

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

**«Пермский национальный исследовательский политехнический
университет»**

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19
по диссертации Давлятшина Романа Позоловича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук**

Диссертация «Моделирование процесса аддитивного формирования металлических материалов с применением вибрационных воздействий методом гидродинамики сглаженных частиц» по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите «11» апреля 2025 г. (протокол заседания № 5) диссертационным советом Д ПНИПУ.01.19, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от «06» апреля 2022 г. № 35-О в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым – четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. N 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. N 1792-р.

Диссертация выполнена на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов, механико-технологического факультета», ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Трушников Дмитрий Николаевич, профессор кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Официальные оппоненты:

1. Кривилев Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук (1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), заведующий лабораторией «Физика конденсированных сред» ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет».

2. Щербаков Алексей Владимирович, доктор технических наук (05.09.10 – Электротехнология), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и электротехнологий» ФГБОУ ВО «НИУ «Московский энергетический институт».

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией, соответствием области научных интересов и направлений исследований тематике диссертационной работы, а также наличием публикаций в высокорейтинговых научных изданиях, соответствующих специальности 1.2.2.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург. Отзыв ведущей организации утвержден Туричиным Глебом Андреевичем, доктором технических наук, заведующим кафедрой «Цифровые лазерные технологии»,

ректором, заслушан на заседании кафедры «Цифровые лазерные технологии» факультета цифровых промышленных технологий ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (протокол № 8 от 22 мая 2025 г.) и подписан Земляковым Евгением Вячеславовичем, кандидатом технических наук, доцентом кафедры «Цифровые лазерные технологии».

Выбор ведущей организации обосновывается научной деятельностью сотрудников организации, связанной с тематикой диссертации, и уровнем компетенций, позволяющих квалифицированно оценить значимость полученных в рамках диссертационного исследования результатов для развития отрасли физико-математических наук.

По теме диссертации соискателем опубликовано 18 научных трудов, в том числе 8 работ – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени, из них 8 работ – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science Core Collection, Mathematics, Scopus, Springer, MathSciNet и т.д., соискателем получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Davlyatshin R.P., Gerasimov R.M., Bayandin Y.V., Permyakov G.L., Trushnikov D.N. Mathematical modeling the process of wire surfacing by the smoothed particle hydrodynamics method // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1730, Is. 1. – 012003 (Scopus) (вклад автора – 25 %)

В статье представлена математическая модель тепломассопереноса при проволочной наплавке, разработанная на основе метода сглаженных частиц гидродинамики. Приведены структура модели, исходные допущения и базовые соотношения, учитывающие плавление, кристаллизацию, поверхностное натяжение, эффект Марангони и параметры теплового источника. Проведена серия верификационных численных экспериментов для титановых и стальных сплавов.

2. Davlyatshin R.P., Gerasimov R.M., Bayandin Y.V., Saucedo-Zendejo F.R., Trushnikov D.N. Simulation of the multi-beam electron-beam wire-feed additive manufacturing process in a vacuum // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2275, Is. 1. – 012006 (Scopus) (вклад автора – 25 %)

В работе показано, что при вертикальной подаче проволоки с использованием нескольких симметричных тепловых источников в вакууме обеспечивается равномерный нагрев металла и проволоки. При этом форма и размеры одиночных валиков существенно зависят от мощности и направления действия тепловых источников.

3. Trushnikov D.N., Permyakov G.L., Varushkin S.V., Davlyatshin R.P., Bayandin Y.V., Pang S. Improving the electron-beam additive manufacturing growth of components // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41. – pp. 874–876. (Scopus) (вклад автора – 25 %)

В статье представлен анализ результатов численных расчетов процесса проволочной наплавки с применением двух электронных лучей и вертикальной подачи проволоки. Показано, что вертикальная ориентация подачи устраняет зоны затенения, делает процесс инвариантным к траектории перемещения инструмента и обеспечивает равномерный прогрев наплавляемой зоны.

