Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

На правах рукописи

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

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель — доктор технических наук, Трушников Дмитрий Николаевич

Пермь, 2025

Оглавление

Введение 4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПРОВОЛОЧНОЙ НАПЛАВКЕ 10
1.1. Технологии аддитивного производства металлических изделий и их особенности 11
1.2. Влияние вибрационных воздействий на процесс аддитивного формирования материалов 21
1.3. Сравнительный анализ методов математического моделирования процессов аддитивного производства 27
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 37
Глава 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА АДДИТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ МЕТОДОМ ГИДРОДИНАМИКИ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ 39
2.1. Концептуальная постановка задачи 39
2.2. Математическая постановка задачи 42
2.3. Метод гидродинамики сглаженных частиц 46
2.3.1. Аппроксимация уравнений математической постановки методом гидродинамики сглаженных частиц 50
Выводы по главе 2 56
ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ, ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПРОВОЛОЧНОЙ НАПЛАВКЕ С ВИБРАЦИОННЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ 57
3.1 Описание разработанного программного комплекса 57
3.2. Верификация математической модели на тестовых вычислительных примерах 68
3.2.1. Верификация модели на тестовых примерах в упрощенных постановках 68

3.3. Валидация математической модели с использованием результатов натурных экспериментов 75
3.3.1. Калибровка параметров модели и алгоритм определения коэффициента поверхностного натяжения 76
3.3.2. Сопоставление результатов численных и натурных экспериментов 80
3.3.3. Итоговая оценка достоверности модели 83
3.4. Верификация математической модели при учете внешних вибрационных воздействий 84
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 91
ГЛАВА 4. ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ И НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРОЦЕССА ПРОВОЛОЧНОЙ НАПЛАВКИ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ 93
4.1. Описание экспериментальной установки и методики проведения натурных экспериментов 93
4.2. Анализ результатов численного моделирования: влияние параметров вибрационных воздействий на процесс проволочной наплавки 97
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 110
Заключение 111
Список литературы 112
Приложение А 134

ВВЕДЕНИЕ

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 проволочной 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 проволочной 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 Туричиным Г.А., Кривилевым М.Д., 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 проволочной 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 проволочной 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 проволочной 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 проволочной 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 проволочной наплавке с применением вибрационных воздействий в виде программного комплекса.
4. Численное моделирование процесса тепломассопереноса при проволочной 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 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.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель процесса тепломассопереноса при проволочной наплавке в условиях вибрационных воздействий.
2. Численная реализация математической модели процесса тепломассопереноса при проволочной наплавке с применением вибрационных воздействий в виде программного комплекса.
3. Результаты верификации и валидации математической модели процесса тепломассопереноса при проволочной 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 проволочной 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. Матвеенко), кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ (рук. проф. П.В. Трусов), 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПРОВОЛОЧНОЙ НАПЛАВКЕ

Аддитивное производство металлических изделий представляет собой одно из наиболее перспективных направлений в современной промышленности, обеспечивая возможность создания изделий сложной геометрии и функциональных конструкций [1]. Среди различных технологий, используемых для производства металлических изделий, особое внимание уделяется методам послойной проволочной наплавки, которые характеризуются высокой скоростью формирования, низкими потерями материала и возможностью масштабирования процесса [2]. Однако, несмотря на очевидные преимущества, проволочная наплавка сопровождается рядом технологических ограничений, связанных с качеством формируемых изделий. Наиболее важными из них являются неравномерность структуры материала, высокая пористость и формирование дендритной текстуры, что приводит к снижению механических характеристик конечных изделий [3].

В последние годы одной из стратегий улучшения качества металлических изделий является применение вибрационных воздействий в процессе проволочной наплавки [4, 5]. Известно, что вибрации оказывают влияние на внутреннюю структуру материала, способствуя измельчению зеренной структуры и снижению количества внутренних дефектов [6, 7, 8]. Однако влияние вибрационных воздействий на геометрические параметры наплавляемых валиков на данный момент остается недостаточно изученным. При этом понимание закономерностей изменения геометрии валиков под действием вибраций позволит создать дополнительный механизм управления геометрическими характеристиками формируемых изделий за счет целенаправленного изменения параметров вибрационного воздействия.

Исследование механизмов воздействия вибраций на формирование наплавляемых валиков требует применения современных подходов математического моделирования, учитывающих комплекс взаимосвязанных физических процессов, таких как тепломассоперенос, конвективные течения, капиллярные эффекты и взаимодействие жидкой металлической фазы со свободной

поверхностью. Использование инструмента математического моделирования обеспечивает возможность детального анализа указанных явлений и позволяет количественно оценивать влияние отдельных факторов на формирование геометрических характеристик наплавленных слоев.

В данной главе представлен обзор современных подходов к математическому моделированию процессов тепломассопереноса в области аддитивного производства с акцентом на технологию проволочной наплавки. Выполнен сравнительный анализ возможностей и ограничений сеточных и бессеточных численных методов. Особое внимание уделено методу гидродинамики сглаженных частиц (SPH) как одному из наиболее перспективных бессеточных подходов к моделированию процесса проволочной наплавки. На основе литературного обзора и анализа существующих исследований формулируется гипотеза о зависимости геометрических характеристик валиков от параметров вибраций и обосновывается необходимость применения численных методов для ее проверки.

1.1. Технологии аддитивного производства металлических изделий и их особенности

Мировая промышленность проявляет острый интерес к аддитивным технологиям (АТ) с момента их появления, так как они способствуют ускорению перехода от проекта изделия к его производству и позволяют реализовать в проекте решения, повышающие эффективность и снижающие вес деталей. В настоящее время аддитивное производство (АП) все больше применяют в качестве заготовительного производства и технологии получения готовых изделий в мелкосерийном производстве в различных отраслях промышленности, преимущественно в наукоемком машиностроении: авиастроение, ракетно-космическая отрасль, химическое машиностроение, энергомашиностроение, автомобилестроение.

АП основывается на концепции цифрового производства, при которой предполагается тесная связь всех этапов проектирования и изготовления изделий, обеспеченная наличием цифрового прототипа изделия и применением принципов

сквозного проектирования. Такой подход позволяет автоматизировать и сократить время на разработку новых изделий, снизить процент брака. В рамках концепции цифрового производства первой стадией является имитационное моделирование цифрового прототипа с заданным набором факторов для дальнейшего определения параметров изделия или технологии его изготовления с учетом требуемых эксплуатационных характеристик. При этом достоверность и точность получаемых результатов в значительной степени зависят от адекватности и корректности используемых математических моделей изделия и производственного процесса. Возможность моделирования технологического процесса представляет собой резерв для оптимизации режимов изготовления изделий, разработки управляющих программ, минимизации вероятности появления дефектов и, как следствие, повышения качества изготовления изделий сложной формы.

За последние двадцать лет наблюдаются значительные успехи в сфере металлических аддитивных технологий, во многом это связано со снижением цен на промышленные лазеры и роботизированные комплексы, появлением недорогих высокопроизводительных вычислительных аппаратных средств и развитием программного обеспечения, совершенствованием технологий производства металлических порошков и широкой номенклатурой проволочных присадочных материалов. Помимо этого, сходство физических процессов и значительные наработки современных ученых в области сварки и наплавки различных групп материалов во многом объясняет бурное развитие металлических АТ. В настоящее время АТ достигли критического уровня принятия на уровне крупных производственных компаний, о чем свидетельствует быстрый рост продаж коммерческих аддитивных систем и установок. Металлические АТ, разработанные в национальных лабораториях, университетах и промышленных исследовательских лабораториях, в настоящее время демонстрируются на различных выставках и вызывают значительный интерес промышленности. Некоторые металлические аддитивные технологии достигли уровня готовой сертифицированной технологии, большинство из них сделали это путем сертификации каждого отдельного типа детали, материала и процесса.

В настоящее время аддитивные технологии активно используются для мелкосерийного производства изделий в авиационной промышленности. В частности, корпорацией General Electric был выполнен значительный объем исследовательских работ, в результате чего стало возможным промышленное производство топливных форсунок из кобальт-хромовых порошков для перспективного турбовинтового двигателя LEAP [9]. Аналогичные исследования активно проводятся компанией Boeing, уже изготовившей более 20 тысяч деталей методом аддитивных технологий, которые эксплуатируются в ее военных и гражданских воздушных судах [10].

Согласно международному стандарту ASTM F2792 [11], процессы аддитивного производства подразделяются на две основные категории: направленное осаждение материала (Directed Energy Deposition, DED) и послойное сплавление порошкового материала (Powder Bed Fusion, PBF). В данных процессах используются исходные материалы в виде металлических порошков или проволоки, а также различные источники энергии, такие как лазерное излучение (Laser, L), электронный луч (Electron Beam, EB), плазменная дуга (Plasma Arc, PA) или электрическая дуга с плавящимся электродом в защитной газовой среде (Gas Metal Arc, GMA).

При реализации технологии послойного сплавления порошковых материалов (PBF, Powder Bed Fusion) первоначально на рабочей платформе формируется равномерный слой материала заданной толщины, для чего порошок дозированно подается и разравнивается посредством специального устройства (ролика или плоского ножа). Затем происходит выборочная (селективная) обработка порошкового слоя в соответствии с текущим поперечным сечением изделия, полученным из исходной CAD-модели. В качестве источников энергии для селективного сплавления металлических порошков обычно применяются лазерные или электронно-лучевые установки.

В технологии направленного осаждения материала (DED, Directed Energy Deposition) исходный материал подается непосредственно в зону локального подвода энергии. Термин Directed Energy Deposition можно интерпретировать как

технологию непосредственного осаждения материала в целевую точку. Для изготовления металлических изделий в рамках данной технологии могут применяться лазерные, электронно-лучевые, плазменные и электродуговые источники энергии. При этом исходными материалами выступают не только металлические порошки, но и присадочные проволоки. На рисунке 1.1 приведены схемы различных аддитивных технологий, классифицированных по типу используемых исходных материалов и источников энергии.

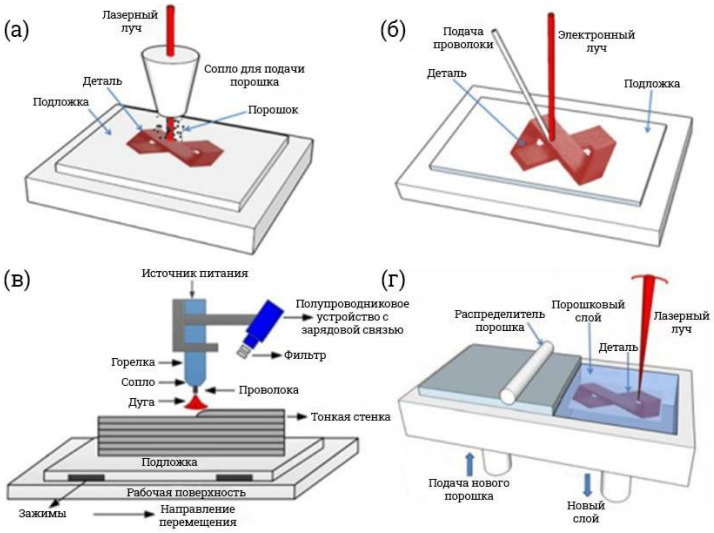


Рисунок 1.1 – Схематическое представление АТ (а) DED-L, (б) DED-EB, (в) DED-GMA, (г) PBF-L

На рисунке 1.1(а) приведена иллюстрация процесса направленного осаждения материала с использованием лазерного источника энергии и порошкового материала (Directed Energy Deposition–Laser, DED-L) [2, 12–20]. Как правило, технология DED-L основана на непрерывной подаче металлического порошка в локальную зону расплавленного металла (сварочную ванну), формируемую за счет воздействия лазерного излучения. В результате происходит послойное формирование материала на подложке. Для защиты расплава от окисления и обеспечения переноса порошкового материала обычно используется инертный газ, например аргон.

Технология направленного осаждения материала с использованием электронно-лучевого источника (Directed Energy Deposition–Electron Beam, DED-EB), представленная на рисунке 1.1(б), основана на расплавлении присадочного

материала в виде проволоки посредством электронного луча. Важным условием реализации процесса DED-EB является вакуумная среда, которая обеспечивает защиту расплавленного металла от окисления в ходе послойного формирования изделия.

Технологии направленного осаждения материала с применением плазменной дуги (DED-PA) или электрической дуги в защитной газовой среде (DED-GMA) используют в качестве источника тепловой энергии плазменную или электрическую дугу, а исходным материалом служит присадочная проволока, что аналогично традиционной сварке плавлением [2, 12–14]. Технологическая схема процессов DED-PA и DED-GMA, представленная на рисунке 1.1(в), включает источник нагрева, механизм подачи присадочной проволоки, а также систему управления перемещением и формированием изделия.

На рисунке 1.1(г) представлена иллюстрация технологии послойного сплавления порошкового материала с применением лазерного источника энергии (Powder Bed Fusion–Laser, PBF-L) [21–24]. В данном процессе изделие формируется путем последовательного нанесения тонких слоев металлического порошка, который равномерно распределяется посредством специального механизма. Лазерное излучение селективно воздействует на нанесенный порошковый слой, осуществляя локальное сплавление материала и тем самым обеспечивая послойное создание конечного изделия.

Во всех процессах DED и PBF заготовка создается поэтапно после ввода оцифрованной геометрии из системы автоматизированного проектирования (САПР). Параметры режима, такие как скорость наплавки и скорость подачи исходного материала (или траектория сканирования и толщина слоя в случае PBF технологий), либо предварительно установлены, либо контролируются в процессе с помощью соответствующих датчиков и обратных связей. Для изготовления деталей небольших размеров со сложной геометрией, включая ажурные конструкции, внутренние полости или каналы малого сечения, а также при высоких требованиях к качеству поверхностей, рациональным является применение технологий послойного сплавления порошкового материала (PBF). В то же время

для формирования крупногабаритных изделий более целесообразным является использование технологий направленного осаждения материала (DED).

Выбор оптимального метода аддитивного производства неразрывно связан с типом и характеристиками исходного материала, поэтому особое внимание уделяется изучению и классификации порошковых материалов, используемых в данных процессах.

Порошковые материалы представляют собой дисперсные вещества с характерными размерами частиц до 1,0 мм и условно классифицируются по среднему диаметру частиц d следующим образом: нанодисперсные ($d < 0{,}001$ мкм), ультрадисперсные ($d = 0{,}01 \div 0{,}1$ мкм), высокодисперсные ($d = 0{,}1 \div 10$ мкм), мелкодисперсные ($d = 10 \div 40$ мкм), среднедисперсные ($d = 40 \div 250$ мкм) и крупнодисперсные ($d = 250 \div 1000$ мкм) [25].

На данный момент общепринятые требования и стандарты к порошковым материалам, используемым в аддитивном производстве, отсутствуют. Производители оборудования для реализации аддитивных технологий обычно предлагают к использованию собственные перечни материалов, характеризующиеся определенным фракционным составом и поставляемые непосредственно производителем. Существенным недостатком в области производства порошковых материалов является отсутствие стандартизации и невозможность прямого переноса методик оценки свойств материалов, разработанных для традиционных производственных технологий, на аддитивные процессы, что обусловлено наличием выраженной анизотропии свойств изделий, неизбежно возникающей при их послойном выращивании.

За рубежом вопросы стандартизации материалов для аддитивных технологий находятся в ведении таких организаций, как Национальный институт стандартов и технологий США (NIST – National Institute of Standards and Technology), Международная организация по стандартизации (ISO, технический комитет TC261 по аддитивным технологиям) и Американское общество по испытаниям и материалам (ASTM, международный комитет F42 по аддитивным технологиям). На сегодняшний день разработан лишь один специализированный стандарт — ASTM

F2924 [26], регламентирующий применение порошка сплава Ti-6Al-4V для технологий послойного сплавления порошкового материала (PBF).

Использование проволоки в качестве исходного материала при аддитивном формировании металлических изделий позволяет устранить ряд недостатков, характерных для традиционных методов, использующих порошковые материалы, а именно: низкую производительность существующих подходов, высокую стоимость оборудования, повышенную пористость и ограниченность номенклатуры применяемых сплавов, обусловленную необходимостью их оплавления мощными источниками тепла [27–33].

Дополнительным преимуществом применения присадочной проволоки является ее существенно меньшая удельная площадь поверхности по сравнению с порошковыми материалами, вследствие чего проволока менее подвержена окислению, а также поглощению влаги и различных загрязнений. Проволочные материалы проще в хранении и обеспечивают лучшие условия с точки зрения безопасности и охраны труда, особенно при использовании сплавов на основе активных металлов, таких как титановые и магниевые сплавы.

В процессе проволочной наплавки металлическая проволока непрерывно подается на подложку (или на ранее сформированный слой) и расплавляется под действием локального источника тепла (электрической дуги, электронного луча, плазменной струи или лазерного излучения), образуя сварочную ванну расплавленного металла.

В зависимости от источника энергии проволочная наплавка может быть реализована с использованием дугового (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing), лазерного (LWAM – Laser Wire-Feed Additive Manufacturing) или электронно-лучевого нагрева (EBAM – Electron Beam Additive Manufacturing). При этом WAAM можно разделить на наплавку неплавящимся электродом в инертном газе (GTAW – Gas Tungsten Arc Welding), наплавку электрической дугой плавящимся электродом в защитном газе (GMAW – Gas Metal Arc Welding), плазменно-дуговую наплавку (PAW – Plasma Arc Welding) (рис. 1.2) и технологию холодного переноса металла (CMT – Cold Metal Transfer) [34, 35].

Благодаря высокой концентрации энергии лазерного излучения LWAM позволяет формировать слои металла с высокой точностью геометрических характеристик и качеством поверхности. Важными преимуществами метода LWAM являются низкое тепловое воздействие на подложку, уменьшенные остаточные напряжения и деформации, а также возможность обработки широкого спектра металлических сплавов, включая труднообрабатываемые и жаропрочные материалы. Тем не менее, сравнительно высокая стоимость и сложность лазерных систем ограничивают широкое применение этой технологии преимущественно в наукоемких отраслях промышленности, таких как авиастроение и космическая промышленность.

Особенность технологии EBAM состоит в необходимости выполнения процесса в вакуумной среде, что обеспечивает защиту наплавленного металла от окисления и загрязнения, одновременно позволяя достичь высокой чистоты наплавленного материала и стабильности процесса. Метод EBAM характеризуется высокой производительностью и эффективностью при изготовлении крупногабаритных изделий из титана, жаропрочных и других высокоактивных сплавов, однако требует наличия сложного вакуумного оборудования и специализированной инфраструктуры, что определяет его применение преимущественно в аэрокосмической отрасли и других высокотехнологичных производствах.

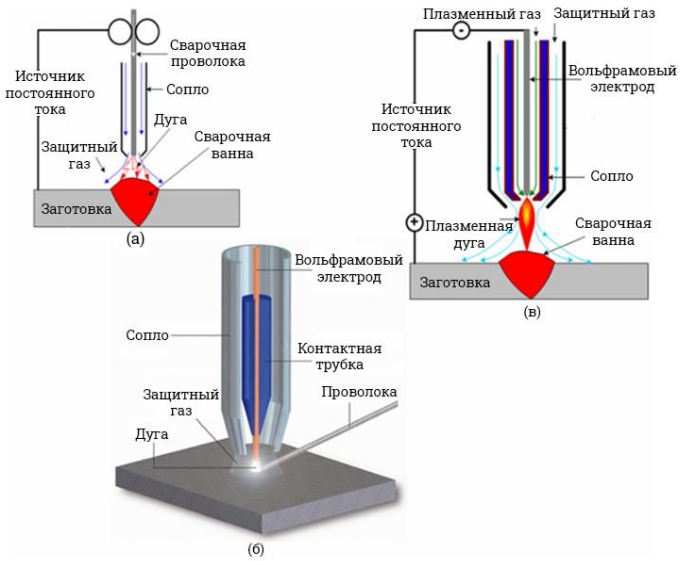


Рисунок 1.2 – Схематичное представление процессов [2]. (а) GMAW, (б) GTAW, (в) PAW

Аддитивное производство на основе наплавки металлов плавящимся электродом в среде защитных газов (Gas Metal Arc Welding, GMAW) характеризуется высокой энергетической эффективностью и наибольшей скоростью формирования изделий среди существующих аддитивных технологий. В данной методике присадочная проволока подается в зону наплавки преимущественно перпендикулярно к подложке, обеспечивая равномерное осаждение материала. Однако технология GMAW имеет ряд недостатков, среди которых можно выделить интенсивное разбрызгивание капель расплавленного металла, что снижает эффективность использования материала и может негативно сказываться на качестве поверхности изделия. Дополнительным ограничением является нестабильность дугового разряда, влияющая на равномерность формирования слоев [36]. Кроме того, избыточное накопление тепловой энергии в процессе наплавки приводит к ухудшению структурных и механических свойств материала, что может снижать качество и эксплуатационные характеристики получаемых изделий [37].

Для предотвращения окисления расплавленного металла при аддитивном формировании применяется технология наплавки неплавящимся электродом в среде инертного газа (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW). В качестве защитного газа, обеспечивающего инертную атмосферу в зоне наплавки, используются аргон, гелий и азот [38, 39]. Данная технология характеризуется минимальным образованием брызг, что способствует высокой чистоте и однородности наплавленного металла, а также применима к широкому спектру металлических материалов [40]. Однако, несмотря на высокое качество наплавленного металла, GTAW отличается сравнительно низкой производительностью, что ограничивает ее применение в задачах, требующих высокой скорости формирования изделий. Дополнительно, стабильность и качество процесса наплавки металла в значительной степени зависят от параметров технологического режима, включая силу тока, скорость подачи проволоки и состав защитной газовой среды.

Процесс плазменно-дуговой наплавки (Plasma Arc Welding, PAW) характеризуется высокой плотностью тепловой энергии, что обуславливает

значительное повышение температуры в зоне обработки и увеличение скорости наплавки. В отличие от технологий наплавки плавящимся электродом в среде защитного газа и наплавки неплавящимся электродом в инертном газе, плазменная дуга имеет более узкую зону термического воздействия, что способствует повышенной точности формируемых изделий [41]. Однако высокая интенсивность теплового воздействия сопровождается неравномерным охлаждением наплавленного металла, что может приводить к образованию структурных дефектов на стадии кристаллизации и ухудшению механических характеристик наплавленного слоя [42].

Технология холодного переноса металла (Cold Metal Transfer, CMT) представляет собой усовершенствованный вариант сварки плавящимся электродом в защитном газе (GMAW) и отличается автоматизированным управлением нагревом сварочной дугой, что позволяет динамически регулировать температуру проволоки, обеспечивая ее контролируемое нагревание и охлаждение. Это приводит к значительному снижению тепловыделения, повышению точности процесса и переносу расплавленного металла без образования брызг [35]. Процесс CMT осуществляется в несколько последовательных этапов: пиковый ток, фоновый ток и короткое замыкание. На стадии пикового тока формируется устойчивая дуга с высокой плотностью тока, способствующая эффективному расплавлению проволочного материала. Затем ток снижается перед фазой короткого замыкания, предотвращая образование крупных капель расплава, после чего проволока автоматически втягивается назад, обеспечивая контролируемый перенос капли в сварочную ванну. Для предотвращения дефектов, таких как пористость и включения, необходимо тщательное регулирование параметров подачи проволоки и силы тока на всех стадиях процесса [43].

По мере охлаждения металл кристаллизуется, формируя очередной наплавленный слой, называемый валиком. Геометрические характеристики формируемых валиков (ширина, высота, глубина проплавления) зависят от множества параметров процесса: скорости подачи проволоки, мощности и типа теплового источника, состава и характеристик защитной газовой среды, величины

и распределения поверхностного натяжения расплава, условий теплоотвода и других факторов.

Для любого варианта проволочной наплавки характерны значительные объемы жидкого металла, интенсивные процессы тепло- и массопереноса в сварочной ванне, а также высокие температурные градиенты. Сложность и нестационарность протекающих процессов проявляется в формировании за короткие временные интервалы сравнительно крупных наплавленных валиков, характеризующихся взаимосвязанными теплофизическими и гидродинамическими параметрами. В ряде случаев это приводит к формированию пористости и нежелательной крупнозернистой структуры материала, а также возникновению высоких термических напряжений и остаточных деформаций, что может отрицательно сказаться на механических характеристиках, эксплуатационных свойствах и долговечности получаемых изделий. Одним из перспективных направлений в этом контексте является применение вибрационных воздействий, направленных на улучшение структурных и механических свойств получаемых изделий [44–47].

1.2. Влияние вибрационных воздействий на процесс аддитивного формирования материалов

Вибрационные воздействия в процессах сварки и наплавки не являются новым направлением: уже в середине XX века предпринимались попытки использовать механические колебания, ультразвук и различные виды вибраций для повышения качества сварных соединений [48, 49]. Классически отмечалось позитивное влияние подобных воздействий на структуру металла (дробление зерна, снижение пористости, улучшение механических свойств), а также на снижение остаточных напряжений [50, 51].

В последние десятилетия появились работы, где исследуется влияние вибраций непосредственно на ванну расплава [5, 52]. Экспериментальные данные указывают на то, что вибрации усиливает конвекцию и способствует лучшему перемешиванию металла [4], а также интенсифицируют теплообмен за счет

дополнительного движения расплава. Ультразвуковые колебания влияют на процессы зарождения и роста кристаллов, уменьшая их средний размер и улучшая однородность структуры [52]. Однако большинство исследований фокусируются именно на структурных аспектах (формирование мелкозеренной структуры, уменьшение пор и т. д.) и значительно реже затрагивают вопросы изменения формы ванны расплава.

Применение технологий вибрационных воздействий в сварке и наплавке может осуществляться множеством способов, существенно различающихся по физической природе. Так, к числу известных методов относятся электродуговые вибрации [53, 54], тепловые эффекты когерентного лазерного луча [55] и прямое введение вибраций в материал через волновод [6]. Внедрение подобных подходов позволяет стабилизировать гидродинамические процессы в сварочной ванне, управлять структурой, а также сокращать технологический цикл изготовления изделий за счет снижения объемов термической обработки. В частности, в [6, 8, 56, 57, 58] представлено экспериментальное подтверждение того, что наложение механических колебаний при дуговой сварке приводит к заметному улучшению структуры шва, уменьшению пористости и более мелкозернистой структуре, по сравнению с процессом сварки, проводимой без вибраций. При этом отмечается более равномерное распределение упрочняющих и легирующих компонентов в объеме металла шва, что повышает его прочность и улучшает технологический процесс.

Следует также подчеркнуть, что введение вибрационных воздействий широко применяется не только в сварке, но и при непрерывном литье металлов. В алюминиевой металлургии, к примеру использование ультразвука дает эффект целенаправленной кавитации, способствующей рафинированию расплава, получению ячеистых (пористых) структур, а также активному перемешиванию при химическом легировании [59]. В исследовании [6] для алюминиевых сплавов и стали было показано, что при определенном наборе параметров волновода и акустической мощности достигается улучшение структуры и повышение

твердости. В то же время авторы обращают внимание, что вопросы управления амплитудой и энергией вибраций требуют дальнейшего исследования.

Влияние механических колебаний на формирование сварного шва и его эксплуатационные характеристики активно обсуждается в литературе. Например, при сварке неплавящимся электродом высокопрочного алюминиевого сплава 7075 в защитном газе с колебаниями в диапазоне 1025…2050 Гц достигалось снижение восприимчивости к горячему растрескиванию и рафинирование структуры шва [60]. Однако дальнейшее увеличение частоты выше 2051 Гц вновь вызывало рост склонности к растрескиванию, указывая на то, что воздействие вибраций может иметь оптимальный рабочий диапазон, за пределами которого эффект становится отрицательным. Кроме того, отмечено, что при ультразвуковом воздействии прочность сварных швов возрастает на 27%, а число интерметаллидов Fe-Al в структуре сплава заметно сокращается, что благоприятно сказывается на механических свойствах шва.

Помимо алюминиевых сплавов, исследуется влияние вибраций в процессе лазерной сварки. В [61] было показано, что введение ультразвука способно снизить турбулентность потоков внутри расплава, придать сварному шву более «гладкую» форму и увеличить глубину проплавления. Аналогичные исследования [62–64] отмечают положительный эффект вибраций при формировании керамических и интерметаллидных покрытий, когда из расплава при вибрационном воздействии формируется гомогенная структура с равномерным распределением частиц. Вибрации в ряде случаев могут оказывать влияние на процесс сегрегации, агломерации, интенсификации диффузии твердого тела и модифицирования структуры металла [65-71].

Отдельные работы [7] посвящены анализу фаз волн в сварочной ванне и объясняют, каким образом меняется структура в зоне термического влияния (ЗТВ) при различном фазовом соотношении. Например, дистанция между фронтами кристаллизации сокращалась более чем в два раза в сравнении с образцами, сваренными без ультразвуковых колебаний. Исследования [72] и [73] углубляют эту тематику, показывая, что кристаллизация может протекать в «импульсном» или

«периодическом» режиме, если амплитуда и частота внешних колебаний или импульсов тока синхронизируются с собственными частотами зарождения и роста кристаллов. Подобный «резонанс» приводит к формированию более мелкого, равномерно распределенного зерна, обеспечивая повышение пластических свойств шва и снижение склонности к образованию горячих трещин.

В работах [74-76] акцентируется внимание на импульсно-периодических процессах сварки: она может сопровождаться появлением определенной частоты кристаллизации, при которой формируется мелкозернистая структура и увеличивается сопротивление материала возникновению дефектов. Управление тепловложением и параметрами импульсного режима помогает снижать величину сварочных напряжений и остаточных деформаций, существенно влияющих на качество металлического соединения. В [77] было показано, что применение импульсных электромагнитных воздействий при сварке алюминиевых сплавов способствует локальному упрочнению металла в зоне термического влияния, а также перераспределению химических элементов за счет усиления конвекции в расплаве.

Проволочная аддитивная наплавка (WAAM) мартенситностареющих сталей также проявляет чувствительность к тепловым и вибрационным воздействиям, что приводит к формированию интерметаллидных соединений, расположенных вдоль направления сварки [78]. Последующая термическая обработка (например, отжиг) способствует снятию анизотропии свойств и улучшению прочности [79]. Стабильное прохождение процесса сварки/наплавки возможно при согласовании частоты внешних колебаний с частотой зарождения кристаллов (или собственной частотой кристаллизации металла) [80], когда основным фактором становится оптимальное чередование стадий затвердевания и процессов перемешивания расплава.

В случае алюминиевых сплавов подходы MIG и TIG с ультразвуковым воздействием позволяют добиться снижения пористости и повышения твердости [7]. Для титановых и никелевых сплавов (Ti-6Al-4V, Inconel 625), наплавляемых в условиях вибрационного воздействия, подтверждено уменьшение доли столбчатых

зерен, формирование мелкой равноосной структуры и улучшение микроструктурной однородности [81, 82]. С теоретической точки зрения, основной механизм влияния высокочастотных колебаний на расплав связан с появлением осредненных течений (эффект Шлихтинга [83]) и трехмерных вибрационных течений с неоднородной фазой колебаний [84].

Наиболее значимые результаты в плане фундаментальных исследований гидродинамики вибрационных течений представлены в работах [85-87], где анализировались амплитуда, частота и направление гармонических колебаний цилиндрических тел, вызывающих пульсации и сдвиговые течения во внешней жидкости при Re≈1000. В классической монографии [88] Г. З. Гершуни и Д. В. Любимова сделана попытка систематизировать влияние вибраций на конвективные течения, показано различие уравнений термовибрационной конвекции и классических уравнений Зеньковской – Симоненко, особенно при наличии свободных поверхностей или границы раздела фаз.

Свободная поверхность в условиях вибрации ведет себя совершенно иначе, чем граница, фиксированная жесткими стенками. Так, колебания капли или жидкого моста (в условиях невесомости) изучались в работах [89-92]. Было показано, что колебания поверхности при определенной частоте способны усиливать или подавлять термокапиллярное течение Марангони, изменять форму границы «расплав – газ» и даже вызывать смещение капель в более холодную область подложки [90]. При этом более сильный эффект дает вибрация, имеющая касательную составляющую к подложке, по сравнению с колебаниями, перпендикулярными поверхности [92].

Помимо вибрационных воздействий, дополнительным фактором управления движением расплава может служить электромагнитное поле, как показано в работах [93, 94] по стабилизации конвективных течений жидкого галлия. При относительно низких числах Гартмана обеспечивается заметное затухание и переход к стационарным режимам. Более сложные сценарии, когда комбинируется переменное неоднородное магнитное поле и вибрационные воздействия, рассматриваются в [95-99], где анализируются как медленные осредненные

процессы, так и быстрые пульсации. В [98, 99] обобщены уравнения термовибрационной конвекции на случай неньютоновских жидкостей, приводится решение линейной задачи устойчивости квазиравновесия относительно малых периодических возмущений. Подобные исследования могут служить фундаментальной базой для понимания поведения расплава при аддитивном формировании.

Переходя непосредственно к численным методам, следует отметить, что сегодня наметилась тенденция к использованию, помимо классических сеточных подходов, таких методов, как гидродинамика сглаженных частиц (SPH) [100-105]. Сеточные методы (метод конечных объемов, метод конечных элементов и т. д.) остаются востребованными благодаря развитым коммерческим программным комплексам, позволяющим учитывать силы поверхностного натяжения, эффект Марангони, давление паров и т. д. [106]. Однако при моделировании интенсивной деформации свободной поверхности (особенно при вибрациях или капельном переносе) они нередко сталкиваются с проблемами перестройки сетки из-за учета интерфейса «жидкость – газ». Метод SPH, напротив, органично описывает подвижные границы, так как частицы, дискретизирующие объем, сами перемещаются в потоке.

Таким образом, обширный круг работ [53-106] демонстрирует значительный потенциал вибрационных воздействий для управления процессами тепломассопереноса, формированием структуры металла и улучшением механических свойств сварных швов. В то же время большинство исследований сосредоточено либо на структурных аспектах (распределение зерен, пористость, упрочнение), либо на фундаментальном изучении вибрационной гидродинамики (форма капли, термокапиллярные течения, кавитация). В случае аддитивного формирования методом послойной проволочной наплавки до сих пор не описан подход к выбору частоты, амплитуды и направления вибрационных воздействий, позволяющий целенаправленно влиять на профиль наплавленного валика.

1.3. Сравнительный анализ методов математического моделирования процессов аддитивного производства

Процесс аддитивного формирования с использованием проволочной наплавки характеризуется рядом уникальных особенностей, усложняющих исследование его динамики и контроль над качеством наплавленного слоя. Во-первых, имеют место быстропротекающие нестационарные процессы, проявляющиеся в резких перепадах температур и скоростей течения расплава [107]. Во-вторых, при локальном нагреве (дуговом, электронно-лучевом, лазерном и т. д.) наблюдается интенсивное перемещение свободной поверхности металла, а также сильные конвекционные потоки, которые дополнительно могут усиливаться вибрационными воздействиями [91]. В-третьих, высокие градиенты температуры и сложности в измерении полевых величин внутри ванны расплава затрудняют постановку и проведение полноценных экспериментальных исследований [108].

Таким образом, аппарат математического моделирования приобретает особую значимость, поскольку позволяет прогнозировать геометрию расплавленной ванны, кинетику кристаллизации, распределение температур и скорости потока, а также оценивать интенсивность возникающих напряжений. При этом чрезвычайно важно корректно описывать свободную поверхность расплава и учитывать внешние факторы, такие как вибрационные воздействий и др., влияющее на поведение металла в сварочной ванне [109].

Сеточные методы, представленные в основном методами конечных элементов (МКЭ) и конечных объемов (МКО), традиционно широко применяются для решения задач тепломассопереноса, механики жидкости и сопряженных физических процессов [110]. Их высокая популярность обусловлена развитой теоретической базой, а также наличием большого числа коммерческих и открытых программных комплексов, таких как ANSYS, Fluent, COMSOL и другие, обеспечивающих эффективную реализацию данных методов. В указанных программных продуктах интегрированы готовые модели теплообмена, турбулентности и фазовых переходов, что значительно упрощает постановку и численное решение инженерных задач [111, 112, 113].

