

На правах рукописи

Ермаков Сергей Борисович



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ
ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПОРОШКОВ
ДЛЯ АДДИТИВНЫХ МАШИН**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Гюлиханданов Евгений Львович

Официальные оппоненты:

Геращенко 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.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара.

Защита диссертации состоится **19 декабря 2024 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 19 октября 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из наиболее затратных по «производству отходов» является металлообрабатывающая промышленность, где коэффициент использования металла при производстве продукции не превышает 50–60%, а при изготовлении сложных изделий даже 5–10%. Прибегнув к политике разумного потребления и повысив тем самым коэффициент использования металла, можно добиться постепенного смещения центра тяжести таких производств от вычитающих операций (точения, фрезерования, сверления и т. д.) в сторону аддитивных технологий 3D-печати, где производство изделий осуществляется методом послойного выращивания деталей из мелкодисперсных порошков металлов и сплавов. Этот путь развития требует изменения целого ряда технологических процессов производства отдельных деталей и узлов, машин и механизмов. Наиболее активно замещение вычитающих процессов на 3D-технологии отмечается в таких отраслях, как авиационная промышленность, судостроение, энергетическое машиностроение, а также стоматология и восстановительная хирургия. Одним из сдерживающих факторов развития аддитивных технологий является недостаточное качество исходного сырья – порошков металлов и сплавов. Значения характеристик качества ряда порошков не являются стабильными и изменяются от партии к партии и на различных этапах жизненного цикла, что осложняет внедрение технологических процессов аддитивного производства. Таким образом, внедрение аддитивных процессов производства как отдельных узлов и деталей, так и изделий может быть осуществлено только при обеспечении надлежащего качества исходного порошкового сырья.

Одним из перспективных путей создания качественных металлических порошков является плазменное распыление твердых металлических заготовок (фидстоков) в струе плазмы. Получение качественных распыленных порошков возможно только путем комплексного моделирования процесса плазменного

распыления и создания математической модели поведения расплавленных микрокапель металла в герметически обособленной от внешней среды колонне распыления плазменного атомайзера.

Вышеизложенное подтверждает актуальность диссертационной работы, посвященной разработке перспективных путей создания качественных металлических порошков для аддитивных машин различных типов путем плазменного распыления твердых металлических заготовок в разработанном и изготовленном для этих целей плазменном атомайзере.

Степень разработанности темы исследования

Основными ограничениями развития аддитивных производств в России является недостаточная материальная база для производства качественных металлических порошков. В стране практически не изготавливается оборудование для производства металлических порошков и их распыление осуществляется или на импортных, крайне дорогостоящих установках, или на самостоятельно изготовленных атомайзерах. В значительной степени отсутствует научно-технологическая и нормативно-техническая базы, опираясь на которые можно было бы в кратчайшие сроки создать отечественную индустрию производства высококачественных порошков различного назначения.

Объект исследования – процесс создания технологии и оборудования плазменного распыления порошков для аддитивных машин.

Предмет исследования – оценка влияния способа и режима получения аддитивных порошков металлов и сплавов на их состав и свойства.

Цель работы заключается в разработке технологии получения порошков черных и цветных металлов и их сплавов требуемого химического состава и показателей свойств.

Идея работы состоит в научном обосновании, разработке 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.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Провести анализ влияния энергосиловых параметров распыления, составов распыляемых проволок и качества плазмообразующего газа на качество распыляемых порошков.

2. Выполнить проектирование и изготовить полноразмерный макет атомайзера для плазменной атомизации и определить основные технологические параметры распыления порошков нержавеющей стали.

3. Исследовать физические свойства, структуру и свойства распыленных порошков Cr-Ni сталей, проверить применимость полученных порошков в установках 3D-печати.

4. Провести компьютерное моделирование термодинамических процессов, происходящих в колонне распыления и системе сбора порошков плазменного атомайзера.

5. На основании результатов исследований и компьютерного моделирования разработать проект промышленного атомайзера, обеспечивающего получение порошковой продукции с заданным уровнем сферичности, гранулометрического, химического составов и дефектности частиц.

6. Определить технологические параметры получения металлических порошков сплавов цветных металлов и сплавов, пригодных для использования в условиях промышленного производства порошковой продукции и обеспечивающих свойства частиц и порошка в целом, соответствующие требованиям нормативно-технической документации.

