

ДАВЛЯТШИН РОМАН ПОЗОЛОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АДДИТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ МЕТОДОМ ГИДРОДИНАМИКИ
СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ**

**1.2.2. Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Пермь 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

**Научный
руководитель:**

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

**Официальные
оппоненты:**

Кривилев Михаил Дмитриевич
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией «Физика конденсированных
сред», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный
университет»

Щербаков Алексей Владимирович
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
«Электроснабжение промышленных предприятий и
электротехнологии» ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет»

Защита состоится «17» июня 2025 года в 15.00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.01.19 по адресу 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 423б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (сайт <http://pstu.ru>)

Автореферат разослан «___» _____ 20___ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д ПНИПУ.01.19,
кандидат физико-математических наук, доцент



Е.Л. Кротова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в различных отраслях промышленности существует потребность в технологиях производства массивных конструкций и деталей со сложным сегментированным строением, которые обеспечивают снижение материалоемкости без потери несущей способности (прочности). Этой потребности может удовлетворить технология аддитивного формирования заготовок различных изделий методом послойной проволоочной наплавки.

Материал изделий, изготовленных по данной технологии, в большинстве случаев обладает недостаточным уровнем механических характеристик из-за особенностей внутреннего строения: дендритной структуры и текстуры изделий из титановых сплавов, значительная пористость изделий из сплавов на основе железа.

Благоприятное влияние вибрационных воздействий на внутреннюю структуру металлических изделий, полученных в результате сварки и проволоочной наплавки, известно давно, но до сих пор остается недостаточно изученным влияние вибрационных воздействий на геометрические параметры, получаемых в процессе аддитивного формирования валиков. Теоретические исследования процессов тепломассопереноса в условиях термовибрационной конвекции ведутся коллективом Любимовой Т.П., но работы применительно к аддитивным сварочным процессам отсутствуют.

Для определения геометрических характеристик валиков более подходящими являются эмпирические модели, основанные на обработке экспериментальных данных. Однако только математическое моделирование и численные эксперименты позволяют в полной мере установить значимость наблюдаемых факторов и понять механизмы сопутствующих процессов.

Математическое моделирование позволяет учесть многочисленные факторы, такие как тепломассоперенос, конвекционные потоки в расплаве и динамика формирования капли металла под воздействием вибраций. Численные методы моделирования можно условно разделить на две группы: сеточные методы, основанные на эйлеровом подходе, и бессеточные методы, которые используют лагранжев подход.

Сеточные методы, такие как методы конечных элементов и конечных объёмов, широко применяются для моделирования аддитивных процессов с порошковыми металлическими материалами. Исследования, проведённые Кривилевым М.Д., Туричиным Г.А., Щербаковым А.В., Jamshidinia M., Lee Y., Zhang W., Yuan P.P. и Gu D.D., способствовали значительному прогрессу в этой области. Однако сеточные методы обладают рядом ограничений при моделировании сложных нестационарных процессов, которые возникают в процессе проволоочной наплавки, особенно в условиях вибрационных воздействий. Основным недостатком такого рода методов является малая эффективность при моделировании процессов со свободной поверхностью и наличием больших градиентов деформаций.

В связи с этим всё более перспективными становятся бессеточные методы, основанные на лагранжевом подходе к описанию движения сплошной среды. Наиболее развитым из этого типа методов является метод гидродинамики

сглаженных частиц (SPH). Этот метод активно развивается и находит свое применение в моделировании сварочных процессов и аддитивных технологий. Исследователи, такие как Щербаков А.В., Russell M.A., Eberhard P., King W., Khairallah S.A. и Trautmann M., внесли значительный вклад в развитие этого направления.

Исходя из вышесказанного **целью исследования** является – разработка и численная реализация математической модели тепломассопереноса в процессе проволоочной наплавки с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц для определения механизмов влияния вибрационных воздействий на геометрические характеристики формируемых валиков.

Объектом исследования является процесс аддитивного формирования металлических изделий методом послойной проволоочной наплавки, включая механизмы тепломассопереноса и фазовых переходов в условиях вибрационных воздействий.

Предметом исследования является математическая модель и метод гидродинамики сглаженных частиц, описывающие тепломассоперенос и затвердевание металлического расплава при аддитивном формировании с применением вибрационных воздействий.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Обоснование выбранных подходов математического моделирования процесса тепломассопереноса при проволоочной наплавке, в том числе с применением вибрационных воздействий, для исследования явлений, протекающих в ванне расплава.

2. Разработка математической модели процесса аддитивного формирования металлических изделий с вибрационными воздействиями методом гидродинамики сглаженных частиц.

3. Численная реализация, верификация и валидация математической модели процесса тепломассопереноса при проволоочной наплавке с применением вибрационных воздействий в виде программного комплекса.

4. Численное моделирование процесса тепломассопереноса при проволоочной наплавке в условиях вибрационных воздействий с использованием разработанного программного комплекса.

Методология и методы исследования. Работа опирается на инструмент математического моделирования, гидродинамику, тепломассоперенос и основные физические законы. Основной метод численного моделирования – гидродинамика сглаженных частиц, используемый для описания процессов тепломассопереноса при аддитивном формировании металлических изделий. Математическая модель включает систему уравнений Навье-Стокса, дополненную уравнениями, описывающими процессы испарения и плавления металла, а также силы поверхностного натяжения. Экспериментальные исследования проводились с целью получения данных для верификации математической модели, включая анализ геометрических характеристик одиночных валиков. Анализ данных осуществлялся с применением статистических методов, обеспечивая выявление

закономерностей и механизмов влияния вибрационных воздействий на процесс формирования металлических изделий.

Научная новизна исследования включает в себя следующие положения:

1. Впервые разработана математическая модель процесса тепломассопереноса на основе метода гидродинамики сглаженных частиц для изучения процесса послойной наплавки металлических изделий в условиях вибрационных воздействий.

2. Численным экспериментом выявлено и подтверждено экспериментально, что направление приложения вибрационных воздействий влияет на геометрические характеристики формируемых валиков и фронта плавления и кристаллизации, что необходимо учитывать при создании уточненных моделей формирования зеренной структуры.

3. 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.

Практическая значимость работы. Математическая модель и программный комплекс могут быть использованы 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. Математическая модель и программный комплекс могут быть использованы для исследования процессов, протекающих при проволоочной 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.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель процесса тепломассопереноса при проволоочной наплавке в условиях вибрационных воздействий.

2. Численная реализация математической модели процесса тепломассопереноса при проволоочной наплавке с применением вибрационных воздействий в виде программного комплекса.

3. Результаты верификации и валидации математической модели процесса тепломассопереноса при проволоочной наплавке с применением вибрационных воздействий.

