



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
и инновационной деятельности
технических наук, доцент
ЮРГПУ (НПИ)

Владимир Сергеевич

06

2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова»

Диссертация «Структурообразование и свойства магнитно-мягкого композиционного материала на основе порошков железа ПЖРВ, покрытых силикатами и солями калия и натрия» **выполнена на кафедрах** «Международные логистические системы и комплексы» и «Материаловедение и технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова».

В период подготовки диссертации соискатель Гетто Елена Руслановна обучалась в очной аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (с 10.2018 г. по 10.2022 г.); **работала** в Южно-Российском государственном политехническом университете (НПИ) имени М.И. Платова в должностях: ассистента кафедры «Транспортная безопасность и управление дорожной инфраструктурой» ШАИ(ф) ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова (с 01.09.2019 г. по 31.08.2020 г.); младшего научного сотрудника ИЦ «СПТ» (с 16.09.2020 г. по 30.08.2022 г.); старшего преподавателя кафедры «Проектирование и строительство автомобильных дорог» ШАИ(ф) ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова (с 16.02.2023 г. по 31.08.2023 г.); старший преподаватель кафедры «Международные логистические системы и комплексы» (с 01.09.2023 г. по настоящее время).

В 2018 г. окончила с отличием магистратуру¹ в ФГБОУ ВО «Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова» **по направлению** 23.04.01 «Технология транспортных процессов».

В 2022 г. окончила очную аспирантуру ФГБОУ ВО «Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова» **по направлению подготовки** 22.06.01 «Технологии материалов».

¹ Фамилия Махмудова изменена на Гетто в связи с вступлением в брак.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Гасанов Бадрудин Гасанович, работает в должности профессора кафедры «Международные логистические системы и комплексы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Цель и актуальность работы

В различных отраслях машиностроения, приборостроении, электронной технике, электротехнических машинах и устройствах, средствах управления технологическими процессами широко применяются магнитные материалы. Учитывая высокий удельный расход электротехнических сталей при производстве микроэлектродвигателей, трансформаторов малой мощности, пускателей и других устройств наиболее перспективным направлением является разработка безотходной технологии изготовления магнитопроводов и сердечников методами порошковой металлургии, позволяющие снизить потери материала, исключить многие трудоемкие операции, автоматизировать технологический процесс и обеспечить необходимое качество деталей, исключая дальнейшую механическую обработку.

Особенно актуальны исследования по структурообразованию и свойств магнитно-мягких композиционных материалов (ММКМ) на основе порошков железа с неорганическими диэлектрическими покрытиями. Во всем мире ведутся работы по улучшению их магнитных характеристик ММКМ, снижению энергетических и материальных затрат для расширения областей их применения. Для этого разрабатываются и совершенствуются методы получения порошков и нанесения на них диэлектрических покрытий и способы изготовления из ММКМ изделий различной конфигурации.

Целью работы – повышение магнитных свойств ММКМ из распыленных порошков железа отечественного производства, покрытых силикатами и солями калия и натрия, разработка технологии изготовления из них магнитопроводов с заданными функциональными свойствами для эксплуатации в переменных магнитных полях.

Диссертационная работа соответствует научному направлению «Порошковые и композиционные материалы, покрытия и ресурсосберегающие технологии» утверждённого на механическом факультете ФГБОУ ВО «ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова» (протокол №2 от 26.10.2022 г.); при финансовой поддержке РФФИ в рамках гранта «Аспиранты» № 20-33-90252, по направлению – (03) химия и науки о материалах.

Тема диссертации «Структурообразование и свойства магнитно-мягкого композиционного материала на основе порошков железа ПЖРВ, покрытых силикатами и солями калия и натрия» в настоящей редакции утверждена ученым советом механического факультета от 11.09.2024 г., протокол № 1.

2. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в непосредственном выполнении всех этапов проведённых исследований, а именно: постановке задач исследования, обработке экспериментальных результатов и интерпретации экспериментальных данных.