4. Trushnikov D.N., Kartashev M.F., Davlyatshin R.P., Sausedo-Zendejo F.R. Control of three-dimensional surfacing // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42. – pp. 1058-1060. (Scopus) (вклад автора – 25 %)

Описан разработанный соискателем метод управления тепловложением при трехмерной

наплавке, основанный на численном решении нестационарной тепловой задачи. С применением предложенного алгоритма мощность источника тепла корректируется для поддержания фронта кристаллизации. На основе обработки результатов численных экспериментов показано, что разработанный подход обеспечивает устойчивость процесса наплавки, формирование заданной геометрии многослойного изделия и минимизирует риск возникновения дефектов.

5. Permyakov G.L., Davlyatshin R.P., Belenkiy V.Y., Trushnikov D.N., Varushkin S.V., Pang S. Numerical analysis of the process of electron beam additive deposition with vertical feed of wire material // *Obrabotka Metallov*. – 2022. – Vol. 24. – pp. 6-21. (Scopus) (вклад автора – 25 %)

Соискателем определена зависимость геометрических характеристик одиночных валиков от угла наклона тепловых источников и взаимного расположения векторов подачи проволоки и электронных пучков. Установлено, что меньший азимутальный угол наклона электронных лучей к вертикали обеспечивает более ровную геометрию валиков и повышает устойчивость процесса наплавки.

6. Давлятшин Р.П., Перминов А.В., Баяндин Ю.В., Сауседо-Зендехо Ф.Р., Трушников Д.Н. Моделирование влияния вибраций на поверхностное натяжение капли жидкости с применением бессеточных методов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2022. – № 2. – С. 73–84. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.2.07 (Scopus, ВАК) (вклад автора – 25 %)

Рассмотрена оценка влияния вибрационных воздействий на формирование капли жидкого металла в процессах проволоочной наплавки. Показано, что математическая модель корректно описывает влияние вибрационных воздействий на поведение жидкого металла. Выявлено, что эффективный коэффициент поверхностного натяжения воды и стали снижается при увеличении амплитуды вибрационных воздействий, что может способствовать улучшению формирования наплавляемых валиков в процессе проволоочной наплавки.

7. Trushnikov D.N., Kartashev M.F., Davlyatshin R.P., Mosyagin I.A., Sausedo-Zendejo F.R. Ultrasound treatment of AMg5 aluminum–magnesium alloy samples produced from wire: Numerical modeling // *Russian Engineering Research*. – 2023. – Vol. 43. – pp. 862-865. (Scopus) (вклад автора – 25 %)

Приведена оценка влияния вибрационных воздействий на процесс проволоочной наплавки алюминиевого сплава AMg5. Показано, что рост амплитуды вибраций приводит к заметному снижению влияния поверхностного натяжения и усиливает конвективные потоки в расплаве. Наибольшее влияние обнаружено при вертикальных колебаниях подложки, что способствует углублению зоны расплава и более эффективному теплопереносу в жидкой фазе.

8. Davlyatshin R.P., Perminov A.V., Bayandin Y.V., Saucedo-Zendejo F.R., Trushnikov D.N. Numerical modeling of vibration effects on the surface tension of a liquid drop in additive technologies with SPH // *Computational Particle Mechanics*. – 2023. – Vol. 10. – pp. 911–928. (Scopus, Q1) (вклад автора – 25 %)

Анализируется влияние вибрационных воздействий на каплю металла в процессе аддитивной проволоочной наплавки. Верификация возможности модели корректно описывать влияние вибрационных воздействий на жидкость выполнена по данным экспериментов на воде. Проведены численные эксперименты для стали 12X18H10T, показавшие, что высокочастотные вибрации (до 20 кГц) могут существенно изменять динамику расплава и формирование валика. Разработанная модель может быть использована для оптимизации параметров аддитивного производства с учетом вибрационных воздействий.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616021 «Реализация метода SPH для моделирования процесса проволоочной наплавки в среде LAMMPS» / Р.П. Давлятшин. Дата регистрации 24.03.2022. (вклад автора – 100 %)