4. Результаты численных исследований, раскрывающие влияние параметров и направлений вибрационных воздействий на геометрию формируемых валиков (ширину, высоту) и глубину проплавления, с установлением механизма изменения глубины проплавления за счёт повышения эффективности теплопереноса

вследствие изменения интенсивности термокапиллярных течений в ванне расплава под воздействием вибраций.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе подтверждена успешной верификацией полученной математической модели, соответствием результатов моделирования экспериментальным данным, а также соответствием известным теоретическим положениями.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи (совместно с научным руководителем), разработке математической модели процесса тепломассопереноса при проволоочной наплавке в условиях вибрационных воздействий, разработке и реализации программного комплекса для моделирования с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц, проведении численных экспериментов и анализе результатов.

Апробация результатов работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на IV Международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» (г. Москва, 2021 г) и V Международной конференции «Электронно-лучевая сварка и смежные технологии» (г. Ижевск, 2023 г), на XXIX и XXXIII Всероссийской конференции «Математическое моделирование в естественных науках» (г. Пермь, 2020 и 2024 г.), на Всероссийской конференции молодых ученых-механиков YSM-2022 (г. Сочи, 2022 г.), на Международной конференции «Инновационные модели международной интеграции в науке – международные исследовательские группы (МИГ)» (г. Пермь, 2022, 2023 и 2024 г.г.). Результаты работы использованы в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 20–48-596006 и МИГ С 26 / 511.

Диссертационная работа докладывалась и обсуждалась на семинарах Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. Академик РАН В.П. Матвеев), кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ (рук. проф. П.В. Трусков), кафедры механики композиционных материалов и конструкций ПНИПУ (рук. проф. В.Э. Вильдеман), лаборатории физики конденсированных сред УДГУ (рук. проф. М.Д. Кривилев).

Публикации. По теме диссертационного исследования было опубликовано 18 научных работ, в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых изданиях, индексированных 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.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 134 страницы, включая 23 таблицы, 58 рисунков. Список литературы содержит 179 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность диссертационного исследования, формулируется цель, ставятся задачи, формулируются научная новизна и практическая значимость, а также представляется краткое содержание работы и перечисляются основные результаты.

В **первой главе** отражен анализ существующих теоретических и экспериментальных работ по исследованию влияния вибрационных воздействий на процесс аддитивной проволоочной наплавки и способам математического моделирования указанных процессов.

В п.1.1 приводится общее описание технологий аддитивного производства металлических изделий и их особенностей.

В п.1.2 проанализированы известные способы введения вибраций в зону сварки, такие как электродуговые вибрации, тепловые эффекты когерентного лазерного луча, а также прямое введение вибраций в материал через волновод. Показано, что данные методы позволяют улучшить свариваемость без необходимости дополнительной термообработки, это приводит к сокращению технологического цикла, снижению себестоимости и времени на производство изделий, что доказано многочисленными натурными исследованиями различных научных групп.

В п.1.3 проведен обзор существующих математических моделей для описания процесса проволоочной наплавки.

В результате проведения литературного обзора была сформулирована гипотеза о зависимости геометрических параметров наплавляемых валиков от параметров вибрационных воздействий. Обоснована необходимость применения численного моделирования для изучения механизма протекающих явлений. Отмечена перспективность использования метода гидродинамики сглаженных частиц при численном моделировании процессов тепломассопереноса, что позволяет в ряде случаев значительно увеличить производительность численной реализации и исследовать процессы, протекающие в сварочной ванне.

Во **второй главе** приведены концептуальная и математическая постановки для описания поведения расплавленного металла в процессе проволоочной наплавки в условиях вибрационных воздействий. Рассмотрены и описаны основные физические явления, влияющие на формирование одиночных валиков. Приведено описание метода гидродинамики сглаженных частиц, его математическая формулировка, аппроксимация уравнений разработанной математической модели и численная схема.

В п.2.1 представлено описание концептуальной постановки задачи послойного формирования металлических изделий методом проволоочной наплавки. В этом процессе осуществляется последовательное формирование одиночных валиков, геометрические характеристики которых зависят от совокупности ключевых факторов: теплофизические свойства материала (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность, вязкость, коэффициент поверхностного натяжения и др.), характеристики теплового источника (мощность, пространственное и временное распределение теплового потока) и

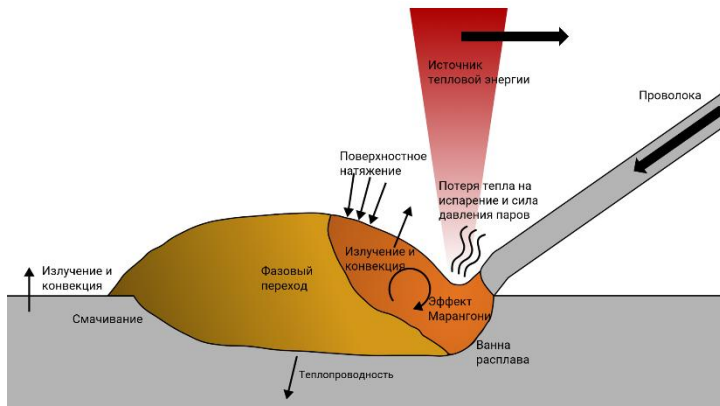


Рисунок 1 – Схематическое представление основных физических явлений, сопровождающих процесс проволоочной наплавки

расплава, а также возникают потери тепла на испарение, радиационный и конвективный теплообмен с окружающей средой. Значительное влияние на геометрию валика оказывает поверхностное натяжение, особенно при учёте термокапиллярного эффекта.

В п.2.2 приведено описание разработанной математической модели процесса проволоочной наплавки. Область расчёта разделена на две части: твёрдую (подложка и проволока) и жидкую (расплав). В твёрдой фазе движение задаётся принудительно (равномерное смещение либо гармонические колебания). Жидкая фаза описывается уравнением неразрывности и Навье – Стокса; теплоперенос учитывается как в расплаве, так и в подложке, причём граница между фазами определяется температурой ликвидуса. На межфазной границе газ – жидкость действуют поверхностные силы (натяжение, эффект Марангони, давление паров). Условие прилипания на границе жидкость – твёрдое тело обеспечивает передачу дополнительного импульса расплаву при вибрациях. На внешних границах задаются тепловые условия (источник тепла с гауссовым распределением мощности, потери при испарении, конвективный и радиационный теплообмен). Все поверхностные силы и поверхностные тепловые потоки моделируются как объёмные в тонком приграничном слое. Фазовые переходы описываются методом «эффективной теплоёмкости», эффект Марангони учитывается через температурную зависимость коэффициента поверхностного натяжения, а давление паров и испарительные потери вводятся феноменологически.