Лично соискателем получены следующие научные результаты:

1. Результаты экспериментальных исследований по структурообразованию ММКМ с добавками стеклоэмалей и влияние технологических параметров на их магнитные свойства;
2. Установлено, что на магнитные и технологические свойства ММКМ из порошков железа влияют химический состав и толщина диэлектрика, физико-химические процессы, протекающие на границах частиц железа и диэлектрических покрытий из силикатов и солей калия и натрия;
3. Установлено, что отличительной особенностью уплотнения активированных порошков железа с покрытием из силиката калия на является преобладание структурной деформации;
4. Разработаны технология и способ получения нового магнитно-мягкого композиционного материала из порошков железа, покрытых силикатом калия и солями калия натрия.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований подтверждается большим статистическим объёмом и современными методиками обработки экспериментальных данных, согласованностью полученных результатов с фундаментальными положениями порошкового материаловедения, а также соответствием экспериментальных данных и научных выводов с общепринятыми положениями, опубликованными в авторитетных изданиях. Достоверность полученных результатов базируется на использовании современных физико-химических методов исследования структуры и свойств ММКМ с применением поверенного высокотехнологического оборудования, в том числе в ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ (НПИ), и высокой воспроизводимости экспериментальных данных в пределах заданной точности; согласованности результатов экспериментальных исследований с результатами других исследователей, которые работают в данной области. Выводы, сделанные по результатам работы, являются достоверными, научные положения аргументированными и прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях.

4. Новизна результатов проведенных исследований

1. Научно и экспериментально обоснован механизм формирования диэлектрического покрытия из силиката и солей калия и натрия на распыленные порошки железа, отличающийся тем, что качество и толщина покрытия зависят не только от состава диэлектрических покрытий, но и от гранулометрического состава и морфологии частиц порошков;

2. Впервые установлено, что в процессе механической активации с поверхности частиц распыленных порошков железа удаляются инородные включения и прилипшие к ним частицы мелких фракций, что позволило обеспечить более равномерное распределение покрытия из силиката калия на

поверхности частиц, повысить плотность прессовок и улучшить магнитные свойства ММКМ;

3. Выявлено, что покрытие из силиката калия толщиной в пределах 20–40 нм, нанесенное на механически активированные распыленные порошки железа, позволяет снизить пористость формовок без применения пластификатора и уменьшить дефекты кристаллической структуры металла частиц порошков в процессе прессования;

4. Разработан новый магнитно-мягкий композиционный материал, представляющий собой порошок железа с низким содержанием примесей, покрытый электроизолирующим силикатом содержащим неорганическим диэлектриком с толщиной не более 20–60 нм, для производства сердечников и магнитопроводов микроэлектродвигателей и датчиков тока;

5. Установлено, что в процессе спекания покрытия из силикатов калия и натрия синтезируются оксиды кремния и другие соединения, повышающие диэлектрические характеристики покрытий и снижающие концентрация силикатов на поверхности частиц порошков железа.

5. Практическая значимость результатов исследований

1. Теоретически и экспериментально обоснована эффективность применения водного раствора силиката калия для получения диэлектрического покрытия при производстве ММКМ из распыленных порошков железа отечественного производства и установлено, что на химический состав и структурообразование покрытий влияют гранулометрический состав и морфология распыленных порошков железа, концентрация K_2O-SiO_2 в водном растворе и параметры технологии нанесения покрытий;

2. Установлено, что на магнитные и технологические свойства ММКМ из порошков железа влияют химический состав и толщина диэлектрика, физико-химические процессы, протекающие на границах частиц железа и диэлектрических покрытий из силикатов и солей калия и натрия;

3. Установлено, что отличительной особенностью уплотнения активированных порошков железа с покрытием из силиката калия на является преобладание структурной деформации;

4. Разработан новый магнитно-мягкий композиционный материал, представляющий собой порошок железа с низким содержанием примесей, покрытый электроизолирующим силикатом содержащим неорганическим диэлектриком с толщиной не более 20–60 нм, для производства сердечников и магнитопроводов микроэлектродвигателей и датчиков тока;

5. Результаты диссертационной работы внедрены в качестве практических рекомендации по выбору диэлектрика и режима нанесения покрытия на порошки железа в водном растворе силиката калия, прессования и спекания, позволяющие разработать технологию получения датчиков тока и других устройств, в производственную деятельность ООО «Композит Нчк» г. Новочеркасск.

