

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ГУ.9  
ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА (ДОКТОРА) НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 19.12.2024 № 16

О присуждении Ермакову Сергею Борисовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка технологии и оборудования плазменного распыления порошков для аддитивных машин» по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) принята к защите 15.10.2024, протокол заседания № 15, диссертационным советом ГУ.9 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» Минобрнауки России, 199106, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., дом 2, приказ ректора Санкт-Петербургского горного университета о создании диссертационного совета от 10.03.2023 № 312 адм, с изменениями от 13.07.2023 № 1090 адм, от 05.09.2023 № 1227 адм.

Соискатель, **Ермаков Сергей Борисович**, 04 февраля 1987 года рождения, в 2011 г. соискатель окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий» по специальности «Холодильная, криогенная техника и кондиционирование».

Работает ведущим инженером Научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы» в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

В период с 16.03.2020 г. по 15.03.2023 г., Ермаков Сергей Борисович был прикреплен для подготовки диссертации без освоения программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Диссертация выполнена в научно-технологическом комплексе «Новые технологии и материалы» Центра компетенций Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» (далее – Центр НТИ «НПТ») федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Гюлиханов Евгений Львович, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский

политехнический университет Петра Великого», научно-образовательный центр «Конструкционные и функциональные материалы», профессор.

Официальные оппоненты:

**Герашенков Дмитрий Анатольевич**, доктор технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей" имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра "Курчатовский институт", лаборатория «Функциональные наноматериалы и технологии», начальник лаборатории;

**Корсмик Рудольф Сергеевич**, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Институт лазерных и сварочных технологий, начальник технологического отдела;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – **федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»**, г. Самара, в своем положительном отзыве, подписанным заведующим кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, доктором технических наук, доцентом Носовой Екатериной Александровной и утвержденным и.о. первого проректора – проректором по научно-исследовательской работе, доктором технических наук, доцентом Гареевым Альбертом Минеасхатовичем, указала, что результаты математического моделирования процесса распыления могут быть использованы при отработке процессов распыления металлов и сплавов в промышленных условиях при проектировании и изготовлении промышленно выпускаемых плазменных атомайзеров.

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 13 работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 7 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Общий объем работ – 8,5 печатных листов, в том числе 3,75 печатных листа - соискателя.

Материалы диссертации отражены в следующих печатных работах, опубликованных соискателем:

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

**1. Ермаков С. Б., Гюлиханданов Е.Л.** Получение порошков для аддитивных машин методом плазменного распыления. /Наукоемкие технологии в машиностроении. №6 (120), 2021, с.29-41.

*Соискателем рассмотрены тенденции развития и внедрения аддитивных технологий в России, представлены исследования металла распыленных порошковых частиц стали 12X18H12T, полученных методом плазменной атомизации твердых фидстоков, приведена схема плазменного атомайзера.*

**2. Ермаков С. Б.** Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении / Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021; (1): 7-15.

*Соискателем приводятся результаты исследования влияния ряда технологических параметров на гранулометрический размер, форму и дефектность порошков стали 12X18H9 и сплава ВЖ98. Приведены результаты исследований влияния таких параметров распыления, как сила тока и скорость плазмообразующего газа, подаваемых на плазмотрон и объем защитного газа, подаваемого в факел распыления через форсунки системы «кипящего слоя», расположенного в средней части камеры распыления атомайзера.*

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

**3. Ermakov S. B., Ermakov B. S., Vologzhanina S. A., Sleptsov O. I.** Investigation of Material Properties for Cryogenic Products, Produced by Additive Manufacturing Techniques // Metallurgist. 2023. №67. pp. 644-651. DOI 10.1007/s11015-023-01552-x.

**Ермаков С.Б., Ермаков Б.С., Вологжанина С.А., Слепцов О.В.** Исследование свойств материала для изделий криогенного назначения, полученных методами аддитивных технологий / Metallurg, № 5, 2023. С 67 – 72. DOI 10.1007/s11015-023-01552-x.