Программа предназначена для моделирования процесса металлической проволочной наплавки. Программа может использоваться для проведения предварительных численных экспериментов в области аддитивного производства. Функциональные возможности программы: численное моделирование процесса проволочной наплавки при различных начальных условиях (геометрические размеры проволоки и подложки, размеры, мощность и развертка источника тепла, скорость подачи проволоки и скорость наплавки). Вклад соискателя: разработка алгоритма и реализация программного комплекса.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: **разработана** математическая модель процесса тепломассопереноса при послойной проволочной наплавке с учетом вибрационных воздействий, реализованная с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц; **разработан** программный комплекс, позволяющий численно рассчитывать нестационарное объемное распределение температуры, скорости течения расплава, форму и размер ванны расплава, а также форму и размер наплавляемого валика; **установлены** зависимости ширины и высоты одиночных валиков, а также глубины проплавления в зависимости от направления вибрационных воздействий; **выявлен** механизм увеличения глубины проплавления при вертикальных колебаниях, связанный с увеличением интенсивности термокапиллярных течений.

Теоретическая значимость исследования обоснована выявленными механизмами влияния вибрационных воздействий на геометрию получаемых валиков. Форма фронта кристаллизации и величина градиента температуры в его окрестности, получаемые в процессе численной реализации, могут быть использованы при решении задачи кристаллизации для определения параметров зеренной структуры.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы** методы математического моделирования, включая метод гидродинамики сглаженных частиц; **разработана** математическая модель для описания тепломассопереноса и фазовых переходов при проволочной наплавке в условиях вибрационных воздействий, которая позволила численно исследовать влияние направления вибрационных воздействий на геометрические характеристики наплавленных валиков, включая ширину, высоту и глубину проплавления; **установлены** физические механизмы увеличения глубины проплавления за счет интенсификации термокапиллярных течений, что подтверждено натурными экспериментами.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что **разработан** программный комплекс для моделирования процесса тепломассопереноса при проволочной наплавке, который позволяет рассчитывать нестационарное объемное распределение температуры, скорости течения расплава, форму и размеры ванны расплава и наплавляемого валика, форму свободной поверхности расплавленного металла; полученные закономерности позволяют определить факторы и параметры при построении в дальнейшем эмпирических моделей на этапе отработки технологий.

Оценка достоверности результатов исследования выявила: **обоснованность** результатов диссертационной работы определяется корректным применением методов математического моделирования в гидродинамике, апробированных методов вычислительной математики и информационных технологий; **достоверность** подтверждается соответствием результатов,

полученных в ходе выполнения диссертационной работы, данным, опубликованным другими авторами; соответствием результатов численных и натурных экспериментов.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задачи (совместно с научным руководителем), проведении критического анализа литературы, разработке математической модели процесса тепломассопереноса при проволоочной наплавке с учетом вибрационных воздействий, разработке и реализации программного комплекса на основе метода гидродинамики сглаженных частиц, проведении верификации и валидации математической модели на типовых задачах для трех металлических сплавов, проведении обширной серии численных экспериментов для выявления закономерностей влияния параметров вибрационных воздействий на геометрию одиночных валиков и глубину проплавления, интерпретации результатов численных экспериментов и участия в подготовке основных публикаций по теме диссертации.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 28 мая 2024 г. № 27-О: в ней изложены и научно обоснованы метод расчета процесса тепломассопереноса при послойной проволоочной наплавке в условиях вибрационных воздействий, реализованный с применением метода гидродинамики сглаженных частиц, получены зависимости геометрических характеристик одиночных валиков различных металлических сплавов от направления вибрационных воздействий, выявлен механизм увеличения глубины проплавления, связанный с усилением термокапиллярных течений. Все это имеет важное значение для дальнейшего развития теоретических основ аддитивного формирования металлических изделий, а также повышения надежности и предсказуемости технологических процессов проволоочной наплавки.

На заседании «17» июня 2025 г. диссертационный совет Д ПНИПУ.01.19 принял решение присудить Давлятшину Роману Позоловичу ученую степень кандидата физико-математических наук (Протокол заседания № 7)

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 12 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 12, против присуждения ученой степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета Д ПНИПУ.01.19,

д-р физ.-мат. наук. проф. 

Ученый секретарь

канд. физ.-мат. на


(подпись)

зета Д П


(подпись)

/ Трусков Петр Валентинович

.19,

/ Кротова Елена Львовна

«17» июня 2025 г.