6. Ценность научных работ соискателя

1. Установлено, что при использовании в качестве диэлектрических покрытий смеси солей калия и натрия, образующие при спекании расплавы, а также стеклоэмали в пределах 0,5–1,5 % (мас.) независимо от способа актива-

ции порошков железа марок ПЖР2.200.28 и ПЖР2.200.30 магнитные свойства существенно ниже, чем у ММКМ из этих порошков, покрытых в водных растворах силикатов калия и натрия, из-за того что твердые частицы указанных диэлектриков расположены внутри и на границах частиц порошка железа и неравномерно распределены на их поверхности;

2. Выявлено, что на кинетику формирования диэлектрического покрытия на частицах распыленных порошков железа влияет химический состав, способ нанесения и рельеф их поверхности. Теоретически и экспериментально обоснована эффективность применения водного раствора силиката калия для получения диэлектрического покрытия при производстве ММКМ из распыленных порошков железа и установлено, что на химический состав и структуру покрытий влияют гранулометрический состав и морфология распыленных порошков железа, концентрация K_2O-SiO_2 в водном растворе и параметры технологии нанесения покрытий;

3. Показано, что на магнитные и технологические свойства ММКМ из порошков железа, покрытых силикатом калия влияет не только химический состав и толщина диэлектрика, но и физико-химические процессы, протекающие на границах частиц железа и диэлектрика на всех этапах технологического процесса, наиболее высокими свойствами обладают ММКМ из механически активированных порошков железа, покрытых в растворе силиката калия;

4. Экспериментально выявлено, что максимальную магнитную проницаемость имеют ММКМ, изготовленные из механически активированных порошков ПЖРВ 2.200.30 фракций + 100 - 160 мкм, покрытых силикатом калия, а минимальные удельные магнитные потери при частоте перемагничивания 50 Гц имеют образцы, прессованные из порошков размером частиц + 0,35 - - 0,35, покрытые кремнийорганическим лаком;

5. Установлен механизм физико-химических процессов, протекающих на границах частиц железа, покрытия и пор при спекании ММКМ на основе порошков железа, покрытых силикатом калия. Показано, что после спекания прессовок при 650 - 700 °С химический состав диэлектрического покрытия в ММКМ изменяется в слое K_2O-SiO_2 : в зоне межчастичных контактов концентрация кремния снижается в 2 -3 раза по сравнению с его содержанием в покрытии до спекания, в результате деструкций силиката калия образуется диоксид SiO_2 , как на межчастичных границах порошков, так и на их свободной поверхности, что повышает диэлектрические свойства покрытия;

6. Установлено, что отличительной особенностью уплотнения порошков железа с покрытием из силиката калия толщиной в пределах 20-60 нм является преобладание структурной деформации при прессовании, что позволяет повысить плотность формовок без применения пластификатора и уменьшить дефектность кристаллической структуры металла частиц порошков и оптимизировать режим спекания ММКМ;

7. Показано влияние напряженности и частоты намагничивающего поля на магнитные свойства ММКМ из порошков ПЖРВ, покрытых силикатом калия и другими диэлектриками на магнитную проницаемость, индукцию и удельные потери. В частности, с повышением частоты с 50 до 1000 Гц маг-

нитная индукция в поле напряженностью 1,6 кА/м снижается с 510 до 160, а удельные магнитные потери при этом возрастают с 8 до 24 Вт/кг. Аналогично снижается и магнитная индукция ММКМ с повышением частоты намагничивающего поля.

7. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных автором

Результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах (общим объёмом 7,1 п.л., вклад соискателя 4,72 п.л.), из них работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях (из перечня Минорбнауки России) – 3; патент на изобретение – 1; прочих работ – 8, из них включённых в международную базу цитирования Scopus – 1.

Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены:

- в работах опубликованных в журналах из перечней рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук:

1. Махмудова (Гетто) Е.Р., Гасанов Б. Г., Тамадаев В.Г., Богачёв В. О. Кинетика формирования диэлектрического покрытия на порошки железа для получения композиционных магнитно-мягких материалов = Formation Kinetics of the Dielectric Coatings on Iron Powders for the Fabrication of Soft Magnetic Composite Materials // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2019. № 4. С. 44–54; [Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2020. - Vol.61, Is. 4. – 446-455] (1.29/0.85 п.л.);

2. Гетто Е. Р., Гасанов Б.Г., Михайлов В.В. Нис Я.З. Баев С.С. Влияние гранулометрического состава и морфологии частиц порошка железа на структуру и свойства магнитно-мягких композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2024. № 4. С. 67–76 (1.17/0.74 п.л.);

3. Гетто Е. Р., Гасанов Б.Г., Михайлов В.В. Технологические особенности получения магнитно-мягких композиционных материалов из распыленных порошков железа, покрытых силикатом калия и кремнийорганическим лаком // Технология машиностроения. -2025. - №3. – С. 33-40

-в патенте РФ на изобретение:

4. Пат. 2 810 561 Магнитно-мягкий композиционный материал. Российская Федерация МПК H01F 1/24 (2006.01) B22F 3/12 (2006.01) C22C 33/02 (2006.01) СПК H01F 1/24 (2023.08); B22F 3/12 (2023.08); C22C 33/02 (2023.08)/ Е.Р. Гетто, Б.Г.Гасанов. - № 2023118243; заявл. 11.07.2023; опубл. 27.12.2023, Бюл. № 36;

Научные результаты диссертации отражены так же в следующих научных изданиях:

5. Гетто Е. Р., Гасанов Б. Г., Михайлов В. В., Нис Я.З. Влияние химического состава диэлектрического покрытия на структурообразование и свойства магнитно-мягких композиционных материалов из порошков железа // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2022. № 4. С. 57–64. (0.68 п.л.);

6. Гетто Е.Р., Гасанов Б. Г. Влияние химического и гранулометрического состава порошков железа на структуру и свойства спечённых и горячедеформированных магнитно-мягких материалов // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2021. № 4. С. 65–71 (0.82/0.62 п.л.);

7. Махмудова (Гетто) Е.Р., Гасанов Б. Г., Егоров С. Н., Кебедов Р.Ш. Влияние способа введения кремния и параметров технологии на магнитные свойства порошковых горячештампованных электротехнических сталей // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2020. № 3. С.73-78 (0.7/0.45 п.л.);

8. Махмудова (Гетто) Е.Р., Нуштаев С.О., Чернышев Т.И. Электропривод подвижного состава // Интеллектуальный и научный потенциал XXI века: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., г. Казань, 20 дек.2016 г.: в 6ч.- Уфа: Аэтерна, 2016. -Ч.4. -С. 147–149 (0.09/0.05 п.л.);

9. Махмудова (Гетто) Е.Р., Богачёв В.О., Гасанов Б.Г. Влияние концентрации диэлектрика на магнитные свойства композиционных магнитно-мягких материалов // Студенческая научная весна - 2019: материалы региональной науч.-техн. конф. (конкурса науч.-техн. работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Рост. обл., г. Новочеркасск, 13–14 мая 2019 г. - Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2019. - С. 137 (0.06/0.04 п.л.);

10. Гетто Е.Р. Влияние термостойкой краски Certa на магнитные свойства композиционных магнитно-мягких материалов на основе железа. Студенческая научная весна -2021: материалы региональной науч.-техн.конф. (конкурса науч.-техн.работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Рост.обл., г. Новочеркасск, 13-14 мая 2021 г. / Юж.-Рос. гос. политехнический. ун-т (НПИ) им.М.И. Платова. - Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2021. - С.144 (0.06 п.л.);

11. Гетто Е. Р.,Гасанов Б. Г., Бабец А.В., Богачёв В.О., Михайлов В.В. Влияние режима прессования и спекания на структурообразование и свойства композиционных магнитно-мягких материалов на основе порошков железа, покрытых силикатом натрия. // «Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: Материалы 14 – МНТК, посвящённая 60 - летию порошковой металлургии Беларуси» Минск, 2020 г. (0.82/0.52 п.л.);

12. Гетто Е.Р., Гасанов Б.Г., Михайлов В.В. Характерные свойства магнитно-мягких композиционных материалов на основе порошков железа, покрытых силикатом калия. // Всероссийская научно-практическая конференция Проблемы машиностроения: современные технологии обработки, материалы, машины, агрегаты .11-12 октября 2024 года г. Каспийск (0.23/0.13 п.л.).