*Соискателем представлены результаты исследования порошков, полученных из распыленного порошка, стали 12X18H12T, и образцов, изготовленных методом прямого лазерного сплавления, в диапазоне температур от +600 до –196 °С.*

**4. Ermakov B. S., Ermakov S. B., Vologzhanina S. A., Khuznakhmetov R. M.** Relationship between operating conditions and the emergence of nano- and ultradispersed grain boundary defects in weld joints // Tsvetnye materialy. - 2023. - V 8. - PP. 80-85. DOI: 10.17580/tsm.2023.08.13.

**Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Вологжанина С.А., Хузнахметов Р.М.** Влияние условий эксплуатации на формирование нано- и ультрадисперсных дефектов в сварных соединениях / Цветные металлы, № 8, 2023. С 80 - 85. DOI: 10.17580/tsm.2023.08.13

*Соискателем рассмотрено влияние длительной эксплуатации и высокотемпературных нагревов на работоспособность оборудования, изготовленного из стали 12X18H12T. Показано, что именно зоны сварных соединений являются потенциально опасными относительно выхода из строя отдельных участков низкотемпературного оборудования.*

5. Ermakov B. S., Ermakov S. B., Vologzhanina S. A., Features of Obtaining Ni-Cr-Fe Alloy Powders by Plasma Atomization / Materials Science Forum. Advanced Materials in Industrial and Environmental Engineering II. - 2021. – Volume 1040. – PP. 1-7. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.1.

Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Вологжанина С.А. Особенности получения порошков сплавов Ni-Cr-Fe методом плазменной атомизации / Форум по материаловедению. Передовые материалы в промышленной и экологической инженерии II. - 2021. – Т. 1040. – С. 1-7. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.1.

*Соискателем предложена технология аддитивного выращивания на основе системы Ni-Fe-Cr. Представлены результаты влияния тока, подаваемого на плазматрон, и расхода плазмообразующего газа; скорости подачи проволоки при распылении на количество фракций и соотношение размеров частиц в объеме выхода годного для сплава Инконель 718.*

6. Ermakov Sergey, Shvecov Oleg. Features of obtaining powders for additive machines by plasma spraying // Materials Physics and Mechanics. 2021, V. 47. N. 6. P. 843- 855. DOI: 10.18149/MPM.4762021\_4.

Ермаков Сергей, Швецов Олег. Особенности получения порошков для аддитивных машин методом плазменного напыления // Физика и механика материалов. 2021, Т. 47. № 6. С. 843-855.

*Соискателем представлены данные, подтверждающие возможность использования метода плазменного распыления твердого фидстока для получения высококачественных порошков для аддитивных машин и результаты исследований влияния энергосилового параметра плазменного распыления на геометрические размеры получаемых порошков, их кристаллическую структуру и основные характеристики.*

7. Ermakov B. S., Ermakov S. B., Pavlenko A. A., Vologzhanina S. A. Regulation of powder particle sizes during plasma spraying. //Saint-Petersburg: ITMO University, V 826, 2020. pp. 12007 - 12007. DOI:10.1088/1757-899X/826/1/012007 .

Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Павленко А.А., Вологжанина С.А. Регулирование размеров частиц порошка при плазменном напылении // Санкт-Петербург: Университет ИТМО, Т. 826, 2020. С.-12007-12007.

*Соискателем представлены результаты исследований влияния давления и скорости потока газа, создаваемого в колонне распыления при производстве порошков из сплавов 08X18H10T и ХН60ВТ, на гранулометрический состав.*

8. Ermakov, B.S., The use of sprayed powders to create coatings in the welds of oilfield pipelines / Alkhimenko, A.A., Shaposhnikov, Ermakov S.B, N.O., Shatsky, T.E., Igolkin, A.F. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 826 012008, 2020. DOI:10.1088/1757-899X/826/1/012008 .

Ермаков Б.С. Использование напыляемых порошков для создания покрытий в сварных швах нефтепромысловых трубопроводов / Альхименко

А.А., Шапошников Н.О., Шацкий Т.Е., Иголкин А.Ф. // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. 826 012008, 2020.