технологические параметры процесса наплавки (скорость и угол подачи проволоки, скорость наплавки).

Совокупность перечисленных факторов определяет интенсивность плавления материала и кинетику формирования сварочной ванны (рисунок 1). Кроме того, при высоких температурах протекают процессы испарения металла и связанного с ним парциального давления паров над поверхностью

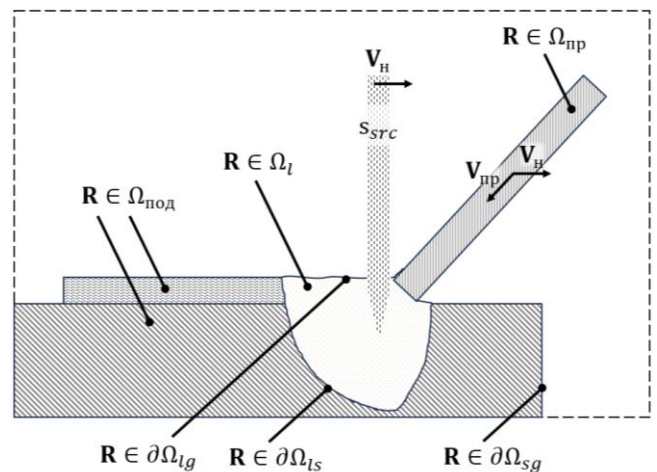


Рисунок 2 – Принципиальная схема процесса наплавки проволоки концентрированными источниками энергии с боковой подачей проволоки

$$\begin{aligned}
\frac{d\rho}{dt} &= -\rho \nabla \cdot \mathbf{u} & , \mathbf{R} \in \Omega \\
\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} &= (-\nabla P + \mathbf{f}_v) + (\mathbf{f}_s + \mathbf{f}_{\text{evp}}) \delta_s + \mathbf{g} & , \mathbf{R} \in \Omega_l \\
\rho c_p^{\text{eff}} \frac{dT}{dt} &= -\nabla \cdot \mathbf{q} + (Q_{\text{src}} - Q_{\text{evp}} - Q_{\text{env}} - Q_{\text{rad}}) \delta_s & , \mathbf{R} \in \Omega
\end{aligned} \quad (1)$$

В п.2.3 описана математическая формулировка метода гидродинамики сглаженных частиц, приведена аппроксимация математической модели с применением метода и сформулирована численная схема расчета.

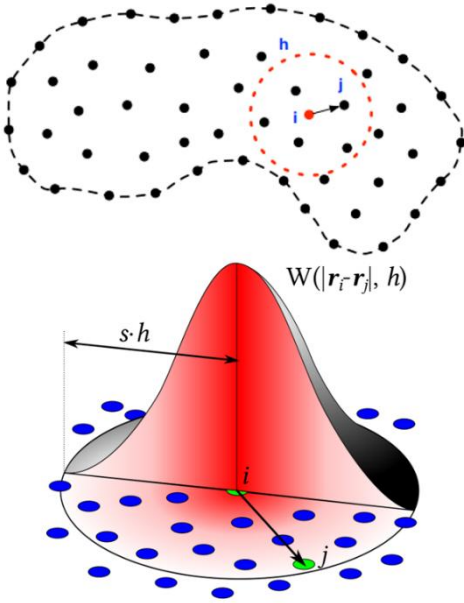


Рисунок 3 – Схематичное представление функции ядра

С использованием метода гидродинамики сглаженных частиц переход от континуального представления среды к дискретному предполагает замену непрерывной функции $f(\mathbf{r})$, описывающей поле переменную, ее дискретным аналогом f_i . Значение f_i для каждой частицы i определяется как взвешенная сумма значений f_j от соседних частиц j (рисунок 3), находящихся в пределах сглаживающего радиуса h , с использованием функции сглаживания W . Преимуществом метода гидродинамики сглаженных частиц в таком представлении является то, что операция дифференцирования по координатам не отражается на массах частиц m_i и значениях полевых величин f_i . Дифференцирование выполняется исключительно по сглаживающей функции W_{ij}^h , что упрощает численную реализацию метода:

$$f_i = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f_j W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f_j W_{ij}^h, \quad \nabla f_i = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f_j \nabla_j W_{ij}^h, \quad (2)$$

где m_i – масса частицы, ρ_i – плотность частицы, W (W_{ij}^h) – функция сглаживания (ядро), зависящая от расстояния между частицами и радиуса сглаживания h , а $\nabla_j W_{ij}^h$ – градиент ядра по координатам частицы j .

Применяя дискретизацию метода гидродинамики сглаженных частиц к системе уравнений (1), получаем следующие выражения для i -ой частицы:

$$\begin{aligned}
\frac{d\rho_i}{dt} &= - \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{u}_{ij} \cdot \nabla_j W_{ij}^h, & \mathbf{R} \in \Omega, \\
\frac{d\mathbf{u}_i}{dt} &= \frac{1}{m_i} [\mathbf{F}_{p,i} + \mathbf{F}_{v,i} + (\mathbf{F}_{s,i} + \mathbf{F}_{\text{evp},i}) \delta_s] + \mathbf{g}, & \mathbf{R} \in \Omega_l, \\
\frac{dT_i}{dt} &= - \frac{1}{\rho_i c_{p,i}^{\text{eff}}} [-(\nabla \cdot \mathbf{q})_i + (Q_{\text{src},i} - Q_{\text{evp},i} - Q_{\text{conv},i} - Q_{\text{rad},i}) \delta_s], & \mathbf{R} \in \Omega,
\end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{F}_{p,i}$ – сила давления, $\mathbf{F}_{v,i}$ – вязкая сила, $\mathbf{F}_{s,i}$ – сила поверхностного натяжения, $\mathbf{F}_{\text{evp},i}$ – сила давления паров.

В третьей главе диссертационной работы представлено описание структуры программного комплекса и ключевых элементов численной схемы. Описана процедура верификации вычислительных алгоритмов на ряде модельных задач, а также приведена валидация математической модели на основе сравнения с экспериментальными данными. В заключительном разделе проведена верификация способности модели корректно описывать влияние вибрационных воздействий.