Научная новизна работы определяется следующими результатами проведенных исследований:

1. Теоретически обоснованы и экспериментально доказаны новые принципы распыления проволок из хромоникелевых сталей, реализованные на макетной установке для плазменной атомизации.

2. Выполнено компьютерное моделирование и разработана цифровая модель процесса распыления металлических проволок и термодинамических процессов, происходящих в колонне распыления плазменного атомайзера при одновременной работе одного и трех генераторов плазмы.

3. На основании компьютерного моделирования и расчетно-теоретического анализа процессов образования капли расплавленного металла, условий ее диспергизации, кристаллизации и охлаждения определены конструктивные и технологические параметры промышленной установки плазменной атомизации металлических порошков, обеспечивающие требуемый уровень качества порошковой продукции.

4. Исследованы и экспериментально подтверждены оптимальные параметры распыления металлических порошков в зависимости от химического состава, диаметров и скоростей подачи распыляемых проволок.

5. Показана взаимосвязь между геометрической формой, гранулометрическим, химическим составами распыляемых порошков, технологическими режимами распыления металлической проволоки и механическими свойствами изделий, полученных из распыленных порошков.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности 2.6.17. Материаловедение по пунктам 8. Разработка и компьютерная реализация математических моделей физикохимических, гидродинамических, тепловых, хемореологических, фазовых и деформационных превращений при производстве, обработке, переработке и эксплуатации различных металлических, неметаллических и композиционных**

материалов. Создание цифровых двойников технологических процессов, а также разработка специализированного оборудования; 14. Развитие научных основ комплексного использования сырья, местных сырьевых ресурсов и техногенных отходов для получения металлических, неметаллических и композиционных материалов для деталей, изделий, машин и конструкций.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Показано, что результаты математического моделирования процесса распыления могут быть использованы при обработке процессов распыления металлов и сплавов в промышленных условиях при проектировании и изготовлении промышленно выпускаемых плазменных атомайзеров.

2. Разработаны технологические режимы плазменного распыления порошков нержавеющей стали, сплавов титана, никеля, меди, получены опытные партии порошков, исследованы их физические и технологические свойства, доказана возможность их использования в аддитивном производстве. Установлено, что механические свойства образцов, полученных из распыленных порошков, соответствуют требованиям нормативно-технической документации на данные марки.

3. Изготовлен полноразмерный макет плазменного атомайзера, позволяющий исследовать процесс плазменного распыления, разрабатывать технологии производства и получать порошки сталей и сплавов цветных металлов заданного гранулометрического состава. Получен патент РФ на полезную модель №204335 «Устройство для получения металлических порошков».

4. Разработана и промышленно опробована 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 в ПАО «Северсталь» («ССМ-Тяжмаш») (получен акт о внедрении

результатов диссертации от 26 декабря 2023 и АО «ОЗ «Микрон».

Методология и методы исследования. Проведены исследования процесса распыления порошков Cr-Ni сталей и сплавов цветных металлов, химического и гранулометрического составов, геометрической формы, физических свойств полученных порошков, методами 3D-печати изготовлены образцы и проведены механические испытания полученных материалов. Выполнен расчет газодинамических процессов в колонне распыления атомайзера. Механические свойства испытаны на разрывных машинах INSTRON 8801. Анализ частиц порошка выполнен на оптическом микроскопе Reichert-Jung MeAF-3A с программным обеспечением ThixometPro, растровом электронном микроскопе Zeiss Supra 55VP.

На защиту выносятся следующие положения:

1. 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.

2. Доказана возможность использования плазменного атомайзера для получения порошков цветных металлов и их сплавов. Разработаны требования к условиям распыления порошков цветных металлов и их сплавов.