*Соискателем рассматривается возможность нанесения порошковых защитных нержавеющей покрытий на внутренние кромки трубы, прилегающие к кольцевому сварному шву. Представлены исследования коррозионной стойкости и механических свойств сварных соединений труб.*

9. Ermakov, S., Gyulikhhandanov, E., Petukhov, E. Influence of temperature and time factor on process of spraying of metallic powders in a plasma atomizer // E3S WEB OF CONFERENCES. Сер. "Energy Systems Environmental Impacts, ESEI 2020" Volume 221. 2020., 02003.

Doi.org/10.1051/e3sconf/202022102003.

**Ермаков, С.,** Гюлиханданов, Е., Петухов, Е. Влияние температурного и временного фактора на процесс распыления металлических порошков в плазменном распылителе // E3S WEB OF CONFERENCES. Сер. «Воздействие энергетических систем на окружающую среду ESEI 2020». Том 221. 2020., 02003. Doi.org/10.1051/e3sconf/202022102003.

*Соискателем предложен метод математического моделирования предельно допустимой температуры стенок колонны распыления во избежание порошковых отложений, определены способы стабилизации, исследовано качество порошка при промышленном производстве в зависимости от технологических параметров распыления.*

*Патент:*

1. Ермаков Б. С., **Ермаков С. Б.**, Одноблюдов М.А. Устройство для получения металлических порошков. Патент на полезную модель 204335 U1, 20.05.2021. Заявка №2020140625 от 09.12.2020.

*Соискателем разработаны чертежи и рассчитана математическая модель функционирования устройства для получения металлических порошков (на которой основывались данные о структуре разработки).*

Апробация основных положений и результатов исследований диссертационной работы проведена на научно-практических мероприятиях с докладами:

1. Всероссийская конференции с международным участием «Хладостойкость. Новые технологии для техники и конструкций Севера и Арктики» Якутск, 2016 г; тема доклада «Разработка оборудования получения металлических материалов для аддитивного производства».

2. «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECSE 2018» 2018; тема доклада «Разработка оборудования получения металлических материалов для аддитивного производства».

3. IX Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 13 - 15 ноября 2019 г.); тема доклада «Регулирование размеров порошковых частиц при плазменном распылении».

4. Международный семинар «Нанофизика и наноматериалы» СПб, 2021 г.; тема доклада «Структура и низкотемпературные свойства изделий криогенного назначения, полученных методами 3D-печати».

5. «Нанофизика и наноматериалы» Международный симпозиум СПб, 2023; тема доклада: «К возможности получения порошков легированных сплавов системы Co-Cr в системы Co-Cr для 3D-принтеров методами плазменной атомизации».

В диссертации Ермакова Сергея Борисовича отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от: ведущего эксперта (развитие партнерств) АО «Северсталь Менеджмент», к.т.н. **А.И. Карлиной**; начальника металлографической лаборатории ЦЗЛ АО "Северо-Западный региональный центр Концерн ВКО "Алмаз-Антей" - Обуховский завод", к.т.н. **С.А. Пескишева**; заведующего кафедрой технологии художественной обработки материалов и ювелирных изделий ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», д.т.н., профессора **Л.Т. Жуковой**; профессора кафедры «Материаловедение и технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессора **В.Ю. Дорофеева**; доцента кафедры литейных процессов и материаловедения ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», д.т.н., доцента **Е.В. Петроченко**; заведующего кафедрой Материаловедения, сварочных и аддитивных технологий ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», к.т.н., доцента **А.Е. Балановского**; главного научного сотрудника отдела «Технологий сварки и металлургии» ИФТПС СО РАН, д.т.н. **Н.И. Голикова**; профессора кафедры 1105 МАИ, д.т.н., доцента **С.А. Одиноква**.

Все отзывы положительные. В них дана оценка проведенных исследований, отмечена актуальность темы, степень проработки вопроса и профессиональный подход к решению поставленных задач, однако имеется ряд замечаний.