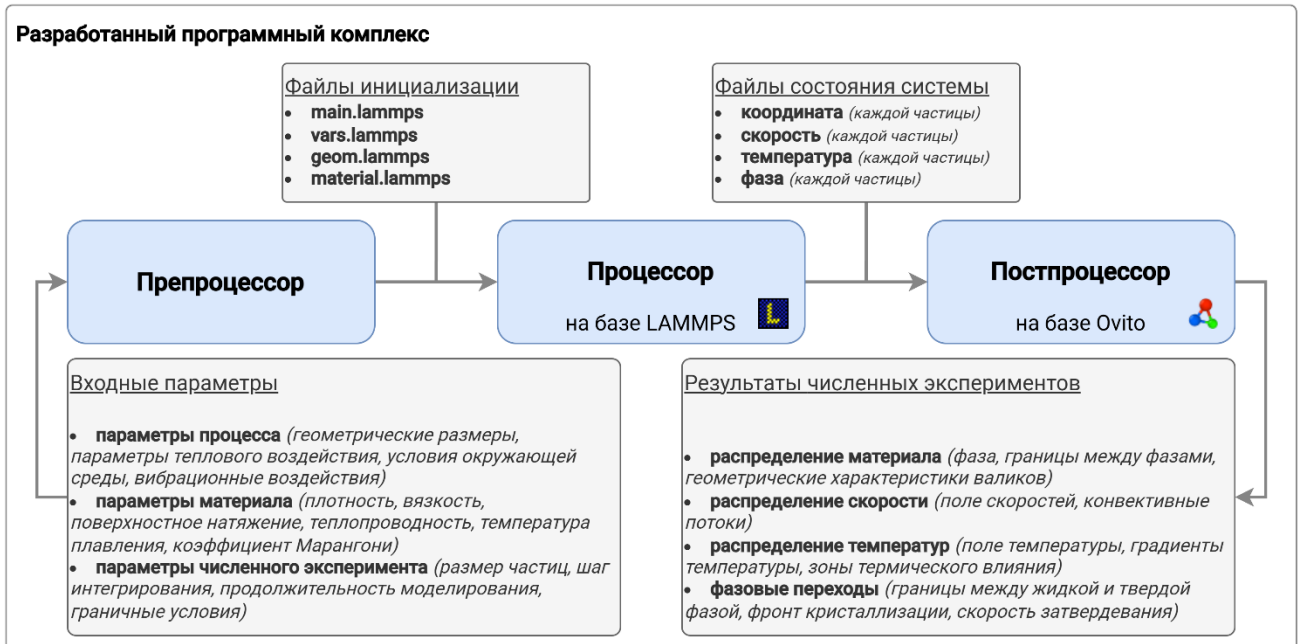


Рисунок 4 – Функциональная схема разработанного программного комплекса

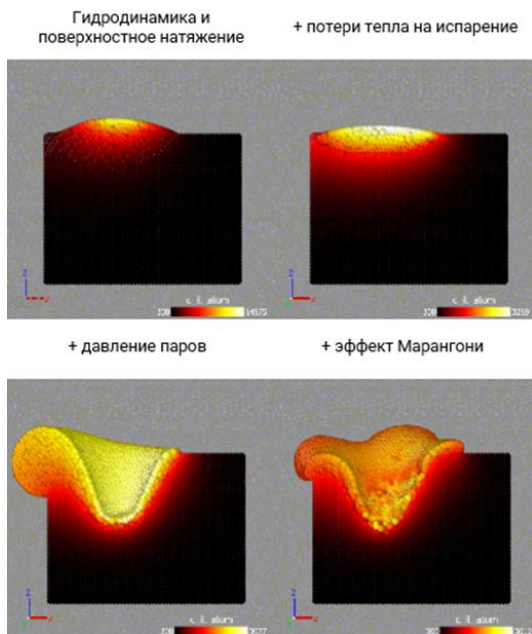


Рисунок 5 – Результаты численного моделирования процесса оплавления подложки с учетом разных физических явлений.

Разработанный программный комплекс включает в себя препроцессор для подготовки исходных данных, процессор в виде программного модуля для LAMMPS (для численного моделирования методом SPH) и постпроцессор на базе Ovito для анализа результатов.

Во п.3.2 описана верификация математической модели. Для этого были использованы модельные примеры процессов оплавления подложки и оплавления проволоки. Верификация была проведена путем поочередного включения различных физических явлений. В результате проведения численных экспериментов было определено, что математическая модель корректно описывает физические явления и результаты моделирования соотносятся с натурными экспериментами. Качественное описание

процесса требует учета всех физических явлений, начиная от поверхностного натяжения и заканчивая давлением паров (рисунок 5).

В п.3.3 описана калибровка параметров модели (коэффициента поверхностного натяжения и зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры) для корректного описания силы поверхностного натяжения и силы Марангони, возникающих при наплавке титанового сплава ВТ6, алюминиевого сплава АМг5 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Для этого был разработан автоматизированный алгоритм (рисунок 6), который работает по итерационному принципу и использует сталагмометрический метод (метод отрыва капли), который основан на предположении, что в момент отрыва капли с подвеса сила тяжести, действующая на нее, равна силе поверхностного натяжения, приложенной к наиболее узкой части капли.

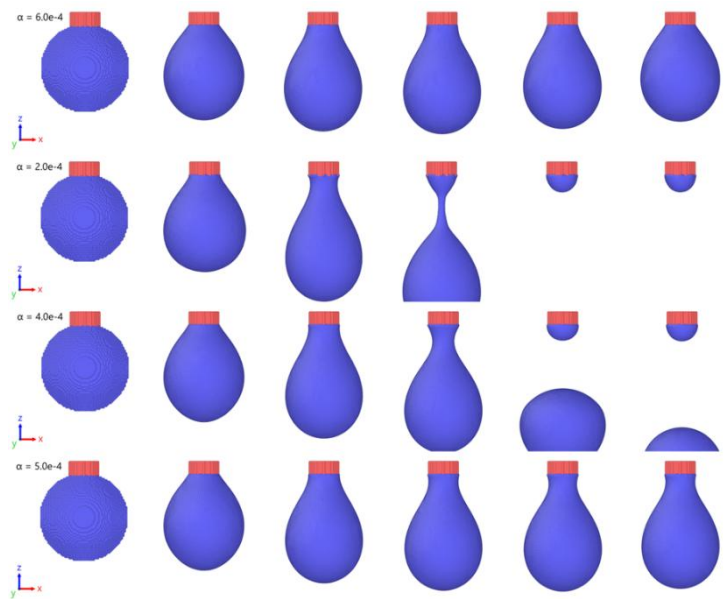


Рисунок 6 – Иллюстрация работы автоматизированного алгоритма по определению модельного параметра коэффициента поверхностного натяжения α

На первом этапе по известным параметрам материала вычисляется максимальная масса капли, способная удержаться на подвесе. Затем задаются минимальные и максимальные значения параметра поверхностного натяжения α . Далее с использованием метода деления отрезка пополам вычисляется необходимое значение параметра α , если капля оторвалась, то необходимо увеличить значение искомого параметра, если капля не оторвалась, то параметр уменьшается. При этом сам отрыв капли фиксируется автоматически.