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в: [1,10] – обоснована кинетика формирования диэлектрического покрытия на порошки железа и влияние его состава на структуру и свойства

магнито-мягких композиционных материалов из порошков марки ПЖРВ; [2,8] -изучено влияние химического и гранулометрического состава на структуру и свойства магнитно-мягких композиционных материалов; [3] – разработка магнито-мягкого композиционного материала, на основе порошков ПЖРВ с добавлением солей калия и натрия; [4] – показано применение магнито-мягкого материала в электроприводе подвижного состава; [5,6,11,12] -показано влияние различных добавок, их концентрации и способов введения на свойства магнито-мягких композиционных материалов; [7] - изучено влияние режима прессования и спекания на структурообразование и свойства магнито-мягких композиционных материалов.

8. Научная специальность и отрасль науки, которым соответствует диссертация

Диссертация Гетто Елены Руслановны на тему «Структурообразование и свойства магнито-мягкого композиционного материала на основе порошков железа ПЖРВ, покрытых силикатами и солями калия и натрия» соответствует **паспорту научной специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы»**, технической отрасли наук, направления исследований паспорта специальности:

- пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования физических и химических процессов нанесения покрытий в контролируемой среде и вакууме, разработка технологии и оборудования» - исследовано влияние технологии нанесения диэлектрического покрытия из силикатов и солей калия и натрия на порошки марки ПЖРВ;

- пункту 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» - обоснована кинетика формирования диэлектрического покрытия на порошки железа и влияние его состава на структуру и свойства магнито-мягких композиционных материалов из порошков марки ПЖРВ .

Выводы.

Диссертация «Структурообразование и свойства магнито-мягкого композиционного материала на основе порошков железа ПЖРВ, покрытых силикатами и солями калия и натрия» оформлена в соответствии с пунктом 30 Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук и с ГОСТом Р 7.0.11–2011.

Диссертация соответствует требованиям, предъявляемым Положением о присуждении ученых степеней к кандидатским диссертациям, в том числе:

- п.9, является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные теоретические и технологические решения и разработки по изготовлению нового магнито-мягкого композиционного материала на основе использования активированных порошков марки ПЖРВ фракционного состава +100-160 мкм с добавлением силикатов и солей калия и натрия, позволивших повысить магнитные свойства материала на 8-14% по сравнению с аналогами, сократить отходы производства при изготовлении

магнитопровода, исключить трудоёмкие операции, что имеет существенное значение для развития электротехнической промышленности страны;

- п.14, в диссертации соискатель учёной степени ссылается на авторов и источники заимствования материалов или отдельных результатов, а также приводит информацию об использовании в диссертации результатов научных работ, выполненных соискателем как лично, так и в соавторстве.

Диссертация «Структурообразование и свойства магнитно-мягкого композиционного материала на основе порошков железа ПЖРВ, покрытых силикатами и солями калия и натрия» Гетто Е.Р. рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Заключение принято на совместном заседании кафедр «Международные логистические системы и комплексы» и «Материаловедение и технология машиностроения». Присутствовали на заседании 30 чел., в том числе - 7 докторов наук. Результаты голосования: «за» - 30 чел., «против» - нет, «воздержались» - нет, протокол № 9 от «26» мая 2025 г.

Председательствующий на совместном заседании кафедры, заведующий кафедрой «Международные логистические системы и комплексы», кандидат технических наук, доцент

— А. Д. Ефимов

И.о. заведующего кафедрой «Материаловедение и технология машиностроения», кандидат технических наук, доцент

- Д. А. Гринько

Подписи А. Д. Ефимова и Д. А. Гринько
Начальник управления персоналом ЮРГПУ (НПИ)

Г.Г. Иванченко

Заключение соответствует установленным тр

Ученый секретарь
ученого совета ЮРГПУ (НПИ)

✓ Н.Н. Холодкова