В исследовании [114] была разработана трехмерная математическая модель, описывающая процессы теплопередачи и динамики жидкого металла в сварочной ванне в ходе аддитивного производства методом наплавки плавящимся электродом в среде защитного газа (WAAM). Для дискретизации дифференциальных уравнений, описывающих процесс, был использован метод конечных объемов (МКО). Верификация модели показала высокую степень согласованности расчетных данных о зоне проплавления с результатами экспериментов (рисунок 1.3). В последующем исследовании [115] данная модель была усовершенствована для определения контрольных точек при построении треугольных и круговых траекторий наплавки.

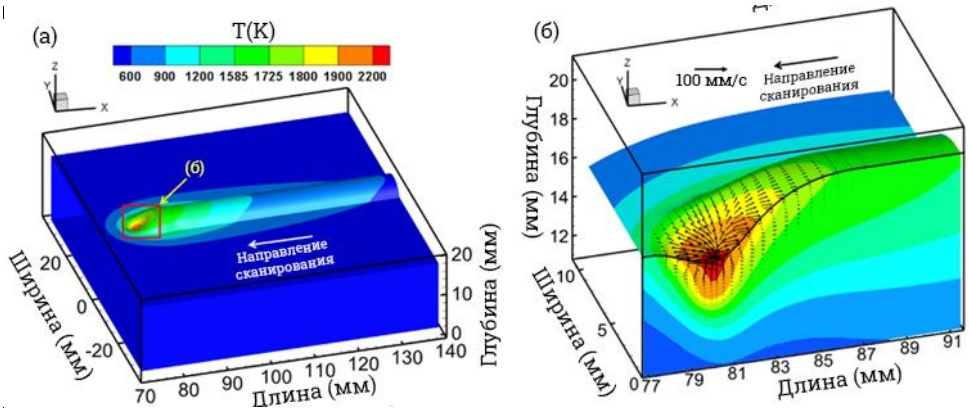


Рисунок 1.3 – (а) Распределение температуры в ходе осаждения одиночного слоя. (б) Увеличенное изображение температурного и скоростного поля [114]

В исследовании [116] проведено изучение механизмов переноса металла в процессе трехмерной аддитивной печати с использованием электронно-лучевого источника энергии и присадочной проволоки. В рамках работы были выполнены экспериментальные исследования, а также разработана математическая модель, основанная на методе конечных элементов (МКЭ), для численного моделирования процессов теплопередачи и динамики расплавленного металла. Для повышения точности вычислений и сокращения времени расчетов в модели была реализована адаптивная сетка (Adaptive Mesh Refinement, AMR), позволяющая локально изменять разрешение расчетной сетки. В частности, вблизи ванны расплава сетка значительно детализировалась, тогда как на удаленных участках применялось ее

укрупнение, что позволило оптимизировать вычислительные ресурсы и повысить эффективность моделирования (рисунок 1.4).

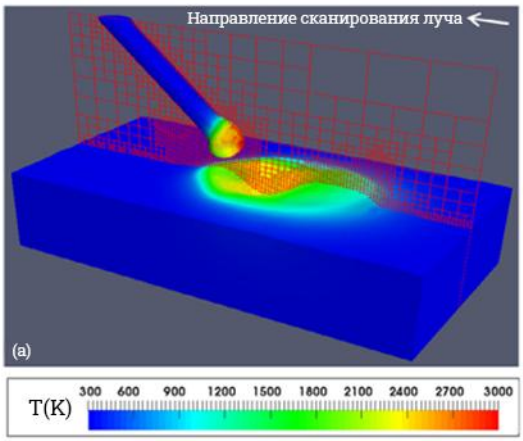


Рисунок 1.4 – Пример построения адаптивной сетки [116]

В исследовании [111] представлена разработка комплексной многомасштабной модели, предназначенной для анализа процессов теплопередачи и течения жидкости со свободной поверхностью в процессе лазерной наплавки с подогревом присадочной проволоки. Численные расчеты выполнялись с использованием коммерческого программного комплекса ANSYS Fluent, основанного на методе конечных объемов (МКО).

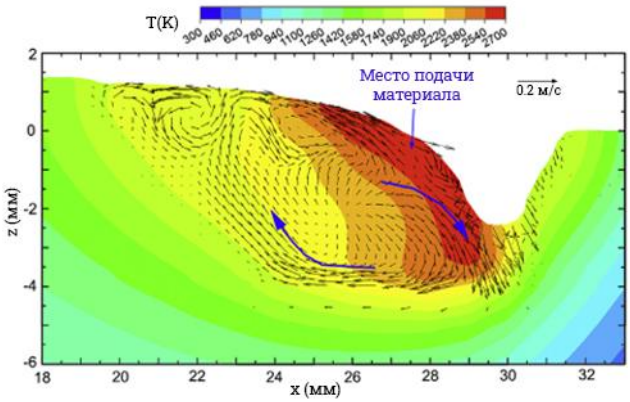


Рисунок 1.5 – Поле температуры и скорости жидкости в продольном сечении [112]

В работе [112] разработана трехмерная численная модель, описывающая динамику жидкого металла в сварочной ванне и процессы теплообмена при многослойном осаждении методом плазменно-дуговой наплавки (PAW). Для повышения точности вычислений использовалась неравномерная шестигранная сетка с локальным уменьшением размеров элементов в областях с высокими

температурами и на границе свободной поверхности. Управляющие уравнения решались с использованием коммерческого программного обеспечения CFD FLUENT, основанного на методе конечных элементов (МКЭ). Распределение температурных и скоростных полей в процессе формирования первого слоя наплавки представлено на рисунке 1.5.

В исследовании [117] метод конечных элементов (МКЭ) был применен в программном комплексе ABAQUS для моделирования процессов теплопередачи в технологии WAAM с учетом различных механизмов теплообмена, включая теплопроводность, конвекцию и излучение.

В работе [113] численное моделирование процесса холодного переноса металла (CMT) с использованием присадочной проволоки из сплава Inconel 718 было выполнено с применением метода конечных элементов в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Разработанная мультифизическая модель учитывала влияние электромагнитных полей, процессы теплопередачи и массопереноса. Для описания фазовых переходов и динамики свободной поверхности расплава был использован метод отслеживания границы раздела фаз (Volume of Fluid, VOF).

В исследовании [118] представлена модификация метода конечных элементов (МКЭ), направленная на повышение эффективности численного моделирования процессов аддитивного производства. В качестве усовершенствования предложен новый подход, основанный на регулярном обновлении расчетной сетки в ходе вычислений, что способствует улучшению точности моделирования и снижению вычислительных затрат.

В работе [119] разработан метод расчета временных пауз в процессе WAAM, основанный на конечно-элементном моделировании теплового поведения наплавляемой детали. Предложенный метод позволяет определять индивидуальное время остывания для каждого наплавляемого слоя, оптимизируя температурный режим и снижая остаточные напряжения в наплавленной структуре.

Большинство термомеханических моделей, описывающих процессы WAAM, разрабатываются на основе метода конечных элементов (МКЭ) [120]. В частности,

в исследовании [121] с использованием программного комплекса ABAQUS была построена модель, обеспечивающая высокую точность предсказания остаточных напряжений, возникающих в процессе наплавки.

Таблица.1.1. Научные публикации, посвященные моделированию процессов аддитивного производства с использованием сеточных методов

Метод	Процесс	ПО	Год	Ссылка
МКО	WAAM	собственная разработка	2018	[114]
МКО	WAAM	собственная разработка	2020	[115]
МКО	Лазерное осаждение горячей проволоки	ANSYS FLUENT	2018	[111]
МКЭ	Электронно-лучевая наплавка проволоки	собственная разработка	2018	[116]
МКЭ	PAW	CFD FLUENT	2018	[112]
МКЭ	WAAM	ABAQUS	2022	[117]
МКЭ	CMT	COMSOL Multy-physics	2018	[113]
МКЭ	DMD	собственная разработка	2018	[118]
МКЭ	WAAM	LS-DYNA	2018	[119]
МКЭ	WAAM	ABAQUS	2021	[121]

В задачах аддитивной проволочной наплавки возникают дополнительные сложности, обусловленные значительной деформацией свободной поверхности расплава, а при наложении вибрационных воздействий – ее высокочастотными колебаниями. Это требует либо частой перестройки расчетной сетки, либо применения сложных алгоритмов отслеживания межфазного интерфейса, таких как метод отслеживания границы раздела фаз (Volume of Fluid), метод уровневой функции (Level-Set) или произвольно-эйлеров подход (Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE) [111, 113, 116]. Дополнительно, при значительных локальных деформациях существенно возрастает вычислительная нагрузка, а точность интерфейсных методов может снижаться, если не применять специальные алгоритмы локального сгущения сетки или адаптивной перестройки расчетной области.

Альтернативой традиционным сеточным методам являются бессеточные подходы, в которых отсутствует расчетная сетка, что позволяет эффективно моделировать процессы с деформациями границы раздела фаз и сложной динамикой течений. Среди таких методов можно выделить метод гидродинамики сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) [122], метод движущихся частиц (Moving Particle Semi-implicit, MPS) [123], метод частиц в ячейках (Particle-in-Cell, PIC) [124], метод оптимальной транспортировки без сетки (Optimal Transportation Meshfree, OTM) [125] и другие [126].

Концепция бессеточных методов основана на дискретизации расчетной области системой частиц, которые перемещаются в пространстве вместе с моделируемым потоком, что соответствует лагранжевой формулировке. В частности, в методе гидродинамики сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) каждая частица несет информацию о своих физических характеристиках, таких как скорость, температура, плотность и другие параметры. Непрерывные поля в данном подходе аппроксимируются с использованием сглаживающих ядер (kernel functions), что позволяет избежать необходимости явного построения и регулярной перестройки сетки, как в методах конечных элементов (МКЭ) и конечных объемов (МКО). Такой методологический подход значительно упрощает моделирование свободных поверхностей, деформаций и интенсивных динамических процессов.

Метод OTM (Optimal Transportation Meshfree) был применен в работе [127] для описания плавления частиц порошка в рамках континуальной теории для задач фазовых переходов при конечной деформации. В частности, была рассмотрена задача слияния двух порошковых частиц без учета конвективных эффектов, обусловленных градиентами поверхностного натяжения (конвекция Марангони), а также без влияния сил давления паров.

В работе [128] был разработан усовершенствованный метод Hot Optimal Transportation Meshfree (HOTM) для моделирования процесса лазерной сварки. Он сочетает в себе метод OTM и вариационные термомеханические конститутивные уравнения, что позволило повысить точность описания геометрии ванны расплава.

В последующем исследовании [129] метод HOTM был доработан для применения к моделированию процессов послойного сплавления порошка (PBF) на мезомасштабном уровне, что позволило детально отслеживать влияние параметров печати на формирование структуры наплавленного материала (рисунок 1.6).

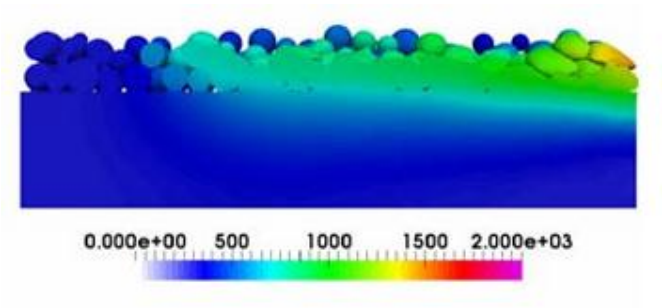


Рисунок 1.6 – Распределение температуры в поперечном сечении слоя порошка в конце процесса печати при мощности лазера 300 вт/ч и скорости сканирования 1м/с [129]

С точки зрения вибрационных воздействий и процессов с быстрыми изменениями формы расплава, метод SPH предоставляет эффективный механизм прямого учета вибрационных воздействий через граничные условия. Это дает возможность отслеживать изменения формы ванны расплава и другие эффекты, возникающие в процессе массопереноса.

На практике метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH) уже применялся в ряде исследований, посвященных моделированию процессов дуговой сварки и лазерной наплавки, хотя его распространенность уступает традиционным сеточным методам. В литературе отмечаются успешные примеры моделирования формирования ванны расплава [50], отрыва капель электродного металла [130], а также появления брызг при высоких энергетических режимах [131].

Метод SPH был применен в исследовании [132] для моделирования процесса селективного лазерного сплавления (SLM). Полученные численные результаты продемонстрировали хорошую согласованность с экспериментальными данными. Однако, авторами была отмечена необходимость разработки более эффективной схемы моделирования поверхностных сил для повышения точности описания динамики свободной поверхности расплава.

В работе [133] была представлена трехмерная модель SPH для детального моделирования процессов SLM и направленного осаждения материала (DMD) с

использованием порошковых материалов. В основе модели лежит программный код parallelSPHYSICS v2.0, адаптированный для задач аддитивного производства. Численные расчеты показали высокую точность предсказания размеров и формы ванны расплава, что подтверждается результатами, представленными на рисунке 1.7. Однако вычислительная сложность метода ограничивает его применение при моделировании крупномасштабных задач.

В исследовании [134] был разработан численный фреймворк на основе метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) с переменным разрешением для двумерного моделирования процессов селективного лазерного сплавления порошковых материалов (LPBF). Внедрение предложенного алгоритма измельчения частиц и метода быстрого поиска соседних частиц позволило существенно сократить время вычислений.

В последующем исследовании [135] данный подход был усовершенствован для моделирования многослойного процесса лазерного плавления порошка. Оптимизированная модель генерации порошкового слоя обеспечила дополнительное сокращение вычислительных затрат, что повысило эффективность расчетов. Разработанный фреймворк на основе SPH продемонстрировал высокую вычислительную эффективность при моделировании порошковых процессов, обеспечивая баланс между точностью и разумным временем расчетов.

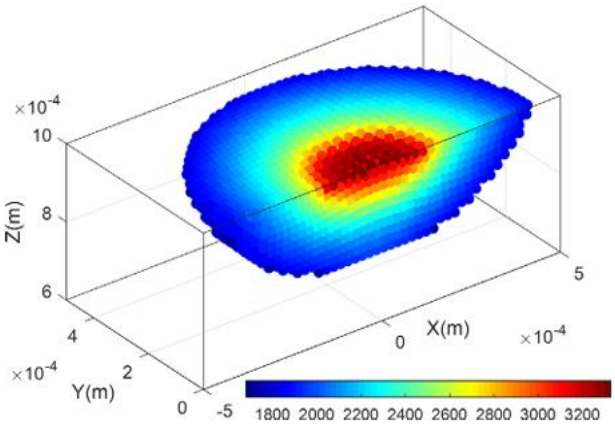


Рисунок 1.7 – Распределение температуры внутри ванны расплава [133]

Трехмерная математическая модель процесса селективного лазерного сплавления (SLM) на основе метода SPH, представленная в работе [136], позволила

предсказать оптимальные параметры лазерного воздействия, обеспечивающие формирование устойчивой ванны расплава с минимальным количеством дефектов.

В исследовании [137] на основе метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) была разработана математическая модель для численного моделирования физических процессов, протекающих в аддитивном производстве, с особым акцентом на термокапиллярные течения и обратимые фазовые переходы. Для повышения устойчивости вычислительной схемы авторы предложили модифицированную версию метода SPH, включающую регуляризацию сил взаимодействия между частицами.

Разработанная модель была применена для моделирования различных аддитивных технологий, включая послойное сплавление порошка (PBF), направленное осаждение материала (DED), струйную печать связующего (BJ) и струйное нанесение материала (MJ) (рисунок 1.8). Полученные результаты продемонстрировали высокую точность и устойчивость численного решения, что подтверждает эффективность предложенного подхода.

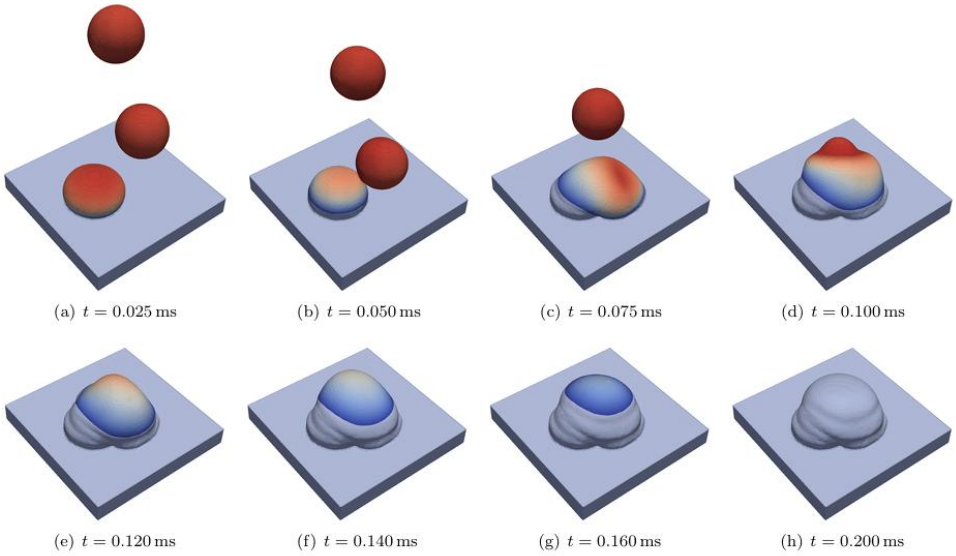


Рисунок 1.8 – Динамика переноса и последующего затвердевания трех капель расплава на подложке [137]

В исследовании [138] разработана численная модель для моделирования процесса селективного лазерного сплавления (SLM), основанная на комбинации метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) и клеточных автоматов. В рамках данной модели расчет температурного поля выполнялся с использованием метода

SPH, на основе которого метод клеточных автоматов описывал эволюцию микроструктуры наплавленного материала (рисунок 1.9).

В работе [139] представлен SPH-фреймворк для трехмерного моделирования динамики ванны расплава в процессе лазерного плавления порошкового материала (LPBF). Авторами предложен механизм динамического уточнения размера дискретизации, а также новый алгоритм сортировки, обеспечивающий более эффективный поиск соседних частиц в расчетных областях с различным разрешением. Внедрение указанных усовершенствований позволило существенно повысить вычислительную эффективность и выполнить трехмерное моделирование четырехтрекового наплавления слоя.

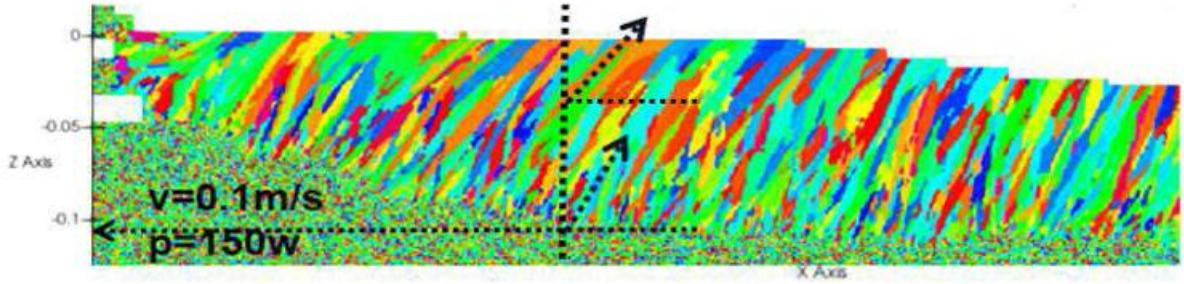


Рисунок 1.9 – Микроструктура наплавленного материала в поперечном сечении в процессе селективного лазерного сплавления [138]

Таблица.1.2. Научные публикации, посвященные моделированию процессов аддитивного производства с использованием бессеточных методов

Метод	Процесс	Размерность	Год	Ссылка
OTM	Лазерная сварка	3D	2019	[128]
OTM	LPBF	3D	2020	[129]
OTM	SLM	3D	2018	[126]
SPH	SLM	2D	2018	[132]
SPH	SLM, DMD	3D	2020	[133]
SPH	LPBF	2D	2021	[134]
SPH	LPBF	2D	2022	[135]
SPH	SLM	3D	2022	[136]
SPH	PBF, MJ, BJ, DED	3D	2022	[137]
SPH	LPBF	3D	2023	[138]
SPH	LPBF	3D	2023	[139]

Метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH) является наиболее востребованным среди бессеточных подходов к моделированию процессов аддитивного производства, поскольку обеспечивает высокую точность описания поведения порошковых частиц и формирования ванны расплава. Его основным

преимуществом является способность эффективно обрабатывать большие деформации и быстро изменяющуюся свободную поверхность, в том числе при наложении вибрационных воздействий. Несмотря на сравнительно недавнее внедрение данного подхода в инженерные задачи, SPH уже демонстрирует значительный потенциал для численного анализа проволочной наплавки в условиях вибрационных воздействий и потому рассматривается в настоящем исследовании в качестве одного из ключевых инструментов.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

В ходе обзора существующих аддитивных технологий показано, что проволочная наплавка отличается высокой производительностью и простотой аппаратного обеспечения, однако сопровождается формированием сравнительно больших сварочных ванн и может приводить к возникновению крупнозернистой структуры и пористости металла. Для улучшения свойств наплавленного слоя и более гибкого управления процессом все чаще рассматриваются возможности применения вибрационных воздействий. При этом, несмотря на обширную литературу о влиянии вибрации на структуру (дробление зерна, снятие напряжений), вопрос о влиянии колебаний на форму валика остается недостаточно изученным.

Сформулирована гипотеза о зависимости размеров и формы наплавленного слоя (ширины, высоты, глубины проплавления) от параметров вибрации (частоты, амплитуды, направления). Подтверждение этой гипотезы имеет практическое значение для повышения точности и эффективности проволочной аддитивной наплавки. Однако сложность и многофакторность процесса затрудняют проведение полномасштабных экспериментальных исследований во всех возможных режимах, делая их весьма затратными.

На основании анализа методов математического моделирования установлено, что при наличии больших градиентов деформации, динамического перемещения свободной поверхности и дополнительного внешнего воздействия (вибрации) более подходящим инструментом численного моделирования является метод

гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Данный метод обладает преимуществами в описании интенсивных течений расплава и подвижных границ, что создает предпосылки для более точного учета влияния вибрации на тепломассоперенос и формирование одиночного валика.

Таким образом, в дальнейших главах будут рассмотрены постановка задачи в рамках SPH, реализация модели с учетом вибрационных сил, а также разработка алгоритмов верификации и валидации. На основе результатов численных экспериментов будет оценено влияние параметров вибрационных воздействий на формирование геометрии наплавляемого валика и выявлены физические механизмы, определяющие характер его формирования.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА АДДИТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ МЕТОДОМ ГИДРОДИНАМИКИ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В главе приведены концептуальная и математическая постановки для описания поведения расплавленного металла в процессе проволочной наплавки в условиях вибрационных воздействий. Рассмотрены и описаны основные физические явления, влияющие на формирование одиночных валиков. Сформулирована система гипотез. Приведено описание метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH), его математическая формулировка, включая аппроксимацию уравнений разработанной математической модели, и численная схема.

2.1. Концептуальная постановка задачи

В процессе послойного формирования металлических изделий методом проволочной наплавки формируется последовательность одиночных валиков. Геометрия каждого валика определяется совокупностью нескольких ключевых групп факторов. Прежде всего, это теплофизические свойства материала (плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность, вязкость, коэффициент поверхностного натяжения и др.) [140], оказывающие значительное влияние на динамику течения расплава и формирование свободной поверхности. Наряду с этим важную роль играют параметры теплового источника (мощность, пространственное и временное распределение теплового потока), а также режим подачи проволоки (скорость, угол наклона) и скорость наплавки [116, 141, 142]. Указанные технологические параметры определяют интенсивность плавления материала и темп роста расплавленной зоны (рисунок 2.1).

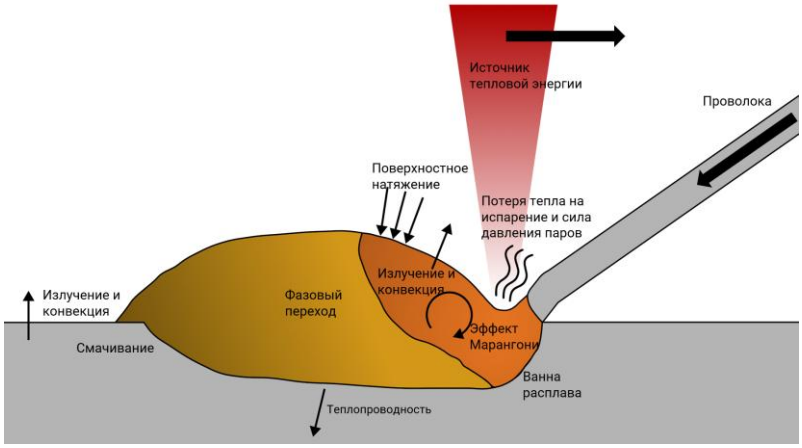


Рисунок 2.1 – Схематическое представление основных физических явлений, сопровождающих процесс проволочной наплавки.

Важным дополнением к перечисленным факторам являются физические процессы, протекающие при высоких температурах: испарение металла и связанное с ним парциальное давление паров над поверхностью расплава, а также потери тепла на испарение и радиационный и конвективный теплообмен с окружающей средой [140, 143]. Значительное влияние на формирование геометрии валика оказывает поверхностное натяжение, особенно при учете термокапиллярного эффекта – зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры [144, 145].

Процесс можно описать как двухфазную систему, в которой твердая фаза (подложка и еще не оплавившаяся часть проволоки) сосуществует с жидкой фазой (ванна расплава). Граница между фазами определяется температурой ликвидус с учетом скрытой теплоты плавления [146]. Предполагается, что твердая фаза не подвержена деформациям и рассматривается как неподвижная, за исключением колебательных перемещений, вызванных вибрационными воздействиями. Жидкая фаза моделируется как вязко-текучий несжимаемый материал.

Для решения поставленной задачи была принята следующая система допущений:

1. мощность теплового источника и его форма, а также скорости подачи проволоки и наплавки считаются постоянными;

2. температура окружающей среды поддерживается неизменной;

3. материал подложки и проволоки идентичен по химическому составу;

4. расплавленный металл описывается как несжимаемая ньютоновская жидкость;

5. переход материала из твердого в жидкое состояние определяется температурой ликвидус с учетом скрытой теплоты плавления;

6. вибрационные воздействия вводятся через граничные условия и распространяются по твердой фазе мгновенно;

7 акустические эффекты не учитываются, так как длина звуковых волн в исследуемом диапазоне частот значительно превышает размеры области расплавленного металла.

В рамках данного исследования предполагается, что вибрационные воздействия представляют собой внешние колебания, накладываемые на систему через граничные условия. Они моделируются путем колебательного движения подложки или проволоки, что приводит к передаче вибрации расплавленному металлу.

Таким образом, концептуальная постановка задачи сводится к построению модели, учитывающей:

1. тепловложение от концентрированного источника и плавление присадочной проволоки;

2. движение расплавленного металла в зоне наплавки, определяемое вязкостью, поверхностным натяжением и другими объемными силами;

3. теплообмен с окружающей средой (конвективный и радиационный) и испарение металла при высоких температурах;

4. граничные условия, описывающие взаимодействие твердого металла, ванны расплава и окружающей среды, включая внешние вибрационные воздействия;

5. фазовые переходы на границе между твердой и жидкой фазами с учетом скрытой теплоты плавления.

2.2. Математическая постановка задачи

Для количественного описания процессов плавления присадочной проволоки, формирования ванны расплава и последующего затвердевания металла под воздействием концентрированного теплового потока разработана математическая модель, основанная на разделении расчетной области Ω на две фазы: жидкую (Ω_l), представляющую собой расплавленный металл в зоне наплавки, и твердую (Ω_s), включающую подложку, наплавленную часть валика и нерасплавленную часть проволоки (рисунок 2.2). Для жидкой фазы решается система уравнений гидродинамики и теплопереноса, тогда как для твердой фазы рассчитывается только температурное поле. Ниже приводится постановка задачи, включающая основные уравнения и соответствующие граничные условия.

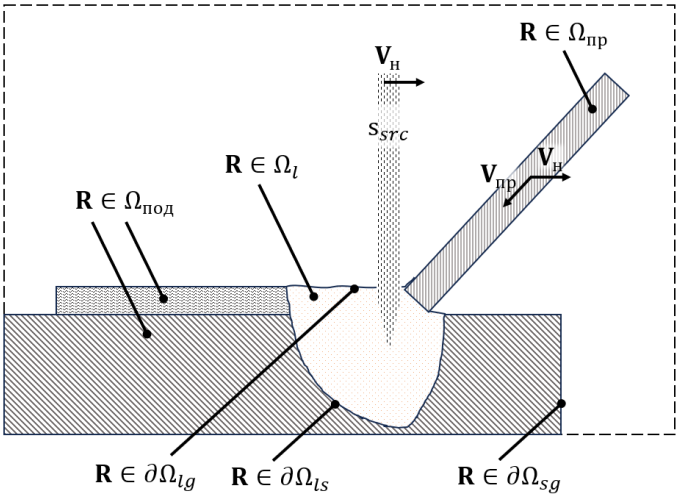


Рисунок 2.2 – Принципиальная схема процесса наплавки проволоки концентрированными источниками энергии с боковой подачей проволоки

Предполагается, что расплав является несжимаемой ньютоновской жидкостью:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \tag{2.1}$$

где $\mathbf{u}$ – вектор скорости потока в зоне Ω_l.

Динамика расплава описывается как течение вязкой несжимаемой жидкости с учетом внешних сил:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}_{\text{ext}}, \tag{2.2}$$

где ρ – плотность расплава, p – давление, μ – динамическая вязкость, $\mathbf{F}_{\text{ext}}$ – суммарная дополнительная сила, включающая: $\rho\mathbf{g}$ – силу тяжести, $\mathbf{F}_\sigma$ – силу

поверхностного натяжения (в том числе термокапиллярную), $\mathbf{F}_{\mathrm{v}}$ – давление паров над поверхностью расплава, $\mathbf{F}_{\mathrm{pl}}$ (опционально) – силы, связанные с давлением плазменной дуги или электронного пучка и др.

В классических подходах поверхностное натяжение $\mathbf{F}_{\sigma}$ вблизи свободной границы моделируется либо с помощью граничных условий на поверхности, либо (в случае использования континуальной модели [147]) путем представления его как объемной силы в тонкой окрестности свободной границы (CSF-подход). Термокапиллярный эффект учитывается через температурную зависимость коэффициента поверхностного натяжения σ(T).

$$\mathbf{F}_{\sigma} = \quad \sigma\kappa\mathbf{n} + \frac{\partial\sigma}{\partial T}\nabla_s T + p_s\mathbf{n} \quad \delta_s, \tag{2.3}$$

$$\mathbf{F}_{st} = \sigma\kappa\mathbf{n} = -\sigma\nabla^2 c\frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}, \tag{2.4}$$

$$\mathbf{F}_{mg} = \frac{\partial\sigma}{\partial T}\nabla_s T = \frac{\partial\sigma}{\partial T}(\nabla T - (\nabla T\cdot\mathbf{n})\mathbf{n}), \tag{2.5}$$

где κ – кривизна свободной поверхности, $\mathbf{n}$ – вектор нормали, δ_s – нормализирующая функция с пиком на границе раздела.

Баланс энергии в жидкой фазе описывается уравнением нестационарной теплопроводности с учетом конвекции, источников и стоков тепла:

$$\rho c_{p,\mathrm{eff}} \quad \frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u}\cdot\nabla)T \quad = k\nabla^2 T + (Q_{\mathrm{src}} - Q_{\upsilon} - Q_{\mathrm{rad}} - Q_{\mathrm{conv}})\delta_s, \tag{2.6}$$

где T – температура, $c_{p,\mathrm{eff}}$ – эффективная удельная теплоемкость, k – коэффициент теплопроводности. Слагаемое Q_{src} отвечает за внешнее тепловложение (например, энергия луча или дуги), Q_{υ} – теплопотери на испарение (давление паров, отток массы и энергии), Q_{rad} и Q_{conv} – радиационный и конвективный теплообмен с окружающей средой (по законам Стефана–Больцмана и Ньютона–Рихмана соответственно).

Переход от твердой фазы Ω_{s} к жидкой Ω_{l} моделируется с учетом скрытой теплоты плавления в уравнении энергии. Скрытая теплота плавления в свою очередь учитывается с помощью введения эффективной теплоемкости $c_{p,\mathrm{eff}}$ [146, 148, 149]:

$$c_{p,\mathrm{eff}} = c_p + \frac{\exp\ -\ \frac{T - T_{SL}}{T_L - T_S}^{\ 2}}{\bar{\pi}(T_L - T_S)} \Delta \mathrm{H}, \tag{2.7}$$

где ΔH – скрытая теплота плавления, c_p – удельная теплоемкость, $T_{SL} = (T_S + T_L)/2$ – средняя температура плавления, T_S – температура солидус, T_L – температура ликвидус.

В условиях высоких температур, когда температура расплава близка к температуре кипения T_v, из металла испаряется часть вещества, что создает дополнительное давление паров над поверхностью и уносит часть тепла в виде теплоты испарения. Этот процесс можно описать с помощью эмпирической формулы [143]:

$$p_r = A_p P_0 \exp\ \triangle H_{evp} \frac{T - T_v}{RTT_v}\ , \tag{2.8}$$

где p_r – давление паров над поверхностью, A_p – коэффициент, зависящий от окружающего давления (значение варьируется от 0,55 для испарения в вакууме до единицы для случая испарения при высоком давлении окружающей среды [143]), P_0 – атмосферное давление, $\triangle H_{evp}$ – скрытая теплота плавления, R – универсальная газовая постоянная, а вклад в теплоемкость и теплоотдачу учитывается через член Q_v, который представляет собой теплоту испарения:

$$Q_v = A_q \frac{\triangle H_{evp}}{\overline{2\pi MRT}} P_0 \exp\ \triangle H_{evp} \frac{T - T_v}{RTT_v}\ , \tag{2.9}$$

$$Q_{\mathrm{rad}} = \sigma_B \varepsilon \left(T^4\ -\ {T_0}^4\right), \tag{2.10}$$

$$Q_{\mathrm{conv}} = q_h (T - T_0), \tag{2.11}$$

где A_q – коэффициент испарения, M – молярная масса, σ_B – постоянная Стефана-Больцмана, ε – излучающая способность, q_h – коэффициент конвективного теплообмена, T_0 – температура окружающей среды.

Граничные и начальные условия, определяющие процесс аддитивного формирования металлических изделий, включают несколько ключевых аспектов, которые важны для точного моделирования динамики расплава и его

взаимодействия с окружающей средой. На границе между жидким металлом и окружающим воздухом или защитным газом необходимо учитывать условие непрерывности нормальных и касательных напряжений. Это условие может быть реализовано в численных методах через контактную силу $\mathbf{F}_\sigma$, которая включает термокапиллярный вклад, а также через давление паров $\mathbf{F}_v$, приложенное по нормали к свободной поверхности, когда температура металла близка к точке кипения. Помимо этого, следует учесть потоки тепла, такие как радиационный поток Q_{rad} и конвективный поток Q_{conv}, которые зависят от локальной температуры поверхности.

Граница между жидким расплавом и твердой подложкой также определяется специальными граничными условиями. В рамках принятой гипотезы подложка либо неподвижна, либо перемещается как твердое тело с заданной скоростью. В точках контакта жидкой и твердой фаз скорость установлена как нулевая (при прилипании). Тепловой поток через подложку зависит от физических характеристик материала и его способности к теплопроводности, что определяет отвод тепла вглубь заготовки.

