

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям

Пермского национального

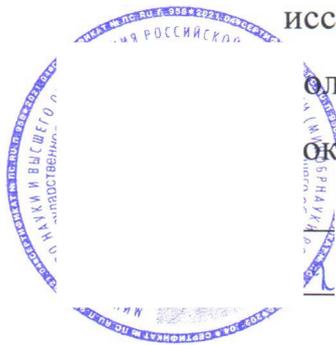
исследовательского

политехнического университета,

доктор физ.-мат. наук, доцент

Швейкин А.И.

и.г. 2025 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Моделирование процесса аддитивного формирования металлических материалов с применением вибрационных воздействий методом гидродинамики сглаженных частиц» выполнена на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов».

В период подготовки диссертации соискатель Давлятшин Роман Позолович работал в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», на кафедре «Сварочное производство, метрология и технология материалов» в должности младшего научного сотрудника, а также в лаборатории методов создания и проектирования систем «материал-технология-конструкция» в должности младшего научного сотрудника.

В 2019 году окончил с отличием федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 01.03.02 «Прикладная математика и механика» (бакалавр), в 2021 году окончил с отличием федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 01.04.02 «Прикладная математика и механика» (магистр). В 2021 году поступил в аспирантуру очной формы обучения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 09.06.01 «Информатика и вычислительная техника», специальность 1.2.2 (05.13.18) «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» (период обучения с «01» октября 2021 по «30» сентября 2025 г.)

Научный руководитель – доктор технических наук Трушников Дмитрий Николаевич, профессор кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

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

постановка представленных в работе задач осуществлена автором совместно с научным руководителем. Разработка математической модели процесса тепломассопереноса при проволочной наплавке в условиях вибрационных воздействий осуществлена автором совместно с научным руководителем и другими соавторами публикаций. Разработка и реализация программного комплекса включающего препроцессор, в виде утилиты с графическим интерфейсом, процессор в виде программного модуля для пакета

Lammps, и постпроцессор, осуществлена лично автором. Расчеты с использованием разработанного программного комплекса и анализ полученных результатов проведены лично автором. Опубликованные статьи по теме диссертационного исследования подготовлены автором совместно с научным руководителем и другими соавторами публикаций.

2. Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

– впервые разработана математическая модель процесса тепломассопереноса на основе метода гидродинамики сглаженных частиц для изучения процесса послойной наплавки металлических изделий в условиях вибрационных воздействий;

– численным экспериментом выявлено и подтверждено экспериментально, что направление приложения вибрационных воздействий влияет на геометрические характеристики формируемых валиков, фронта плавления и кристаллизации, что необходимо учитывать при составлении последующих моделей формирования зеренной структуры;

– с использованием численного эксперимента впервые установлен механизм влияния вибрационных воздействий различных направлений на глубину проплавления, заключающийся в повышении эффективности теплопереноса при увеличении интенсивности термокапиллярных течений.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований

подтверждается удовлетворительным качественным и количественным соответствием результатов численного моделирования с результатами проведенных натуральных экспериментов, а также с данными, приведенными в публикациях других авторов.

4. Практическая и теоретическая значимость диссертационного исследования

Практическая значимость работы заключается в том, что математическая модель и программный комплекс могут быть применены для расчета нестационарного объемного распределения температуры, скоростей течения

расплава, давлений, формы и размера расплавленной ванны, формы свободной поверхности расплавленного металла, формы и размера наплавляемого валика. (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022616021, 04.04.2022). Полученные закономерности позволяют определить факторы и параметры при построении в дальнейшем эмпирических моделей на этапе отработки технологий.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что математическая модель и программный комплекс могут использоваться для исследования процессов, протекающих при проволочной наплавке. Форма фронта кристаллизации и величина градиента температуры в его окрестности, получаемые в процессе численной реализации, будут полезны при решении задачи кристаллизации с определением параметров зеренной структуры.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы Давлятшиным Романом Позоловичем опубликовано 18 научных работ, в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и/или Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. 9 прочих публикаций, в том числе тезисы докладов на российских и международных конференциях.

Основные положения и результаты работы отражены в следующих научных публикациях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, и в базы цитирования Web of Science, Scopus:

1. R.P. Davlyatshin, R.M. Gerasimov, Y.V. Bayandin, G.L. Permyakov, D.N. Trushnikov 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 %)

Соискателем разработана математическая модель процесса послойного выращивания металлических изделий методом проволочной наплавки, основанная на методе гидродинамики сглаженных частиц. Описаны ключевые

физические процессы (плавление, кристаллизация, поверхностное натяжение, эффект Марангони, особенности теплового источника) и их влияние на формирование ванны расплава и геометрические характеристики формируемых валиков. Проведена серия верификационных численных экспериментов для титановых и стальных сплавов.

2. R.P. Davlyatshin, R.M. Gerasimov, Y.V. Bayandin, F.R. Saucedo-Zendejo, D.N. Trushnikov 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 %)

Работа посвящена моделированию процесса проволочной наплавки при вертикальной подаче проволоки с использованием нескольких симметричных тепловых источников в вакууме. Соискателем проведена серия численных экспериментов. Показано, что вертикальная подача проволоки обеспечивает равномерный нагрев металла проволоки и подложки, однако 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 %)

На основе разработанной математической модели соискателем проведено численное моделирование процесса проволочной наплавки с использованием двух электронных лучей с вертикальной подачей проволоки. Показано, что такая схема технологического процесса позволяет обеспечить равномерный прогрев зоны наплавки без затененных участков и независимость процесса от направления наплавки.