Степень достоверности результатов исследования обеспечиваются воспроизводимостью и согласованностью полученных результатов, подтверждается большим объемом экспериментальных исследований, проведенных для подтверждения основных теоретических положений, применением современного сертифицированного исследовательского оборудования и лицензионных программных средств для обработки информации, корректностью постановки задач исследования и комплексным подходом.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Всероссийская конференция с международным участием «Хладостойкость. Новые технологии для техники и конструкций Севера и Арктики» Якутск, 2016 г.; «International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering, EECSE 2018» 2018; IX Международная научно-техническая конференция "Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке" (Санкт-Петербург, 13 - 15 ноября 2019 г.); Международный семинар «Нанозифика и наноматериалы» СПб, 2020 г.; «Нанозифика и наноматериалы» Международный симпозиум СПб, 2022, 2023.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, выдвижении основных идей и их научном обосновании, выборе методов исследований и проведении экспериментов, интерпретации экспериментальных данных, участии в проектировании макетного и промышленного атомайзеров, изготовлении, монтаже и пусконаладке макетной установки. Все экспериментальные результаты и анализ полученных результатов, включенные в диссертацию, получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 13 печатных 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, ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 7 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, библиографического списка, включающего 181 наименование, и 2

приложений. Диссертация изложена на 163 страницах, содержит 32 таблицы и 55 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность выбранной темы и степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследований, обсуждена достоверность результатов исследований и их апробация.

В первой главе обоснованы требования к оборудованию для производства металлических порошков для аддитивных машин, основанные на принципах риск-ориентированного мышления и включающие анализ основных факторов и условий, необходимых для обеспечения процесса получения металлических порошков и управления этими процессами. Показано, что наиболее перспективными видами оборудования для получения порошков заданного состава и свойств являются плазменные атомайзеры – малогабаритные и недорогие системы, работающие на принципе плазменного распыления твердых металлических фидстоков.

Во второй главе приводятся данные о разработанном плазменном атомайзере, его основные технические характеристики и данные об использованных металлических материалах: сталях 20, 07X16H6, 08X18H9, 12X18H10T, ЭИ417, сплавов титана - ВТ1-0, ВТ3-1 и ВТ6, никеля - Инконель 718, меди - БрАЖ9-4 и БрОФ8-0.3. В качестве плазмообразующего и защитного газа при распылении проволок был использован аргон высокой чистоты марок 5.5 (ТУ 2114-006-45905715-2010) и 5.6 (ТУ 2114-005-53373468-2006). Приведены данные о методах математического моделирования, методах исследований распыленных порошков и образцов, изготовленных из них.

В третьей главе подтверждена возможность получения качественных металлических порошков при распылении

твердых фидстоков в потоке плазмы; рассмотрен макет атомайзера и определены основные энергосиловые и технологические параметры процесса плазменного распыления Cr-Ni сталей, приведены данные результатов исследований полученных порошков и изготовленных из них методами 3D-печати образцов.

В четвертой главе показана невозможность переноса лабораторных режимов распыления порошков на производственные технологии. Выявлены дополнительные факторы, влияющие на качество порошков в ходе длительного промышленного процесса, разработана цифровая модель процесса распыления порошков в колонне атомайзера при промышленном использовании установки.

В пятой главе определены параметры работы атомайзера для получения порошков при распылении цветных сплавов на основе титана, никеля и меди.

В заключении обобщены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. 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.

Для первоначального подтверждения возможности получения порошков процесс распыления был осуществлен на открытом воздухе (рисунок 1а) с использованием проволок сталей 20 и 08X18H9 диаметром 2 мм. Определено, что для получения сферических порошков достаточным является ток 200–300 А, при скорости плазмообразующего газа 40–50 л/мин, что обеспечивает сферичность (φ) 85–95% и средний размер распыленных частиц (d_{50}) 100–150 мкм. Однако, металлографический и

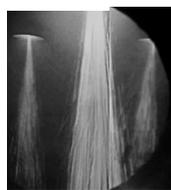
химико-спектральный анализ частиц показал, что их поверхность покрыта слоем окислов. Подтверждено, что методом плазменного распыления возможно получение сферических частиц, однако для получения качественных порошков необходимо вести процесс в защитной атмосфере аргона. С целью оптимизации процесса распыления в работе был проведен математический расчет и выполнены работы по конструированию макета атомайзера по универсальной схеме, позволяющей вести процесс распыления в одно-, двух- и трехплазмотронном режиме. На рисунке 1б показан общий вид макета плазменного атомайзера и факелы распыления (рисунок 1в) твердых фидстиков при трехплазмотронном включении атомайзера. По результатам термодинамических расчетов, включающих в себя расчет скорости формирования первичной капли, ее взрывного разрушения, формирования расплавленной частицы, скорости ее кристаллизации и охлаждения, размеров факелов распыления и т. п. были обоснованы и приняты для проектирования основные габаритные размеры колонны.