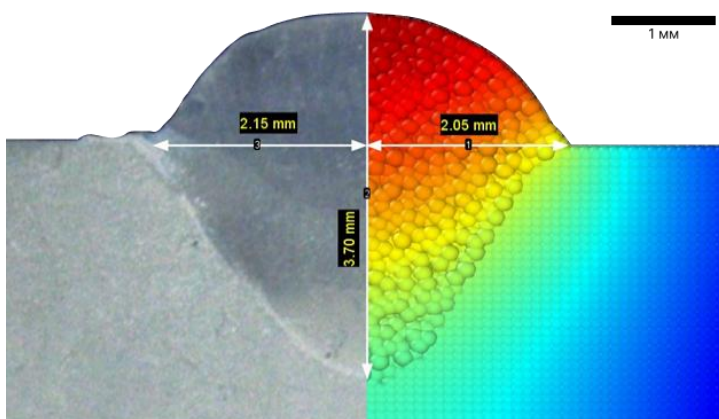


Рисунок 7 – Геометрические характеристики зоны проплавления: натурный эксперимент (слева) и численный эксперимент (справа)

Валидация математической модели проведена путём сравнения результатов численных и натурных экспериментов для различных материалов: нержавеющей стали 12Х18Н10Т, алюминиевого сплава АМг5 и титанового сплава ВТ6. На рисунке 4 представлены геометрические характеристики зоны проплавления для натурального и численного экспериментов, что демонстрирует высокую точность модели.

Погрешность между моделированием и экспериментальными данными не превышает 12%, что подтверждено результатами, отображенными в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические характеристики наплавленных валиков из сплава ВТ6

№ п/п	Q, Вт	v _{пр} , м/мин	v _{под} , м/час	b, мм				h, мм			
				ЧЭ	НЭ	Δ	ε	ЧЭ	НЭ	Δ	ε
1	3350	2,7	18	8,1	8,6	0,5	6%	2,2	2,4	0,2	8%
2	3350	3,0	18	8,1	8,4	0,3	4%	2,3	2,5	0,2	8%
3	3350	2,4	24	6,6	7,3	0,7	10%	1,5	1,8	0,3	17%
4	3350	2,4	12	9,4	9,9	0,5	5%	2,5	2,8	0,3	11%
5	3350	2,4	18	8,5	8,9	0,4	4%	2,0	2,2	0,2	9%

В п.3.4 была проверена гипотеза о том, что влияние вибрационных воздействий можно описать через снижение эффективного коэффициента поверхностного натяжения. Для верификации способности математической модели описывать этот эффект были использованы известные экспериментальные данные, где исследовалось влияние вибраций на коэффициент поверхностного натяжения воды.

На первом этапе в качестве исследуемого материала была выбрана вода, что позволило сравнить результаты моделирования с экспериментальными данными. Исследовалась зависимость коэффициента поверхностного натяжения от пиковой скорости вибрационных воздействий в диапазоне от 0,0 до 0,8 м/с. В результате моделирования были получены данные, показывающие, что при увеличении пиковой скорости вибрационных воздействий коэффициент поверхностного натяжения снижается. Максимальное снижение коэффициента поверхностного натяжения на 25 % было достигнуто при пиковой скорости 0,8 м/с. Полученные результаты качественно и количественно совпадают с известными экспериментальными данными, что подтверждает способность математической модели адекватно описывать эффект снижения коэффициента поверхностного натяжения под воздействием вибраций (рисунок 8).

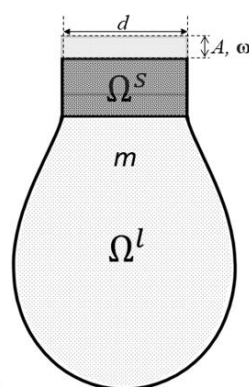
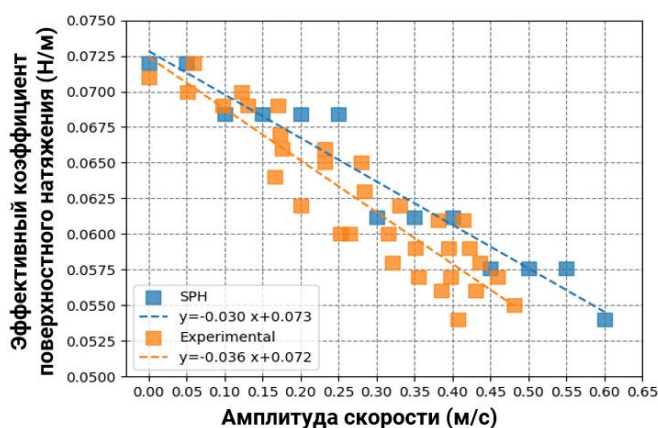


Рисунок 8 – Принципиальная схема процесса отрыва капли от цилиндрического подвеса (слева), сравнение результатов экспериментальных и численных экспериментов зависимости эффективного коэффициента поверхностного натяжения воды от амплитуды скорости вибрационных воздействий (справа)

Аналогичные исследования были проведены для металлов, таких как нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, алюминиевый сплав АМг5 и титановый сплав ВТ6. Результаты показали, что с увеличением пиковой скорости вибрационных воздействий, эффективный коэффициент поверхностного натяжения также снижается, что соответствует наблюдаемым экспериментальным данным (рисунок 9). Это подтверждает, что ключевым параметром, влияющим на снижение

поверхностного натяжения при вибрационных воздействиях, является пиковая скорость.

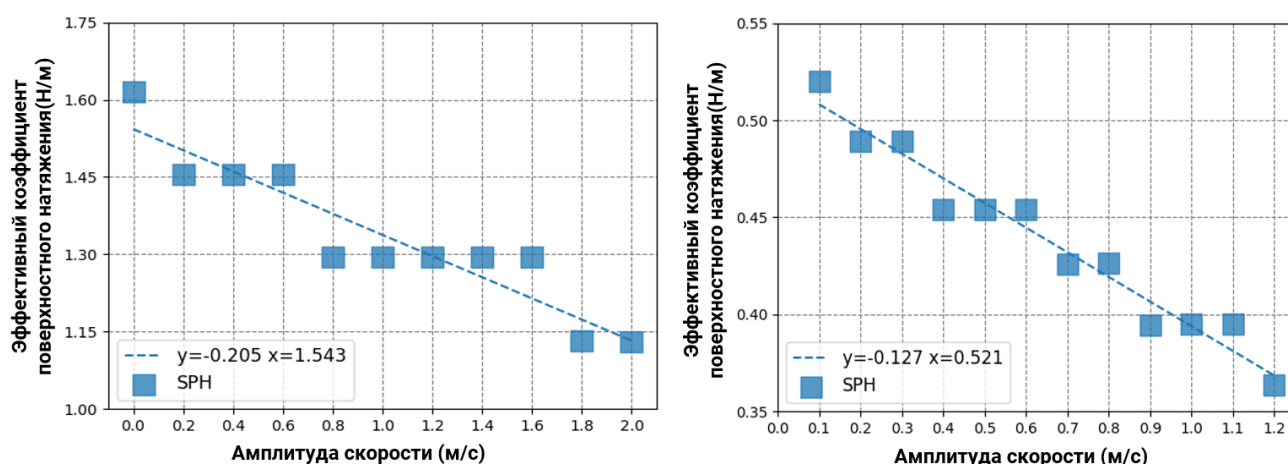


Рисунок 9 – Экспериментальные зависимости эффективного коэффициента поверхностного натяжения от пиковой скорости при различных частотах вибрационных воздействий: для стали 12X18H10T (слева) и для алюминиевого сплава АМг5 (справа)