Вибрационные воздействия задаются через граничные условия, которые могут быть реализованы как периодическое смещение подложки в заданном направлении (например, $\mathbf{r}_{\mathrm{sub}}(t) = \mathbf{r}_0 + A\sin(\omega t)\,\mathbf{e}_{\mathrm{n}}$) или как колебания присадочной проволоки. Эти колебания приводят к дополнительному импульсу, передаваемому расплаву в зоне Ω_l, что оказывает влияние на его движение и формирование валика.

На начальный момент времени t=0 в области твердой фазы Ω_s задается равномерная температура T_0, которая может быть комнатной или выше, если подложка предварительно подогревается. Скорости подачи проволоки и движения источника тепла считаются постоянными и не изменяются в процессе наплавки.

Важным моментом при моделировании взаимодействия концентрированного теплового пучка с поверхностью металла является введение распределения тепла в приповерхностной зоне. Одной из часто используемых моделей для этого является гауссова модель, заданная следующим образом:

$$\mathrm{Q}_{src}(r,t) = \eta_0 \frac{3Q_0}{\pi r_{src}^2} \exp\ -\frac{3}{r_{src}^2}\left(x - x_{src}(t)\right)^2 - \frac{3}{r_{src}^2}\left(y - y_{src}(t)\right)^2 \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_{\mathrm{src}}\ , \qquad (2.12)$$

где Q_0 – максимальная мощность источника, η_0– КПД передачи тепла металлу, $\mathbf{r}_{src}$ – характерный радиус теплового пятна, $\left(x_{src}(t); y_{src}(t)\right)$ – координаты оси теплового пучка в зависимости от времени.

Таким образом, математическая постановка задачи сводится к решению системы уравнений гидродинамики и теплопереноса в жидкой фазе Ω_l, уравнения теплопроводности в твердой фазе Ω_s, а также соответствующих граничных условий на свободной поверхности, подложке и в зоне подачи проволоки. Ключевыми особенностями модели являются учет термокапиллярных эффектов, испарение металла и связанные с ним потери тепла, давление паров, влияние внешнего теплового источника с заданным пространственно-временным распределением, вибрационные колебания, определяемые как граничные условия на подложке или проволоке, и фазовый переход между твердым и жидким состоянием металла, с учетом скрытой теплоты плавления.

2.3. Метод гидродинамики сглаженных частиц

Метод гидродинамики сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) относится к классу лагранжевых численных методов, основанных на дискретном представлении моделируемой среды в виде совокупности подвижных частиц, каждая из которых является носителем массы, импульса, энергии и иных физических величин.

Данный метод был независимо предложен двумя научными коллективами для решения задач астрофизического моделирования, включая процессы звездообразования и эволюции галактик [150, 151]. Принципиальным отличием данного подхода от традиционных сеточных методов является отказ от расчетной сетки в пользу свободного перемещения вычислительных частиц вслед за движением моделируемой среды. Это позволяет эффективно описывать системы с интенсивными нелинейными деформациями и изменяющейся топологией без необходимости периодической перестройки сетки.

В дальнейшем метод начали активно использовать для решения задач гидродинамики. Основные направления исследований того периода были связаны с использованием SPH для моделирования течений жидкости со свободной поверхностью [152], совершенствованием алгоритмов учета граничных условий, а также с первыми работами, посвященными применению данного метода к задачам механики разрушения [153]. Проведенные исследования сформировали фундамент для дальнейшего применения метода SPH в решении широкого круга научно-технических задач, таких как моделирование движения волн (рисунок 2.3), высокоскоростных ударных взаимодействий и поведения материалов при разрушении.

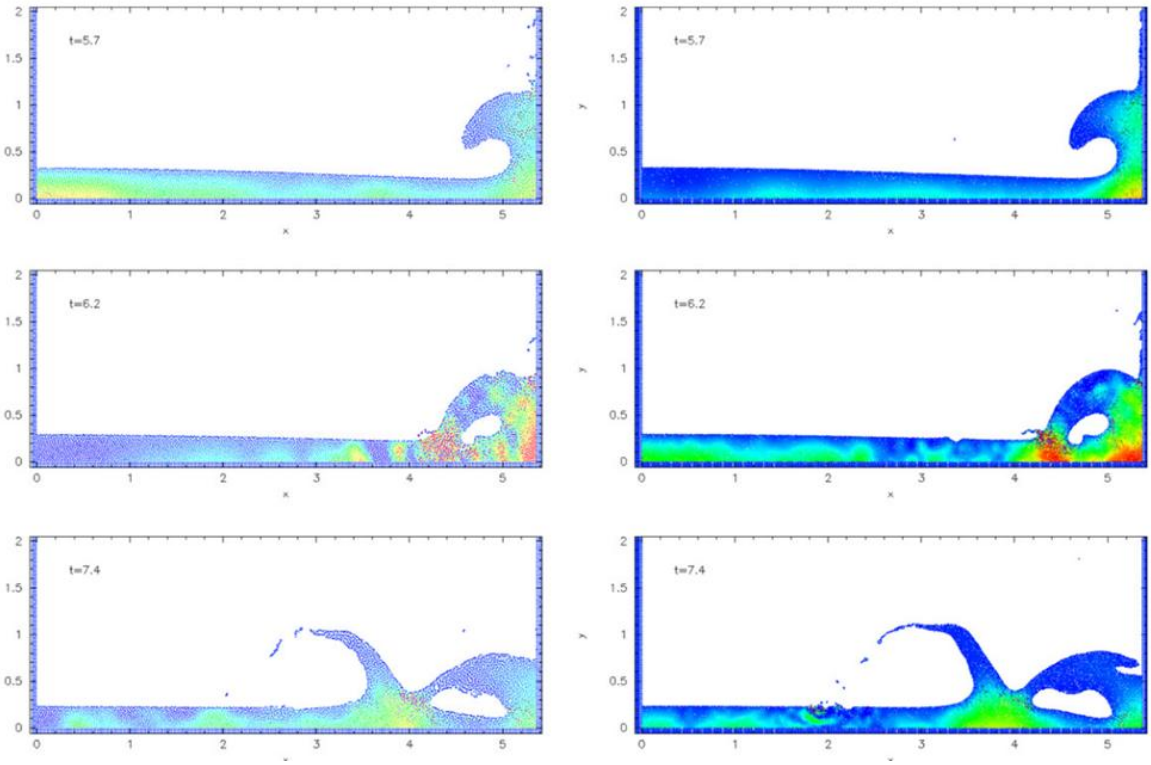


Рисунок 2.3 – Моделирование волн методом SPH [154]

В последние десятилетия метод гидродинамики сглаженных частиц продолжает активно развиваться, что способствует расширению области его применения и повышению точности численного моделирования. Были разработаны различные модификации метода, включая WC-SPH (Weakly Compressible SPH – слабосжимаемый SPH) и ISPH (Incompressible SPH – несжимаемый SPH), направленные на улучшение точности моделирования течения

жидкостей [155, 156]. Значительное внимание уделено усовершенствованию моделирования граничных условий, включая методы фиктивных частиц, призрачных частиц и полуаналитические подходы [154]. Разработаны алгоритмы адаптивного изменения размера частиц (Adaptive Particle Refinement, APR), позволяющие динамически изменять разрешение моделирования в зависимости от локальных особенностей потока [157].

В настоящее время метод гидродинамики сглаженных частиц применяется не только в академических исследованиях, но и в различных отраслях промышленности. С его помощью моделируются процессы удара жидкости о твердые поверхности (рисунок 2.4), гидроудары и кавитационные явления, имеющие важное значение для машиностроения, судостроения и проектирования гидротехнических сооружений (рисунок 2.5). Кроме того, метод используется для моделирования течений с учетом поверхностного натяжения и других сложных физических эффектов.

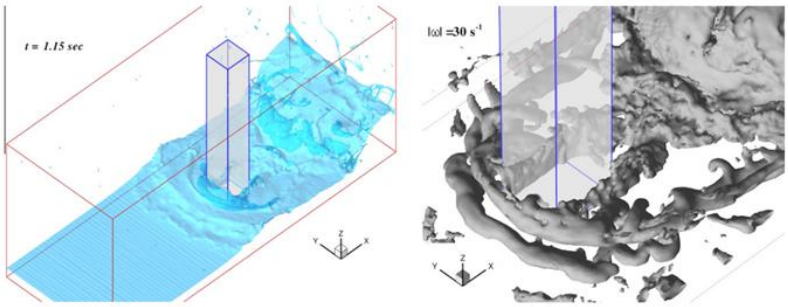


Рисунок 2.4 – Моделирование взаимодействия жидкости с твердыми телами

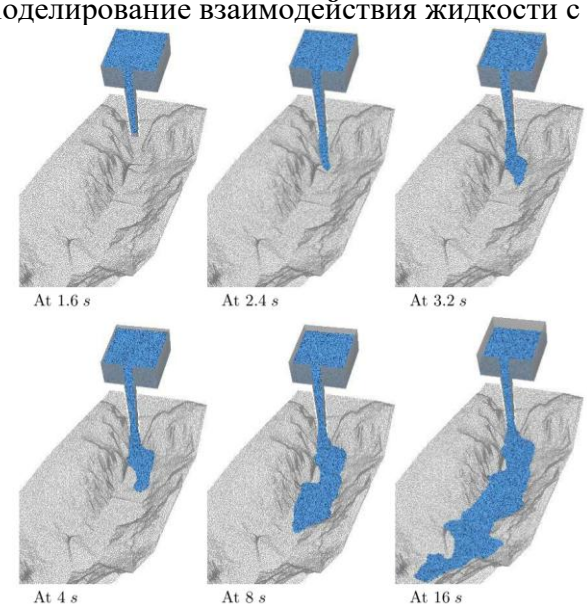


Рисунок 2.5 – Моделирование гидроударов [158]

Несмотря на широкое применение метода SPH, он по-прежнему остается активно развивающимся направлением численного моделирования, сталкивающимся с рядом нерешенных проблем [159]. Одной из ключевых трудностей метода является задание граничных условий. На сегодняшний день не существует универсального подхода или единого стандарта их реализации. Разработаны различные методики для задания границ и их взаимодействия с жидкой средой, включая модель призрачных (зеркальных) частиц, модель граничных связей и модель сил граничных частиц [160]. Каждая из этих моделей демонстрирует определенные преимущества в зависимости от специфики задачи, однако остаются нерешенные вопросы, касающиеся корректной обработки рециркуляции, определения начального распределения частиц (для предотвращения скачков после начала интегрирования), а также задания сложной геометрии области моделирования [159].

Еще одной значимой проблемой метода гидродинамики сглаженных частиц является его интеграция с традиционными сеточными методами. Сложности в реализации граничных условий делают логичной идею о комбинировании SPH с методами Эйлерова типа, в которых граничные условия описаны более стабильно и точно при отсутствии значительных деформаций. Такой гибридный подход был протестирован в задачах гидроупругости, где метод гидродинамики сглаженных частиц совмещался с методом конечных элементов [161, 162]. Результаты численных экспериментов показали, что интеграция методов позволила не только повысить точность моделирования, но и улучшить вычислительную эффективность по сравнению с использованием только SPH.

Тем не менее реализация таких гибридных моделей сопряжена с серьезными трудностями. Основная сложность заключается в сопряжении методов с различной математической природой – лагранжевой (SPH) и эйлеровой (сеточные методы). Эти различия приводят к необходимости сложных алгоритмов обмена данными между методами. Дополнительной проблемой является интеграция различных

программных решателей, что усложняется отличиями в подходах к написанию кода, его оптимизации и поддержке вычислительных ускорителей [159].

Таким образом, несмотря на значительные успехи в развитии метода гидродинамики сглаженных частиц и его широкое применение в численном моделировании сложных физических процессов, реализация математической модели с его использованием представляет собой сложную задачу. Постоянное совершенствование подходов к заданию граничных условий, улучшение алгоритмов сопряжения с другими численными подходами и оптимизация программных реализаций остаются актуальными направлениями исследований, направленных на повышение точности и эффективности моделирования.

2.3.1. Аппроксимация уравнений математической постановки методом гидродинамики сглаженных частиц

Суть метода гидродинамики сглаженных частиц заключается в аппроксимации полевых переменных $\{\rho,\ \mathbf{u},\ T\}$. Переход от континуального представления среды к дискретному предполагает замену непрерывной функции $f(\mathbf{r})$, описывающей полевую переменную, ее дискретным аналогом f_i. Значение f_i для каждой частицы i определяется как взвешенная сумма значений f_j от соседних частиц j, находящихся в пределах сглаживающего радиуса h, с использованием функции сглаживания W:

$$f_i = \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} f_j\, W\left(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h\right) = \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} f_j\, W_{ij}^{h}, \tag{2.13}$$

где m_i – масса частицы, ρ_i – плотность частицы, W – функция сглаживания (ядро), зависящая от расстояния между частицами и радиуса сглаживания h. Здесь и в дальнейшем используются эквивалентные обозначения $W\left(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h\right) \equiv W\left(\mathbf{r}_{ij}, h\right) \equiv W_{ij}^{h}$. Формально суммирование выполняется только по частицам, находящимся внутри области влияния с радиусом сглаживания h, то есть для которых $\left\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\right\| < h$, где h параметр дискретизации метода SPH (радиус сглаживания).

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. Дифференцирования выполняется исключительно по сглаживающей функции W_{ij}^h, что упрощает численную реализацию метода. Градиент полевой величины f для частицы i вычисляется следующим образом:

$$\nabla f_i = \nabla \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} f_j W_{ij}^h = \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} f_j \nabla_j W_{ij}^h, \tag{2.14}$$

где m_j – масса частицы j, ρ_j – плотность частицы, W_{ij}^h – сглаживающая функция (ядро), а $\nabla_j W_{ij}^h$ – градиент ядра по координатам частицы j.

Сглаживающая функция W в методе SPH представляет собой аппроксимацию δ-функции Дирака. Рассмотрим ключевые свойства функции W, которые обеспечивают корректную работу метода. Одним из основных требований к сглаживающему ядру является условие компактности:

$$W(\mathbf{r}, h) d\mathbf{r} = 1. \tag{2.15}$$

Это условие гарантирует, что ядро распределяет массу (или другую физическую величину) без искажения. При стремлении сглаживающего радиуса к нулю функция W асимптотически приближается к δ-функции Дирака:

$$\lim_{h \to 0} W(\mathbf{r}, h) = \delta(\mathbf{r}). \tag{2.16}$$

Функция W обладает радиальной симметрией, что упрощает вычисление ее градиента. Градиент сглаживающего ядра по координатам частицы j записывается следующим образом:

$$\nabla_j W_{ij}^h = \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{||\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j||} = \frac{\partial W}{\partial r} \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}}, \tag{2.17}$$

где $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$, а $r_{ij} = \|\mathbf{r}_{ij}\|$ – расстояние между частицами.

Из свойства (2.17) следует антисимметрия градиента сглаживающей функции $\nabla_j W_{ij} = -\nabla_j W_{ij}$. Это свойство критически важно для сохранения законов сохранения импульса и энергии в методе SPH.

Выражение для плотности в методе SPH вычисляется посредством взвешенного суммирования масс частиц с использованием сглаживающей функции:

$$\rho_i = \sum_{j=1}^{N} m_j W_{ij}^h . \tag{2.18}$$

Это выражение интерпретируется как усредненная масса в окрестности частицы i с радиусом сглаживания h, то есть для частиц, удовлетворяющих условию $||\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|| < h$. Важно отметить, что для плотности используется простое осреднение, тогда как для остальных полевых величин осреднение выполняется с учетом взвешивания, зависящего от значений этих величин у соседних частиц.

Применяя дискретизацию метода гидродинамики сглаженных частиц к системе уравнений (2.12), получаем следующие выражения для i-ой частицы:

$$\begin{aligned}
&\frac{d\rho_i}{dt} = -\sum_{j=1}^{N} m_j \mathbf{u}_{ij} \cdot \nabla_j W_{ij}^h, && \mathbf{R} \in \Omega, \\
&\frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = \frac{1}{m_i}\left[\mathbf{F}_{\mathrm{p},i} + \mathbf{F}_{v,i} + \mathbf{F}_{\mathrm{s},i} + \mathbf{F}_{\mathrm{evp},i}\right] + \mathbf{g}, && \mathbf{R} \in \Omega_{\mathrm{l}}, \\
&\frac{dT_i}{dt} = -\frac{1}{c_i \rho_i}\left[-(\nabla \cdot \boldsymbol{q})_i + Q_{\mathrm{src},i} - Q_{\mathrm{evp},i} - Q_{\mathrm{conv},i} - Q_{\mathrm{rad},i}\right], && \mathbf{R} \in \Omega,
\end{aligned} \tag{2.19}$$

где $\mathbf{F}_{p,i}$ – сила давления, $\mathbf{F}_{v,i}$ – вязкая сила, $\mathbf{F}_{s,i}$ – сила поверхностного натяжения, $\mathbf{F}_{evp,i}$ – сила давления паров. Действие на частицу i является результатом суммирования всех вкладов межчастичного взаимодействия с соседними частицами j. Силы давления и вязкости дискретизируются по формулировке, предложенной Адами и соавторами [154, 163]:

$$\mathbf{F}_{p,i} + \mathbf{F}_{v,i} = \sum_j \left(V_i^2 + V_j^2\right) \; -\frac{\rho_j p_i + \rho_i p_j}{\rho_i + \rho_j} \nabla_j W_{ij}^h \cdot \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}} + \frac{2\eta_i \eta_j}{\eta_i + \eta_j} \mathbf{u}_{ij} \cdot \nabla_j W_{ij}^h \quad , \tag{2.20}$$

где η_i – кинематическая вязкость частицы i.

Для дискретизации поверхностных сил в SPH вводится функция уровня c, которая торжественно равна единице для каждой частицы. Градиент этой функции позволяет определить нормаль к поверхности:

$$\nabla c_i = \frac{1}{V_i}\sum_j \left(V_i^2 + V_j^2\right)\frac{\rho_i}{\rho_i + \rho_j} c_j \nabla_j W_{ij}^h \cdot \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}}, \quad \mathbf{n}_i = \frac{\nabla c_i}{\| \nabla c_i \|}. \tag{2.21}$$

Силу поверхностного натяжения можно представить как сумму двух слагаемых $\mathbf{F}_{\mathrm{s},i} = \mathbf{F}_{\mathrm{n},i} + \mathbf{F}_{\tau,i}$. Первое слагаемое представляет собой пропорциональные кривизне нормальные силы поверхностного натяжения, а второе представляет собой тангенциальные силы Марангони, обусловленные градиентам поверхностного натяжения. Первое слагаемое имеет вид:

$$\mathbf{F}_{\mathrm{n},i} = \alpha V_i \sum_j V_j \quad \frac{|\nabla c_i|^2 + \left|\nabla c_j\right|^2}{2} \quad \nabla_i W_{ij}^h, \tag{2.22}$$

Второе слагаемое принимает вид:

$$\mathbf{F}_{\tau,i} = \alpha' V_i (\mathbf{I} - \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i) \sum_j V_j \left(T_j - T_i\right) \nabla_i W_{ij}^h, \tag{2.23}$$

где α' – производная коэффициента поверхностного натяжения по температуре, $\mathbf{I}$ – единичный тензор.

В случае явной зависимости $\alpha = \alpha(T)$, слагаемое, описывающее силу поверхностного натяжения, упрощается:

$$\mathbf{F}_{\mathrm{s},i} = \alpha(T) V_i \sum_j V_j \quad \frac{|\nabla c_i|^2 + \left|\nabla c_j\right|^2}{2} \quad \nabla_i W_{ij}^h. \tag{2.24}$$

Сила давления паров на свободной поверхности выражается следующим образом:

$$\mathbf{F}_{v,i} = -V_i p_{v,i} \mathbf{n}_i. \tag{2.25}$$

Дивергенция теплового потока дискретизируется как [164]:

$$(\nabla \cdot \mathbf{q})_i = \sum_j \frac{4m_j}{\rho_j} \frac{k_i k_j}{\left(k_i + k_j\right)} \left(T_j - T_i\right) \nabla_j W_{ij}^h, \tag{2.26}$$

где k_i и k_j – теплопроводности частиц.

Конвективный теплообмен и радиационный теплообмен описываются следующим образом:

$$Q_{\mathrm{conv},i} = q_h (T_i - T_0) s_i \mathbf{n}_i, \quad Q_{\mathrm{rad},i} = \sigma_B \varepsilon \left(T_i^4 - T_0^4\right) s_i \mathbf{n}_i, \tag{2.27}$$

где s_i – площадь, ассоциированная с частицей i, σ_B – постоянная Стефана-Больцмана.

Источник тепла моделируется гауссовым распределением:

$$Q_{\mathrm{src},i} = \eta_0 \quad \frac{3Q_0}{\pi r^2{}_{src}} \quad \exp \quad \frac{-3}{r^2{}_{src}} \left[\left(x_i - x_{src}(t) \right)^2 + \left(y_i - y_{src}(t) \right)^2 \right] \quad s_i \, \langle \mathbf{n}_{\boldsymbol{i}} \cdot \mathbf{e}_{src} \rangle. \quad (2.28)$$

При интегрировании получаемых дифференциальных уравнений для вязких течений временной шаг ограничен вязкой составляющей, в отличие от известного условия Куранта, как, например, в сеточных методах. Для стабильного численного моделирования шаг по времени должен удовлетворять следующим условиям [Tong2014]:

1. условие Куранта $\Delta t \leq \frac{0{,}25h}{\|\mathbf{u}\|_{\max}}$,
2. условие для диффузии $\Delta t \leq \frac{h^2}{\mu/\rho_{\max}}$,
3. условие для поверхностного натяжения $\Delta t \leq 0{,}25 \sqrt{\frac{\rho_{\min} h^3}{2\pi\alpha}}$,
4. Условие для термокапиллярной диффузии: $\Delta t \leq 0{,}125 \frac{\rho \|\mathbf{u}\|_{\mathrm{s}} h^2}{\lambda}$.

Для численного решения системы уравнений (2.19) применение классических явных схем интегрирования, таких как схема Верле, в методе гидродинамики сглаженных частиц (SPH) сталкивается с определенными сложностями. Основная проблема заключается в том, что силы, действующие на частицы, зависят от скоростей, которые определяются на полушаге по времени. Это приводит к несогласованности между вычисленными силами и положениями частиц, снижая точность интегрирования.

Для устранения данной проблемы используется подход с экстраполяцией скоростей на полный временной шаг. Экстраполированные скорости позволяют более точно оценить силы и ускорения, действующие на частицы, что, в свою очередь, улучшает устойчивость и точность численного метода. Экстраполяция скоростей выполняется по следующему выражению:

$$\mathbf{u}_i(t + \Delta t) = \mathbf{u}_i(t) + \Delta t \frac{d\mathbf{u}_i}{dt}, \quad (2.29)$$

где $\widetilde{\mathbf{u}}_i(t+\Delta t)$ – экстраполированная скорость частицы i на момент времени $t+\Delta t$, $\mathbf{u}_i(t)$ – скорость частицы на текущем шаге, а $\frac{d\mathbf{u}_i}{dt}$ – ускорение, рассчитанное на текущем временном шаге.

Использование экстраполированных скоростей позволяет согласовать расчет сил и обновление положений частиц, что повышает стабильность интегрирования и уменьшает численные ошибки.

Полная схема Верше включает следующие шаги:

1. Предсказание скоростей, плотностей и температур:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i \quad t+\frac{1}{2}\Delta t \quad &= \mathbf{u}_i(t)+\frac{\Delta t}{2}\frac{d\mathbf{u}_i(t)}{dt}, \\ \rho_i \quad t+\frac{1}{2}\Delta t \quad &= \rho_i(t)+\frac{\Delta t}{2}\frac{d\rho_i(t)}{dt}, \\ T_i \quad t+\frac{1}{2}\Delta t \quad &= T_i(t)+\frac{\Delta t}{2}\frac{dT_i(t)}{dt}. \end{aligned} \tag{2.30}$$

2. Обновление координат:

$$\mathbf{r}_i(t+\Delta t)=\mathbf{r}_i(t)+\Delta t\mathbf{u}_i \quad t+\frac{1}{2}\Delta t \quad . \tag{2.31}$$

3. Коррекция скоростей, плотностей и температур:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i(t+\Delta t)=\mathbf{u}_i \quad t+\frac{1}{2}\Delta t \quad &+\frac{\Delta t}{2}\frac{d\mathbf{u}_i}{dt}\Big|_{t+\Delta t}, \\ \rho_i(t+\Delta t)=\rho_i \quad t+\frac{1}{2}\Delta t \quad &+\frac{\Delta t}{2}\frac{d\rho_i}{dt}\Big|_{t+\Delta t}, \\ T_i(t+\Delta t)=T_i \quad t+\frac{1}{2}\Delta t \quad &+\frac{\Delta t}{2}\frac{dT_i}{dt}\Big|_{t+\Delta t}. \end{aligned} \tag{2.32}$$

Разделение эволюции по времени для плотности ρ и температуры T на два отдельных этапа аналогично интегрированию скорости $\mathbf{u}$ обеспечивает значительные преимущества по сравнению с использованием простой явной схемы Эйлера. Такой подход позволяет снизить численные ошибки и повысить устойчивость интегрирования. В отличие от схемы Эйлера, которая, как известно, может приводить к нарушению балансовых уравнений, применение многошаговой схемы с промежуточными оценками (например, полушагами) способствует более точному соблюдению законов сохранения массы и энергии. Это особенно критично в методе гидродинамики сглаженных частиц (SPH), где локальные

несогласованности могут существенно искажать глобальную динамику моделируемой системы.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

В рамках концептуальной постановки задачи описаны основные физические явления, влияющие на процесс формирования ванны расплава при проволочной наплавке, и сформулированы гипотезы, определяющие применимость разрабатываемой математической модели.

Разработана математическая модель процесса проволочной наплавки, основанная на описании течения расплавленного металла как вязко-текучей несжимаемой жидкости и учитывающая ключевые факторы: мощность теплового источника, поверхностное натяжение, испарение металла, а также конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой, а также вибрационное воздействие.

Описана математическая формулировка метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Проведена аппроксимация математической модели с применением метода и сформулирована численная схема расчета.

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ, ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ПРОВОЛОЧНОЙ НАПЛАВКЕ С ВИБРАЦИОННЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

В настоящей главе рассматривается практическая реализация разработанной во второй главе математической модели процесса аддитивного формирования металлических изделий с учетом поверхностного натяжения, фазовых переходов и вибрационных воздействий в рамках метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Изложение охватывает несколько этапов: (1) описание структуры программного комплекса и ключевых элементов численной схемы; (2) верификация вычислительных алгоритмов на ряде модельных задач; (3) валидация модели, то есть сравнение с реальными экспериментальными данными по проволочной наплавке; (4) верификация возможности модели корректно описывать влияние вибрационных воздействий, проверка гипотезы о возможности замены действия вибраций снижением коэффициента поверхностного натяжения и анализ влияния вибраций на динамику расплава в более сложных задачах.

3.1 Описание разработанного программного комплекса

В данном подразделе описывается реализация математической модели тепломассопереноса при проволочной наплавке с учетом поверхностного натяжения, сил давления паров, термокапиллярных (марангони) сил и вибрационных воздействий в среде открытого пакета LAMMPS. Выбор LAMMPS в качестве основы для реализации собственного программного комплекса обусловлен его развитой инфраструктурой, включающей средства параллельного поиска соседей, интегрирования по времени (с учетом метода Верле или Ланжевена, а также более специализированных схем), встроенные функции обмена данными по технологии MPI и уже имеющиеся базовые модули для реализации метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH). В ходе работы был создан программный модуль, расширяющий функционал базового SPH в LAMMPS и включающий новые процедуры для корректного учета граничных условий по тепловому потоку, поверхностного натяжения и вибрационных воздействий.

Для наглядности и удобства дальнейшего изложения в подразделе последовательно рассмотрен общий вычислительный процесс математического моделирования, включающий три взаимосвязанных этапа: предварительную обработку данных (препроцессор), решение математической задачи (процессор) и последующую обработку результатов (постпроцессор).

На этапе препроцессора осуществляется формирование исходных данных и генерация начальной конфигурации частиц для численного эксперимента. В рамках этапа процессинга реализуется расчет динамики исследуемой системы с применением модифицированной версии программного пакета LAMMPS. Заключительный этап постпроцессора включает визуализацию и детальный анализ полученных результатов посредством программного обеспечения Ovito. Схема, отражающая взаимодействие основных компонентов разработанного программного комплекса, представлена на рисунке 3.1.

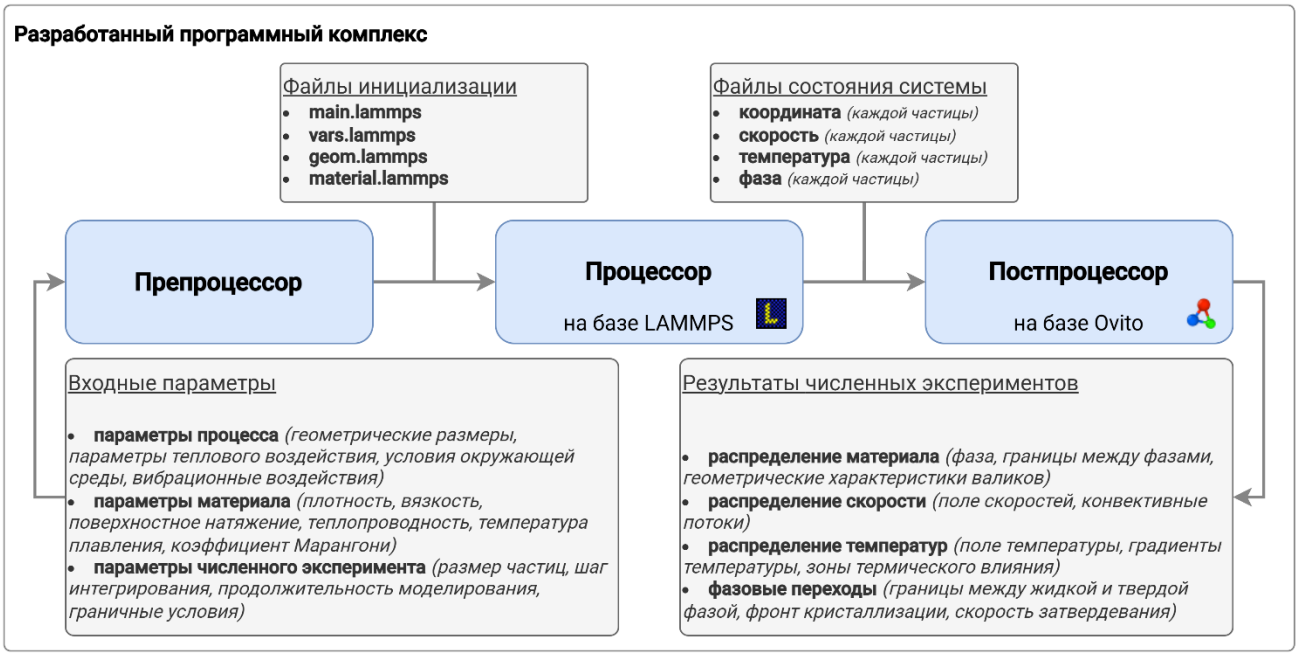


Рисунок 3.1 – Схема взаимодействия основных компонентов программного комплекса для численного моделирования процесса проволочной наплавки, включающая препроцессор для подготовки исходных данных, модифицированный процессор на базе LAMMPS для численного моделирования методом гидродинамики сглаженных частиц и постпроцессор на базе Ovito для визуализации и анализа результатов.

Основная задача препроцессора – сформировать начальную конфигурацию системы частиц в нужном формате (обычно это текстовый файл, содержащий

координаты, типы частиц и дополнительные поля, необходимые для моделирования методом гидродинамики сглаженных частиц). Здесь же указываются параметры технологического процесса, параметры материала и параметры численного расчета, которые будут использоваться в численном эксперименте.

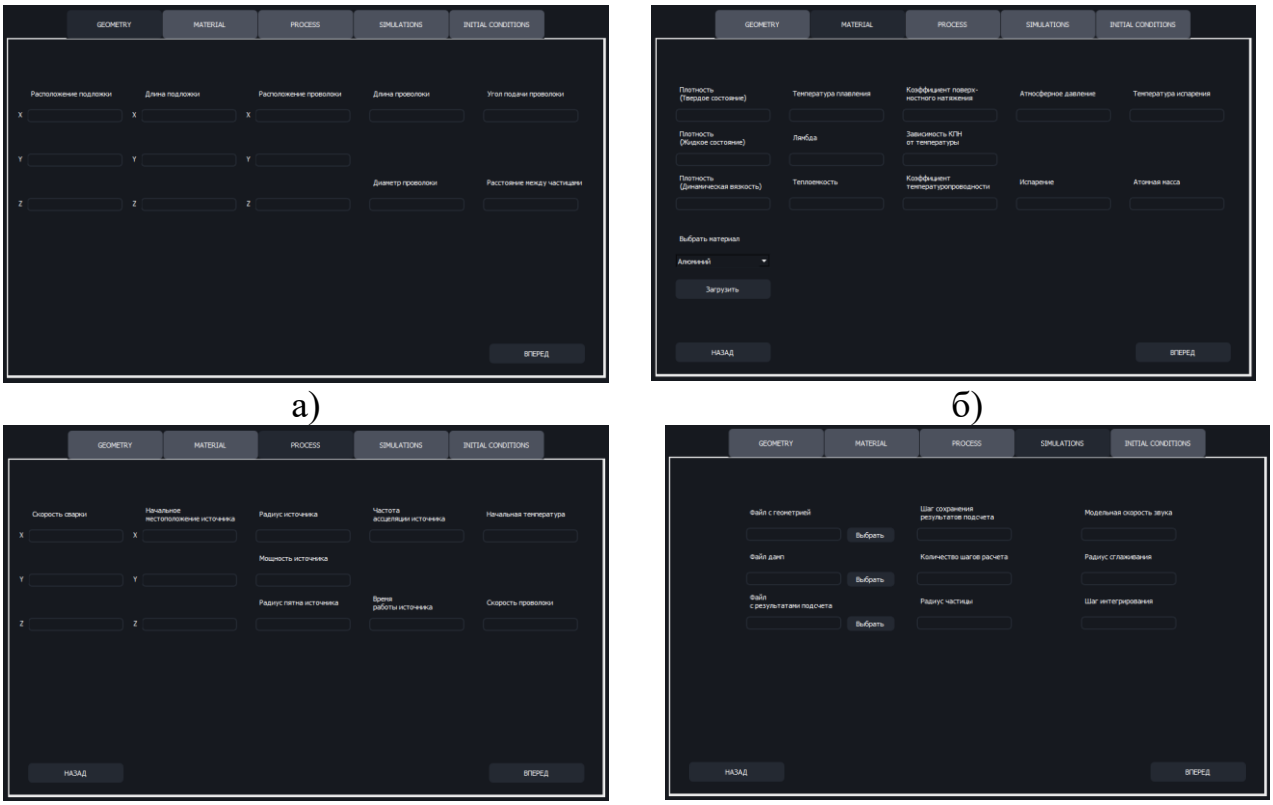
Ниже представлена таблица (таблица 3.1) с кратким описанием необходимых для запуска численного эксперимента параметров.

