С. 14-21; (ВАК)

Marieva (Beltykova) M.A., Shatsov A.A. Control of hysteretic properties in powder alloys based on the Fe–Cr–Co system. Powder Metallurgy and Functional Coatings. –2021;(3):14–21. (**Web of Science, Scopus**)

Соискателем представлены результаты исследования магнитной структуры сплава 22Х15К4МС посредством электронной микроскопии. Установлена связь кинетики формирования магнитной структуры при старении и уровня магнитных свойств. Показана возможность регулирования магнитных свойств повторным старением без перезакалки. Установлено незначительное изменение размеров и морфологии частиц магнитной фазы в процессе старения. Определено влияние количества циклов повторного старения на стабильность магнитных свойств во времени (вклад автора 60%).

2. **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**)

Marieva (Beltykova) 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.). Построена 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%).

3. **Бельтюкова, М.А., Оглезнева С.А.** Влияние добавки КС25ДЦ 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**)

Соискателем изучено влияние добавки редкоземельного сплава на температурную стабильность и механические свойства порошкового магнитотвердого сплава на основе системы Fe-Cr-Co-Mo. Получены температурные коэффициенты разработанных сплавов (ТК) магнитной индукции (ТК(Br), % / °С), коэрцитивной силы (ТК(Hc), % / °С) и магнитной энергии (ТК(BH)max, % / °С) при повышенных температурах. Определена концентрация добавки, оказывающая положительное влияние, на механическую прочность и стабильность магнитных свойств сплава 22Х15К4МС. (вклад автора 60%).

4. **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).

Beltykova 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).

Соскателем изучены микроструктура, кинетика превращений, фазовый состав и магнитные свойства сплавов на основе системы Fe-Cr-Co-Mo с добавкой редкоземельного магнита КС25ДЦ. Установлена немонотонная зависимость магнитных свойств от концентрации добавки. Определена концентрация КС25ДЦ, позволяющая повысить магнитные свойства и коэффициент прямоугольности петли магнитного гистерезиса. (вклад автора 80%).

• *Прочие научные статьи*

5. **Мариева (Бельтюкова) М. А.** Повышение прямоугольности петли магнитного гистерезиса магнитотвердого сплава на основе системы Fe-Cr-Co за счет легирования Sm / М. А. (Бельтюкова) Мариева, В. А. Козвонин, А. А. Шацов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета Машиностроение, материаловедение. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 39-46.

6. **Мариева (Бельтюкова) М. А., Шацов А. А.** Обратимые изменения магнитных свойств в сплавах на основе системы Fe-Cr-Co // Уральская школа молодых металлургов. Екатеринбург. – 2020. – С. 312-315.

7. **Мариева (Бельтюкова) М. А., Шацов А.А.** Влияние добавки самария на гистерезисные свойства порошкового магнитотвердого сплава на основе системы Fe-Cr-Co // Физическое материаловедение. Актуальные проблемы прочности: Сборник материалов X Международной школы, посвященной 10-летию лаборатории "Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы" и LXIII Международной конференции. Тольятти. Тольяттинский государственный университет, 2021. – С. 127-129.

8. **Мариева (Бельтюкова) М.А., Козвонин В.А., Шацов А.А.** Влияние легирования интерметаллидами $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ и SmCo_5 на гистерезисные свойства порошкового магнитотвердого сплава на основе системы Fe-Cr-Co-Mo // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении». Пермь. –2022. Пермь: – С. 388-394.

9. **Мариева (Бельтюкова) М.А., Шацов А.А., Козвонин В.А.** Влияние добавки самария на кинетику превращений и гистерезисные свойства порошкового магнитотвердого сплава на основе системы Fe-Cr-Co-Mo // Сборник материалов конференции. 76 всероссийская научно-техническая

конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. Ярославль: ЯГТУ, 2023. – С.285-291.

10. **Бельтюкова М.А., А.А. Шацов** Роль добавки КС25ДЦ в формировании микроструктуры и магнитных свойств сплава на основе системы Fe-Cr-Co-Mo // **Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии в материаловедении и машиностроении»**. Пермь. – 2023. – С. 22–27.

6. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Представленная Бельтюковой Марией Александровной диссертационная работа является самостоятельным научным исследованием в области металловедения и порошковой металлургии. Указанная область исследования соответствует паспорту специальности 2.6.5 Порошковая металлургия и композиционные материалы, а именно:

п.2 Исследование и моделирование физико-химических процессов получения полуфабрикатов и изделий из порошковых, композиционных материалов с металлической, углеродной, керамической матрицей и армирующими компонентами различной неорганической природы, разработка оборудования и технологий.

п.5 Изучение структуры и свойств порошковых, композиционных материалов, покрытий и модифицированных слоев на полуфабрикатах и изделиях, исследование процессов направленной кристаллизации изделий из порошковых и композиционных материалов, разработка технологий и оборудования.

п.6 Разработка и совершенствование технологических процессов производства, контроля и сертификации полуфабрикатов и изделий различного назначения из порошковых и композиционных материалов, а также материалов и изделий с покрытиями и модифицированными слоями.

7. Соответствие диссертационной работы п.14 требованиям «Положения о присуждении ученых степеней».

Диссертационная работа Бельтюковой Марии Александровны отвечает требованиям, установленным п.14 Положения о присуждении ученых

степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842, соискатель Бельтюкова М.А. в тексте диссертационной работы корректно ссылается на авторов и (или) источники заимствования материалов, в том числе при использовании результатов научных работ, опубликованных соискателем лично и в соавторстве.

Диссертация *«Формирование структуры и свойств концентрационно-неоднородного порошкового сплава системы Fe-Cr-Co-Mo с добавками Sm, Zr, Si для точного приборостроения»* **Бельтюковой Марии Александровны** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.5. Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Заключение обсуждено и принято на заседании кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Присутствовало на заседании «8» человек. Результаты голосования: «за» - 8 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол №33 от «1» июля 2024 г.

Заведующий кафедрой «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов», доктор технических наук, профессор

СИМОНОВ Ю.Н./