В результате проведенной серии численных экспериментов, было выявлено, что математическая модель способна адекватно описывать влияние вибрационных воздействий на эффективный коэффициент поверхностного натяжения как для воды, так и для расплавленных металлов.

Во второй серии численных экспериментов был изучен процесс образования капли металлического расплава из проволоки в условиях вибрационных воздействий. Проволока подавалась под наклоном с заданной скоростью, а вибрационные воздействия были реализованы путем добавления гармонической составляющей к постоянной скорости подачи проволоки.

$$v_{wire} = v_0 + A\omega \sin(\omega t),$$

где v_0 – постоянная скорость проволоки, A – амплитуда колебаний, ω – угловая частота колебаний.

Таблица 2. Параметры процесса

Диаметр проволоки	$d_{пр}$	мм	1,2
Скорость подачи проволоки	$v_{пр}$	мм / с	30,0
Мощность источника тепла	Q	Вт	1000
Диаметр источника тепла	d_Q	мм	2,0
Амплитуда колебаний	A	мкм	35
Частота колебаний	ν	кГц	22

Были выполнены четыре серии численных экспериментов для разных направлений вибраций и варианта искусственного снижения коэффициента поверхностного натяжения. Анализ формы и динамики поведения капли показал (рисунок 10), что введение вибрационных воздействий не является эквивалентом снижения коэффициента поверхностного натяжения. Вибрации приводят к изменению конвективных потоков, вызывая эффект усреднённой вибрационной силы, действующей на систему. Процесс отрыва капли наблюдался в случае оплавления проволоки без вибраций, как при нормальном, так

и при пониженном коэффициенте поверхностного натяжения. Однако при моделировании с вибрациями отрыв капли не происходил. Важным фактором является то, что вибрации увеличивают площадь контакта между проволокой и каплей, что требует большей массы капли для её отрыва.

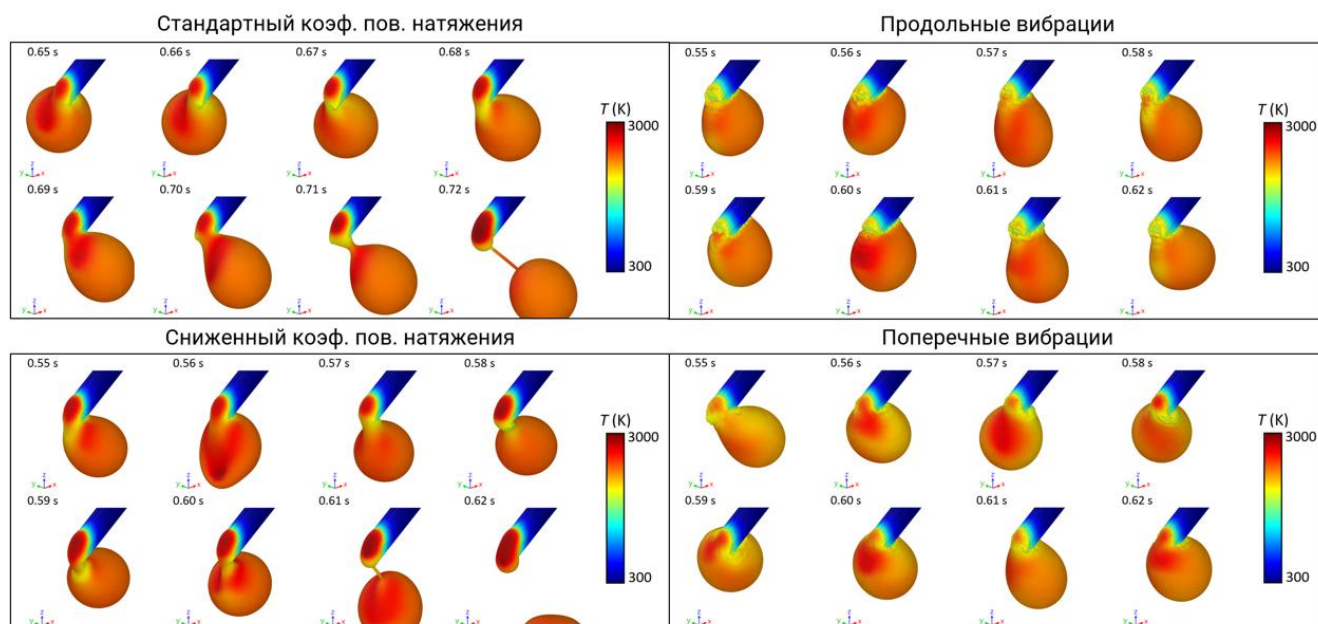


Рисунок 10 – Результаты моделирования процесса оплавления проволоки при различных параметрах вибрационных воздействий

Особое внимание следует уделить изменению характера течения расплавленного металла: продольные колебания приводят к эффекту "соскабливания" материала, что способствует улучшению массопереноса при аддитивной наплавке присадочной проволокой, а также уменьшению ширины наплавленного валика. В то же время поперечные колебания увеличивают ширину сварочного шва, что также может быть полезным.

Процесс формирования капли металла имеет выраженный нестационарный характер, который обусловлен эффектом Марангони и давлением паров, зависящими от температуры. Эти явления вызывают автоколебательные эффекты, при которых капля раскачивается в горизонтальной плоскости. Термокапиллярные течения, вызванные эффектом Марангони, препятствуют отрыву капли, особенно в случае алюминиевых сплавов, для которых эффект Марангони проявляется слабее по сравнению с хромоникелевой сталью, из-за более низкого коэффициента поверхностного натяжения и его температурной зависимости.