Таблица 3.1. Описание параметров численного эксперимента

Тип параметра	Название параметра	Описание параметра
Геометрические параметры	sub_xlo, sub_xhi, sub_ylo, sub_yhi, sub_zlo, sub_zhi	Границы расчетной области (подложки)
	wire_xlo, wire_xhi, wire_ylo, wire_yhi, wire_zlo, wire_zhi	Координаты проволоки
	wire_radius	Радиус проволоки
	wire_length	Длина проволоки
	mesh_size	Расстояние между частицами
Параметры технологического процесса	wire_velocity_x, wire_velocity_y, wire_velocity_z	Скорость проволоки
	sub_velocity_x, sub_velocity_y, sub_velocity_z	Скорость подложки
	freq_wire, amplitude_wire_x, amplitude_wire_y, amplitude_wire_z	Частота и амплитуда колебаний проволоки
	freq_sub, amplitude_sub_x, amplitude_sub_y, amplitude_sub_z	Частота и амплитуда колебаний подложки
	heat_source_radius, heat_source_spot, heat_source_power	Геометрия и мощность источника тепла
	heat_source_vel_x, heat_source_vel_y, heat_source_vel_z	Скорость перемещения источника тепла
Параметры материала	rho	Плотность материала
	viscosity	Вязкость материала
	melting_temp	Температура плавления
	Cp	Удельная теплоемкость
	surface_tension	Коэффициент поверхностного натяжения
	sigmaT	Градиент поверхностного натяжения
	enthalpy_vaporization	Энтальпия испарения
	evaporation_temp	Температура испарения

	atomic_mass	Атомная масса материала
Параметры численного расчета	dt	Шаг интегрирования по времени
	h	Радиус сглаживания ядра
	c	Скорость звука (модельная)
	skin	Радиус поиска соседей
	step_dump, step_thermo, step_restart	Частота вывода данных
	number_of_steps	Количество шагов интегрирования

С целью упрощения процедуры задания параметров численного эксперимента разработан программный инструмент с графическим интерфейсом, обеспечивающий удобную и интуитивно понятную настройку входных данных моделирования. Для реализации графического интерфейса использован инструмент PyQt, представляющий собой набор расширений графического фреймворка Qt для языка программирования Python. В качестве системы управления базами данных применена SQLite — компактная встраиваемая СУБД.



а) б)

в) г)

Рисунок 3.2 – Графический интерфейс программного инструмента для задания начальных условий численного моделирования: (а) задание геометрических характеристик системы; (б) определение параметров материала; (в) настройка параметров процесса проволочной наплавки; (г) задание параметров численного моделирования.

На рисунке 3.2 представлены основные элементы графического интерфейса, предназначенного для формирования начальных условий численного моделирования.

Интерфейс препроцессора реализован в виде последовательности этапов, на каждом из которых осуществляется настройка соответствующей группы параметров: геометрических характеристик, свойств материала, технологических параметров процесса проволочной наплавки и численных параметров модели. Параметры материала могут быть выбраны из существующей базы данных либо заданы пользователем вручную. В последнем случае предусмотрена возможность сохранения новых параметров материала в базу данных для последующего применения. По завершении настройки всех групп параметров запускается численный эксперимент посредством нажатия кнопки «Запуск», расположенной на завершающей вкладке интерфейса. Одновременно с запуском эксперимента заданные параметры сохраняются в базе данных. Результатом работы препроцессора являются входные файлы (скрипты): *main.lammps, var.lammps, material.lammps, geom.lammps*.

Программный комплекс для численного моделирования процесса аддитивного формирования металлических материалов построен на основе нескольких входных файлов (скриптов), каждый из которых отвечает за определенные аспекты расчета. Центральным элементом является скрипт *main.lammps*, выполняющий функцию основного управляющего модуля. Он обеспечивает загрузку всех необходимых параметров и подключает другие скрипты, такие как *vars.lammps* и *geom.lammps*. Основные задачи, реализуемые в этом скрипте, включают задание граничных условий, настройку параметров взаимодействия между частицами, а также определение алгоритма выполнения численного эксперимента, включая запуск расчета, управление шагами интегрирования и организацию вывода данных.

Файл *vars.lammps* представляет собой параметрический модуль, содержащий основные численные и физические характеристики системы. В нем определяются свойства материалов, такие как плотность, вязкость и температура плавления, а

также параметры, описывающие геометрию, размер частиц, шаг интегрирования и условия внешнего воздействия, включая характеристики вибраций и скорости подачи проволоки. Данный файл подключается к *main.lammps* с использованием команды *include*, что обеспечивает централизованную настройку параметров модели.

Генерация геометрии расчетной области осуществляется в скрипте *geom.lammps*, где создаются регионы, задаются их размеры и положение, формируется расчетная сетка и выполняется генерация частиц для моделирования. Кроме того, в данном модуле реализованы операции поворота и смещения проволоки, что позволяет учитывать различные углы ее подачи в расчетной модели.

Файл *material.lammps* содержит параметры конкретного материала, включая такие физические характеристики, как плотность, коэффициент поверхностного натяжения, температурные коэффициенты и параметры фазового перехода. Этот скрипт подключается к *vars.lammps*, что обеспечивает гибкость в изменении материала без необходимости внесения изменений в основной код расчетной модели.

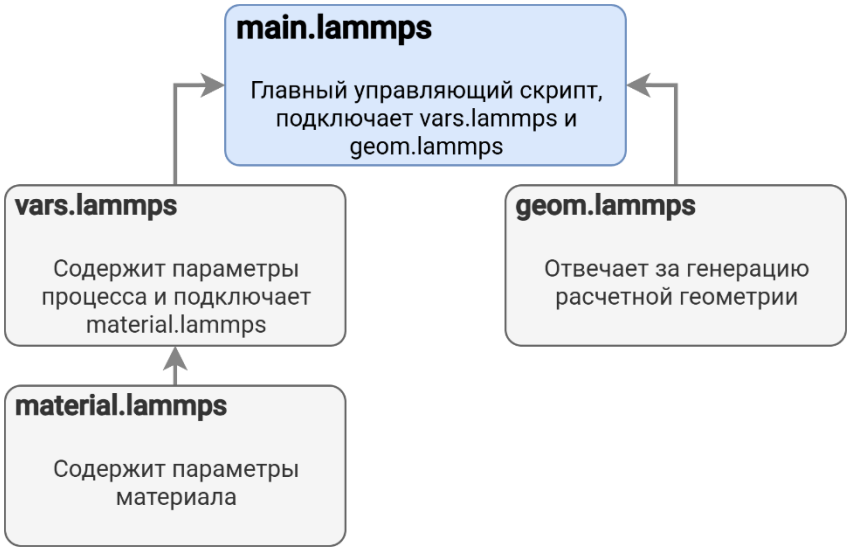


Рисунок 3.3 – Иерархическая структура взаимодействия входных файлов для численного моделирования

Таким образом, взаимодействие между входными файлами организовано по принципу иерархической структуры (рисунок 3.3), где *main.lammps* управляет

процессом моделирования, включая загрузку параметров системы из *vars.lammps* и генерацию геометрии расчетной области через *geom.lammps*. Параметры материалов задаются в *material.lammps*, что позволяет оперативно изменять свойства моделируемой среды, обеспечивая высокую адаптивность расчетной системы к различным условиям численного эксперимента.

После формирования исходной конфигурации (рисунок 3.4) численного эксперимента управление переходит к «процессору» – центральной части пакета LAMMPS.

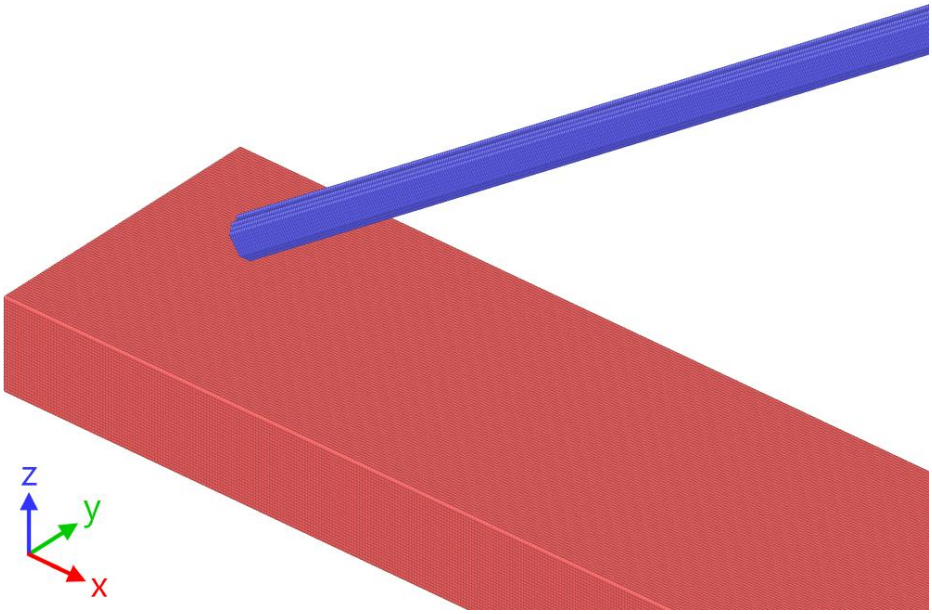


Рисунок 3.4 – Визуализация расчетной области

LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator) – это программный комплекс для молекулярного и многомасштабного моделирования, написанный на языке C++. Он поддерживает высокопроизводительные вычисления и параллельную обработку с использованием MPI, OpenMP и GPU-ускорения через CUDA. Основное назначение LAMMPS заключается в моделировании динамики частиц с учетом межатомных взаимодействий, что делает его востребованным инструментом в области численного моделирования физических процессов. Среди его ключевых возможностей можно выделить поддержку различных потенциалов взаимодействия, а также возможность расширения через пользовательские фиксы, вычисления и потенциалы. Высокая масштабируемость позволяет использовать LAMMPS на суперкомпьютерах.

LAMMPS организован в виде объектно-ориентированной системы с четкой иерархией классов. Основной класс lammps.cpp управляет экземпляром симулятора, включая ввод данных, инициализацию моделирования и запуск вычислений. Важную роль в структуре кода играют классы, отвечающие за хранение координат и свойств частиц (*Atom*), расчет сил между частицами (*Force*), построение списков ближайших соседей (*Neighbor*), управление коммуникацией между процессами (*Comm*), выполнение модификаций движения частиц (*Fix*), обработку парных потенциалов взаимодействий (*Pair*) и расчеты вспомогательных параметров (*Compute*), таких как энергия и температура. Обновление системы выполняется через интегратор, например *Verlet*, который отвечает за расчет сил, перемещение частиц и обновление состояния системы.

Модификация LAMMPS осуществляется через расширение его функционала путем добавления новых команд (*Command*), механизмов модификации параметров системы (*Fix*), функций межчастичного взаимодействия (*Pair*) и вычислений свойств системы (*Compute*). Одним из наиболее распространенных способов внесения изменений является создание новых механизмов модификации параметров системы (фикс). Фиксы в LAMMPS используются для модификации движения частиц, задания внешних воздействий и выполнения вычислений на каждом шаге интегрирования. Для добавления нового фикса в систему создаются файлы с его реализацией, содержащие объявление нового класса, унаследованного от базового *Fix*, и реализующие основные функции фикса, включая *post_force*, *initial_integrate* и *final_integrate*. После этого фикс регистрируется в системе путем добавления соответствующей строки в *style_fix.h*, что позволяет использовать его в скриптах LAMMPS. После компиляции программного комплекса производится тестирование нового фикса с использованием тестовых скриптов.

Модификация алгоритма расчета взаимодействий в LAMMPS требует внесения изменений в классы парных взаимодействий, где определяются уравнения для расчета сил и энергии. Для этого создается новый файл с реализацией потенциальной функции, в котором добавляется функция compute, вычисляющая силы и энергию на каждом шаге моделирования. После этого новая

функция межчастичного взаимодействия регистрируется в системе, что делает ее доступной для использования в расчетах. В случаях, когда требуется расширение функционала вывода и анализа данных, в систему добавляются новые методы расчета, которые позволяют вычислять термодинамические параметры, распределение плотности, температуры и скорости. Для этого создаются файлы с описанием нового вычисляемого свойства, которое затем регистрируется в системе аналогично фиксам и межчастичным взаимодействиям.

LAMMPS активно использует параллельные вычисления через MPI и GPU, поэтому при необходимости ускорения вычислений в код могут быть добавлены вызовы CUDA Kernels, что позволяет выполнять сложные численные расчеты на видеокартах. Для организации межпроцессорного обмена данными применяются функции MPI, такие как MPI_Send и MPI_Recv, которые обеспечивают эффективную передачу данных между процессами.

Алгоритм включает инициализацию начальных условий, построение списка соседей (NL), расчет взаимодействий между частицами (PI), обновление состояния системы (SU) и периодическое сохранение текущего состояния для последующего анализа (рисунок 3.5).

Рисунок 3.5 – Схематичное представление основных этапов расчета за один шаг интеграции

Базовая версия LAMMPS не включает специализированных инструментов для моделирования процессов с учетом внешних вибрационных воздействий, а также имеет ограниченные возможности для корректного учета фазовых переходов

и поверхностных эффектов в условиях проволочной наплавки. Поэтому потребовалось внесение изменений в ядро программы и разработка новых пользовательских механизмов модификации параметров системы и сил межчастичного взаимодействия (рисунок 3.6).

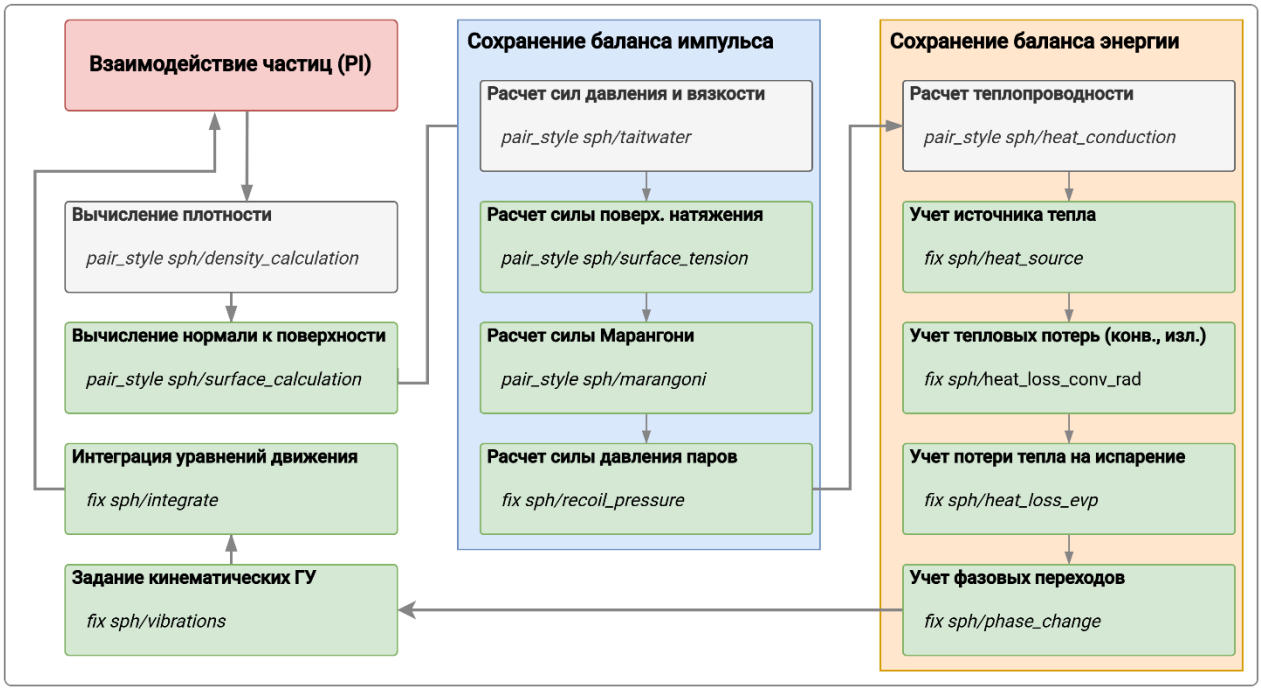


Рисунок 3.6 – Схема основных этапов расчета взаимодействия частиц методом сглаженных частиц (SPH), где серым цветом обозначены модули стандартной версии LAMMPS, а зеленым – дополнительные компоненты, разработанные в рамках диссертационной работы.

На завершающем этапе проводится анализ результатов численных экспериментов с использованием инструмента Ovito (Open Visualization Tool) [165], обеспечивающего обработку данных и их визуализацию. С его помощью можно строить сечения изделия, исследовать изменения границ между твердой и жидкой фазой, анализировать поля температур, распределение интенсивности поверхностных сил, оценивать динамику ванны расплава, характер конвективных течений при различных параметрах вибрационных воздействий, геометрию формируемых валиков и формировать анимированные ролики для наглядной демонстрации поведения расплава во времени (рисунок 3.7). В качестве входных данных используются файлы дампов LAMMPS, в которых сохраняются координаты частиц, скорости, ускорения, температура, фазовый признак и любые другие пользовательские параметры каждый заданный интервал времени.

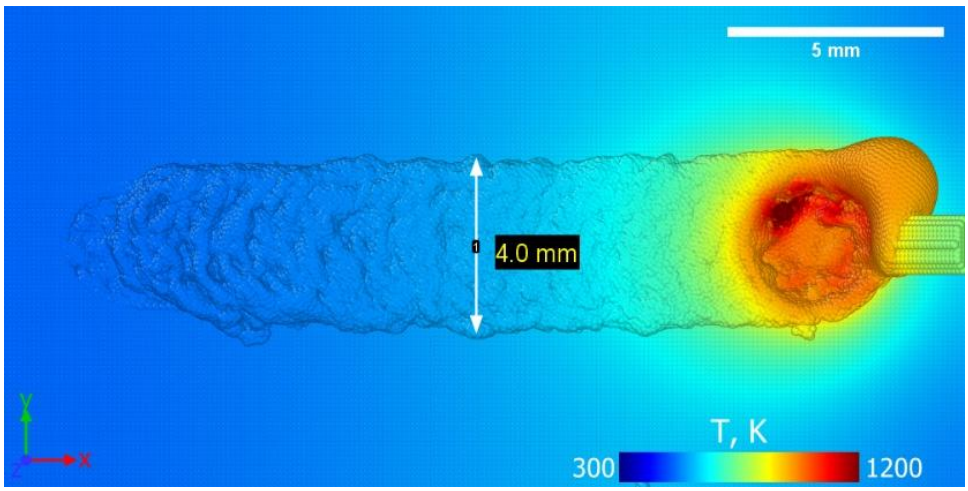


Рисунок 3.7 – Визуализация результатов численного моделирования в Ovito: анализ геометрии, температурных полей и динамики расплава

При необходимости в постпроцессоре выполняются количественные измерения: высоты валика, глубины проплавления, радиуса капли и т. д., которые можно экспортировать для дальнейшей статистической обработки или сопоставления с экспериментом. Таким образом, Ovito выступает в качестве универсального инструмента для качественной и количественной интерпретации полученных результатов SPH-моделирования.

Разработанный модуль для LAMMPS представляет собой многофункциональный инструмент для моделирования процесса проволочной наплавки с учетом поверхностного натяжения, включая его температурную зависимость (эффект Марангони), испарения и давления паров, влияющих на форму расплава, а также тепловых потерь за счет конвекции и излучения при наличии внешних источников нагрева, таких как лазер, электронный луч или дуговой разряд. Дополнительно реализовано воздействие вибрации на подложку и проволоку, что позволяет учитывать эффекты перемешивания и изменения характера течения в зоне расплава.

Разработанный программный модуль использует стандартный цикл вычислений LAMMPS и встроенные средства параллельной обработки данных на основе MPI, что обеспечивает высокую вычислительную эффективность и масштабируемость вычислений [166]. Разделение вычислительного процесса на препроцессор, основной расчет и постпроцессор позволяет гибко задавать

геометрические параметры и свойства материала на стадии подготовки входных данных, а анализ дамп-файлов и визуализация в Ovito ускоряют обработку численных результатов.

Разработанный программный комплекс (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2022616021 «Реализация метода SPH для моделирования процесса проволочной наплавки в среде LAMMPS») [167] составляет основу для всех последующих верификационных и валидационных исследований, которые будут рассмотрены далее.

3.2. Верификация математической модели на тестовых вычислительных примерах

Верификация разработанной математической модели представляет собой важный этап, нацеленный на подтверждение корректности реализации отдельных физических механизмов и их совокупного взаимодействия в рамках метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Для этого была сформирована серия тестовых задач, начиная с простейших постановок (проверка тепловых расчетов на неподвижной подложке, формирование одиночной капли без подачи проволоки) и вплоть до более сложных сценариев, включающих фазовые переходы и вибрационные воздействия.

3.2.1. Верификация модели на тестовых примерах в упрощенных постановках

В качестве моделируемой системы рассматривались по отдельности проволока и подложка, а также их совместное присутствие при заданных граничных условиях. Материалом для вычислительных экспериментов служила нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т, для которой в таблице 3.2 приведен набор теплофизических характеристик (плотность, вязкость, температура плавления, теплопроводность, удельная теплоемкость и др.).

Таблица 3.2. Принятые при расчете теплофизические характеристики материала 12Х18Н10Т

Характеристика	Обозначение	Размерность	Значение
Температура ликвидус	T_L	°C	1450
Температура солидус	T_S	°C	1420
Температура кипения	T_v	°C	2900
Удельная теплоемкость	C	Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$	502
Плотность	ρ	кг·м$^{-3}$	7680
Теплопроводность	λ	Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$	26

Скрытая теплота плавления	H_f	Дж/кг	276000
Скрытая теплота испарения	H_v	Дж/кг	6250000
Динамическая вязкость	μ	Па·с	0,007
Коэффициент пов. натяжения	σ	Н·м$^{-1}$	1,615
Темп. коэф. поверхностного нат.	$\gamma = \partial\sigma/\partial T$	Н·м$^{-1}$·К$^{-1}$	–0,00043

На первом этапе верификационных исследований была проведена серия численных экспериментов, нацеленных на поэтапное включение и анализ влияния различных физических механизмов (поверхностного натяжения, эффекта Марангони, потерь тепла на испарение, давления паров) при моделировании процесса оплавления наклонной и вертикальной проволоки. Такая постановка позволяет в явном виде оценить вклад каждого из перечисленных факторов в формирование зоны расплава, распределение температур и характер течения жидкости.

В качестве исходной конфигурации для первого теста (рисунок 3.8) выбиралась проволока, расположенная под наклоном к горизонтальной плоскости; при этом граничные условия в зоне контакта с подложкой могли быть упрощенными (например, фиксированная температура основания). Варианты расчета (а – д) демонстрируют, как постепенно усложняется поведение модели при включении дополнительной физики: в случае (а) учитывается лишь нагрев без поверхностных сил и испарения; в (б) вводится сила поверхностного натяжения; в (в) добавляется эффект Марангони; а в (г) – еще и потери тепла за счет испарения; наконец, в (д) появляются и потери тепла, и сила давления паров. Анализ каждой из перечисленных схем позволил проследить, как меняется форма свободной поверхности расплава, насколько активно развиваются конвективные потоки, и в каких зонах возникают заметные градиенты температуры.

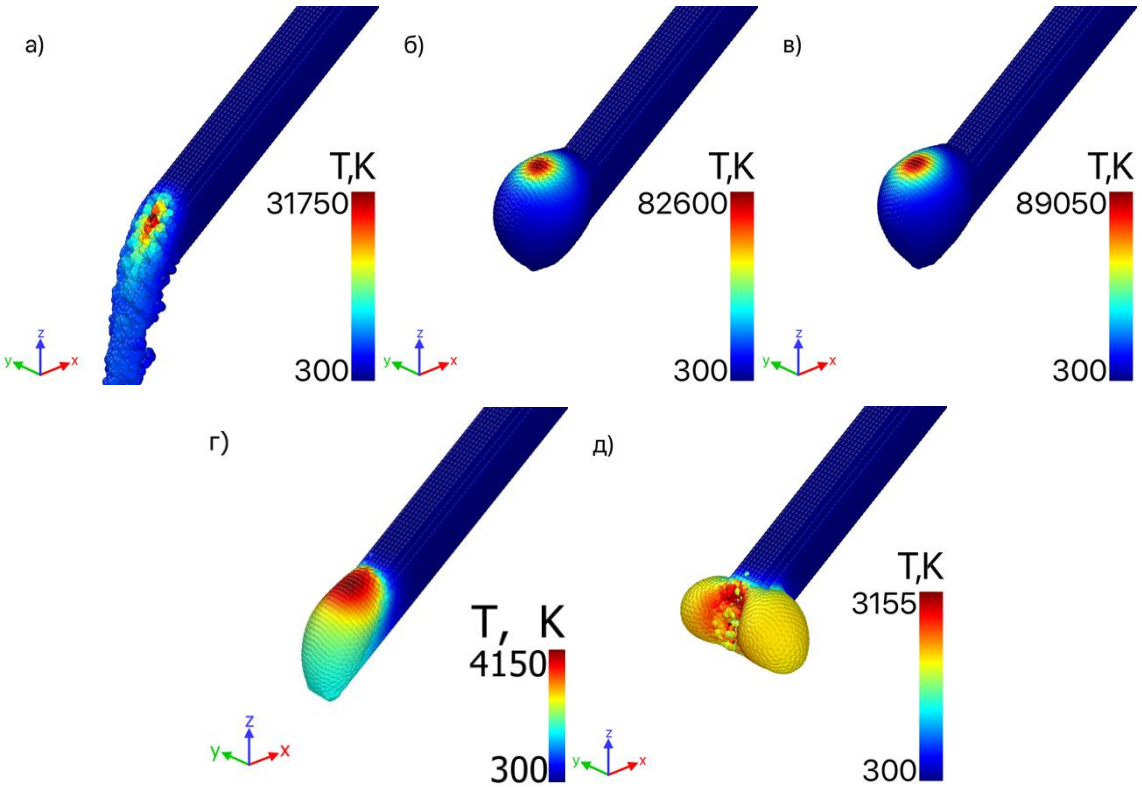


Рисунок 3.8 – Сравнительная визуализация расчетной области при последовательном подключении различных физических механизмов в задаче оплавления наклонной проволоки: (а) нагрев без учета поверхностных явлений и испарения, (б) учет силы поверхностного натяжения, (в) учет силы поверхностного натяжения и эффекта Марангони, (г) учет силы давления паров (д) одновременно действующих поверхностных сил, эффекта Марангони, испарения и давления паров.

Аналогичная серия экспериментов для вертикально расположенной проволоки (рисунок 3.9) позволила дополнительно проверить корректность аппроксимации сил тяжести и влияния разных граничных условий в зоне контакта проволоки с теплоисточником. На изображениях (а – г) иллюстрируется эволюция расплава при поэтапном усложнении: от простого нагрева без поверхностных явлений до включения всех факторов – поверхностного натяжения, эффекта Марангони, испарения и давления паров. Результаты (рис. 3.9 г) наглядно показывают, что именно совокупный учет всех обозначенных механизмов обеспечивает физически достоверную картину течения расплава, позволяя достичь хорошей самосогласованности между распределением температуры и динамикой жидкости.

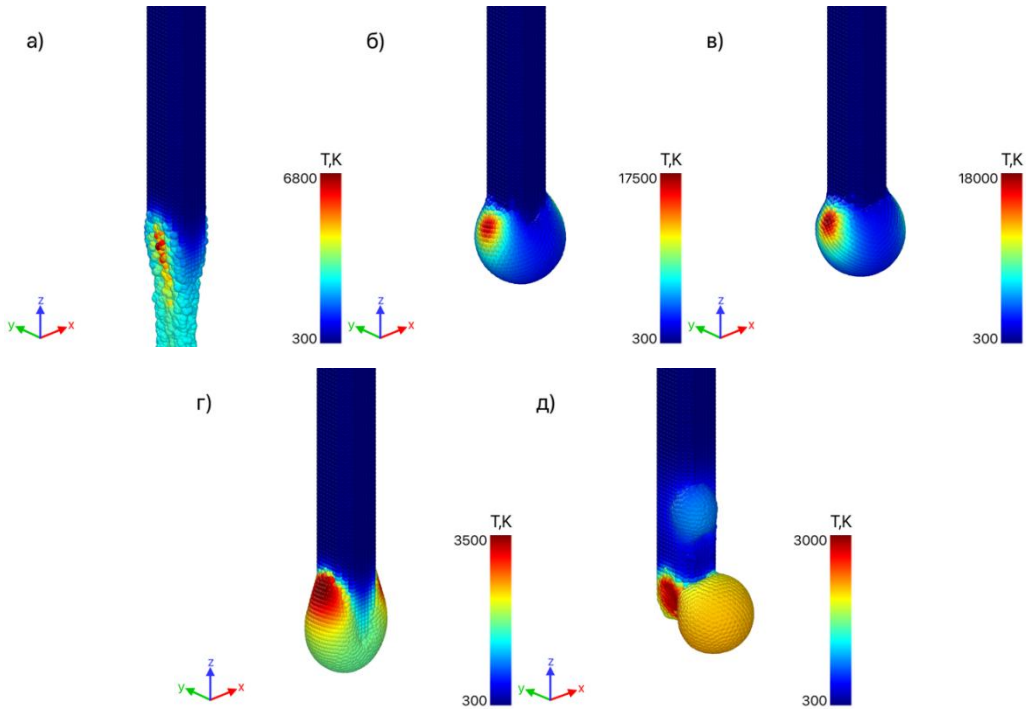


Рисунок 3.9 – Визуализация для задачи оплавления вертикально ориентированной проволоки, последовательно демонстрирующая влияние: (а) простого нагрева, (б) поверхностного натяжения, (в) эффекта Марангони и (г) комплекса факторов – поверхностных сил, теплофизических потерь на испарение и давления паров.

Следующим этапом верификации стала реализация различных схем развертки теплового источника (в данном случае электронного луча): кольцо, «пила», «зигзаг». Это позволило оценить, насколько адекватно модель описывает процесс нагрева при сложных траекториях движения источника тепла и как он влияет на формирование зоны расплавленного металла. На рисунке 3.10 представлена визуализация расчетной области для трех типов траекторий. Здесь варьировались частота развертки, количество периодов, амплитуда колебаний, а также число источников тепла и их направление. Анализ показал, что все тестовые расчеты дают корректную эволюцию температурного поля и зоны прогрева, сопоставимую с экспериментальными результатами по сварочным и наплавочным процессам при динамическом воздействии источника энергии.

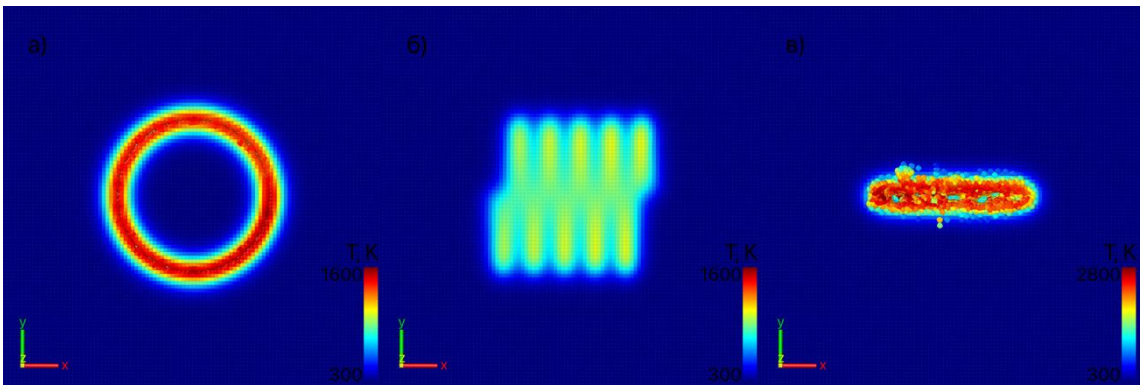


Рисунок 3.10 – Визуализация расчетной области при численном моделировании различных схем развертки электронного луча (кольцевая, «зигзаг», «пила»), используемых для нагрева подложки.

Дополнительно на рисунке 3.11 отображены итоги изучения влияния испарения, давления паров и сил Марангони при нагреве подложки.

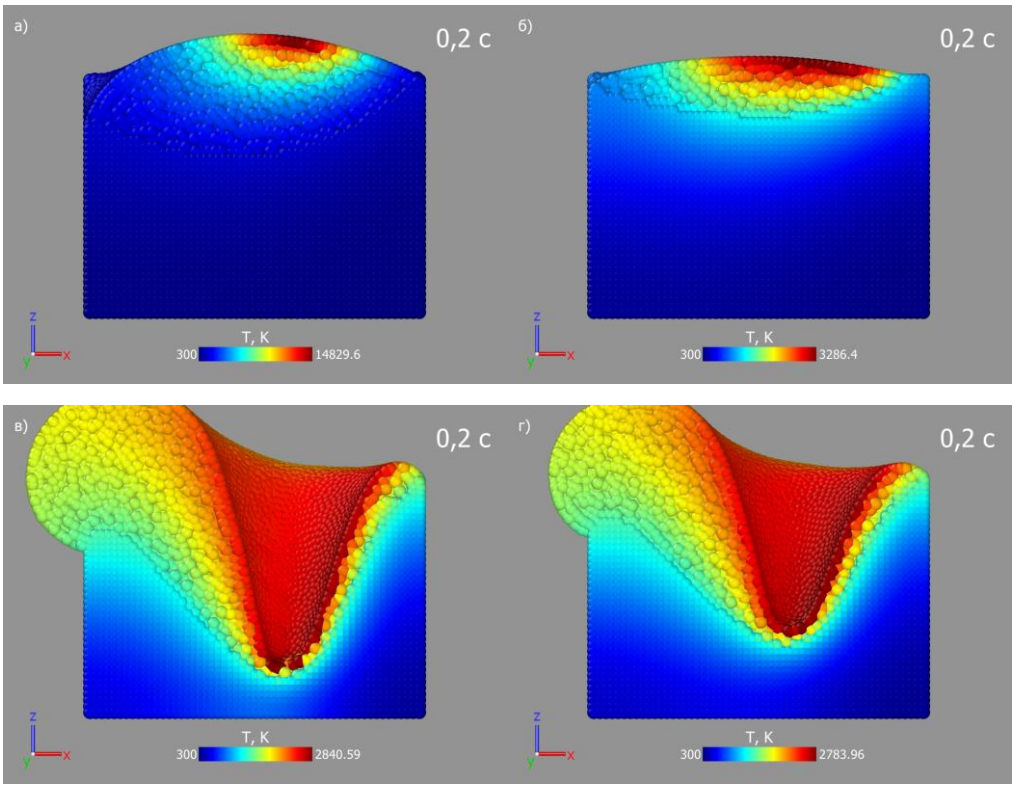


Рисунок 3.11 – Визуализация расчетной области при различных действующих физических механизмах: а) поверхностное натяжение; б) поверхностное натяжение и потеря тепла на испарение; в) поверхностное натяжение и давление паров; г) все вышеперечисленные механизмы

В вариантах (а–г) наглядно видно, как изолированное включение потерь тепла на испарение или давления паров по отдельности дает частичное изменение формы расплавленной зоны, тогда как совместный учет (панель (г)) приводит к формированию парогазового канала и заметному перераспределению расплава под

воздействием интенсивных конвективных потоков и сил поверхностного натяжения. Таким образом, комплексный учет всех перечисленных механизмов меняет динамику расплавления в сторону, соответствующую реальным физическим процессам, и позволяет математической модели надежно описывать как распределение температур, так и эволюцию геометрии расплава.

Второй этап верификационных исследований был посвящен оценке сходимости численной схемы. Для этого проверялось, как результат моделирования процесса оплавления подложки меняется при варьировании размера SPH-частиц (dx) в широком диапазоне (от 1,0 мм до 0,05 мм). На рисунке 3.12 представлено сравнение температурного поля для пяти значений dx (1,0 мм; 0,50 мм; 0,25 мм; 0,1 мм и 0,05 мм).