1. Имеются опечатки и неточности. Не приведено обоснование почему именно такой набор материалов был выбран для исследования: стали 20, 07X16H6, 12X18H10T, ЭИ417, сплавы титана – ВТ1-0, ВТ3-1 и ВТ6, никеля – Инконель 718, меди – БрАЖ9-4 и БрОФ8-0,3 (к.т.н. **А.И. Карлина**);

2. В автореферате указано, что плазменный атомайзер может быть использован для получения порошков сплавов цветных металлов. Для каких диаметров проволок возможно проведение плазменной атомизации. Есть ли ограничения по температурам плавления сплавов? (к.т.н. **С.А. Пескишев**);

3. Практически вся информация по работе относится к получению порошков на основе железа, уточните условия получения порошков цветных металлов и сплавов (д.т.н. **Л.Т. Жукова**);

4. Отсутствует сравнение со свойствами порошков-аналогов и материалов на их основе, полученных по известным технологиям с использованием традиционного оборудования (д.т.н. **В.Ю. Дорофеев**);

5. Не приведены конкретные значения параметров промышленной установки плазменной атомизации металлических порошков, обеспечивающие требуемый уровень качества порошковой продукции (с.6) (д.т.н. **В.Ю. Дорофеев**);

6. Для каких групп сплавов на основе железа, кроме Cr-Ni сталей, может быть использован метод плазменной атомизации (д.т.н. **Е.В. Петроченко**);

7. В задачах исследований стоит получение порошков с заданным уровнем сферичности, но в главе 2, 3 нет требований к форме частиц, не описан метод оценки уровня сферичности частиц. Как соискатель определял, что эта форма порошка – сфера, а это частично сфера, а этот порошок не сферический? (к.т.н. **А.Е. Балановский**);

8. Не совсем понятно, зачем дополнительно определять химический состав в боковых ветвях дендритного кристалла и междендритном пространстве, если есть общий химический анализ состава порошка в объеме? Если это надо делать, то, что нам дает эта информация с точки зрения оценки качества порошка при производстве и в последующем непосредственно при использовании в условиях аддитивного производства? (к.т.н. **А.Е. Балановский**);

9. В автореферате практически не отсутствуют фотографии микроструктур частиц полученных порошков, недостаточно обсуждены вопросы формирования кристаллической микроструктуры частиц порошка. Более подробное изложение этого раздела позволило бы дополнительно верифицировать процессы математического моделирования (д.т.н. **Н.И. Голиков**);

10. Так как изготовленные порошки в дальнейшем планируется использовать в 3D-принтерах, было бы полезно исследовать процессы лазерного сплавления частиц порошка, образования новых межфазных границ образующегося материала (д.т.н. **Н.И. Голиков**);

11. В автореферате практически отсутствуют фотографии микроструктур распыленных порошков, что не позволяет определить наличие или отсутствие в этих порошках как внутренних, так и внешних дефектов – пор, трещин, расслоев и т.п. Было бы полезно более полно оценить структурную однородность полученных порошковых частиц (д.т.н. **С.А. Одинок**);

12. Автор предлагает использовать для контроля температуры газовой атмосферы внутри колонны распыления – температуру охлаждающей среды на выходе из двухслойной колонны распыления.

Однако, в зависимости от места расположения оборудования и времени года – исходная температура воды может существенно отличаться, соответственно может существенно изменяться разницы в температуре на входе и выходе охлаждающей жидкости. Не скажется ли это на стабильности работы оборудования? (д.т.н. С.А. Одинок).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием исследований и публикаций по теме диссертационной работы и их компетентностью в области диссертационного исследования.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработана** новая научная идея принципа процесса распыления в условиях длительного непрерывного производства порошка, на основании которой выполнено проектирование промышленной установки плазменного распыления;

**предложены** утверждения, позволяющие оценить влияние энергосиловых параметров распыления, составов распыляемых фидстоков и плазмообразующего газа на качество распыляемых порошков;

**доказана** перспективность использования полученных энергосиловых параметров плазменного атомайзера в практике получения порошков сплавов железа, цветных металлов и их сплавов;