В заключительной серии численных экспериментов было изучено влияние вибраций на процесс растекания капли металлического расплава на вибрирующей подложке. В качестве исследуемого материала была выбрана сталь марки 12X18H10T, при этом задача теплопроводности в этих расчетах не решалась, что означало постоянное сохранение жидкого состояния расплава. Целью экспериментов было выявить разницу между влиянием вибрационных воздействий и снижением эффективного коэффициента поверхностного натяжения на процесс смачивания.

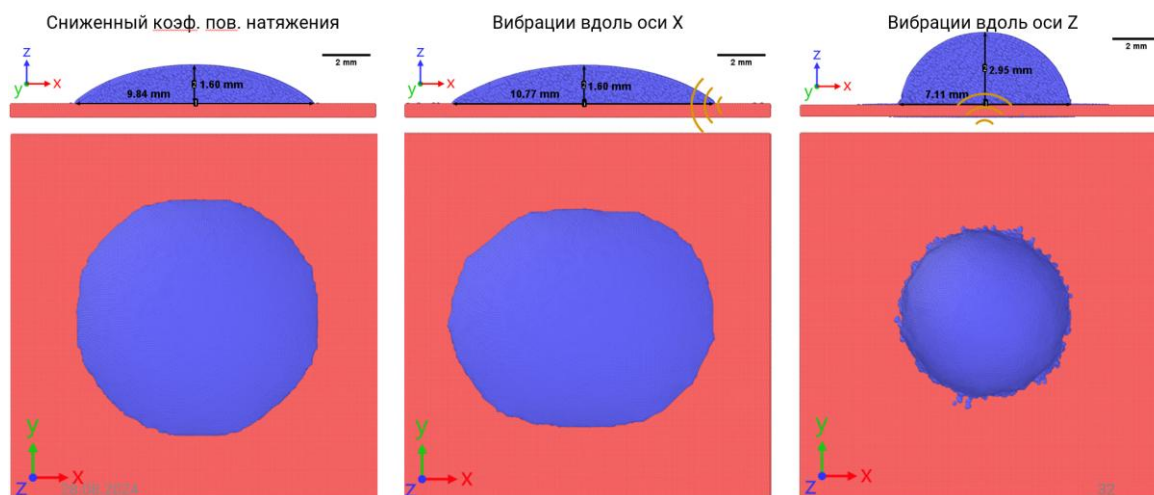


Рисунок 11 – Результаты моделирования процесса растекания капли на вибрирующей подложке при различных направлениях вибрационного воздействия

Результаты численных экспериментов (рисунок 11) показали, что вибрационные воздействия не приводят к уменьшению эффективного коэффициента поверхностного натяжения, более того, наблюдается обратный эффект. Его можно объяснить возникновением дополнительной объемной силы, противодействующей силе тяжести, которая, в свою очередь, непосредственно влияет на форму капли. Возникновение такой объемной силы можно учесть только прямым численным счетом.

В четвертой главе описаны численные эксперименты по моделированию процесса тепломассопереноса при проволоочной наплавке в условиях вибрационных воздействий, а также их натурная реализация.



Рисунок 12 – Изображение экспериментальной установки (слева), результат натурного эксперимента (справа)

Для проведения натурных экспериментов была разработана экспериментальная установка, включающая сварочного робота и вибростол, позволяющий вносить вибрационные воздействия в горизонтальном и вертикальном направлениях. В ходе численных и натурных экспериментов было изучено влияние вибрационных воздействий на процесс проволоочной наплавки. В первом эксперименте в систему не вводились вибрации, во втором – вибрации вводились в систему через подложку. Проведенные численные эксперименты показывают, что при вибрационных воздействиях наблюдается увеличение высоты валика и уменьшение его ширины как в экспериментальных, так и в численных результатах. Кроме того, при отсутствии вибраций форма капли полностью округлая, в то время как при наличии вибраций капли имеют угловатую форму.

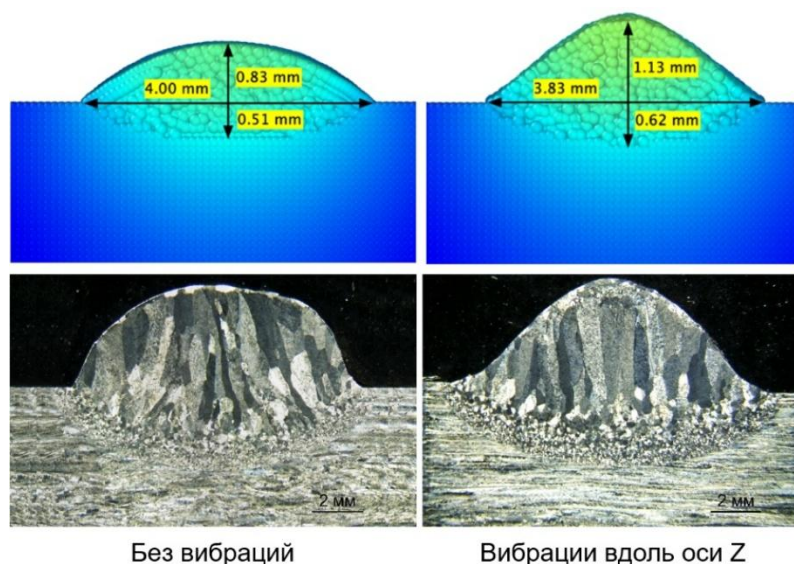


Рисунок 13 – Сравнение результатов численного и натурального эксперимента при одинаковых параметрах вибрационных воздействий: без вибраций (слева) с вибрационными воздействиями вдоль оси Z (справа)

Затем было проведено численное исследование влияния вибрационных воздействий различной направленности на процесс проволоочной наплавки металлов (12X18H10T, АМг5, ВТ6). Рассмотрены четыре серии численных экспериментов: без вибрационных воздействий, а также с вибрациями, направленными вдоль осей X, Y и Z. Параметры технологического процесса и численного моделирования приведены в таблицах 3 и 4 соответственно.

Таблица 3. Параметры процесса проволоочной наплавки

Диаметр проволоки	$d_{пр}$	мм	1,2
Скорость подачи проволоки	$v_{пр}$	мм / с	13,0
Размер подложки	(Ш x Д x В)	мм мм мм	10 x 27 x 5
Скорость наплавки	$v_{подл}$	мм / с	8,5
Мощность источника тепла	Q	Вт	1400
Диаметр источника тепла	d_Q	мм	3,0

Таблица 4. Параметры численного расчета процесса

Параметр дискретизации	h	мм	0,1
Количество частиц	n	шт	1 707 786
Шаг по времени	dt	с	2,5e-6
Количество шагов	N	шт	1 000 000
Физическое время	$t_{физ}$	с	2,5
Время расчета	$t_{рас}$	ччч:мм:сс	190:47:12

Результаты математического моделирования хорошо согласуются с результатами натуральных экспериментов. Наибольшая погрешность наблюдается в глубине проплавления (таблица 5).