а



б



в

Рисунок 1 - Получение металлических порошков: а) распыление на открытом воздухе; б) общий вид макета атомайзера; в) факелы распыления (при трехплазмотронной компоновке атомайзера)

Рассмотрено влияние энергосиловых параметров распыления на сферичность ϕ , содержание кислорода в поверхности и средний размер частиц d_{50} распыленного порошка сталей 20 и 08X18N9. Установлено, что условиями получения качественных распыленных порошков являются основные технологические параметры процесса распыления – сила тока (I), скорость

плазмообразующего газа (V_{Γ}), скорость защитного газа ($V_{зг}$), скорость подачи ($V_{пр}$) и диаметр фидстока, которые были определены методами математического планирования экспериментов и построением функций отклика процесса. Оптимизация проведена по параметру «выход годного» - процента содержания товарного порошка (40–140 мкм), отвечающего требованиям и условиям аддитивного процесса в общей распыленной массе металла. Использованы проволоки сталей 08X18H9, 07X16H6 и 12X18H12T диаметрами от 1,0 до 3,5 мм. На рисунке 2 приведены результаты одного из расчетов для проволоки стали 08X18H9 диаметром 1,2 мм и фотографии полученных после оптимизации процесса частиц распыленного порошка.

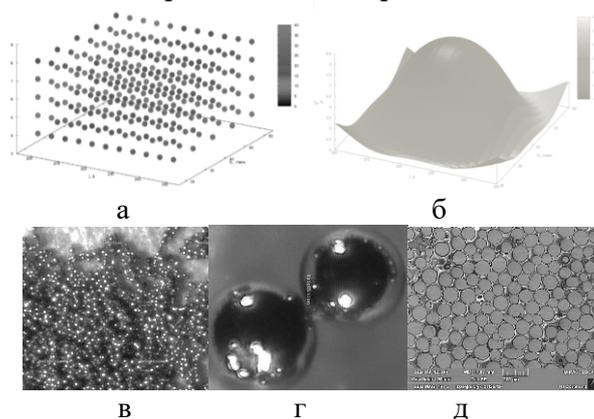


Рисунок 2 - Поверхность функции отклика по параметру «выход годного» до (а) и после этапа крутого восхождения (б), частицы распылённого порошка стали 08X18H9 (в, г) и микрошлиф порошковых частиц (д)

Исследования химического состава исходных проволок и распылённых порошков Cr-Ni приведены в таблице 1. Установлено сохранение химического состава исходного фидстока в распылённом порошке. Текучесть порошков нержавеющей сталей (фракции 40–140 мкм) находится в пределах 21,7–22,0,

соответствуя требованиям ГОСТ 14086–68 (порошки группы А). Насыпная плотность порошков составляет 3,7–3,9 г/см³.

Таблица 1 - Химический состав исходных проволок Cr-Ni сталей и средний состав распыленного порошка

Материал	Химический состав, масс.%										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti					
Проволока 08X18H9	0,07	0,49	1,14	18,20	9,49	-					
Состав порошка	0,08	0,48	1,14	18,18	9,40	-					
Проволока 12X18H12T	0,10	0,66	0,95	17,61	11,37	0,17					
Состав порошка	0,10	0,64	0,94	17,57	11,29	0,17					
Проволока 07X16H6	0,05	0,41	0,67	16,93	6,97	-					
Состав порошка	0,05	0,39	0,64	16,95	6,99	-					
Содержание серы, азота, кислорода и углерода в порошках Cr-Ni сталей, масс. %											
08X18H9		12X18H12T				07X16H6					
C	N	O	S	C	N	O	S	C	N	O	S
0,07	0,006	0,017	0,01	0,11	0,005	0,009	0,01	0,04	0,008	0,010	0,01

Образцы, полученные методом 3D-печати, были испытаны в исходном (после выращивания) состоянии и после термической обработки (таблица 2), по режимам, принятым для этих сталей - ГОСТ 5949–2018.