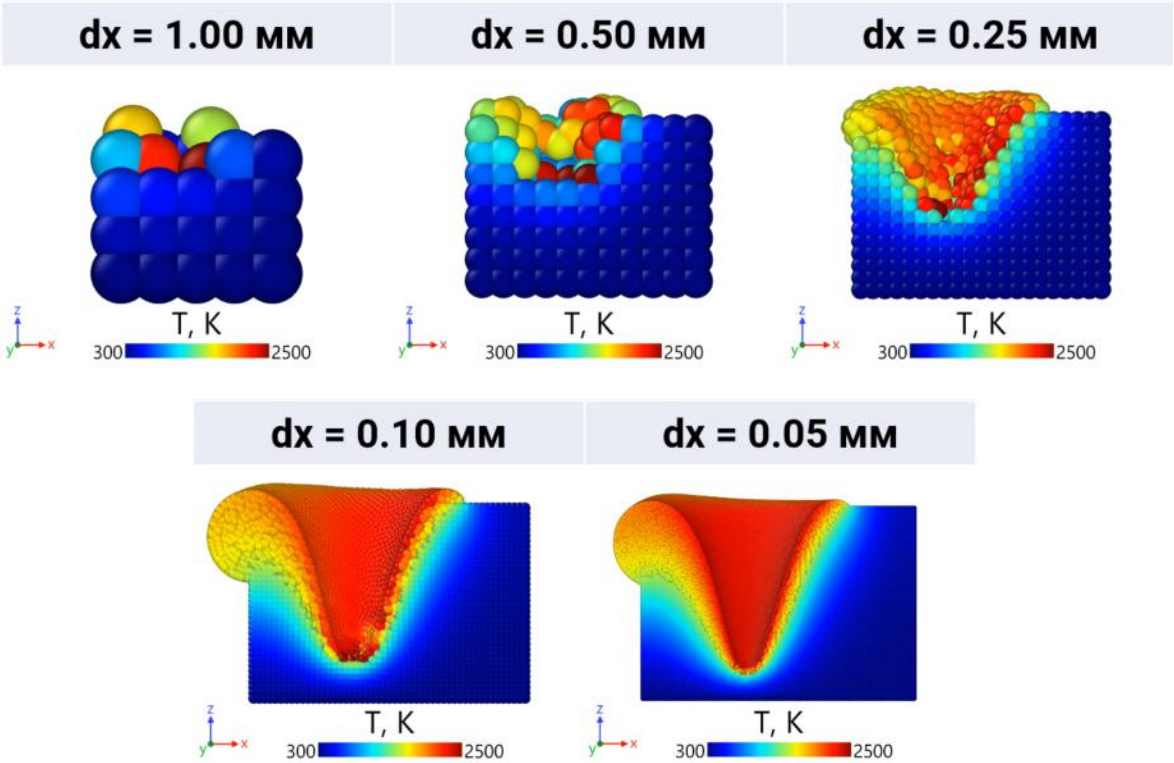


Рисунок 3.12 – Сравнение температурных полей при моделировании оплавления подложки для различных размеров частиц dx.

Видно, что при dx=0,10 мм и dx=0,05 мм результирующая форма расплавленной области практически не отличается. В то же время при более крупном шаге (dx=1,0 мм или 0,50 мм) наблюдается заметная дискретизация области нагрева:

ядро расплава выглядит более «зернистым», а градиенты температуры воспроизводятся с меньшей детализацией.

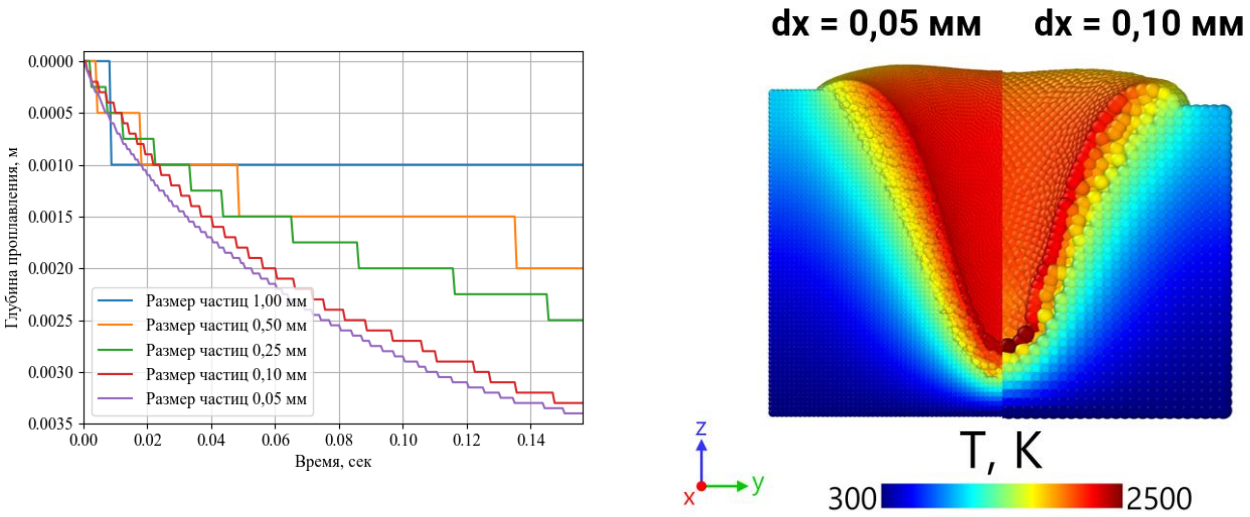


Рисунок 3.13 – График зависимости глубины проплавления от времени при различных шагах дискретизации (1,00 мм, 0,50 мм, 0,25 мм, 0,10 мм и 0,05 мм) (слева) и сопоставление распределения температуры при разных шагах дискретизации метода SPH (справа)

Таким образом, детальный анализ полученных данных показал, что дискретизация с параметром dx=0,10 мм является достаточной для решения поставленной задачи с требуемой точностью, поскольку дальнейшее уменьшение шага (до 0,05 мм) не приводит к существенным изменениям в геометрии расплавленной зоны и характере температурного распределения (рисунок 3.13). При этом существенно возрастает вычислительная нагрузка, так как общее количество частиц увеличивается пропорционально $1/dx^3$. Следовательно, выбор dx=0,10 мм служит оптимальным между точностью численного моделирования и эффективностью использования вычислительных ресурсов.

Для исследования сходимости по времени была проведена серия из пяти численных экспериментов по оплавлению подложки с фиксированными параметрами материала (таблица 3.2), процесса и численных расчетов и следующими параметрами dt = {12,50e-6; 5,00e-6; 2.50e-6; 1,25e-6; 0,50e-6} (рисунок 3.14).

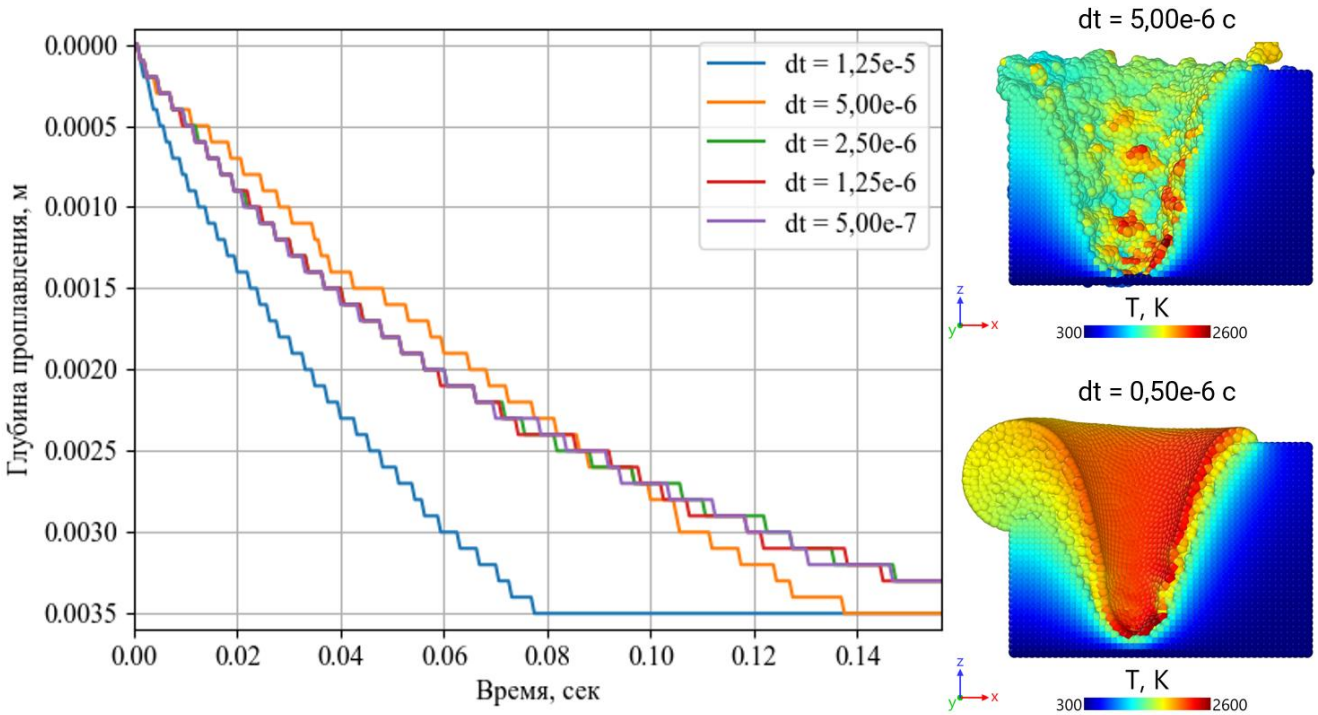


Рисунок 3.14 – График зависимости глубины проплавления от времени при различных dt (слева) и сопоставление формы зоны проплавления при разных dt (справа)

Исходя из анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что при большом шаге интегрирования температура частиц заметно превышает температуру кипения материала, что приводит к значительному увеличению силы давления паров и отрыву частиц от подложки, тем самым глубина проплавления резко увеличивается. При уменьшении временного шага до dt=2,5e-6 с и ниже динамика системы стабилизируется, демонстрируя сходимость результатов. Таким образом, для последующего моделирования выбран временной шаг dt=2,5e-6 с, обеспечивающий баланс между точностью численного решения и вычислительной эффективностью.

3.3. Валидация математической модели с использованием результатов натурных экспериментов

После подтверждения общей корректности реализации физических механизмов в разработанном SPH-модуле (раздел 3.2) следующим этапом является сравнение численных результатов с экспериментальными данными процесса проволочной наплавки. Основная задача валидации заключается в уточнении модельных параметров, включая коэффициент поверхностного натяжения для

различных металлов, а также в определении границ применимости разработанной модели. В данном разделе представлены методики калибровки модели и проведен анализ соответствия расчетных данных результатам натурных экспериментов.

3.3.1. Калибровка параметров модели и алгоритм определения коэффициента поверхностного натяжения

Практика моделирования показывает, что табличное значение σ (поверхностного натяжения), измеренное экспериментально (например, методом отрыва капли или сталагмометрически) [168], может приводить к небольшим расхождениям при прямом использовании в SPH-схеме. Это связано с рядом упрощений численной аппроксимации (дискретность метода, выбор сглаживающего ядра, особенности интерпретации «свободной поверхности» в SPH). Поэтому был разработан специальный алгоритм калибровки, нацеленный на подбор эффективного σ_{eff}, позволяющего точно воспроизвести геометрию капли или формирующегося валика при заданном материале и температурных условиях.

Для этого разработан автоматизированный алгоритм, основанный на сталагмометрическом методе, который предполагает, что в момент отрыва капли с подвеса сила тяжести, действующая на нее, уравновешивается силой поверхностного натяжения, приложенной к сечению наибольшего сужения капли (рисунок 3.15).

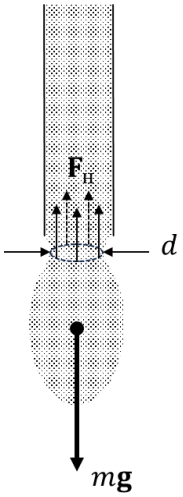


Рисунок 3.15 – Иллюстрация сталагмометрического метода

Автоматизированный алгоритм реализован в итерационной форме. На основе исходных данных вычисляется максимальная масса капли, способной удерживаться на вертикальном подвесе. Далее, исходя из эмпирических соображений, задается диапазон возможных значений параметра поверхностного натяжения σ, после чего его уточнение осуществляется методом бисекции. В случае, если капля отрывается, значение параметра увеличивается, в противном случае – уменьшается. Процесс отрыва фиксируется автоматически, обеспечивая объективное определение искомого параметра. На рисунке 3.16 представлена схема работы алгоритма по вычислению эффективного коэффициента поверхностного натяжения.

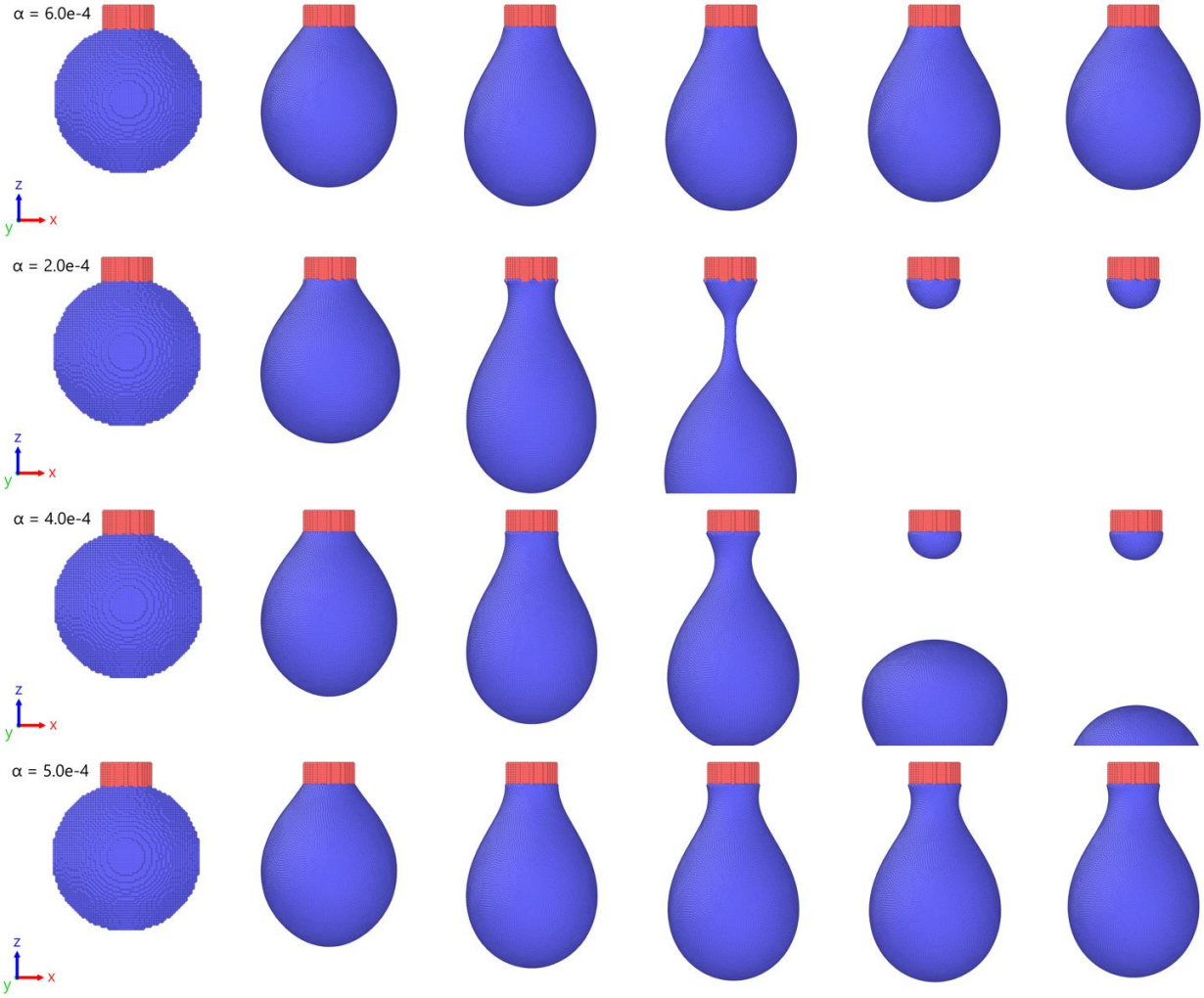


Рисунок 3.16 – Иллюстрация работы автоматизированного алгоритма по определению эффективного коэффициента поверхностного натяжения σ_{eff}

Для идентификации параметра модели силы Марангони проведена верификация на основе численного эксперимента, выполненного в программном

комплексе Comsol. В качестве тестовой задачи рассмотрено поведение капли с радиусом r = 2 мм в вакууме при теплоизолированной поверхности. На верхнюю часть капли воздействует локальный источник тепла мощностью 100 Вт, распределенный по нормальному закону с радиусом 1 мм. Под действием силы Марангони поверхностный слой жидкости начинает движение в сторону антиградиента температуры, что приводит к перераспределению частиц: частицы из центра капли поднимаются к поверхности для компенсации локального уменьшения плотности, тогда как на противоположной стороне наблюдается избыточная концентрация частиц, вызывающая повышение локальной плотности и последующее проникновение частиц под поверхность капли. В результате формируется устойчивое конвективное течение.

На основе данной модели выполнен подбор параметра α', обеспечивающего минимальное отклонение по скорости жидкости в центре капли при сравнении расчетов, выполненных методом гидродинамики сглаженных частиц (SPH) и методом конечных элементов (МКЭ) в Comsol. Идентификация параметра проводилась для двух материалов: стали и титанового сплава ВТ6. Значения температурного градиента поверхностного натяжения $\partial\sigma/\partial T$ составляют $-0{,}43 \cdot 10^{-3}$для стали и $-0{,}28 \cdot 10^{-3}$ для титанового сплава [116, 169].

На рисунке 3.17 представлена расчетная область для моделей SPH и МКЭ.

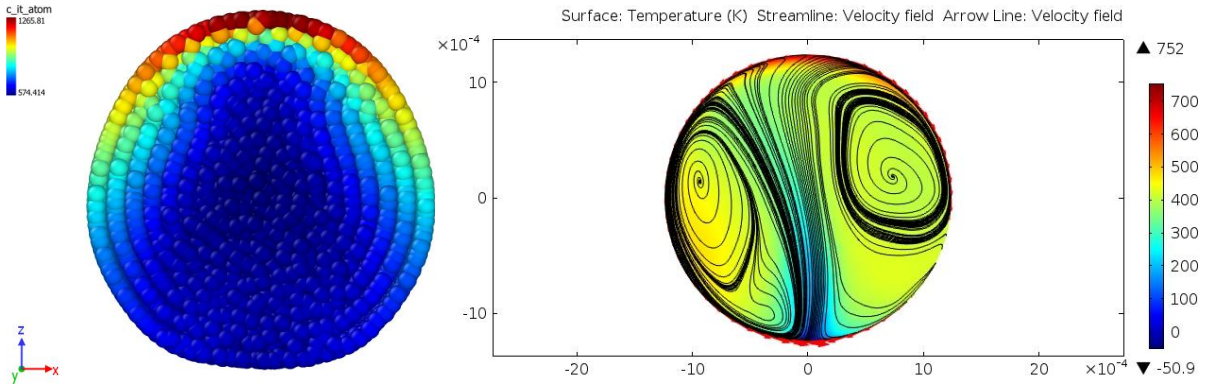


Рисунок 3.17 – Визуализация расчетной области SPH (слева), МКЭ (справа)

На рисунке 3.18 приведены результаты моделирования методом МКЭ, демонстрирующие зависимость скорости потока жидкости в центре расчетной области от времени для стали.

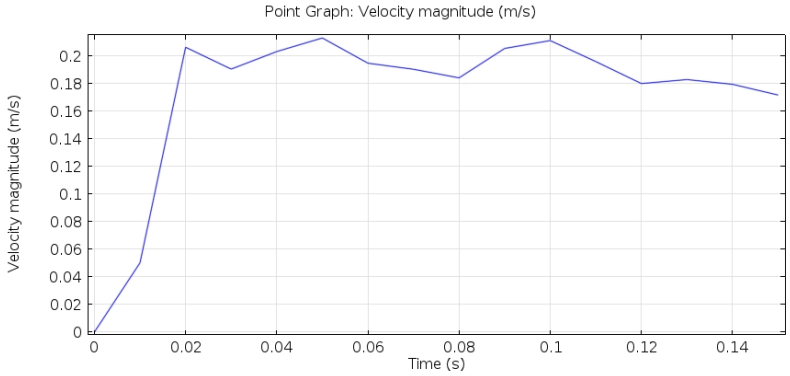


Рисунок 3.18 – Зависимость скорости потока жидкости в центре расчетной области от времени для стали

Проведенный расчет методом SPH при тех же условиях показал совпадение скоростей частиц в центре расчетной области с данными МКЭ в пределах допустимой погрешности ~10-15% (рискнок 3.19).

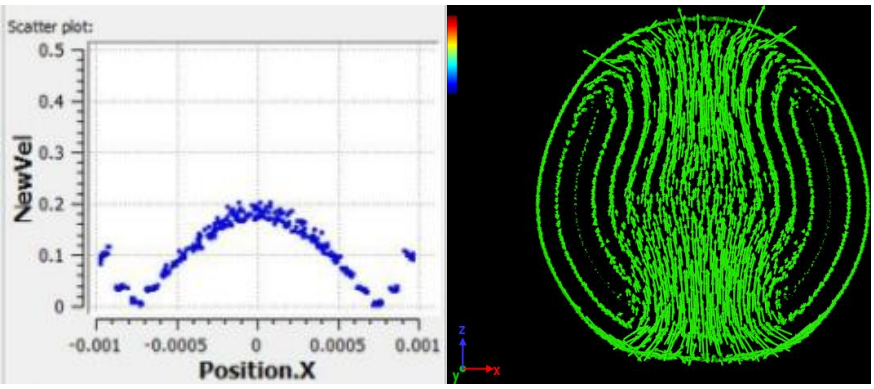


Рисунок 3.19 – Зависимость скорости частицы от координаты вдоль оси Ox (слева) и поле скоростей (справа) при t = 0.15 с для стали

Аналогичная процедура проведена для титанового сплава ВТ6 (рисунок 3.20).

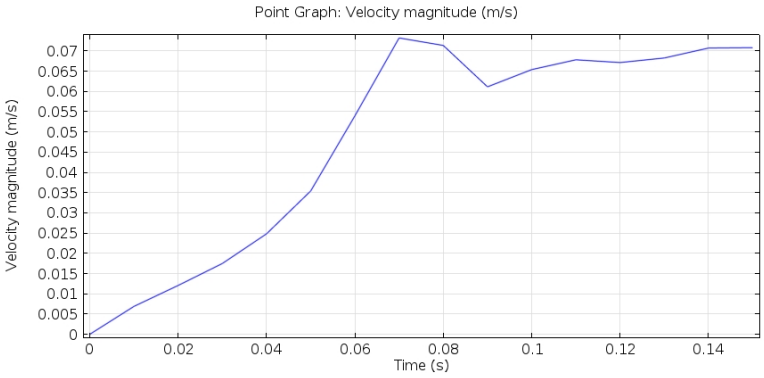


Рисунок 3.20 – Зависимость скорости потока жидкости в центре расчетной области от времени для титанового сплава.

Сравнение результатов моделирования методом SPH и МКЭ также подтвердило согласованность скоростей частиц в центре расчетной области в пределах 10–15% (рисунок 3.21).

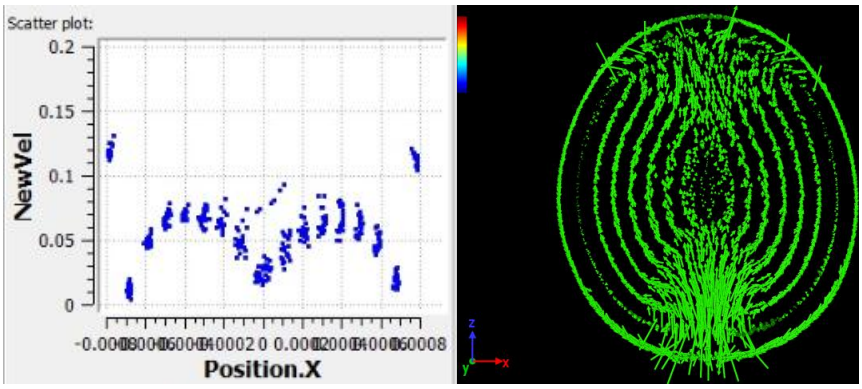


Рисунок 3.21 – Зависимость скорости частицы от координаты вдоль оси Ox (слева) и поле скоростей (справа) при t = 0.15 с для титанового сплава

Таким образом, численные эксперименты показали, что для стали и титанового сплава параметры α' могут быть приняты равными табличным значениям $\partial\sigma/\partial T$, приведенным в литературных источниках. После проведения калибровки становится возможным применять уточненные модельные коэффициенты для численного моделирования более сложных сценариев аддитивной наплавки.

3.3.2. Сопоставление результатов численных и натурных экспериментов

Для оценки достоверности разработанной численной модели проведено сопоставление результатов численного моделирования с данными натурных экспериментов по проволочной наплавке. В качестве исследуемых материалов использовались сталь 12Х18Н10Т и титановый сплав ВТ6. Сравнение осуществлялось по геометрическим параметрам наплавленных валиков, включая их ширину, высоту и глубину проплавления (рисунок 3.22).

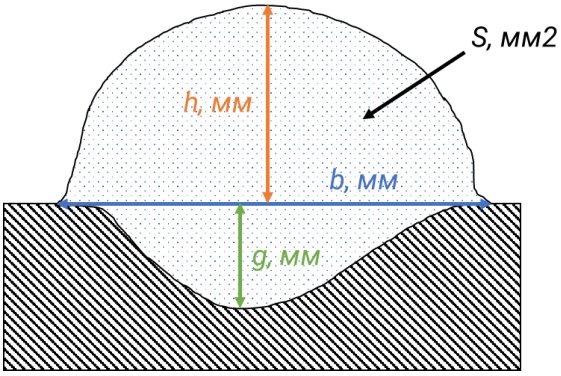


Рисунок 3.22 – Схематическое представление поперечного сечения наплавленного валика с обозначением его ширины (b), высоты (h) и глубины проплавления (g)

Оценка корректности моделирования на примере стали была проведена при следующих технологических параметрах (таблица 3.3).

Таблица 3.3. Параметры процесса наплавки

Характеристика	Значение
Размер подложки	10 мм x 20 мм x 3,5 мм
Диаметр проволоки	1,2 мм
Скорость подачи проволоки	30 мм/с
Скорость движения подложки	15 мм/с
Диаметр источника тепла	1,5 мм

Ниже, на рисунке 3.23, представлены результаты численного моделирования процесса проволочной наплавки нержавеющей стали 12Х18Н10Т с использованием указанных параметров.

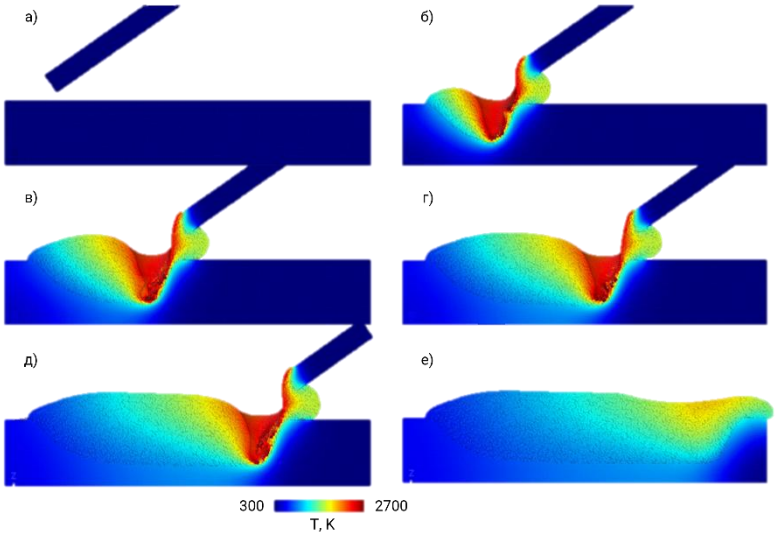


Рисунок 3.23 – Визуализация моделирования процесса проволочной наплавки нержавеющей стали 12Х18Н10Т

По итогам численного и натурного эксперимента была проведена верификация модели по геометрии поперечного сечения сформированного валика (рис. 3.24). В натурных экспериментах анализировалось несколько поперечных сечений каждого наплавленного валика, по которым проводились замеры высоты, ширины и глубины проплавления. Затем значения, полученные в различных сечениях, усреднялись для получения итоговых характеристик, позволяющих минимизировать случайные флуктуации формы валика. Аналогичная методика применялась и в численных расчетах: на основе нескольких сечений рассчитывались средние величины геометрических параметров. При этом технологические режимы (скорости подачи проволоки и движения подложки, мощность источника тепла и т. д.) в модели были полностью идентичны экспериментальным, что обеспечивало корректное сопоставление результатов.

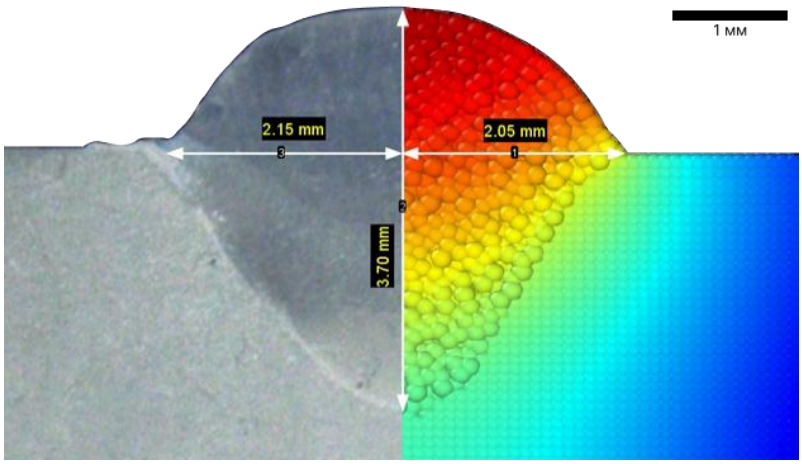


Рисунок 3.24 – Геометрические характеристики зоны проплавления: натурный эксперимент (слева) и численный эксперимент (справа)

Аналогичный верификационный эксперимент был проведен для титанового сплава ВТ6 с применением плазменной дуги, параметры которой, в том числе ее гауссово распределение и типичные габариты пятна нагрева, определялись по ранее известным зависимостям [170]. Данные по эксперименту и результаты сравнительного анализа приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4. Параметры процесса наплавки сплава ВТ-6 плазменной дугой

№ п/п	Q, Вт	$v_{пп}$, м/мин	$v_{нап}$, м/час	b, мм			h, мм		
				ММ	НЭ	ε	ММ	НЭ	ε
1	3350	2,7	18	8,1	8,6	7%	2,2	2,4	7%

2	3350	3,0	18	8,1	8,4	4%	2,3	2,5	9%
3	3350	2,4	24	6,6	7,3	10%	1,5	1,8	20%
4	3350	2,4	12	9,4	9,9	6%	2,5	2,8	10%
5	3350	2,4	18	8,5	8,9	5%	2,0	2,2	11%

Обозначения в таблице: **Q** – мощность источника тепла (Вт), $\mathbf{v}_{пп}$ – скорость подачи проволоки (м/мин), $\mathbf{v}_{нап}$ – скорость наплавки (м/час), **b** – ширина сформированного валика (мм), **h** – высота сформированного валика (мм), **ММ** – результаты математического моделирования, **НЭ** – экспериментальные (натурные) измерения, ε – относительное отклонение результатов математического моделирования от натурных данных (в %).

По итогам этих верификационных экспериментов установлено, что разработанная модель позволяет воспроизводить формирование одиночного валика для разных металлических сплавов (включая ВТ6 и 12Х18Н10Т) с точностью порядка 10 % по основным геометрическим параметрам (высоте и ширине). Такое расхождение считается удовлетворительным для ряда технологических применений.

Таким образом, сопоставление численных и натурных экспериментов подтвердило, что разработанная модель обеспечивает корректное воспроизведение геометрии формируемого валика при проволочной наплавке в диапазоне типичных технологических режимов. Увеличение погрешности при экстремальных значениях скорости подачи проволоки и мощности нагрева обусловлено возрастанием сложности протекающих процессов, включая интенсификацию динамических явлений, что требует учета дополнительных факторов при численном моделировании.

3.3.3. Итоговая оценка достоверности модели

Обобщение результатов валидационных расчетов для различных материалов, включая сталь 12Х18Н10Т, титановый сплав ВТ6 и алюминиевый сплав АМг5, а также для различных режимов наплавки, таких как лазерная и дуговая, позволяет сделать несколько ключевых выводов.

Разработанная модель обеспечивает достаточную точность описания геометрических характеристик наплавленного валика и зоны проплавления [171-175]. Погрешность не превышает 10–12 % и в большинстве случаев обусловлена допущениями, такими как форма лазерного или дугового пятна и другие приближения.

Область применимости представленной модели ограничивается при экстремальных температурных режимах и высоких скоростях течения материала, поскольку при данных условиях существенно возрастает влияние таких факторов, как интенсивное парообразование и турбулентные эффекты. Для адекватного описания этих явлений может потребоваться расширение модели с учетом турбулентного переноса и динамического взаимодействия с окружающей газовой фазой.

В диапазоне рассматриваемых параметров, соответствующих условиям реального технологического процесса, представленная модель адекватно воспроизводит динамику формирования расплавленных зон, их эволюцию, пространственное перемещение и последующую кристаллизацию, что подтверждается удовлетворительным согласованием полученных результатов с данными металлографических исследований (макрошлифов).

Таким образом, результаты проведенной валидации подтверждают способность разработанного программного модуля адекватно прогнозировать ключевые параметры процесса аддитивного формирования металлических валиков методом проволочной наплавки. Полученные данные свидетельствуют о перспективности применения предложенного подхода для численного исследования и анализа технологических режимов наплавки с учетом вибрационных воздействий.

3.4. Верификация математической модели при учете внешних вибрационных воздействий

В предыдущих разделах главы описана реализация математической модели, учитывающая комплекс физических явлений, сопровождающих процесс

проволочной наплавки, включая теплоперенос, испарение, фазовые превращения, эффекты поверхностного натяжения, а также влияние вибрационных воздействий. Однако для оценки корректности воспроизведения эффектов вибрации в численном моделировании необходимо предварительно верифицировать способность модели адекватно описывать влияние вибрационных воздействий на динамику расплава на основе данных натурных экспериментов.

Анализ экспериментальных данных [176] показывает, что во многих случаях влияние вибраций проявляется схожим образом со снижением коэффициента поверхностного натяжения, приводя к изменению формы капли расплава, увеличению ее радиуса и изменению угла смачивания. Это наблюдение послужило основанием для выдвижения гипотезы о возможности упрощенного моделирования вибрационных воздействий путем уменьшения эффективного коэффициента поверхностного натяжения.

В данном разделе сначала проводится верификация модели на основе экспериментальных данных, оценивается степень ее соответствия натурным измерениям, а затем проверяется гипотеза о снижении коэффициента поверхностного натяжения как способе аппроксимации влияния вибраций. Для этого рассматривается тестовый пример – капля воды (таблица 3.5), параметры которой хорошо изучены в литературе [176]. Далее приводится схема приложения вибрационных воздействий (рисунок 3.25) и выполняется сравнительный анализ численных и экспериментальных данных (рисунок 3.26).