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

В работе предлагается метод управления тепловложением при трехмерной наплавке, основанный на численном алгоритме определения оптимальных технологических параметров во времени. Для решения тепловой задачи используется математическое моделирование, позволяющее задать требуемые изменения параметров в режиме реального времени. Соискателем проведен ряд численных экспериментов, показывающий, что предложенный подход обеспечивает стабильность процесса наплавки, требуемую геометрию 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 %)

На основе разработанной математической модели соискателем проведен численный анализ электронно-лучевой аддитивной наплавки с вертикальной подачей проволоки. Выявлена зависимость геометрических характеристик наплавленных валиков от угла наклона лучей 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 %)

Соискателем изучено влияние 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 проволочной наплавки.

7. Trushnikov, D.N., Kartashev, M.F., Davlyatshin, R.P., Mosyagin, I.A., Saucedo-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, Q1) (вклад автора – 25 %)

Соискателем проведено численное исследование поведения капли расплава алюминиевого сплава AMg5 при ультразвуковом воздействии и моделирование процесса проволочной наплавки с учетом высокочастотных колебаний, подаваемых через подложку. 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. R.P. Davlyatshin, A.V. Perminov, Y.V. Bayandin, F.R. Saucedo-Zendejo, D.N. Trushnikov 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) (вклад автора – 25 %)

Соискателем представлена математическая модель на базе метода сглаженных частиц (SPH) для описания вибрационных воздействий на каплю металла в процессе аддитивной проволочной 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.

Получено свидетельство о регистрации программ для ЭВМ:

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

Соискателем написан код программного модуля для пакета LAMMPS, позволяющего проводить численное моделирование процесса проволочной наплавки с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц.

Прочие работы по теме диссертационного исследования:

10. Mathematical modeling of the electron-beam wire deposition additive manufacturing by the smoothed particle hydrodynamics method / D. N. Trushnikov, E. G. Koleva, R. P. Davlyatshin [et al.] // Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes. – 2019. – Vol. 5, No. 1. – P. 1-14. – DOI 10.1186/s40759-019-0044-1
11. Учет скрытой теплоты плавления и кристаллизации при моделировании процесса наплавки проволочных материалов / Р. П. Давлятшин, Р. М. Герасимов, Ю. В. Баяндин, Д. Н. Трушников // Математическое моделирование в естественных науках : Тезисы XXIX Всероссийской школы-конференции, Пермь, 07–09 октября 2020 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2020. – С. 149.
12. Модель процесса проволочной наплавки. Метод гидродинамики сглаженных частиц / Р. П. Давлятшин, Р. М. Герасимов, Ю. В. Баяндин [и др.] // Математическое моделирование в естественных науках. – 2021. – Т. 1. – С. 340-342
13. Моделирование процесса оплавления вертикально подаваемой проволоки дугой в вакууме с несколькими симметрично действующими источниками / Р. П. Давлятшин, Р. М. Герасимов, Ю. В. Баяндин [и др.] // Электронно-лучевая сварка и смежные технологии : Материалы IV международной конференции, Москва, 16–19 ноября 2021 года. – Москва: Национальный исследовательский университет "МЭИ", 2021. – С. 32-39.

14. Моделирование процесса оплавления вертикально подаваемой проволоки дугой в вакууме с несколькими симметрично действующими источниками / Р. П. Давлятшин, Р. М. Герасимов, Д. Н. Трушников [и др.] // Сварочное производство. – 2022. – № 5. – С. 5-9.
15. Баранов, К. А. Использование техники смещения частиц для метода гидродинамики сглаженных частиц / К. А. Баранов, Р. П. Давлятшин // Математическое моделирование в естественных науках. – 2024. – Т. 1. – С. 40-43
16. Давлятшин, Р. П. Моделирование с применением бессеточных методов влияния вибрационных воздействий на процесс проволочной наплавки / Р. П. Давлятшин, В. А. Ершов, Д. Н. Трушников // Математическое моделирование в естественных науках. – 2024. – Т. 1. – С. 124-127.
17. Моделирование процесса проволочной наплавки с возвратно-поступательной подачей присадочного материала с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц / А. С. Паньков, Р. П. Давлятшин, И. П. Овчинников, Д. Н. Трушников // Математическое моделирование в естественных науках. – 2024. – Т. 1. – С. 295-298.
18. Шарапов, Р. Р. Разработка высокопроизводительного программного комплекса для исследования метода гидродинамики сглаженных частиц / Р. Р. Шарапов, Р. П. Давлятшин // Математическое моделирование в естественных науках. – 2024. – Т. 1. – С. 436-439.

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

Представленная диссертационная работа «Моделирование процесса аддитивного формирования металлических материалов с применением вибрационных воздействий методом гидродинамики сглаженных частиц» соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические науки).

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