Таблица 2 - Механические свойства термически обработанных образцов

Сталь марки	Б _В	Б _{0,2}	δ ₅	КСУ
	МПа		%	кДж/м ²
07X16H6	1090	890	16	711
08X18H9	510	220	49	340
12X18H12T	530	227	50	304

По результатам испытания на одноосное статическое растяжение при повышенных температурах для образцов из стали 12X18H10T установлено, что механические свойства стали в диапазоне температур 500-600 °С монотонно снижаются - величина Б_В снизилась с 430 до 360 МПа, Б_{0,2} – от 190 до 150 МПа, δ₅ от 36 до 31%. Значения механических свойств

образцов, полученных аддитивными методами, показали полное соответствие требованиям ГОСТ 5949–2018 и других нормативно-технических документов для хромоникелевых сталей.

2. Доказана возможность использования плазменного атомайзера для получения порошков цветных металлов и их сплавов. Разработаны требования к условиям распыления порошков цветных металлов и их сплавов.

С помощью цифровой модели решены термодинамические задачи о процессах, происходящих при распылении фидстоков в плазменном факеле и дальнейшем образовании и кристаллизации частиц, и их движении в объеме колонны (рисунки 3-6). Цифровая модель атомайзера позволяет с минимальным объемом испытаний разработать режимы распыления порошков различных металлов и сплавов, в том числе, сплавов на основе цветных металлов: титана, никеля и меди.

Титан технический ВТ1-0 и сплавы – ВТ6 и ВТ3-1. В работе были определены оптимальные параметры процесса распыления титана и его сплавов с выходом годного в диапазоне 56–59 %, сферичностью порошков на уровне 95 %, дефектность не превышала 0,30 %. На рисунке 7 представлены фотографии полученных порошков, распыленных по рассчитанному режиму. Предлагаемый режим распыления проволок был опробован при одно- и трехплазмотронной схеме распыления.

Никель - одним из наиболее распространенных сплавов данной системы является сплав Inconel 718. Установлено, что в условиях распыления фидстоков из сплава Инконель 718 допустимо и экономически обосновано распыление проволок диаметрами 1,5–2,0 мм с выходом товарных фракций, достигающих 60 %, сферичность полученных частиц достигает 95–97 %, наличие поверхностных и внутренних дефектов в частицах порошка не превышало 0,25 %.

1. Разработана и научно обоснована принципиальная схема плазменного атомайзера, определены энергосиловые режимы распыления проволок металлов и сплавов; получены металлические порошки сплавов Fe, Ti, Ni, Co, Cu с заданными показателями сферичности, гранулометрического и химического составов частиц. Разработан и реализован проект промышленного атомайзера. На разработанное устройство получен патент РФ №204335.

2. Проведен анализ влияния энергосиловых параметров распыления, составов распыляемых проволок и качества плазмообразующего газа на форму, химический и гранулометрический состав порошков. Полученные данные позволили рассчитать основные элементы полноразмерного макета и промышленного атомайзера.

3. Выполнено проектирование и изготовлен макет полноразмерного плазменного атомайзера. Разработана технология и определены основные технологические и энергосиловые параметры распыления Cr-Ni сталей для получения выхода товарных фракций (40–140 мкм) на уровне 60 %, со сферичностью частиц >95% и минимальным количеством внешних и внутренних дефектов, обладают идентичным с исходными проволоками составом.

4. Показано, что механические свойства образцов, изготовленных из распыленных порошков Cr-Ni сталей методами аддитивного производства полностью соответствуют требованиям нормативно-технической документации к данным маркам сталей, что доказывает возможность использования распыленных порошков в качестве материалов 3D-печати при изготовлении деталей и изделий ответственного назначения.

5. Выявлено, что автоматический перенос результатов лабораторных разработок атомизации на промышленное производство невозможен, так как увеличение времени распыления более 60 минут приводит к снижению годного и увеличению среднего размера распыленных частиц (d_{50}). Причиной снижения объема

выхода годного является образование внутри колонны распыления замкнутых газовых вихрей, приводящих к образованию отложений частиц порошков на стенках колонны.

6. Выполнено математическое моделирование процесса распыления фидстоков в производственных условиях. Построена цифровая модель процесса распыления в промышленном атомайзере. Определены технологические параметры процесса распыления, обеспечивающие стабильность выхода товарных фракций порошка Cr-Ni сталей в ходе длительного распыления.