Таблица 3.5. Принятые при расчете физические характеристики воды

Характеристика	Обозначение	Размерность	Значение
Плотность	ρ	кг / м^3	1000
Динамическая вязкость	η	Па · с	0,001
Коэффициент поверхностного натяжения	σ	Н / м	0,072

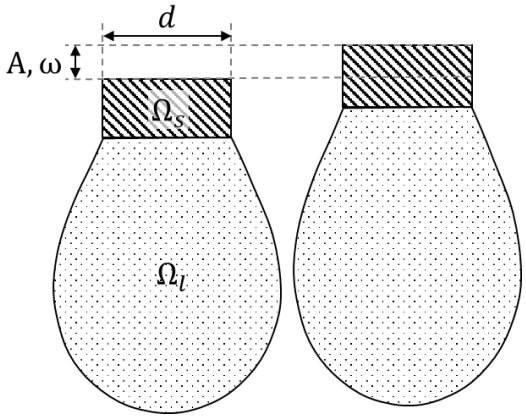


Рисунок 3.25 – Схема приложения вибрационных воздействий на каплю

В ходе исследования анализировалась зависимость коэффициента поверхностного натяжения от пиковой скорости вибрационных воздействий в диапазоне от 0 до 0,8 м/с. Результаты моделирования продемонстрировали снижение коэффициента поверхностного натяжения с увеличением пиковой скорости вибраций, при этом максимальное уменьшение данного параметра на 25 % наблюдалось при скорости 0,8 м/с. Сопоставление численных данных с экспериментальными результатами [176] показало их высокую степень согласования как в качественном, так и в количественном отношении, что подтверждает адекватность разработанной модели для описания влияния вибрационных воздействий на поверхностное натяжение (рисунок 3.26) [177].

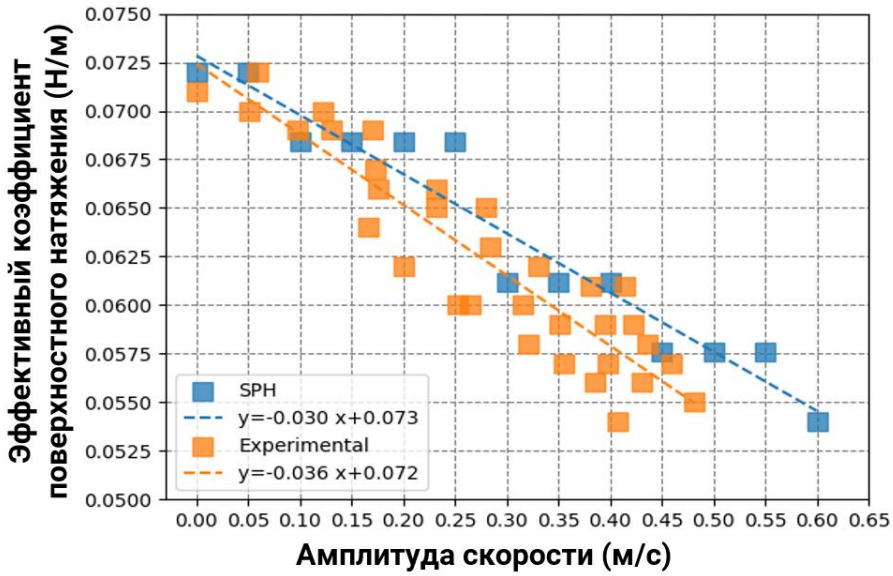


Рисунок 3.26 – Сравнение результатов экспериментальных и численных экспериментов зависимости эффективного коэффициента поверхностного натяжения воды от амплитуды скорости вибрационных воздействий

Аналогичные исследования проведены для металлических материалов, включая нержавеющую сталь 12Х18Н10Т, алюминиевый сплав АМг5 [178] и титановый сплав ВТ6. Полученные результаты продемонстрировали снижение эффективного коэффициента поверхностного натяжения с увеличением пиковой скорости вибрационных воздействий, что соответствует наблюдаемым экспериментальным данным (рисунок 3.27). Данные расчеты подтверждают, что пиковая скорость вибраций является ключевым параметром, определяющим степень уменьшения поверхностного натяжения в условиях динамических возмущений.

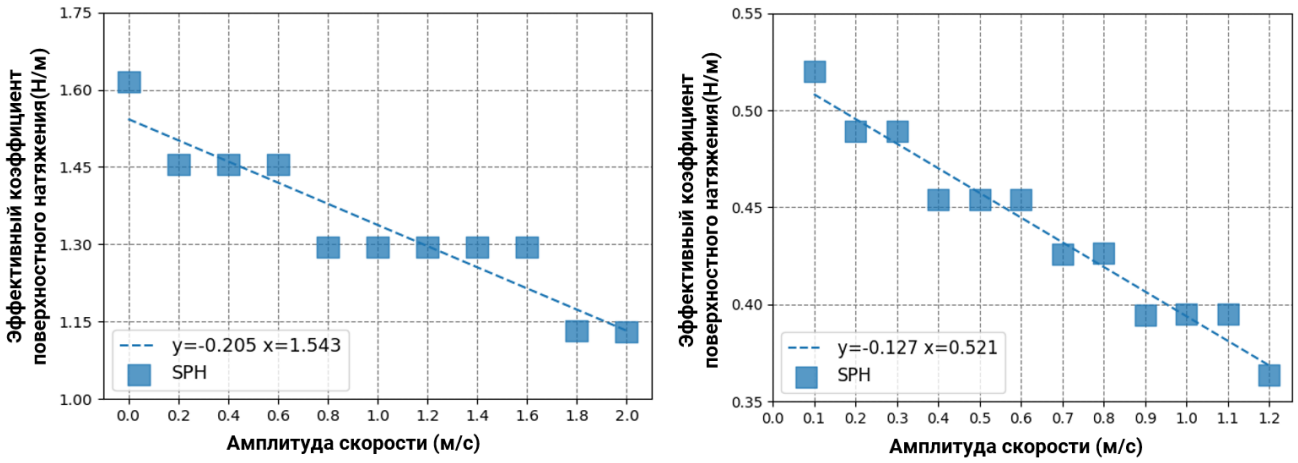


Рисунок 3.27 – Экспериментальные зависимости эффективного коэффициента поверхностного натяжения от пиковой скорости при различных частотах вибрационных воздействий: для стали 12Х18Н10Т (слева) и для алюминиевого сплава АМг5 (справа)

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 исследован процесс оплавления проволоки с последующим образованием капли металлического расплава в условиях вибрационных воздействий (рисунок 3.28).

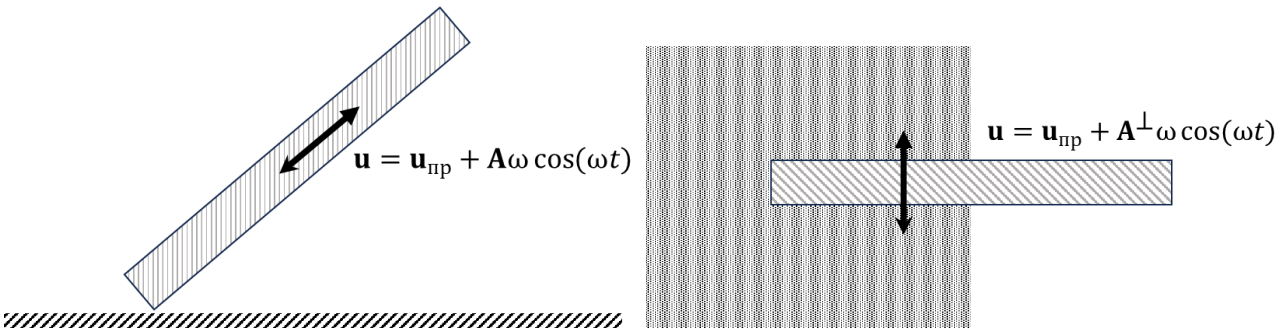


Рисунок 3.28 – Схема приложения вибрационных воздействий на проволоку

Движение проволоки осуществлялось под наклоном с заданной скоростью, при этом вибрационные воздействия моделировались путем добавления гармонической составляющей к постоянной скорости подачи проволоки в соответствии с выражением:

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

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

Таблица 3.6. Параметры процесса

Диаметр проволоки	$d_{\text{пр}}$	мм	1,2
Скорость подачи проволоки	$v_{\text{пр}}$	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	N	кГц	27

Было проведено четыре серии численных экспериментов для изучения влияния вибрационных воздействий на процесс образования капли металлического расплава из проволоки. В первой серии вибрации не вносились, и процесс происходил в стандартных условиях. Во второй серии вибрационные воздействия были направлены вдоль оси подачи проволоки, что позволило исследовать влияние продольных колебаний на процесс. В третьей серии были введены поперечные вибрации, направленные перпендикулярно движению проволоки, что позволило оценить их влияние на ширину и форму капли. В четвертой серии вибрационные воздействия не применялись, но был искусственно занижен коэффициент поверхностного натяжения для анализа его влияния на процесс формирования и отрыва капли.

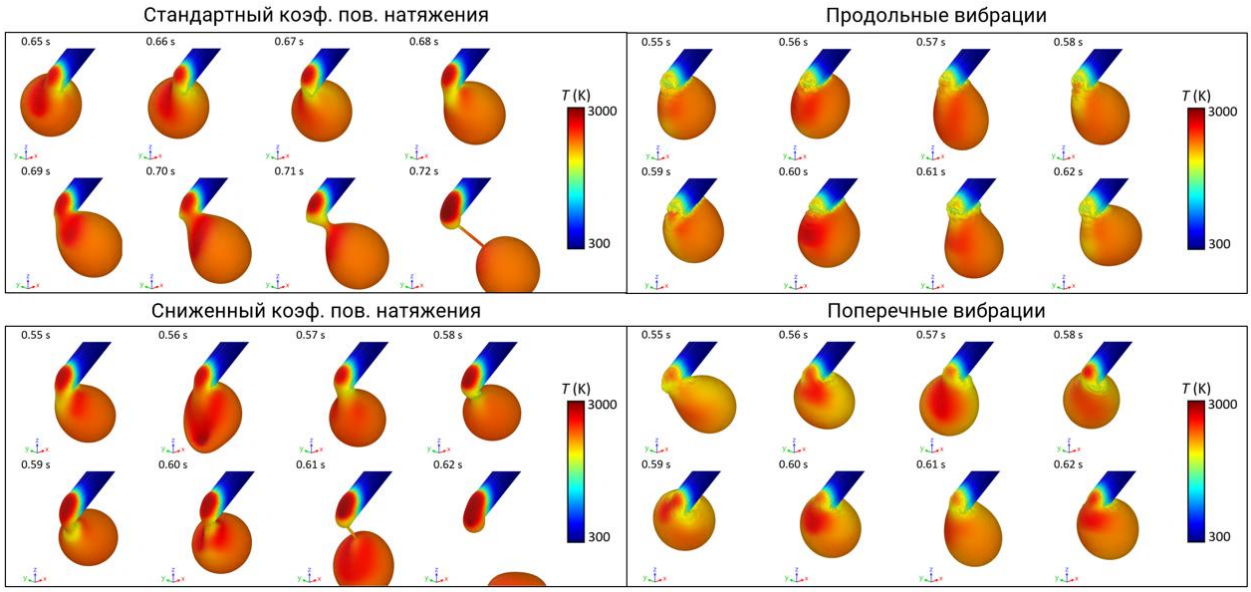


Рисунок 3.29 – Результаты моделирования процесса оплавления проволоки при различных параметрах вибрационных воздействий

Анализ полученных результатов (рисунок 3.29) демонстрирует, что введение вибрационных воздействий не эквивалентно снижению коэффициента поверхностного натяжения. Вибрации существенно изменяют структуру конвективных потоков в расплаве, формируя усредненную вибрационную силу, оказывающую влияние на систему. Процесс отрыва капли наблюдался в условиях оплавления проволоки при отсутствии вибраций как при номинальном, так и при искусственно сниженном значении коэффициента поверхностного натяжения. Однако при моделировании с учетом вибрационных воздействий отрыв капли не происходил. Существенным фактором является увеличение площади контакта между проволокой и каплей под действием вибраций, что приводит к необходимости накопления большей массы расплава для инициирования процесса отрыва.

Особый интерес представляет влияние вибрационных воздействий на характер течения расплавленного металла. Продольные колебания способствуют эффекту «соскабливания» расплава, что приводит к интенсификации массопереноса в процессе аддитивной наплавки с использованием проволочных материалов. Это, в свою очередь, способствует снижению вероятности дефектов и уменьшению ширины формируемого валика. В то же время поперечные колебания

приводят к увеличению ширины сварочного шва, что может быть целесообразно при реализации процессов присадочного производства, где требуется равномерное распределение материала.

В завершающей серии численных экспериментов проведено исследование влияния вибрационных воздействий на процесс растекания капли металлического расплава на подложке (рисунок 3.30).

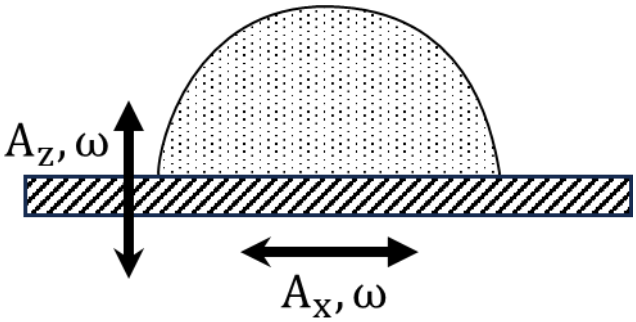


Рисунок 3.30 – Схема приложения вибрационных воздействий при моделировании растекания капли металлического расплава на подложке

В качестве модельного материала использована сталь 12Х18Н10Т. При этом в расчетах не учитывался процесс теплопроводности, что обеспечивало сохранение расплава в жидком состоянии на протяжении всего моделирования. Основной целью исследования являлось выявление различий между эффектами, обусловленными вибрационными воздействиями, и влиянием снижения эффективного коэффициента поверхностного натяжения на процесс смачивания.

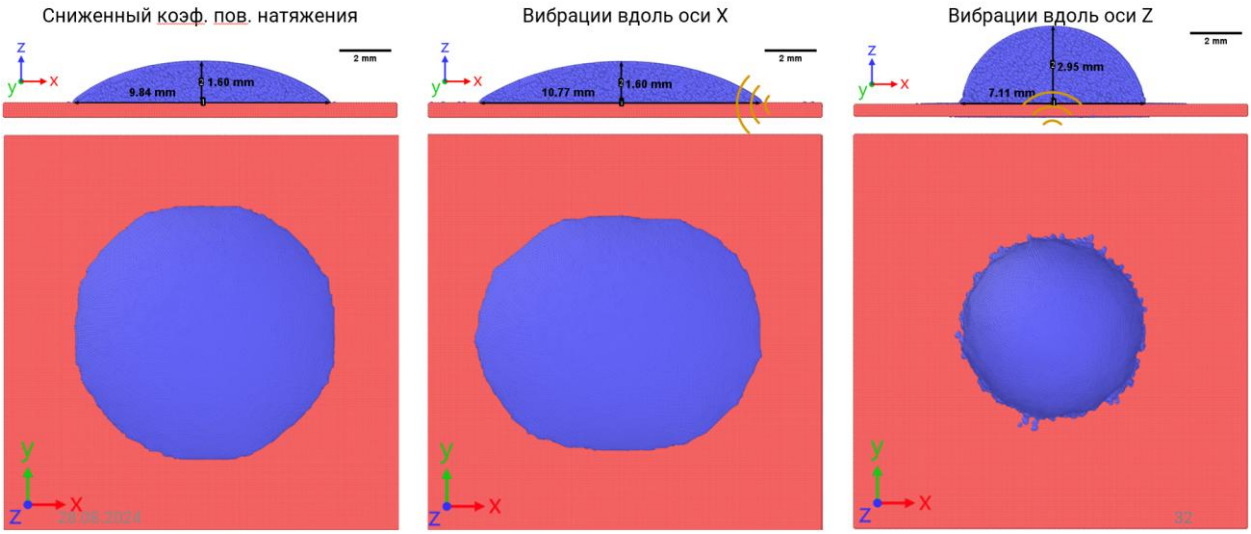


Рисунок 3.31 – Результаты численного моделирования растекания капли металлического расплава на вибрирующей подложке при различных направлениях приложения вибрационных воздействий

Результаты численных экспериментов (рисунок 3.31) показали, что вибрационные воздействия не приводят к уменьшению «силы» поверхностного натяжения, более того, наблюдается обратный эффект, заключающийся в «увеличении» силы поверхностного натяжения при вибрационном воздействии вдоль оси Z. Этот эффект можно объяснить возникновением дополнительной объемной силы, противодействующей силе тяжести, которая, в свою очередь, непосредственно влияет на форму капли.

Анализ результатов проведенных численных экспериментов показал, что моделирование вибрационных воздействий путем снижения коэффициента поверхностного натяжения позволяет частично воспроизвести макроскопические эффекты, такие как увеличение радиуса растекания капли и изменение угла смачивания. Однако в ходе анализа динамики формирования капли и течения расплава были выявлены принципиальные различия: вибрации изменяют структуру конвективных потоков, создавая дополнительные объемные силы, которые не могут быть учтены простым снижением коэффициента поверхностного натяжения.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Разработан и реализован программный комплекс для численного моделирования процесса аддитивного формирования металлических материалов методом гидродинамики сглаженных частиц. Учитывающий влияние поверхностного натяжения, термокапиллярных сил, фазовых переходов и вибрационных воздействий.

Проведена верификация модели на тестовых задачах, включая формирование капли металла и оплавление подложки, показана корректность воспроизведения ключевых физических явлений. Валидация по результатам экспериментов по проволочной наплавке стальных, титановых и алюминиевых материалов продемонстрировала расхождения, не превышающие 10–12 % по линейным размерам формируемого валика, что свидетельствует о достаточной точности модели в диапазоне технологически значимых параметров.

Разработан алгоритм калибровки коэффициента поверхностного натяжения, позволяющий учитывать температурные эффекты для различных материалов. Проведена оценка возможности математической модели корректно описывать влияние вибрационных воздействий. Проверена гипотеза о возможности аппроксимации вибрационных воздействий через снижение эффективного коэффициента поверхностного натяжения. Установлено, что для корректного описания динамических эффектов требуется прямое моделирование вибрационных воздействий.

ГЛАВА 4. ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ И НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРОЦЕССА ПРОВОЛОЧНОЙ НАПЛАВКИ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

В предыдущих главах были детально изложены теоретические основы и построена математическая модель, описывающая гидродинамическое поведение расплавленного металлического материала в процессе аддитивного формирования методом проволочной наплавки. Модель была верифицирована на тестовых задачах и валидирована посредством сопоставления с результатами предварительных экспериментальных исследований, что подтвердило ее адекватность в описании ключевых физических процессов. Настоящая глава посвящена исследованию процесса роботизированной проволочной наплавки, дополненного вибрационным воздействием. Основной задачей данной главы является анализ влияния параметров вибрационных колебаний – направления, частоты и амплитуды на формирование геометрических характеристик одиночных валиков.

В п. 4.1 подробно описана экспериментальная установка, включающая роботизированный аддитивный комплекс, оснащенный вибростолом, и систему измерения ключевых характеристик процесса. Приведена методика проведения натурных экспериментов, включая условия реализации вибрационного воздействия, а также представлены экспериментальные результаты. В п. 4.2 рассматривается численное моделирование процесса проволочной наплавки с использованием метода гидродинамики сглаженных частиц, сопровождаемое сравнительным анализом полученных численных данных и экспериментальных наблюдений.

4.1. Описание экспериментальной установки и методики проведения натурных экспериментов

Экспериментальная установка представляет собой роботизированный аддитивный комплекс для проволочной наплавки, включающий промышленный сварочный робот Fanuc ARC Mate 100iC (табл. 4.1), контроллер R-30iA, системы

дуговой (Fronius TransPlus Synergic 5000 (табл. 4.2)) и плазменной наплавки (EWM Tetrix 400 Plasma), а также ультразвуковой комплекс «Шмель» (табл. 4.3) (рис. 4.1).

Рисунок 4.1 – Общий вид рабочей зоны экспериментальной установки (слева), результат натурного эксперимента (справа)

Таблица 4.1. Технические характеристики промышленного робота Fanuc ARC Mate 100iC

Параметр	Значение
Тип запястья	Классическое запястье
Количество осей робота, шт	6
Досягаемость, мм	1420
Грузоподъемность	10
Точность / повторяемость, мм	0,08
Вес манипулятора, кг	130

Таблица 4.2. Технические характеристики источника питания Fronius TransPlus Synergic 5000

Параметр	Значение
Масса, кг	35,6
Габаритные размеры (В × Ш × Д), мм	475 × 290 × 625
Напряжение холостого хода, В	70
Максимальный сварочный ток, А	500
Минимальный сварочный ток, А	3
Диапазон рабочего напряжения, В	14,2 – 39,0
Частота сети, Гц	50 – 60

Таблица 4.3. Технические характеристики инструмента ультразвукового комплекса «Шмель»

Параметр	Значение
Собственная частота, Гц	22/27
Амплитуда перемещений, мм	0,035
Масса инструмента, кг	3,5
Габаритные размеры (В × Ш × Д), мм	455 × 180 × 75

В рамках экспериментальной программы изучалось несколько режимов вибрационного воздействия, которые отличались друг от друга направлением

колебаний. Частота колебаний во всех экспериментах соответствовала 22 кГц с амплитудой 0,035 мм. Были выделены четыре группы экспериментов: без вибраций (контрольная серия), вибрации вдоль оси X (по наплавлению наплавки), вибрации вдоль оси Y (перпендикулярно направлению наплавки), и вибрации вдоль оси Z (вертикально).

В качестве исследуемых материалов использовались три типа металлических сплавов: хромоникелевая аустенитная сталь 12Х18Н10Т, алюминиевый сплав типа АМг5 и титановый сплав типа ВТ6. В каждой серии экспериментов наплавка осуществлялась на подложку толщиной 10 мм из соответствующего материала. Аддитивное формирование образцов производилось с применением дуговой и плазменной наплавки. Каждая серия экспериментов состояла из нескольких повторных образцов для обеспечения статистической надежности.

Рисунок 4.2 – Внешний вид наплавленных валиков из алюминиевого сплава типа АМг5

Наплавка выполнялась проволокой диаметром 1,2 мм. Для наплавки хромоникелевой аустенитной стали применялась проволока OK Autrod 308LSi ESAB. Для исследований с алюминиевыми сплавами использовались проволоки 5356 ESAB и 5087 Alumat, которые являются аналогами алюминиевого сплава АМг5 (рис.4.2). Для наплавки титанового сплава использовалась проволока ВТ6 (рис. 4.3).

Рисунок 4.3 – Внешний вид наплавленных валиков из титанового сплава типа ВТ6

Угол наклона горелки к поверхности подложки во всех экспериментах выдерживался равным 0°, чтобы исключить дополнительные факторы влияния на форму наплавляемых валиков.

Маркировка образцов проводилась с учетом условий наплавки и характера ультразвукового воздействия. Образцы, полученные без ультразвукового воздействия, обозначались как образец 1. Образцы, подвергшиеся ультразвуковому воздействию с подачей колебаний горизонтально вдоль направления наплавки, маркировались как образец 2. Если ультразвуковые колебания подавались горизонтально поперек направления наплавки, образец обозначался номером 3. В случаях, когда ультразвуковое воздействие осуществлялось перпендикулярно к плоскости подложки, образцы маркировались как образец 4.

Для фиксации геометрических параметров валика по завершении каждого эксперимента проводилось визуальное наблюдение формы валика и фиксировались его основные размеры (ширина и высота над поверхностью). Макроструктура наплавленных валиков оценивалась визуально и с применением оптической микроскопии для выявления дефектов, пор и трещин (рис. 4.4). Глубина проплавления и микроструктура изучалась с использованием металлографического анализа, включающего подготовку шлифов, их травление и исследование под микроскопом для оценки зеренной структуры, выявления межкристаллитных дефектов и распределения фаз.

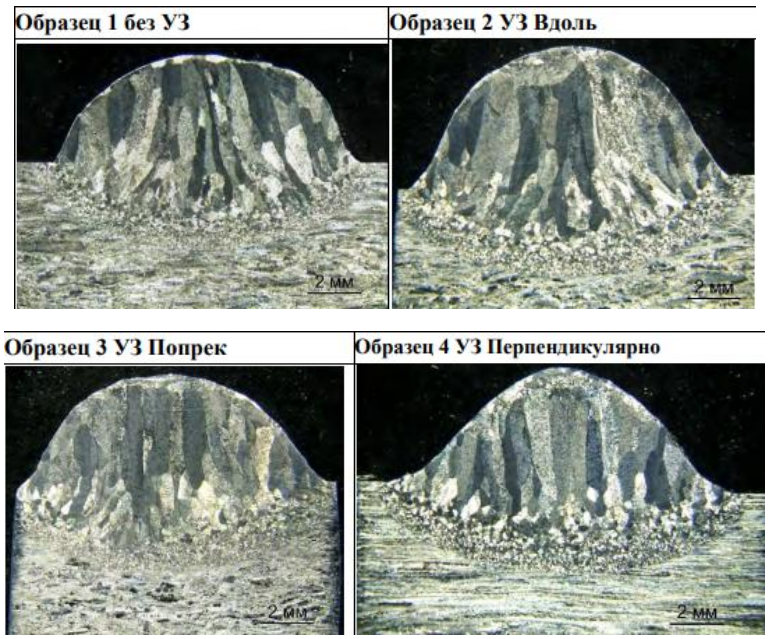


Рисунок 4.4 – Макроструктура одиночных наплавленных валиков сплава ВТ6 при дуговой наплавке с УЗ-воздействием различной направленности и без него (x5)

4.2. Анализ результатов численного моделирования: влияние параметров вибрационных воздействий на процесс проволочной наплавки

В данном разделе приводится постановка, реализация и анализ результатов численных экспериментов, выполненных в соответствии с методикой, разработанной в главах 2–3, и с учетом данных натурных экспериментов, представленных в разделе 4.1. Основной целью является исследование влияния высокочастотных вибраций, задаваемых в различных направлениях (по осям X, Y и Z), на геометрию формируемых валиков при проволочной наплавке. Результаты анализируются как с точки зрения основных геометрических параметров сформированного валика (ширина, высота, глубина проплавления), так и с точки зрения конвективных потоков расплавленного металла. Выявляются ключевые эффекты, обусловленные вибрационным воздействием, и сопоставляются с результатами, полученными при натурных экспериментах. В работе проведено три серии численных экспериментов для трех различных материалов, часто используемых при сварке и аддитивных технологиях: алюминий марки АМг5, сталь 12Х18Н10Т, титан ВТ6.

Отличие этих материалов по плотности, вязкости, температуре плавления и другим физическим свойствам дает возможность проверить универсальность предложенной математической модели и понять, насколько вибрационные воздействия по-разному влияют на конвекцию жидкого металла в ванне расплава и конечную форму наплавляемых валиков при различных сочетаниях теплофизических параметров. Для воспроизведения технологических параметров использовались режимы, максимально приближенные к описанным в разделе 4.1: толщина подложки, скорость подачи проволоки, сварочный ток и напряжение, скорость перемещения горелки и т. д.

Для моделирования процесса проволочной наплавки аустенитной стали 12Х18Н10Т (табл. 4.4) были проведены три численных эксперимента с различными условиями вибрационного воздействия. В первом эксперименте процесс наплавки моделировался без введения колебаний, что позволило сформировать базовый случай для последующего сравнения (рис. 4.5). Во втором эксперименте вибрационные воздействия были введены посредством модуляции мощности теплового источника с частотой 10 кГц, при этом амплитуда изменения мощности составляла 80% от номинального значения. Третий эксперимент предусматривал введение механических колебаний непосредственно через подложку (вертикально, вдоль оси Z) с амплитудой 0,035 мм и частотой 22 кГц.

Таблица 4.4. Принятые при расчете теплофизические характеристики материала 12Х18Н10Т

Характеристика	Обозначение	Размерность	Значение
Температура ликвидус	T_L	°C	1450
Температура солидус	T_S	°C	1420
Температура кипения	T_v	°C	2900
Удельная теплоемкость	C	Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$	502
Плотность	ρ	кг·м$^{-3}$	7680
Теплопроводность	λ	Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$	26
Скрытая теплота плавления	H_f	Дж/кг	276000
Скрытая теплота испарения	H_v	Дж/кг	6250000
Динамическая вязкость	μ	Па·с	0,007
Коэффициент пов. натяжения	σ	Н·м$^{-1}$	1,615
Темп. коэф. поверхностного нат.	$\gamma = \partial\sigma/\partial T$	Н·м$^{-1}$·К$^{-1}$	–0,00043

Основные параметры процесса наплавки включали использование проволоки диаметром 1,2 мм, подачу материала со скоростью 30 мм/с, а также тепловой

источник мощностью 1000 Вт с диаметром пятна 3 мм. Размер подложки составлял 10×20×5 мм, а скорость перемещения горелки была установлена на уровне 15 мм/с.

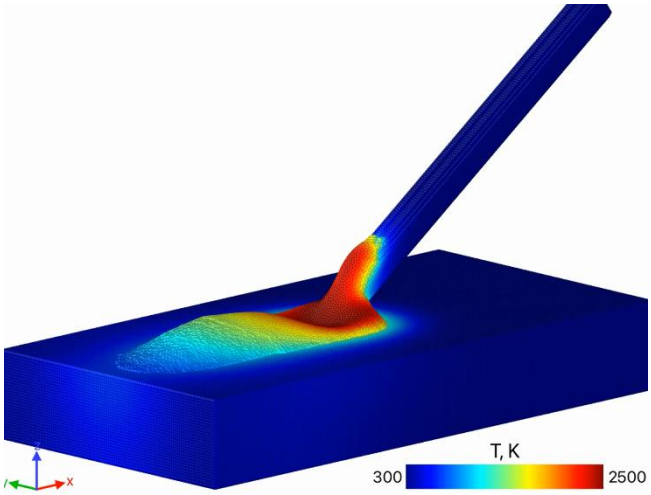


Рисунок 4.5 – Визуализация процесса наплавки проволоки 12Х18Н10Т

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 4.6) [179].

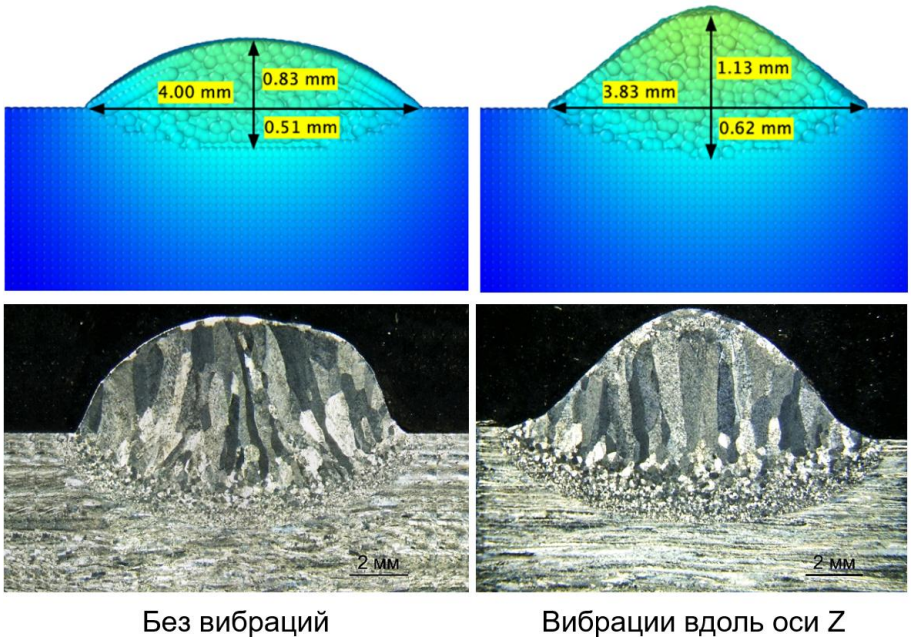


Рисунок 4.6 – Сравнение результатов численного и натурного эксперимента при одинаковых параметрах вибрационных воздействий: без вибраций (слева) с вибрационными воздействиями вдоль оси Z (справа)

На следующем этапе исследований была проведена серия численных экспериментов по моделированию процесса наплавки алюминиевого сплава АМг5 (табл. 4.5). Рассматривались два варианта наплавки: дуговая наплавка и плазменная наплавка. В обоих случаях вибрационные воздействия вводились непосредственно через подложку с амплитудой 35 мкм и частотой 22 кГц.

Таблица 4.5. Принятые при расчете теплофизические характеристики материала АМг5

Характеристика	Обозначение	Размерность	Значение
Температура ликвидус	T_L	°C	638
Температура солидус	T_S	°C	568
Температура кипения	T_v	°C	2500
Удельная теплоемкость	C	Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$	900
Плотность	ρ	кг·м$^{-3}$	2650
Теплопроводность	λ	Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$	120
Скрытая теплота плавления	H_f	Дж/кг	397000
Скрытая теплота испарения	H_v	Дж/кг	284100
Динамическая вязкость	μ	Па·с	0,002
Коэффициент пов. натяжения	σ	Н·м$^{-1}$	0,520
Темп. коэф. поверхностного нат.	$\gamma = \partial\sigma/\partial T$	Н·м$^{-1}$·К$^{-1}$	–0,000827

Параметры процесса дуговой наплавки представлены в таблице 4.6, в таблице 4.7 представлены параметры численного расчета.

Таблица 4.6. Параметры процесса дуговой проволочной наплавки материала АМг5

Диаметр проволоки	d	мм	1,2
Скорость подачи проволоки	$\mathbf{v}_{wire}$	мм/с	13,0
Размер подложки	(Ш х Д х В)	мм мм мм	10 х 27 х 10
Скорость наплавки	$\mathbf{v}_{sub}$	мм/с	8,5
Мощность источника тепла	Q	Вт	1400
Диаметр источника тепла	d_Q	мм	3,0

Таблица 4.7. Параметры численного моделирования процесса дуговой проволочной наплавки материала АМг5

Параметр дискретизации	h	мм	0,1
Количество частиц	n	шт	1 707 786
Шаг по времени	dt	с	2,5e-06
Количество шагов	N	шт	1 000 000
Физическое время	t	с	0,25
Время расчета	t	ччч:мм:сс	190:47:12

Ниже приведена визуализация моделирования процесса дуговой проволочной наплавки (рисунок 4.7).

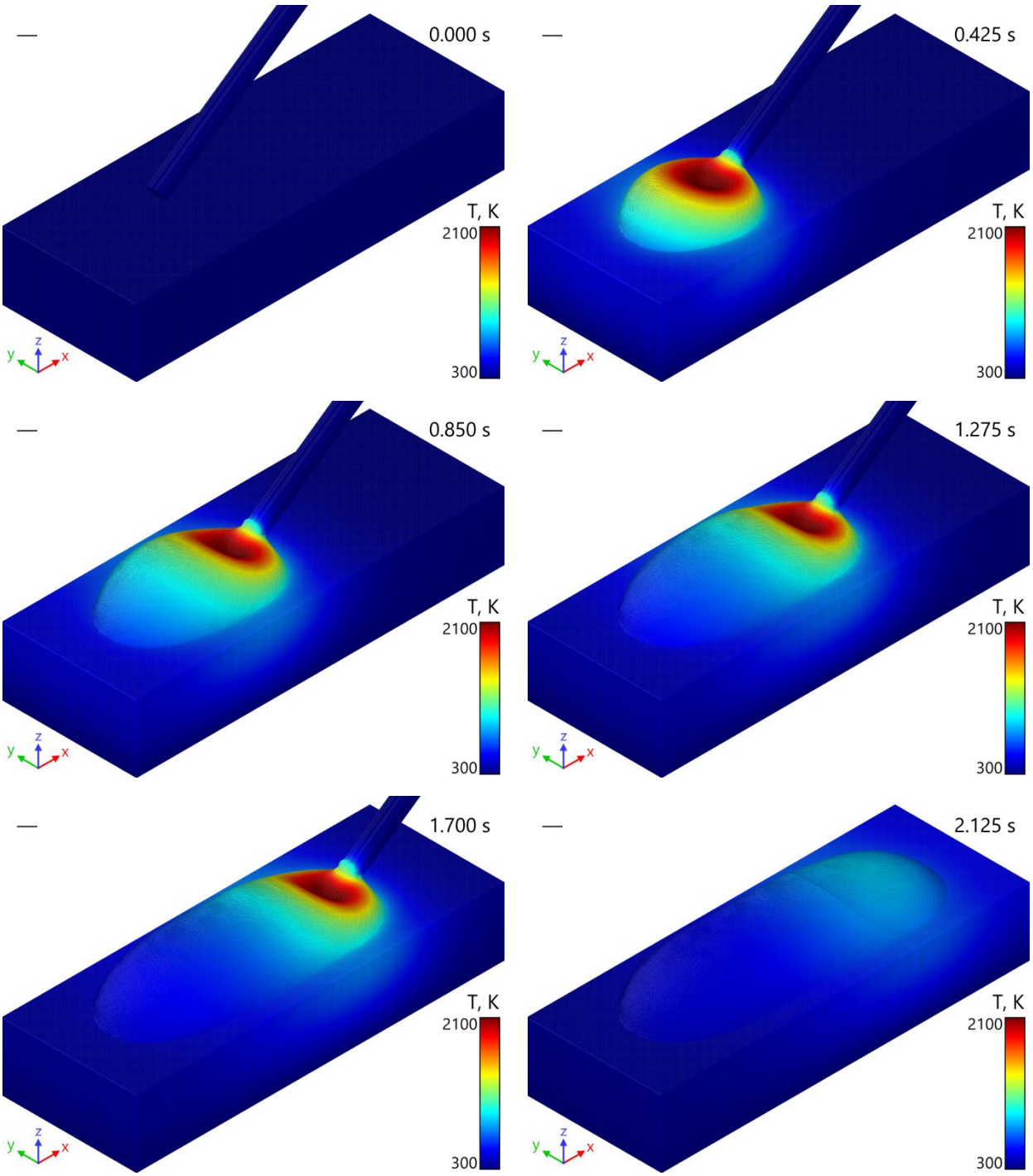


Рисунок 4.7 – Визуализация процесса дуговой проволочной наплавки материала АМг5

В каждой серии экспериментов рассматривались четыре режима вибрационного воздействия: отсутствие вибраций, вибрации вдоль оси X (вдоль направления наплавки), вдоль оси Y (перпендикулярно направлению наплавки) и вдоль оси Z (вертикально к подложке).