**введены** новые понятия в оценке критерия качества порошковых частиц для аддитивных машин, учитывающие в совокупности гранулометрический состав, уровень сферичности, чистоту химического состава материала в объеме частицы, и химическую чистоту ее поверхности.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказаны положения:** определены базовые параметры и технологические режимы распыления металлических порошков для аддитивного производства в плазменных атомайзерах, использующих схему с одним и тремя независимо действующими генераторами плазмы для получения металлических порошков Cr-Ni сталей; доказана возможность использования плазменного атомайзера для получения порошков цветных металлов и их сплавов; разработаны требования к условиям распыления порошков цветных металлов и их сплавов;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)

**использован** комплекс современных базовых методов исследования, в том числе методик обработки экспериментальных данных;

**изложены** современные идеи и подходы к разработке методов получения порошковых частиц металлов и их сплавов;

**раскрыты** несоответствия результатов лабораторных разработок с данными промышленного производства, связанные со снижением объема выхода годного из-за образования внутри колонны распыления замкнутых газовых



вихрей, приводящих к образованию отложений частиц порошков на стенках колонны;

**изучены** факторы влияния энергосиловых параметров распыления, составов распыляемых проволок и качества плазмообразующего газа на форму, химический и гранулометрический состав порошков;

**проведена модернизация** цифровой модели процесса распыления в промышленном атомайзере, позволяющая определить технологические параметры процесса распыления для стабильного получения товарных фракций порошка Cr-Ni сталей в ходе длительного распыления и обеспечивающая получение новых результатов по теме диссертации.

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

**разработана и внедрена** технология распыления металлических порошков нержавеющей стали, сплавов титана, никеля, меди, предложены режимы распыления порошков в условиях промышленного производства. Полученные результаты внедрены в промышленность, а именно в ПАО «Северсталь» («ССМ-Тяжмаш») и АО «ОЗ «Микрон»;

**определены** пределы и перспективы практического использования теории получения качественных порошков сплавов Fe, Ti, Ni, Co, Cu в струе плазмы в промышленном атомайзере;

**создана** система практических рекомендаций по получению стабильного выхода товарных фракций порошка Cr-Ni сталей в ходе длительного распыления для промышленного атомайзера;

**представлены** предложения по дальнейшему совершенствованию технологического процесса распыления металлов и сплавов, а также проектирования и изготовления промышленно выпускаемых плазменных атомайзеров.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**для экспериментальных работ** результаты получены на сертифицированном оборудовании, обоснованы калибровки, показана воспроизводимость результатов с учетом статистической обработки результатов исследования;

**теория** построена на известных, проверяемых данных и фактах, согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

**идея базируется** на анализе практики и обобщении передового опыта получения металлических порошков, разработки и изготовлении оборудования, подборе технологических режимов распыления фидстоков для получения металлических порошков черных и цветных металлов и их сплавов с заранее заданными показателями свойств и химического состава для аддитивного производства;

**использованы** сравнения авторских данных и данных, полученных ранее по рассматриваемой тематике;

**установлено** качественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике;

**использованы** современные методики сбора, обработки, анализа исходной информации в контексте поставленных и решенных в диссертационной работе задач.

**Личный вклад соискателя состоит в:** постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной литературы; инициативе и проведении теоретических и экспериментальных исследований, участии соискателя в получении исходных и научных данных в ходе проведения экспериментов, обработке и трактовке полученных результатов, подготовке публикаций, отражающих основные положения и результаты диссертационной работы. Все этапы экспериментальной работы проведены лично соискателем или при его активном участии.

В ходе защиты диссертации не было высказано критических замечаний.

Соискатель Ермаков С.Б. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел убедительные аргументы в защиту высказанных положений.

На заседании 19.12.2024 года диссертационный совет принял решение присудить **Ермакову Сергею Борисовичу** ученую степень кандидата технических наук за новые научно обоснованные технологические решения и разработки в области промышленного производства порошковых материалов для аддитивных производств, имеющие существенное значение для развития экономики страны и поддержания технологического суверенитета государства.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 9 докторов наук (по научной специальности рассматриваемой диссертации), участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 16, против – нет, ~~недействительных бюллетеней – нет.~~

Председатель  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Максаров  
Вячеслав Викторович

Ефимов  
Александр Евгеньевич

19.12.2024 г.