7. Определены параметры эксплуатации промышленного атомайзера, необходимые для получения качественных порошков сплавов Fe, Ti, Ni, Co, Cu в струе плазмы. Установлены базовые энергосиловые параметры распыления проволоки, обеспечивающие рентабельность получения товарных партий порошков для аддитивного производства.

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение исследований для получения порошковых материалов на основе тугоплавких металлов.

Результаты диссертационного исследования рекомендуются к применению при получении порошковых материалов на основе Fe, Ni, Ni, Co и Cu с заданными показателями свойств для аддитивных машин различных типов, в производственной деятельности предприятий авиационной промышленности, судостроении, энергетическом машиностроении.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

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

2. Ермаков, С. Б. Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении. / Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021.- №1. - С.7-15.

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.

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 metally. - 2023. – V. 8. - PP. 80-85. DOI: 10.17580/tsm.2023.08.13.

5. Ermakov, S. B., Vologzhanina, S. A., Ermakov, B. S. 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.

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

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. - 2020. - V 826. - PP. 12007 - 12007. DOI: 10.1088/1757-899X/826/1/012007.

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. - 2020. - V 826. - 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/826/1/012008.

9. Ermakov, S., Gyulikhandanov, E., Petukhov, E. Influence of temperature and time factor on process of spraying of metallic powders in a plasma atomizer. E3S WEB OF CONFERENCES. Ser. "Energy Systems Environmental Impacts, ESEI 2020". - V 221. - 2020. - 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/202022102003.

Публикации в прочих изданиях:

10. Ермаков, Б. С., **Ермаков, С. Б.**, Одноблюдов, М.А., Теплухин, В.Г. Разработка оборудования получения металлических материалов для аддитивного производства. В сборнике: Хладостойкость. Новые технологии для техники и конструкций Севера и Арктики. - 2016. - С. 22-29.

11. Ермаков, Б. С., **Ермаков, С. Б.**, Павленко, А., Вологжанина, С.А. Регулирование размеров порошковых частиц при плазменном распылении. IX Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 13–15 ноября 2019 г.). Т. I: Материалы конференции. – СПб.: Университет ИТМО. - 2019. - С.108-112.

12. **Ермаков, С. Б.**, Вологжанина, С.А., Ермаков, Б. С., Слепцов, О. И. Структура и низкотемпературные свойства изделий криогенного назначения, полученных методами 3D-печати / Сборник научных трудов «Нанозифика и наноматериалы» СПб, РИЦ Санкт-Петербургского горного университета. - 2021. - С.82-87.

13. **Ермаков, С. Б.**, Вологжанина, С.А., Ермаков, Б. С., Хузнахметов, Р.М., Седова, А.М. К возможности получения порошков легированных сплавов системы Со-Сг в системы Со-Сг для 3D-принтеров методами плазменной атомизации / Сборник научных трудов «Нанозифика и наноматериалы» СПб, РИЦ Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. - 2023. - С.90-95.

Патент:

14. Патент № 204335 Российская Федерация, МПК В22F9/14 (2006/01) Устройство для получения металлических порошков: №2020140625: заявлено 09.12.2020: опубликовано 20.05.2020 Бюл. № 14 /Ермаков Б. С., **Ермаков С. Б.**, Одноблюдов М.А.; заявитель ФГБОУ ВО «СПбПУ».