Таблица 5. Геометрические характеристики наплавленных валиков

Направление ВВ	$b, \text{ мм}$				$h, \text{ мм}$				$g, \text{ мм}$			
	ЧМ	НЭ	Δ	ϵ	ЧМ	НЭ	Δ	ϵ	ЧМ	НЭ	Δ	ϵ
Без ВВ	7,4	7,4	0	0%	3,2	3,3	0,1	3%	1,2	1,6	0,4	25%
ВВ x	6,9	5,6	1,3	23%	3,5	3,6	0,1	3%	1,0	1,1	0,1	9%
ВВ y	7,5	6,8	0,7	10%	3,8	3,8	0	0%	1,1	1,6	0,5	31%
ВВ z	8,0	7,3	0,7	10%	3,8	3,5	0,3	9%	2,4	2,0	0,4	20%

Анализ полученных результатов показал, что вибрационные воздействия существенно влияют на геометрию наплавляемых валиков и интенсивность тепломассопереноса. Их направление определяет характер изменений: при вибрациях вдоль оси X ширина валика уменьшается с 7,4 до 5,6 мм, а глубина проплавления – с 1,6 до 1,1 мм; при воздействиях со стороны подложки глубина проплавления возрастает до 2,0 мм, в то время как высота валика остаётся почти неизменной (3,3–3,8 мм). Численные результаты согласуются с данными натурного эксперимента. Направление вибраций существенно влияет на перемешивание материалов проволоки и подложки, что можно наблюдать на поперечных шлифах (рисунок 14), где синие частицы представляют проволоку, а красные – подложку.

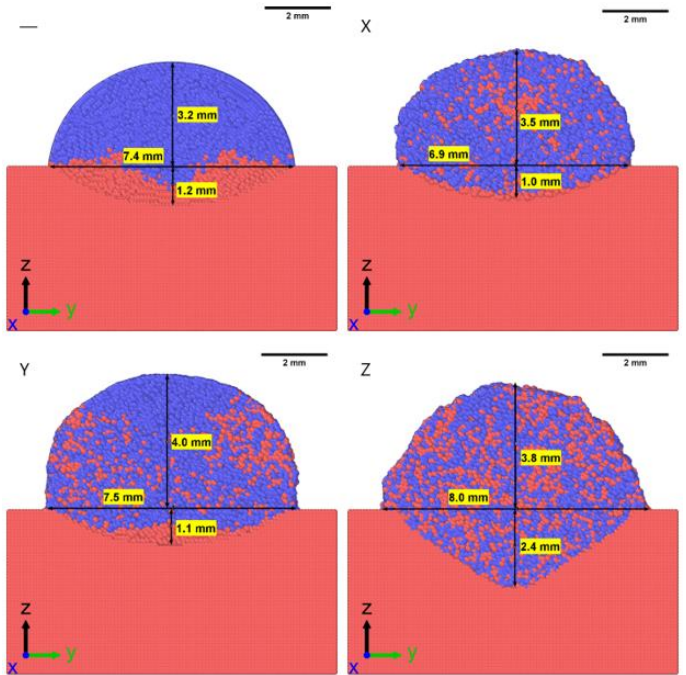


Рисунок 14 – Результаты численных экспериментов по моделированию процесса проволочной наплавки при различных направлениях вибрационных воздействий: размеры наплавленных валиков в разрезе

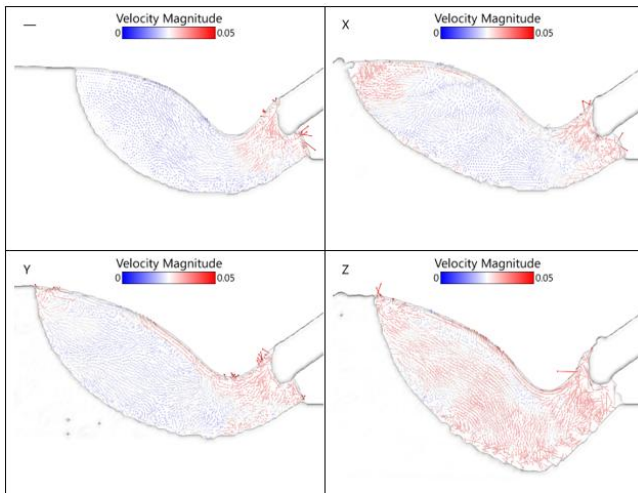


Рисунок 15 – Результаты численных экспериментов по моделированию процесса проволочной наплавки при различных направлениях вибрационных воздействий: визуализация конвективных потоков в ванне расплава

Анализ конвекционных потоков металла в ванне расплава показал, что введение вибраций снижает порог устойчивости системы и усиливает конвекционные потоки. Вибрации в вертикальном направлении способствуют более быстрому переносу тепла к корню ванны расплава, что приводит к увеличению глубины зоны проплавления. Таким образом, вибрационные воздействия оказывают значительное влияние на процесс проволочной наплавки, улучшая тепломассоперенос и качество наплавляемых одиночных валиков.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Проанализированы методы математического моделирования процессов проволоочной наплавки в том числе с применением вибрационных воздействий. Проведен обзор теоретических исследований влияния вибрационных воздействий на термокапиллярные течения. Установлена целесообразность применения метода гидродинамики сглаженных частиц в связи с его высокой производительностью и удобством учета ключевых явлений, сопутствующих процессу.

2. Разработана математическая модель процесса тепломассопереноса при проволоочной наплавке с учетом вибрационных воздействий с применением метода гидродинамики сглаженных частиц. Показана необходимость учета эффектов испарения, давления паров и эффекта Марангони для корректного представления протекающих процессов. Продемонстрирована возможность описания явлений, сопутствующих вибрационным воздействиям при наплавке прямым численным счетом.

3. Осуществлена численная реализация математической модели методом гидродинамики сглаженных частиц, описывающей поведение жидкой капли в условиях вибрационных воздействий. Проведена валидация математической модели на примере натурных экспериментов. Осуществлена верификация на примере расчета поведения капли воды на осциллирующем подвесе (подложке).

4. Численно исследован процесс проволоочной наплавки с вибрационными воздействиями. Посредством математического моделирования установлены механизмы влияния параметров вибрационных воздействий и их направления на геометрические параметры формируемых валиков, а именно изменение размеров и формы валиков. Механизм роста глубины проплавления заключается в увеличении интенсивности теплопереноса с нагретой области на поверхности валика к корню вследствие термокапиллярных течений.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Основные публикации

1. **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)
2. **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 (BAK)
3. **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)
4. **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)

5. 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)

6. 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)

7. 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)

8. 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)

Свидетельства

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.