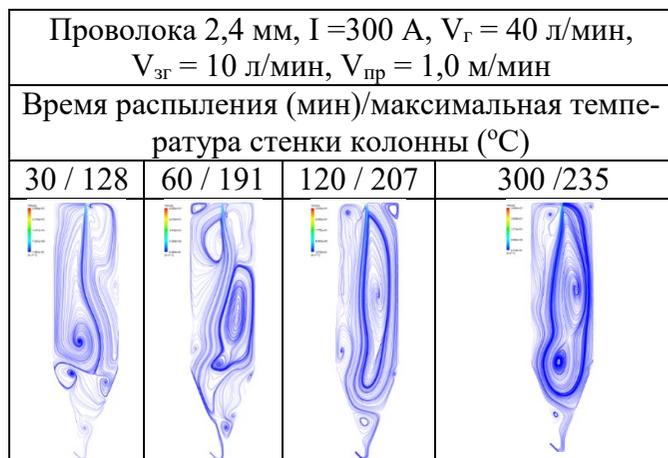


Рисунок 3 - Газовые потоки в колонне распыления атомайзера

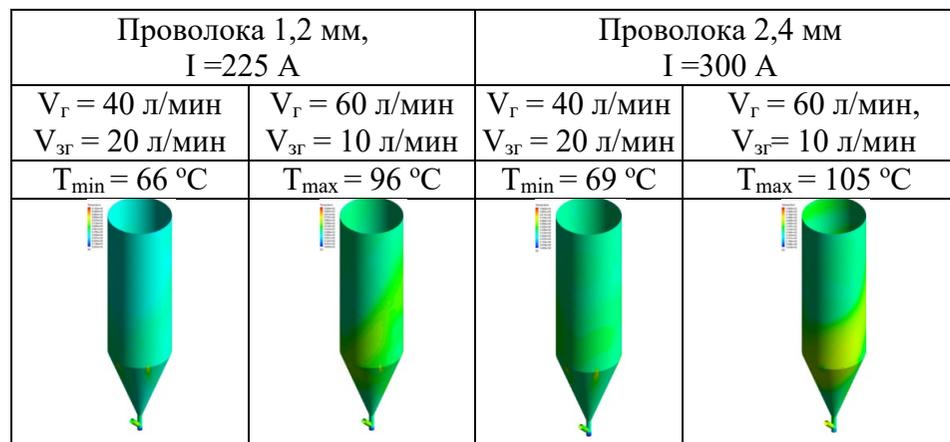


Рисунок 4 - Термограммы колонны распыления в зависимости от режима распыления (минимальные и максимальные температуры) при распылении проволок стали 08X18H9, диаметром 1,2 и 2,4 мм

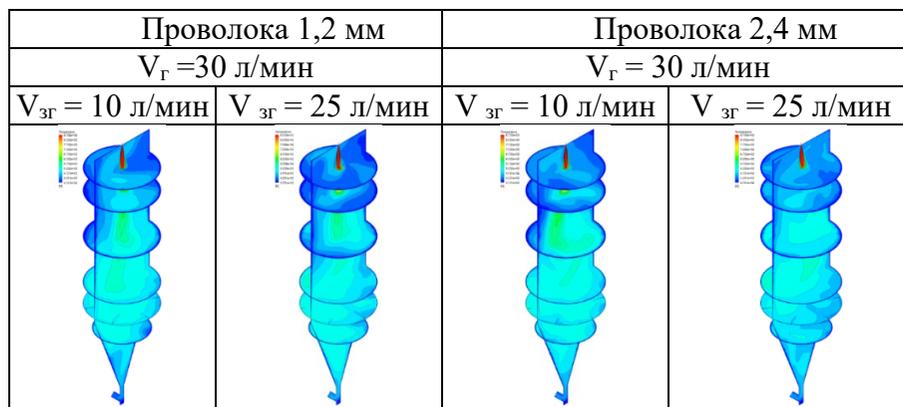


Рисунок 5 - Распределение температур в колонне распыления

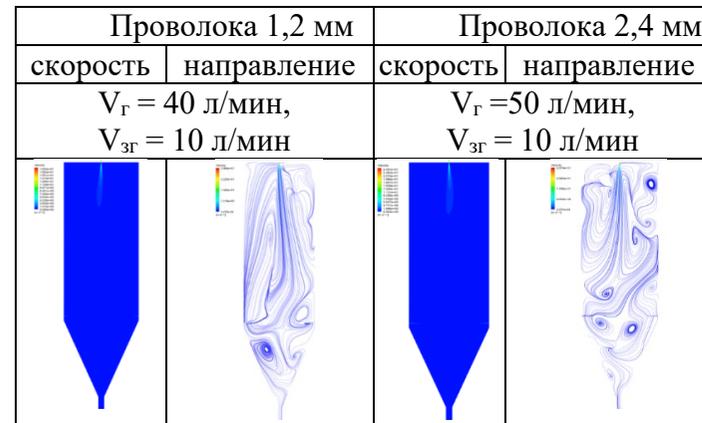


Рисунок 6 - Распределение скоростей и направлений газовых потоков внутри колонны распыления