Таблица 4.8. Параметры вибрационных воздействий

Амплитуда вибрационных воздействий	A	мкм	35			
Частота вибрационных воздействий	ν	кГц	22			
Направление вибрационных воздействий	-	-	-	X	Y	Z

Результаты математического моделирования хорошо согласуются с разультатами натурных экспериментов. Наибольшая погрешность наблюдается в глубине проплавления (табл. 4.11).

Таблица 4.9. Геометрические характеристики наплавленных валиков: дуговая наплавка

Направление ВВ	***b, мм***				***h, мм***				***g, 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 значительное влияние вибрационных воздействий на геометрические характеристики наплавляемых валиков. При этом есть зависимость геометрических характеристик от направления приложения вибрационных воздействий. Так вибрационные воздействия в направлении наплавки (по оси X) приводят к уменьшению ширины валика с 7,4 мм до 5,6 мм и глубины проплавления с 1,6 мм до 1,1 мм. А вибрационные воздействия направленные с поверхности подложки ведут к увеличению глубины проплавления с 1,6 мм до 2,0 мм. При этом высота валика остается практически неизменной для всех направлений вибраций, варьируясь от 3,3 мм до 3,8 мм. Полученные численные результаты согласуются с данными наутрных экспериментов.

В результате детального анализа результатов численных экспериментов удалось выяснить, что направление вибраций существенно влияет на перемешивание материалов проволоки и подложки, что можно наблюдать на поперечных шлифах (рисунок 4.8), где синие частицы представляют проволоку, а красные – подложку.

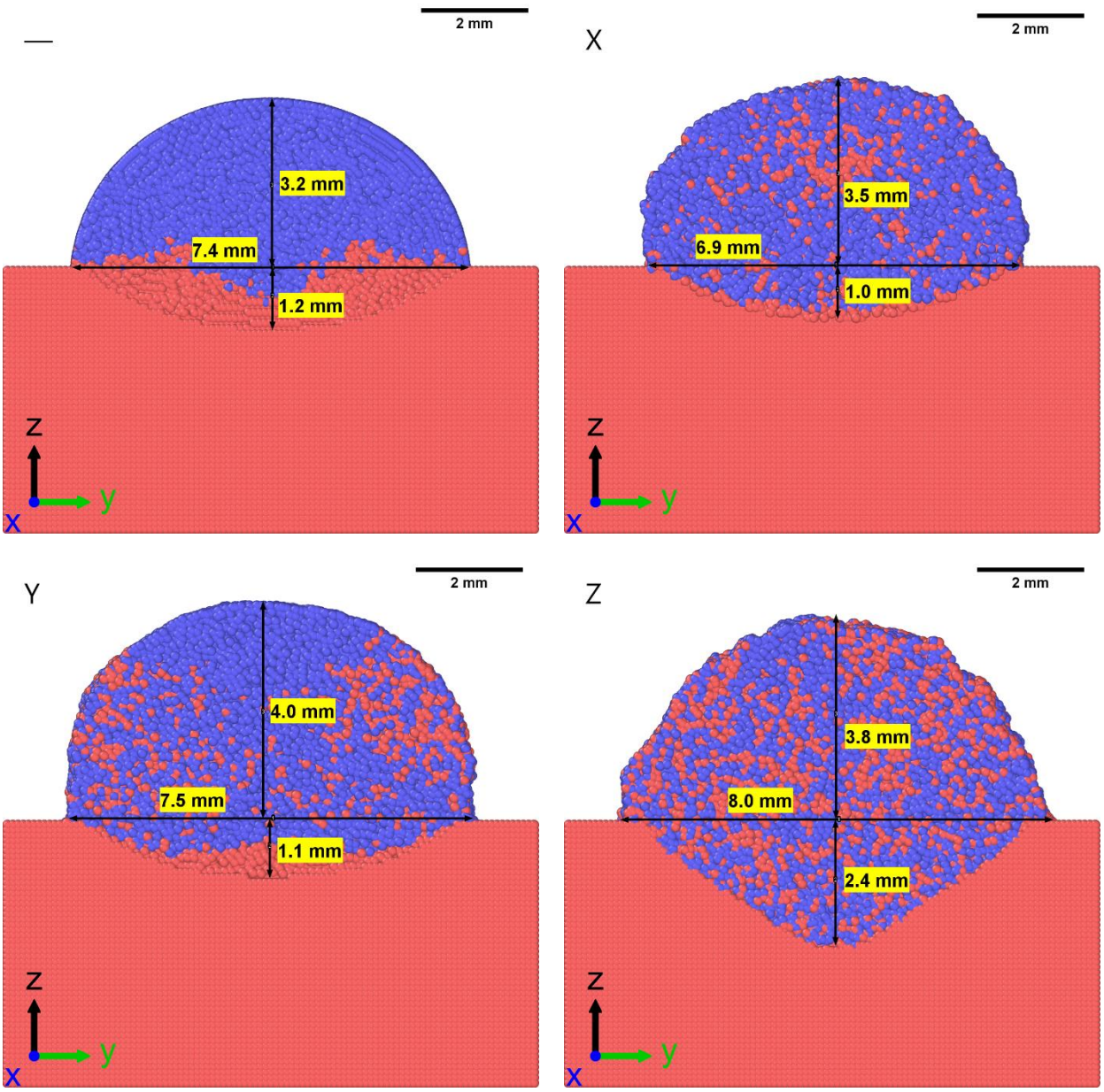


Рисунок 4.8 – Результаты численных экспериментов по моделирования процесса дуговой проволочной наплавки при различных направлениях вибрационных воздействий: размеры наплавленных валиков в разрезе

Анализ конвекционных потоков жидкого 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 (рисунок 4.9). Таким образом, вибрационные воздействия оказывают значительное влияние на процесс наплавки, улучшая тепломассоперенос и качество наплавляемых одиночных валиков.

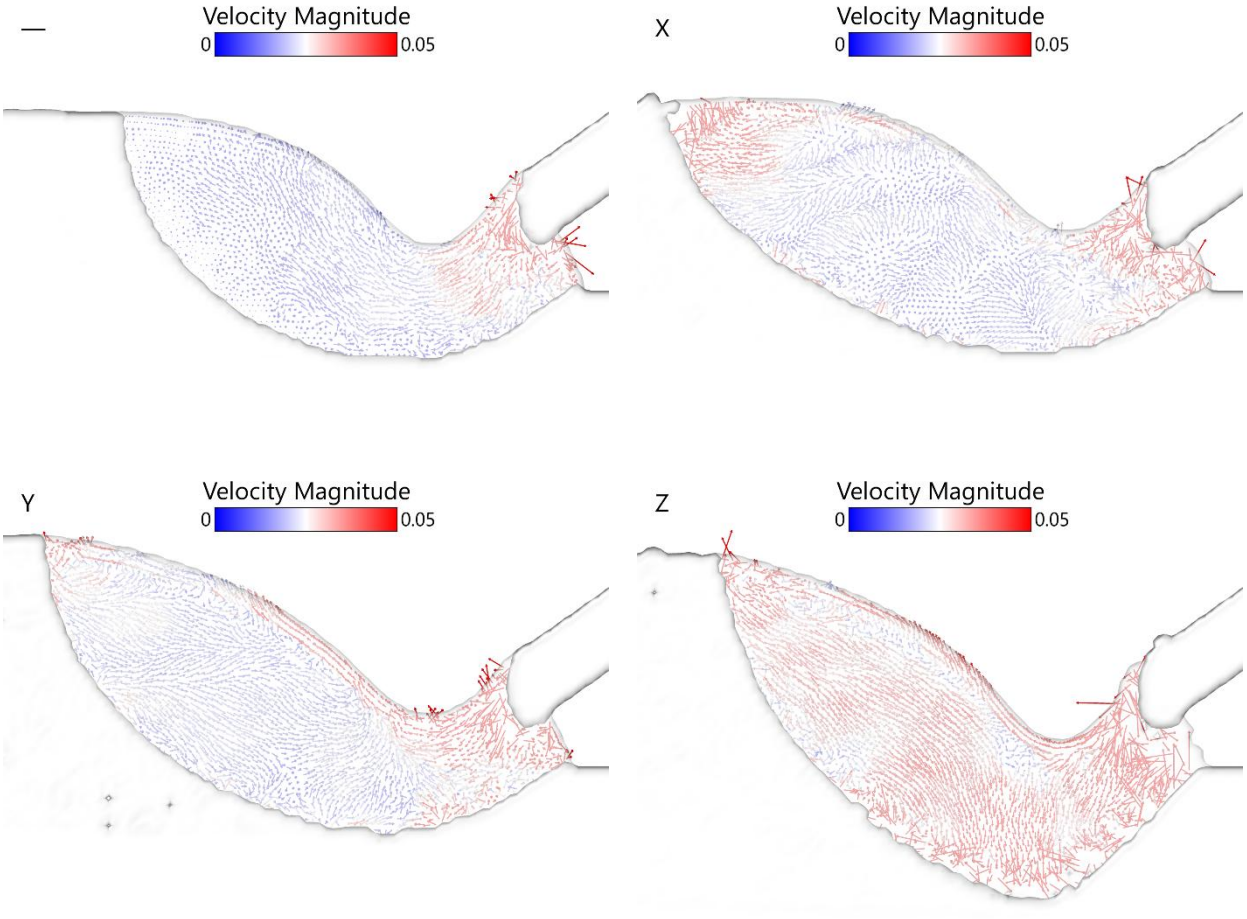


Рисунок 4.9 – Результаты численных экспериментов по моделирования процесса проволочной наплавки при различных направлениях вибрационных воздействий: визуализация конвективных потоков в ванне расплава

Во второй серии численных экспериментов было исследовано влияние вибрационных воздействий на геометрию формируемого валика в процессе плазменной наплавки.

Таблица 4.10. Параметры процесса плазменной проволочной наплавки материала АМг5

Диаметр проволоки	d	мм	1,2
Скорость подачи проволоки	$\mathbf{v}_{wire}$	мм/с	5,5
Размер подложки	(Ш х Д х В)	мм мм мм	15 х 35 х 10
Скорость наплавки	$\mathbf{v}_{sub}$	мм/с	0,42
Мощность источника тепла	Q	Вт	2500
Диаметр источника тепла	d_Q	мм	10,0

Таблица 4.11. Параметры численного моделирования процесса

Параметр дискретизации	h	мм	0,2
Количество частиц	n	шт	387 479
Шаг по времени	dt	с	5,0e-06
Количество шагов	N	шт	960 000
Физическое время	t	с	4,80
Время расчета	t	ччч:мм:сс	039:04:17

Ниже приведена визуализация моделирования процесса плазменной проволочной наплавки материала АМг5 (рис. 4.10).

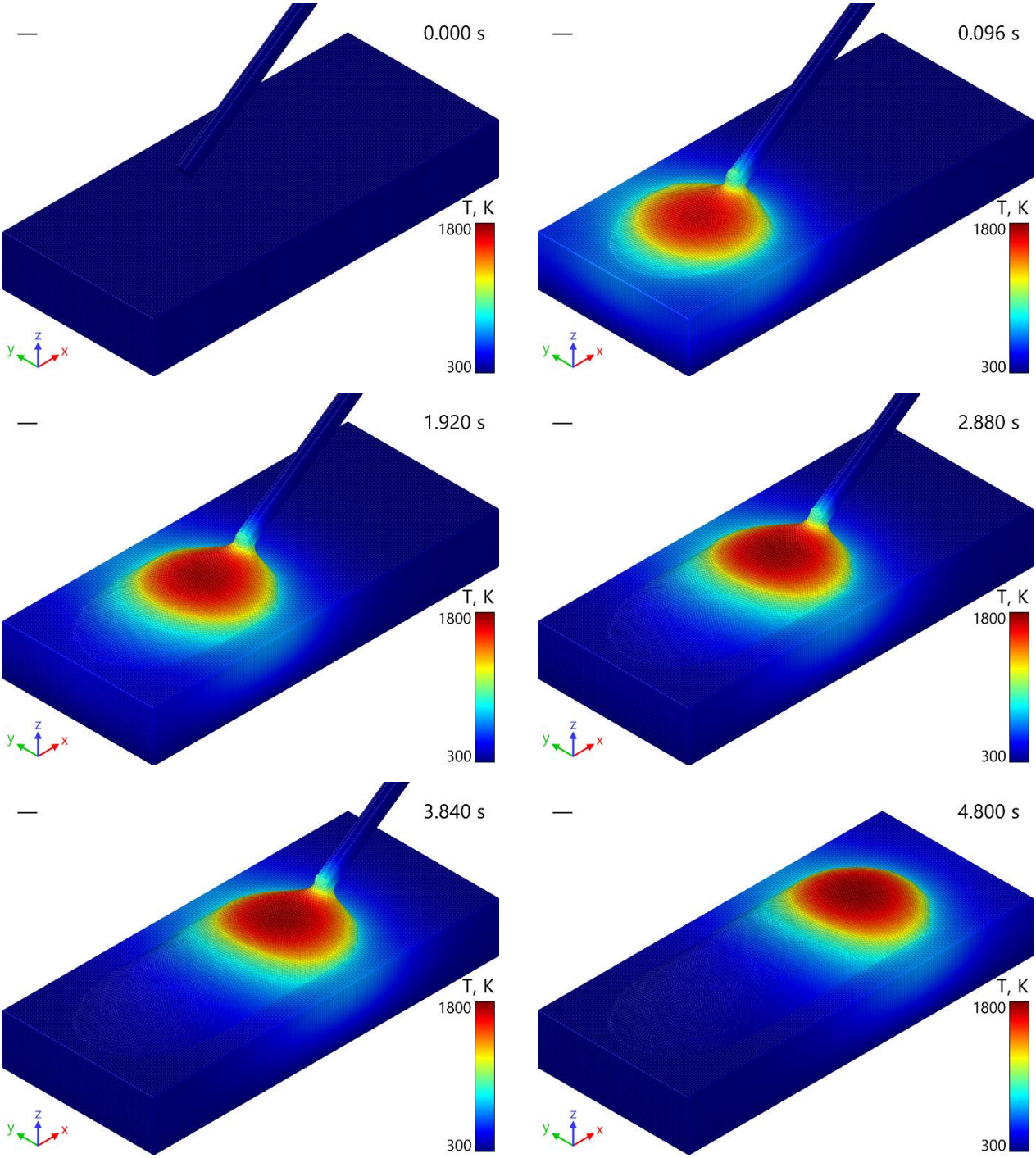


Рисунок 4.10 – Визуализация процесса плазменной проволочной наплавки материала АМг5

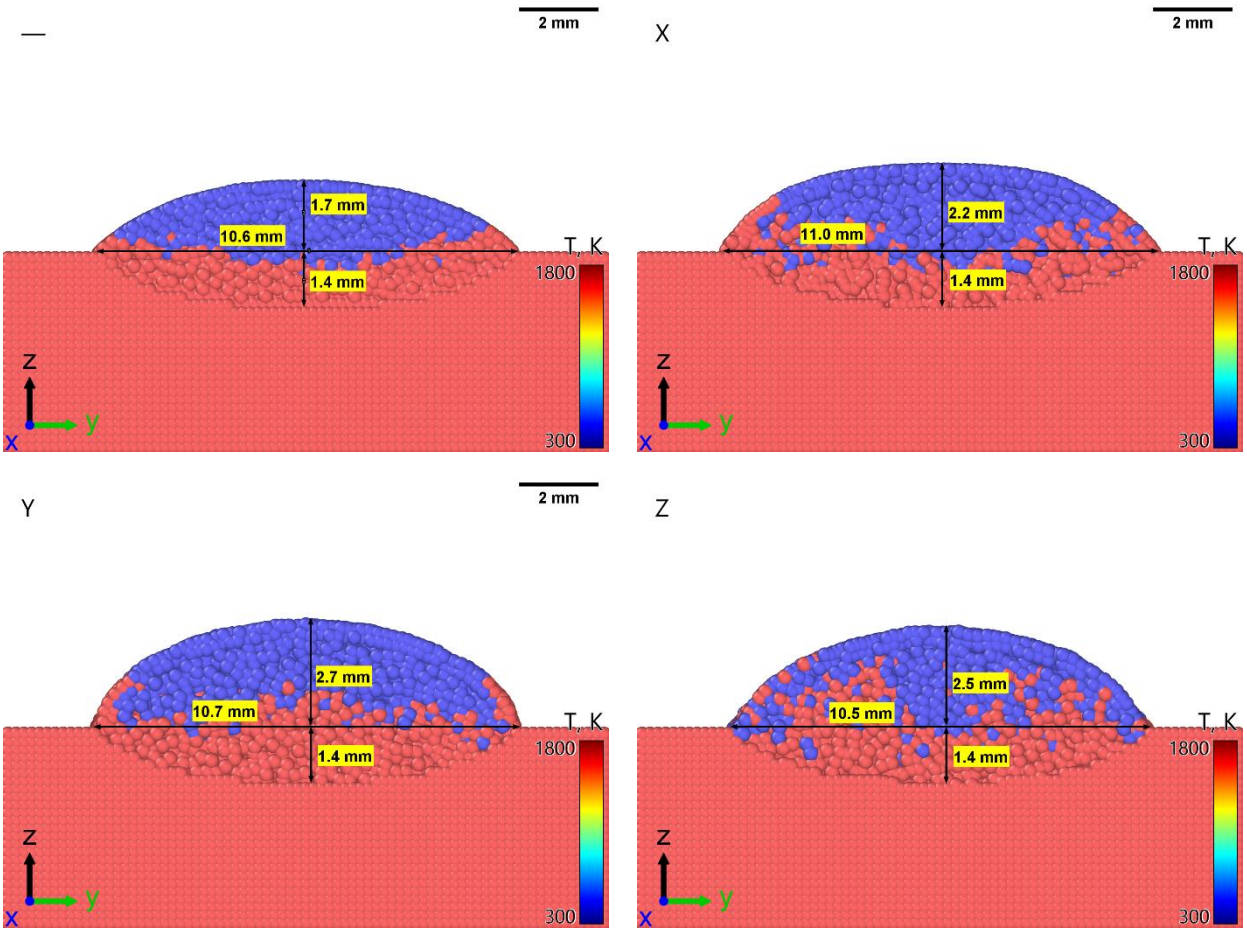


Рисунок 4.11 – Результаты численных экспериментов по моделирования процесса плазменной проволочной наплавки при различных направлениях вибрационных воздействий: размеры наплавленных валиков в разрезе

Таблица 4.12. Геометрические характеристики наплавленных валиков: плазменная наплавка

Направление ВВ	***b, мм***				***h, мм***				***g, мм***			
	ЧМ	НЭ	Δ	ε	ЧМ	НЭ	Δ	ε	ЧМ	НЭ	Δ	ε
Без ВВ	10,6	10,9	0,3	3%	1,7	1,7	0	0%	1,4	1,6	0,2	13%
ВВ x	11,0	9,9	1,1	11%	2,1	1,9	0,2	11%	1,4	1,4	0	0%
ВВ y	10,7	12,8	2,1	16%	2,6	1,3	1,3	100%	1,4	4,1	2,7	66%
ВВ z	10,5	10,1	0,4	4%	2,4	1,8	0,6	33%	1,4	2,3	0,9	39%

Результаты математического моделирования для плазменной наплавки казалось менее выраженным, что может быть связано с более высоким тепловложением и сниженной чувствительностью процесса к дополнительным механическим колебаниям. Также было отмечено, что результаты моделирования для плазменной наплавки показали более низкую степень согласованности с экспериментальными данными, что, вероятно, связано с упрощениями в моделировании плазменного источника.

Далее было исследовано влияние вибрационных воздействий на процесс проволочной наплавки титанового сплава ВТ6 (табл. 4.13). В ходе численных

экспериментов также рассматривалась наплавка одиночных валиков в условиях вибрационного воздействия.

Таблица 4.13. Принятые при расчете теплофизические характеристики материала ВТ6

Характеристика	Обозначение	Размерность	Значение
Температура ликвидус	T_L	°C	1660
Температура солидус	T_S	°C	1600
Температура кипения	T_v	°C	3300
Удельная теплоемкость	C	Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$	564
Плотность	ρ	кг·м$^{-3}$	4540
Теплопроводность	λ	Вт·м$^{-1}$·К$^{-1}$	7
Скрытая теплота плавления	H_f	Дж/кг	18800
Скрытая теплота испарения	H_v	Дж/кг	422600
Динамическая вязкость	μ	Па·с	0,0042
Коэффициент пов. натяжения	σ	Н·м$^{-1}$	1,640
Темп. коэф. поверхностного нат.	$\gamma = \partial\sigma/\partial T$	Н·м$^{-1}$·К$^{-1}$	0,000430

Технологические параметры процесса проволочной наплавки представлены в таблице 4.14, параметры численного расчета – в таблице 4.15.

Таблица 4.14. Параметры процесса дуговой проволочной наплавки материала ВТ6

Диаметр проволоки	d	мм	1,2
Скорость подачи проволоки	$\mathbf{v}_{wire}$	мм/с	13,0
Размер подложки	(Ш х Д х В)	мм мм мм	10 х 27 х 10
Скорость наплавки	$\mathbf{v}_{sub}$	мм/с	8,5
Мощность источника тепла	Q	Вт	1800
Диаметр источника тепла	d_Q	мм	3,0

Таблица 4.15. Параметры численного моделирования процесса

Параметр дискретизации	h	мм	0,1
Количество частиц	n	шт	1 671 169
Шаг по времени	dt	с	2,5e-06
Количество шагов	N	шт	1 000 000
Физическое время	t	с	2,5
Время расчета	t	ччч:мм:сс	175:12:01

Вибрационные воздействия вводились через подложку с амплитудой 35 мкм и частотой 22 кГц. Рассматривались четыре сценария: отсутствие вибраций и вибрации, направленные вдоль осей X, Y и Z. Результаты моделирования показали, что вибрационные воздействия, направленные перпендикулярно подложке (по оси Z), способствуют усилению конвективных потоков в сварочной ванне и увеличению глубины зоны проплавления. Вибрации, направленные вдоль осей X и Y, оказывали противоположный эффект, снижая глубину проплавления за счет

перераспределения потоков и уменьшения тепловложений в корень валика (рисунок 4.13).

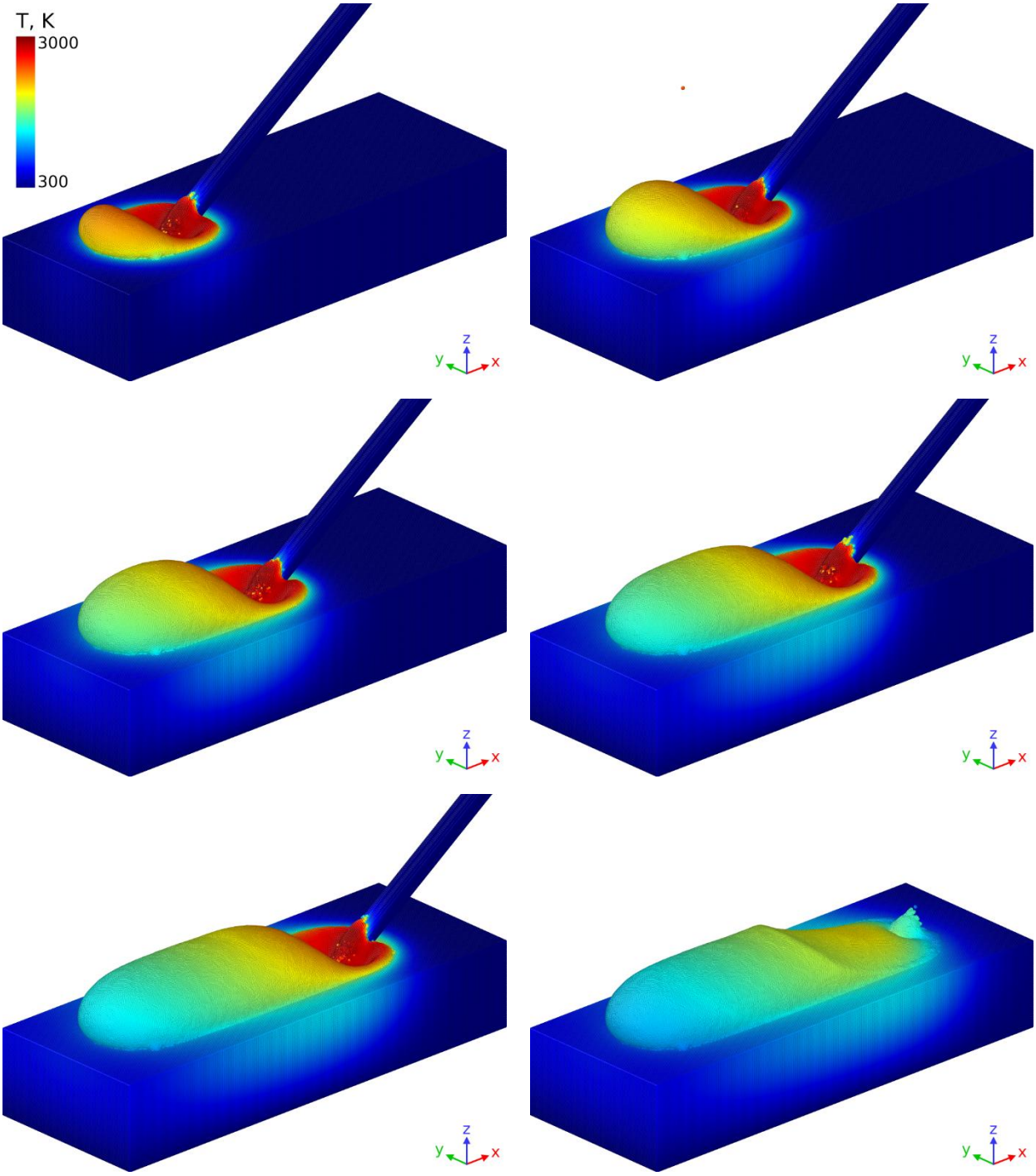
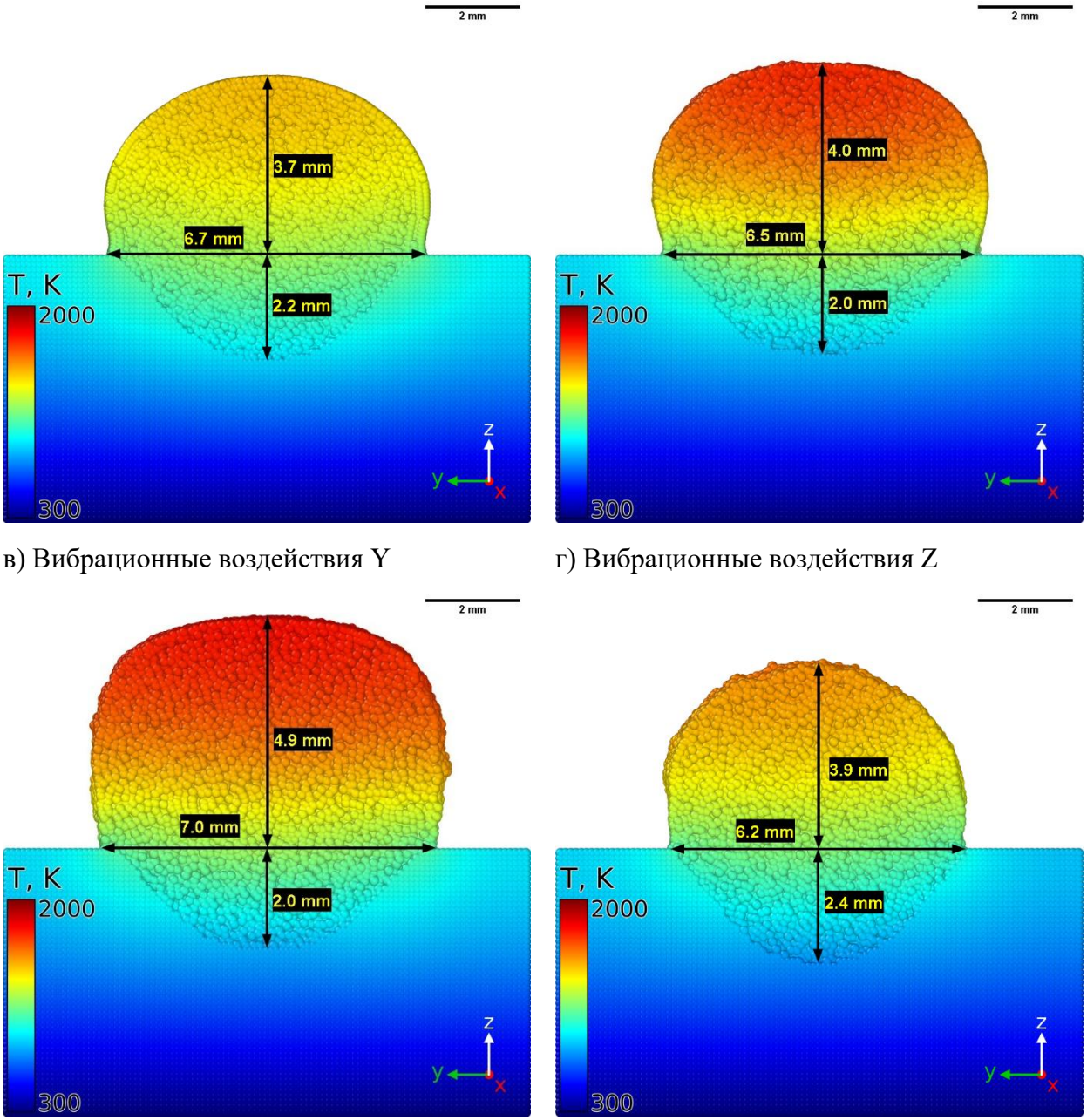


Рисунок 4.12 – Визуализация процесса дуговой проволочной наплавки материала ВТ6

Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальных данных показал соответствие по основным геометрическим характеристикам наплавленных валиков, особенно в случае моделирования процессов для титана и аустенитной стали. Наблюдавшиеся расхождения, преимущественно связанные с

глубиной проплавления, могут быть объяснены ограничениями модели, в частности, упрощением описания теплового источника.

а) Без вибрационных воздействий б) Вибрационные воздействия X



в) Вибрационные воздействия Y г) Вибрационные воздействия Z

Рисунок 4.13 – Результаты численных экспериментов по моделирования процесса дуговой проволочной наплавки ВТ6 при различных направлениях вибрационных воздействий: размеры наплавленных валиков в разрезе

Таким образом, проведенные исследования подтверждают, что выбранная стратегия моделирования, основанная на методе сглаженных частиц (SPH) с учетом вибрационных воздействий в виде граничных смещений подложки, гидродинамики расплава, поверхностного натяжения и теплопроводности,

позволяет воспроизводить процесс формирования ванны расплава с удовлетворительной степенью точности. Модель эффективно описывает основные закономерности, включая увеличение глубины проплавления при колебаниях по оси Z и изменения формы валика при вибрациях по осям X и Y, что делает ее перспективным инструментом для дальнейших исследований и оптимизации технологий аддитивного формирования.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Проведенные натурные и численные эксперименты подтвердили значительное влияние параметров вибрационных воздействий (направления, частоты и амплитуды) на формирование наплавленных валиков.

Анализ динамики расплава показал, что вибрационные воздействия существенно интенсифицируют тепломассоперенос. Колебания, направленные перпендикулярно поверхности подложки, способствуют увеличению глубины проплавления и улучшенному перемешиванию расплава, тогда как вибрации вдоль осей X и Y приводят к изменению формы валика и перераспределению потоков, что в отдельных случаях может снижать глубину проплавления.

Выявлен и описан механизм изменения глубины проплавления за счет повышения эффективности теплопереноса вследствие изменения интенсивности термокапиллярных течений в ванне расплава под воздействием вибраций.

Результаты исследования подтвердили адекватность разработанной численной модели для прогнозирования влияния вибрационных воздействий и оптимизации параметров проволочной наплавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных в работе исследований могут быть сделаны следующие выводы.

1. Проанализированы методы математического моделирования процессов проволочной 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 проволочной 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 проволочной 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 термокапилярных течений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Armstrong M., Mehrabi H., Naveed N. An overview of modern metal additive manufacturing technology // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 84. – P. 1001-1029. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.10.060

2. Ding D. H., Pan Z. X., Cuiuri D., Li H. J. Wire-feed Additive Manufacturing of Metal Components: Technologies, Developments and Future Interests // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. Vol. 81, No. 1-4. – P. 465-481. DOI: 10.1007/s00170-015-7077-3

3. Wei H.L.,Mukherjee T., Zhang W., Zuback J.S., Knapp G.L., De A., DebRoy T. Mechanistic models for additive manufacturing of metallic components // Progress in Materials Science. – 2021. – Vol. 116. – 100703. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100703

4. Kudryashova O., Khmeleva M., Danilov P., Dammer V., Vorozhtsov A., Eskin D. Optimizing the Conditions of Metal Solidification with Vibration // Metals. – 2019. – Vol. 9, No. 3. – P. 366-379. DOI: 10.3390/met9030366

5. Zargari H.H., Ito K., Sharma A. Effect of workpiece vibration frequency on heat distribution and material flow in the molten pool in tandem-pulsed gas metal arc welding // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 129. – P. 2507-2522. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2496490/v1

6. Weng-Long D. Effects of high-intensity ultrasonic-wave emission on the weldability of aluminum alloy 7076-T6 // Materials Letters. – 2003. – Vol. 57. – P. 2447-2454. DOI: 10.1016/S0167-577X(02)01262-4

7. Krajewski A., Wlosinski W., Chmielewski T., Kolodziejczak P. Ultrasonic-vibration assisted arc-welding of aluminum alloys // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. – 2012. – Vol. 60, No. 4. – P. 841-852. DOI: 10.2478/v10175-012-0098-2

8. Кривоносова Е.А., Щицын Ю.Д., Акулова С.Н., Мышкина А.В., Неулыбин С.Д., Белинин Д.С. Снижение дефектности жаропрочных никелевых сплавов в технологиях наплавки // Вестник Пермского национального исследовательского Политехнического Университета. Машиностроение и материаловедение. – 2018. – №2. – С. 12-19. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.2.02

9. Morrow W.R., Qi H., Kim I., Mazumder J., Skerlos S.J. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing // Journal of Cleaner Production. – 2007. – Vol. 15, No. 9. – P. 932-943. DOI: 10.1016/j.jclepro.2005.11.030

10. Wray P. Additive Manufacturing: Turning Manufacturing Inside Out // American Ceramic Society Bulletin. – 2014. – Vol. 93, No. 3 – P. 17-23.

11. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. ASTM F2792-12a (2013). – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013. – 9 p.

12. Ding J., Colegrove P., Mehnen J., Ganguly S., Almeida P.M.S., Wang F. Thermo-mechanical Analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing Process on Large Multi-layer Parts // Computational Materials Science. – 2011. – Vol. 50, No. 12. – P. 3315-3322. DOI: 10.1016/j.commatsci.2011.06.023

13. Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire plus arc additive manufacturing // Materials Science and Technology. – 2016. – Vol. 37. – P. 641-647. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000073

14. Xiong J., Lei Y.Y., Chen H., Zhang G.J. Fabrication of Inclined Thin-walled Parts in Multi-layer Single-pass GMAW-based Additive Manufacturing with Flat Position Deposition // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 240. – P. 397-403. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.10.019

15. Bhavar V., Kattire P., Patil V., Khot S., Gujar K., Singh R. A. Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing // In 4th International Conference and Exhibition on Additive Manufacturing Technologies. – 2014. – P. 251-253. DOI: 10.1201/ 9781315119106-15

16. Jamshidinia M., Sadek A., Wang W., Kelly S. Additive Manufacturing of Steel Alloys Using Laser Powder-bed Fusion // Advanced Materials and Processes. – 2015. – Vol. 173, No. 1 – P. 20-24. DOI: 10.31399/asm.amp.2015-01.p020

17. Kamath C., El-dasher B., Gallegos G.F., King W.E., Sisto A. Density of Additively-manufactured 316L SS Parts Using Laser Powder-bed Fusion at Powers up to 400 W // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 74, No. 1. – P. 65-78. DOI: 10.1007/s00170-014-5954-9

18. Khairallah S.A., Anderson A.T., Rubenchik A., King W.E. Laser Powder-bed Fusion Additive Manufacturing: Physics of Complex Melt Flow and Formation Mechanisms of Pores, Spatter, and Denudation Zones // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 108. – P. 36-45. DOI:10.1016/j.actamat.2016.02.014

19. Mower T.M., Long M.J. Mechanical Behavior of Additive Manufactured Powder-bed Laser-fused Materials // Materials Science and Engineering A. – 2016. – Vol. 651. – P. 198-213. DOI: 10.1016/j.msea.2015.10.068

20. King W., Anderson A., Ferencz R., Hodge N., Kamath C., Khairallah S. Overview of Modelling and Simulation of Metal Powder Bed Fusion Process at Lawrence Livermore National Laboratory // Materials Science and Technology. – 2015. – Vol. 31, No. 8. – P. 957-968. DOI: 10.1179/1743284714Y.0000000728

21. Wu A., Brown D., Kumar M., Gallegos G., King W. An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2014. – Vol. 45A. – P. 1-11. DOI: 10.1007/s11661-014-2549-x

22. Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. Additive Manufacturing of Ti–6Al–4V Components by Shaped Metal Deposition: Microstructure and Mechanical Properties // Materials & Design. – 2010. – Vol. 31. – P. 106-111. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.11.032

23. Riedlbauer D., Mergheim J., McBride A., Steinmann P. Macroscopic Modelling of the Selective Beam Melting Process // Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics. – 2012. – Vol. 12, No. 1. – P. 381-382. DOI: 10.1002/pamm.201210179

24. Martukanitz R., Michaleris P., Palmer T., DebRoy T., Liu Z.-K., Otis R., Heo T.W., Chen L.-Q. Toward an Integrated Computational System for Describing the Additive Manufacturing Process for Metallic Materials // Additive Manufacturing. – 2014. – Vol. 1. – P. 52-63. DOI: 1016/j.addma.2014.09.002

25. Осокин Е.Н., Артемьева О.А. Процессы порошковой металлургии Электронный ресурс : курс лекций. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 420 с.

26. ASTM F2924-14. Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014. – 9 p. DOI: 10.1520/F2924-14

27. Sciaky Inc. Advantages of Wire AM vs. Powder AM [Электронный документ] // Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). (https://additivemanufacturing.com/2015/10/14/electron-beam-additive-manufacturing-ebam-advantages- of-wire-am-vs-powder-am/).

28. Sciaky Inc. [Электронный документ] // Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). (https://www.sciaky.com/images/pdfs/product-sheets/Sciaky-EBAM-Technology.pdf).

29. Jhavar S., Jain N.K., Paul C.P. Development of micro-plasma transferred arc (p-PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications // Journal of Materials Processing Technology. – 2014. – Vol. 214, No. 5. – P. 1102-1110. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.016

30. Louvis E. Fox P., Sutcliffe C.J. Selective laser melting of aluminium components // Journal of Materials Pro-cessing Technology. Department of Engineering, The University of Liverpool, Liverpool L69 3GH, United Kingdom. – 2011. – Vol. 211. – P. 275-284. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019

31. Campanelli S.L., Contuzzi N., Angelastro A., Ludovico A. Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting Process // New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems – 2010. – P. 232-252. DOI: 10.5772/10432

32. Безобразов Ю.А., Зленко М.А., Зотов О.Г. Колбасников, Н. Г. Анализ структуры образцов, полученных DMLS- и SLM- методами быстрого прототипирования // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: материалы 6-й международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина». – 2012. – С. 154-157.

33. Qiu C., Panwisawas C., Ward M., Basoalto H.C., Brooks J.W., Attallah M.M. On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting // Acta Materialia. – 2015. – Vol. 96. – P. 72-79. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.06.004

34. Rajendra P.M., Yuvaraj N.V. A review on wire arc additive manufacturing based on cold metal transfer // Materials and Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 39, Is. 10. – P. 1315-1341. DOI: 10.1080/10426914.2024.2323441

35. Selvamani S.T., Yoganandan G., Bakkiyaraj M., Sivaraman V. Influence of Heat Input on Cold Metal Transfer Welded Joints // Materials and Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 37, Is. 13. – P. 1555-1565. DOI: 10.1080/10426914.2022.2030877

36. Pattanayak S., Sahoo S.K. Gas metal arc welding based additive manufacturing – a review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2021. – Vol. 33. – P. 398-442. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.04.010

37. Yan D., He C., Zhang G. Forming characteristics of thin-walled steel parts fabricated via double electrode gas metal arc additive manufacturing // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 227. – P. 153-160. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.08.021

38. Kutelu B.J., Seidu S.O., Eghabor G.I., Ibitoye A.I. Review of GTAW Welding Parameters // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. – 2018. – Vol. 6. – P. 541-554. DOI: 10.4236/jmmce.2018.65039

39. Ghazvinloo H.R. Effect of Gas-Shielded Flux Cored Arc Welding Parameters on Weld Width and Tensile Properties of Weld Metal in a Low Carbon Steel // Journal of Applied Sciences. – 2010. – Vol.10, No. 8. – P. 658-663. DOI: 10.3923/jas.2010.658.663

40. Sarolkar A.D., Kolhe K.P. A review of (GTAW) Gas Tungsten Arc Welding and its Parameters for Joining Aluminum Alloy // IJSART. – 2017. – Vol. 3, No.8. – P. 361-364. DOI: 10.4236/jmmce.2018.65039

41. Li J., Alkahari M.R., Zhang B., Yang G., Hussein M.A., Liew K. Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing // International Journal of

Automation Technology. – 2019. – Vol. 13, No. 3. – P. 346-353. DOI: 10.20965/ijat.2019.p0346

42. Artaza T., Bhujangrao T., Suárez A., Veiga F., Lamikiz A. Influence of Heat Input on the Formation of Laves Phases and Hot Cracking in Plasma Arc Welding (PAW) Additive Manufacturing of Inconel 718 // Metals. – 2020. – Vol. 10, No. 6. – P. 771-788. DOI: 10.3390/met10060771

43. Tomar B., Shiva S. Cold metal transfer-based wire arc additive manufacturing // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2023. – Vol. 45, Is. 3. DOI: 10.1007/s40430-023-04084-2

44. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. – Vol. 23, No. 6. – P. 1917-1928. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z

45. Herderick E. Additive manufacturing of metals: a review // Materials Science. – 2011. – P. 1413-1425.

46. Stecker S., Lachenberg K., Wang H., Salo R. Advanced electron beam free form fabrication methods & technology // AWS Welding Show. – 2006. – P. 35-46.

47. Syed W.U.H, Pinkerton A.J., Li L. Combining wire and coaxial powder feeding in laser direct metal deposition for rapid prototyping // Applied Surface Science. – 2006. – Vol. 252, No. 13. – P. 4803-4808. DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.08.118

48. Krajewski A., Kołodziejczak P., Cegielski P., Grześ J. Support with mechanical vibrations of welding processes – review of own research // Welding Technology Review. – 2021. – Vol. 93. – P. 57-73. DOI: 10.26628/wtr.v93i3.1143

49. Gowtham A.V., Kishore T.L. A Review on Effect of Vibration Welding of Different Materials in Various Welding Processes // International Journal for Research in Engineering Application & Management. – 2018. – Vol. 3. – P. 97-102. DOI: 10.18231/2454-9150.2018.0018

50. Qiu K., Xiao B. Effect of Mechanical Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of Gray Cast Iron in Lost Foam Casting // Mathematical Problems in Engineering. – 2021. – Vol. 17. – P. 1-8. DOI: 10.1155/2021/4936147

51. Yadav S., Tewari S.P., Singh J.K., Ram S.C. Effects of mechanical vibration on the physical, metallurgical and mechanical properties of cast A308 (LM21) aluminum alloy // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. – 2022. – Vol. 29. – P. 1206-1215. DOI: 10.1007/s12613-020-2209-7

52. Jiang Z., Zhu L., Zhang J., Meng G., Yang Z., Xu L. Influence of ultrasonic vibration on molten pool behavior, cladding layer microstructure and pore defects for directed energy deposition // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 247. – 123047. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123047

53. Longbiao H., Minsheng W., Luming L., Hongwei H. Ultrasonic generation by exciting electric arc: A tool for grain refinement in welding process // Applied Physics Letter. – 2006. – Vol. 89, No. 13. – P. 131-504. DOI:10.1063/1.2357857

54. Yu-Cheng L., Zhi-Wei W., Xi-Zhang C. Effect of arc ultrasound on microstructures and mechanical properties of plasma arc welded joints of SiCp/Al MMCs // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2011. – Vol. 21, No. 2. – P. 272-277. DOI:10.1016/S1003-6326(11)60709-7

55. Laser/Ultrasonic welding Technique: patent 4330699 United States / Farrow M. Application US06/061,350; 1982. – P. 2

56. Balasubramanian K. Studies on the effect of vibration on hot cracking and grain size in AA7075 aluminum alloy welding // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2011. – Vol. 3, No. 1. – P. 681-686

57. Oingmei L., Yong Z., Yoling S., Feipeng O., Oijie Z. Influence of ultrasonic vibration on mechanical properties and microstructure of 1Cr18N9Ti stainless steel // Materials and Design. – 2007. – Vol. 28. – P. 1949-1952. DOI: 10.1016/j.matdes.2006.04.025

58. Cui Y., Xu C., Han O. Effect of ultrasonic vibration on unmixed zone formation // Scripta Mater. – 2006. – Vol. 55, Is. 11. – P. 975-978. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2006.08.035

59. Горунов А.И., Гайсина А.Р., Мухаметов А.Н., Гильмутдинов А.Х Перспективы применения лазерно-акустического метода аддитивного

производства для алюминиевых сплавов // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: материалы IV международной конференции. – Москва, 2018. – С. 218-229

60. Dong H., Yang L., Dong C., Kou S. Improving arc joining of Al to steel and Al to stainless steel // Materials Science and Engineering A. – 2012. – Vol. 534. – P. 424-435. DOI:10.1016/j.msea.2011.11.090

61. Zhiwu X., Jiuchun Y., Gaohui W., Xiangli K., Shipin Y. Interface structure of ultrasonic vibration aided interaction between Zn-Al alloy and Al2O3p/6061Al composite // Composites Science & Technology. – 2005 – Vol. 65, No. 13. – P. 1959-1963. DOI:10.1016/j.compscitech.2005.02.004

62. Chmielewski T., Golanski D. New method of in-situ fabrication of protective coatings based on Fe-Al intermetallic compounds // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture. – 2011. – Vol. 225, No. 4. – P. 611-616. DOI: 10.1177/2041297510394050

63. Piekoszewski J., Krajewski A., Prokert F., Senkara J., Stanistawski J., Walis L., Werner Z., Wtosinski W. Brazing of alumina ceramics modified by pulsed plasma beams combined with arc PVD treatment // Vacuum. – 2003. – Vol. 70, No. 2-3. – P. 307-312. DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00660-7

64. Wtosinski W., Krajewski A., Piekoszewski J., Stanistawski J., Walis L. Intense pulsed plasma beams in ceramic/metal brazing // Nukleonika. – 2000. – Vol. 45, No. 2. – P. 145-146

65. Wtosinski W., Chmielewski T. Plasma-hardfaced chromium protective coatings-effect of ceramic reinforcement on their wettability by glass // Advanced Science and Technology. – 2002. – Vol. 32. – P. 253-260.

66. Chmielewski M., Pietrzak K. Processing, microstructure and mechanical properties of Al2O3-Cr nanocomposites // Journal of the European Ceramic Society. – 2007. – Vol. 27, No. 2-3. – P. 1273-1279. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.093

67. Shchitsyn Y. D., Belinin D. S., Neulybin S. D., Terentev S. A., Plotnikova N. V. Development of Layered Growth Technology for a Workpiece of Highly Alloyed Steel by Plasma Surfacing // Metallurgist. – 2017. – Vol. 61, No. 5-6. – P. 418-423. DOI: 10.1007/s11015-017-0510-0

68. Mingyu L., Hongjun J., Chunqing W., Han Sur B., HeeSeon B. Interdiffusion of Al-Ni systems enhanced by ultrasonic vibration at ambient temperature // Ultrasonics. – 2006. – Vol. 45. – P. 61-65. DOI: 10.1016/j.ultras.2006.06.058

69. Krajewski A. Joining of Si3N4 to wear-resistant steel by direct diffusion bonding // Journal of materials processing technology. – 1995. – Vol. 54, No. 1-4. – P. 103-108. DOI: 10.1016/0924-0136(95)01927-8

70. Weglewski W., Basista M., Chmielewski M., Pietrzak K. Modeling of thermally induced damage in the processing of Cr- Al2O3 // Composites Part B-Engineering. – 2012. – Vol. 43, No. 2. – P. 255-264. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.07.016

71. Трушников Д.Н., Щицын Ю.Д., Кривоносова Е.А., Неулыбин С.Д., Карташев М.Л., Панов Д.О., Акулова С.Н. Структурообразование и свойства материалов в процессах послойного синтеза изделий // Сварка и контроль - 2018: метариалы междунар.науч.-техн. конф., посв. 130-летию изобретения Н.Г. Славяновым электрдуг. сварки плав. электродом. – Пермь, 2018. – С. 317-325

72. Морозов В.П. Роль зародышевой зоны в процессе кристаллизации металла расплавленной ванны при дуговой сварке // Наука и образование. – 2010. – №8. – С. 1-7

73. Сараев Ю.Н., Лебедев В.А., Новиков С.В. Анализ существующих методов управления структурой металла сварного шва // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2016. – Т. 4, №1. – С. 16-26

74. Морозов В.П. Особенности процесса кристаллизации металла расплавленной ванны при дуговой импульснопериодической сварки // Территория нефтегаз. – 2010. – №6. – С. 58-64

75. Сараев Ю.Н. Особенности разработки электротехнологических процессов сварки и наплавки на основе алгоритмов адаптивного импульсного управления энергетическими параметрами режима // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3, № 3. – С. 3-11

76. Сараев Ю.Н., Полетика И.М., Козлов А.В., Хомченко Е.Г. Формирование структуры и свойств сварных соединений в условиях

регулируемого тепловложения при импульсно-дуговой сварке // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № СпецВ. – С. 137-140

77. Vakulenko I.A., Nadezhdin Y.L., Sokirko V.A., Volchok I.P., Mitiaev A.A. Electric pulse treatment of welded joint of aluminum alloy // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2013. – № 4(46). – С. 73-82. DOI: 10.15802/stp2013/16584

78. Xu X., Ganguly S., Ding J., Gui S., Williams S., Martina F. Microstructural evolution and mechanical properties of maraging steel produced by wire + arc additive manufacture process // Materials Characterization. – 2018. – Vol. 143. – P. 152-162. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.12.002

79. Wang T., Zhang Y., Wu Z., Shi C. Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire // Vacuum. – 2018. – Vol. 149. – P. 185-189. DOI: 10.1016/j.vacuum.2017.12.034

80. Kumar S., Wu C.S., Padhy G.K., Ding W. Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review // Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 26. – P. 295-322. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.02.027

81. Todaro C.J., Easton M.A., Qiu D., Zhang D., Bermingham M.J., Lui E.W., Brandt M., StJohn D.H., Qian M. Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound // Nature Communications. – 2020. – Vol. 11, No. 1. – P. 142-151. DOI: 10.1038/s41467-019-13874-z

82. Krivonosova E.A., Schitsin Y.D., Trushnikov D.N., Myshkina A.V., Akulova S.N., Neulibin S.D., Dushin A.Y. Structure formation of high-temperature alloy by plasma, laser and TIG surfacing // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1089. – 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1089/1/012019

83. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Перевод с немецкого / Г. Шлихтинг – М.: «Наука», Гл. ред. физ.-мат. лит., 1969. – 744 с.

84. Lyubimov D.V. A new approach in the vibrational convection theory // Proc. 14 IMACs Congresson Computational and Applied Mathematics. – 1994. – P. 59-68.

85. Ongoren A., Rockwell D. Flow structure from an oscillating cylinder Part 1. Mechanisms of phase shift and recovery in the near wake // Journal of Fluid Mechanics. – 1988. – Vol. 191, No. 1. – P. 197-223. DOI: 10.1017/S0022112088001569

86. Ongoren A., Rockwell D. Flow structure from an oscillating cylinder Part 2. Mode competition in the near wake // Journal of Fluid Mechanics. – 1988. – Vol. 191, No. 1. – P. 225-245. DOI: 10.1017/S0022112088001570

87. Malakhova T.V. Heat transfer of an oscillating cylinder in a viscous incompressible fluid flow // Thermophysics and Aeromechanics. – 2012. – Vol. 19, No. 1. – P. 69-76. DOI: 10.1134/S0869864312010076

88. Gershuni, G.Z. Thermal Vibrational Convection – Wiley, 1998. – 358 p.

89. Kawaji M., Liang R.Q., Nasr-Esfahany M., Simic-Stefani S., Yoda S. The effect of small vibrations on Marangoni convection and the free surface of a liquid bridge // Acta Astronautica. – 2006. – Vol. 58, No. 12. – P. 622-632. DOI: 10.1016/j.actaastro.2006.03.002

90. Mettu S., Chaudhury M.K. Motion of Drops on a Surface Induced by Thermal Gradient and Vibration // Langmuir. – 2008. – Vol. 24, No. 19. – P. 10833-10837. DOI: 10.1021/la801380s

91. Liang R., Kawaji M. Surface Oscillation of a Liquid Bridge Induced by Single and Multiple Vibrations // Microgravity Science and Technology. – 2009. – Vol. 21, No. S1. – P. 31-37. DOI: 10.1007/s12217-009-9116-x

92. Fayzrakhmanova I. S., Straube A. V., Shklyeav S. Bubble dynamics atop an oscillating substrate: Interplay of compressibility and contact angle hysteresis // Physics of Fluids. – 2011. – Vol. 23, No. 10. – P. 102-10510.1063/1.3650280

93. Hof B., Juel A., Mullin T. Magnetohydrodynamic damping of convective flows in molten gallium // Journal of Fluid Mechanics. – 2003. – Vol. 482. – P. 163-179. DOI: 10.1017/S0022112003004014

94. Hof B., Juel A., Mullin T. Magnetohydrodynamic damping of oscillations in low-Prandtl-number convection // Journal of Fluid Mechanics. – 2005. – Vol. 545. – P. 193–201. DOI: 10.1017/S0022112005006762

95. Nikulin I.L., Perminov A.V., Tsaplin A.I. Mathematical model of conducting fluid convection in a non-uniform alternating magnetic field // Magnetohydrodynamics. – 2013. – Vol. 49, No. 1. – P. 203-209. DOI: 10.22364/mhd.49.1-2.25

96. Никулин И.Л., Перминов А.В., Цаплин А.И. Моделирование индукционных процессов в проводящем цилиндре, помещенном в неоднородное переменное магнитное поле // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физикоматематические науки. – 2013. – Vol. 165, №. 1. – С. 188-195

97. Nikulin I., Perminov A., The Mathematical Model of Metal Melt State under Induction Melting // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 770. – P. 242-247. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.242

98. Perminov A.V., Lyubimova T.P. Stability of thermovibrational convection of pseudoplastic fluid in plane vertical layer // Computational Continuum Mechanics.– 2017. – Vol. 10, No. 1. – P. 78-79. DOI: 10.7242/1999-6691/2017.10.1.7

99. Lyubimova T.P., Perminov A.V., Kazimardanov M.G. Stability of quasi-equilibrium states and supercritical regimes of thermal vibrational convection of a Williamson fluid in zero gravity conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Vol. 129. – P. 406-414. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.112

100. Shcherbakov A.V., Rodyakina R.V., Gaponova D.A. Using of Smoothed Particle Hydrodynamics Method for Constructing a Mathematical Model of Electron-Beam Surfacing Process // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 523-529. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.523

101. Shcherbakov A.V., Rodyakina R.V., Kozhechenko A.S., Vakhmyanina N.M., Gaponova D.A., Rubtsov V.P. Peculiarities of Control over Electron-Beam Additive Form Manufacturing // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2019. – Vol. 55, No. 2. – P. 232-240. DOI:10.3103/S1068375519020133

102. Shcherbakov A.V., Gaponova D.A, Rodyakina R.V. Control of Weld Bead Position in Additive Manufacturing Process with Using Backscattered Electron Collector Signal // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. – 2020. – Vol. 2. – P. 1127-1135. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1_120

103. Shcherbakov A.V, Gaponova D.A., Rodyakina R.V. Numerical Modeling of Heat Transfer and Material Flow During WireBased Electron-Beam Additive Manufacturing // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering. – 2020. – Vol. 2. – P. 1115-1125. DOI: 10.1007/978-3-030-22063-1_119

104. Dragunov V.K., Goryachkina M.V., Gudenko A.V., Sliva A.P., Shcherbakov A.V. Investigation of the optimal modes of electron-beam wire deposition // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 681, No. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012008

105. Shcherbakov A.V., Rodyakina R.V., Gaponova D. A., Rubtsov V. P., Gudenko A., Sliva A., Dragunov V.K. Simulation of heat transfer and metal flow in wire-based electro beam additive manufacturing // A: Sim-AM 2019: II International Conference on Simulation for Additive Manufacturing. – 2019 – P. 328-339. ISBN 978-84-949194-8-0

106. Hu R., Luo M., Liu T., Liang L., Huang A.G., Trushnikov D., Karunakaran K.P., Pang S. Thermal fluid dynamics of liquid bridge transfer in laser wire deposition 3D printing // Science and Technology of Welding and Joining. – 2019. – Vol. 24, No. 5. – P. 401-411. DOI:10.1080/13621718.2019.1591039

107. Jafari D., Vaneker T.H.J., Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts // Materials & Design. – 2021. – Vol. 202. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109471

108. Mironova L., Nigay R., Nigay E. About One Method of Modeling High-Gradient Temperature Fields in the Welding of Shell Structures Made of Carbon and High-Alloy Structural Steels // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 971. DOI: 10.1088/1757-899X/971/3/032064

109. Морозов В. П. Анализ условии формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – №8. – С. 41-54

110. Reddy J.N., Anand N.K., Roy P. Finite Element and Finite Volume Methods for Heat Transfer and Fluid Dynamics // Cambridge University Press. – 2023. DOI: 10.1017/9781009275453

111. Wei S., Wang G., Shin Y., Rong Y. Comprehensive modeling of transport phenomena in laser hot-wire deposition process // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 125. – P. 1356-1368. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.164

112. Bai X., Colegrove P., Ding J., Zhou X., Diao C., Bridgeman P., Hönnige J.R., Zhang H., Williams S. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 124. – P. 504-516. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.085

113. Hejripour F., Valentine D.T., Aidun D.K. Study of mass transport in cold wire deposition for Wire Arc Additive Manufacturing // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 125. – P. 471-484. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.092

114. Ou W., Mukherjee T., Knapp G.L., Wei Y., DebRoy T. Fusion zone geometries, cooling rates and solidification parameters during wire arc additive manufacturing // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 127. – P. 1084-1094. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.111

115. Ou W., Wei Y., Liu R., Zhao W., Cai J. Determination of the control points for circle and triangle route in wire arc additive manufacturing // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 53. – P. 84-98. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.02.003

116. Hu R., Chen X., Yang G., Gong S., Pang S. Metal transfer in wire feeding-based electron beam 3D printing: Modes, dynamics, and transition criterion // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – Vol. 126. – P. 877-887. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.033

117. Sandeep K.J., Teja P.J., Choudhary A.K., Jain R. Development of correlation between temperature, liquid life span, molten pool, and porosity during Wire Arc

Additive Manufacturing: A finite element approach // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2022. – Vol. 38. – P. 274-287. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.05.002

118. Jayanath S., Achuthan A.A. Computationally Efficient Finite Element Framework to Simulate Additive Manufacturing Processes // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2018. – Vol. 140. – 041009. DOI: 10.1115/1.4039092

119. Montevecci F., Venturini G., Grossi N., Scippa A., Campatelli G. Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 21. – P. 479-486. DOI: 10.1016/j.addma.2018.01.007

120. Chen Z., Yuan L., Pan Z., Zhu H., Ma N., Ding D., Li H. A comprehensive review and future perspectives of simulation approaches in wire arc additive manufacturing (WAAM) // International Journal of Extreme Manufacturing. – 2025. – Vol. 7. – 022016. DOI: 10.1088/2631-7990/ada099

121. Nycz A., Lee Y., Noakes M., Ankit D., Masuo C., Simunovic S., Bunn J., Love L., Oancea V., Payzant A., Fancher C. Effective residual stress prediction validated with neutron diffraction method for metal large-scale additive manufacturing // Materials & Design. – 2021. – Vol. 205. – 109751. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109751

122. Liu M.B., Liu G.R. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH): an Overview and Recent Developments // Arch Comput Methods Eng. – 2010. – Vol. 17. – P. 25-76. DOI: 10.1007/s11831-010-9040-7

123. Ataie-Ashtiani B., Farhadi L. A stable moving-particle semi-implicit method for free surface flows // Fluid Dynamics Research. – 2005. – Vol. 38, Is. 4. – P. 241-256. DOI: 10.1016/j.fluiddyn.2005.12.002

124. Tskhakaya D., Matyash K., Schneider R., Taccogna F. The Particle-In-Cell Method // Contributions to Plasma Physics. – 2007. – Vol. 47, No. 8-9. – P. 563-594. DOI: 10.1002/ctpp.200710072

125. Li B., Habbal F., Ortiz M. Optimal transportation meshfree approximation schemes for fluid and plastic flows // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2010. – Vol. 83. – P. 1541-1579. DOI: 10.1002/nme.2869

126. Patel V.G., Rachchh N.V. Meshless method – Review on recent developments // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 27. – P. 1556-1560. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.328

127. Wessels H., Weißenfels C., Wriggers P. Metal particle fusion analysis for additive manufacturing using the stabilized optimal transportation meshfree method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2018. – Vol. 339. – P. 91-114. DOI: 10.1016/j.cma.2018.04.042

128. Fan Z., Li B. Meshfree simulations for additive manufacturing process of metals // Integrating Materials and Manufacturing Innovation. – 2019. – Vol. 8. – P. 144-153. DOI: 10.1007/s40192-019-00131-w

129. Fan Z., Wang H., Huang Z., Liao H., Fan J., Lu J., Liu C., Li B. A Lagrangian meshfree mesoscale simulation of powder bed fusion additive manufacturing of metals // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2020. – Vol. 20, Is. 2. – P. 483-514. DOI: 10.1002/nme.6546

130. Komen H., Shigeta M., Tanaka M. Numerical Simulation of Molten Metal Droplet Behavior in Gas Metal Arc Welding by Three-Dimensional Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics Method // Journal of Flow Control, Measurement & Visualization. – 2018. – Vol. 6. – P. 66-81. DOI: 10.4236/jfcmv.2018.62007

131. Jeske S.R., Bender J., Bobzin K., Heinemann H., Jasutyn K., Simon M., Mokrov O., Sharma R., Reisgen U. Application and benchmark of SPH for modeling the impact in thermal spraying // Computational Particle Mechanics. – 2022. – Vol. 9. – P. 1137-1152. DOI: 10.1007/s40571-022-00459-9

132. Russel M.A., Souto-Iglesias A., Zohdi T.I. Numerical simulation of Laser Fusion Additive Manufacturing processes using the SPH method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2018. – Vol. 341. – P. 163-187. DOI: 10.1016/j.cma.2018.06.033

133. Dao M.H., Lou J. Simulations of Laser Assisted Additive Manufacturing by Smoothed Particle Hydrodynamics // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2021. – Vol. 373. – 113491. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113491

134. Afrasiabi M., Lüthi C., Bambach M., Wegener K. Multi-Resolution SPH Simulation of a Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – 2962. DOI: 10.3390/app11072962

135. Afrasiabi M., Lüthi C., Bambach M., Wegener K. Smoothed Particle Hydrodynamics Modeling of the Multi-layer Laser Powder Bed Fusion Process // Procedia CIRP. – 2022. – Vol. 107. – P. 276-282. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.045

136. Li W., Shen M., Meng L., Luo P., Liu Y., Ma J., Niu X., Wang H., Cheng W., Wei T. Establishment of a three-dimensional mathematical model of SLM process based on SPH method // Computational Particle Mechanics. – 2023. – Vol. 10. – P. 1323-1339. DOI: 10.1007/s40571-023-00557-2

137. Fuchs S.L., Meier C., Wall W.A., Cyron C.J. An SPH framework for fluid–solid and contact interaction problems including thermo-mechanical coupling and reversible phase transitions // Adv. Model.and Simul. in Eng. Sci. – 2021. – Vol. 8. – 15. DOI: 10.1186/s40323-021-00200-w

138. Ma J., Niu X., Zhou Y., Li W., Liu Y., Shen M., Wang H., Cheng W., You Z. Simulation of solidification microstructure evolution of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting using a coupled model of smooth particle hydrodynamics and cellular automata // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 27. – P. 600-616. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.09.296.

139. Lüthi C., Afrasiabi M., Bambach M. An adaptive smoothed particle hydrodynamics (SPH) scheme for efficient melt pool simulations in additive manufacturing // Computers and Mathematics with Applications. – 2023. – Vol. 139. – P. 7-27. DOI: 10.1016/j.camwa.2023.03.003.

140. Ou W., Knapp G.L., Mukherjee T., Wei Y. An improved heat transfer and fluid flow model of wire-arc additive manufacturing // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 167. – 120835. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120835

141. Li H., Liu D., Yan Y., Guo N., Liu Y., Feng J. Effects of heat input on arc stability and weld quality in underwater wet flux-cored arc welding of E40 steel // Journal

of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol. 31. – P. 833-843. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.01.013

142. Zhou J., Tsai H. Effects of electromagnetic force on melt flow and porosity prevention in pulsed laser keyhole welding // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – P. 2217-2235. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.10.040

143. Semak V., Matsunawa A. The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1999. – Vol. 30. – P. 2541-2552. DOI: 10.1088/0022-3727/30/18/008

144. Zhang T., Li H., Liu S., Shen S. Evolution of molten pool during selective laser melting of Ti-6Al-4V // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. – Vol. 52. – 055302. DOI: 10.1088/1361-6463/aaee04

145. Zhao W., Cao X., Du X., Wei Y., Liu R., Chen J. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in CMT-based Additive Manufacturing // Journal of Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 58. – P. 267-276. DOI: 10.3901/JME.2022.01.267

146. Цаплин А.И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии: учеб. пособие/ А.И. Цаплин, И.Л. Никулин. –Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – 199 с.

147. Brackbill J.U., Kothe D.B., Zemach C.A. Continuum method for modelling surface tension // Journal of Computational Physics. – 1992. – Vol. 100. – P. 335-354. DOI: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y

148. Farrokhpanah A., Bussmann M., Mostaghimi J. New smoothed particle hydrodynamics (SPH) formulation for modeling heat conduction with solidification and melting // Numerical Heat Transfer. – 2017. –Vol. 71. Is. 4. – P. 299-312. DOI: 10.1080/10407790.2017.1293972

149. Bendaoud I., Mattei S., Cicala E., Tomashchuk I., Andrzejewski H., Sallamand P., Mathieu A., Bouchaud F. The numerical simulation of heat transfer during a hybrid laser–MIG welding using equivalent heat source approach // Optics and Laser Technology. – 2014. – Vol. 56. – P. 334-342

150. Monaghan J. J., Gingold R. A. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1977. – Vol. 181. – P. 375-389. DOI:10.1093/mnras/181.3.375

151. Lucy L. B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis // Astronomical Journal. – 1977. – Vol. 82. – P. 1013-1024. DOI:10.1086/112164

152. Dalrymple R.A., Rogers B.D. Numerical modeling of water waves with the SPH method // Coastal Engineering. – 2006. – Vol. 53. – P. 141-147. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2005.10.004

153. Islam R.I., Peng C. A Total Lagrangian SPH Method for Modelling Damage and Failure in Solids // International Journal of Mechanical Sciences. – 2019. – Vol. 157. – P. 498-511. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.05.003

154. Adami S., Hu X.Y., Adams N.A. A generalized wall boundary condition for smoothed particle hydrodynamics // Journal of Computational Physics. – 2012. – V. 231. – P. 7057-7075. DOI: 10.1016/j.jcp.2012.05.005

155. Becker M., Teschner M. Weakly Compressible SPH for Free Surface Flows // Eurographics symposium on Computer Animation. – 2008. – Vol. 9. – P209-217. DOI: 10.1145/1272690.1272719

156. Songdong S., Edmond Y.M. Incompressible SPH method for simulating Newtonian and non-Newtonian flows with a free surface // Advances in Water Resources. – 2003. – Vol. 26. – P. 787-800. DOI: 10.1016/S0309-1708(03)00030-7

157. Barcarolo D.A., Touzé D., Oger G., Vuyst F. Adaptive particle refinement and derefinement applied to the smoothed particle hydrodynamics method // Journal of Computational Physics. – 2014. – Vol. 273. – P. 640-657. DOI: 10.1016/j.jcp.2014.05.040

158. Lee E., Violeau D., Issa R., Ploix S. Application of weakly compressible and truly incompressible SPH to 3-D water collapse in waterworks // Journal of Hydraulic Research. – 2010. – Vol. 48. – P. 50-60. DOI: 10.3826/jhr.2010.0003

159. Vacondio R., Altomare C., De Leffe M., Hu X., Le Touze D., Lind S.,Marongiu J.-C., Marrone S., Rogers B.D., Souto-Iglesias A. Grand challenges for

Smoothed Particle Hydrodynamics numerical schemes // Computational Particle Mechanics. – 2020. – Vol. 8. – P. 575-588. DOI: 10.1007/s40571-020-00354-1

160. Wang Z.B., Chen R., Wang H., Liao Q., Zhu X., Li S.Z. An overview of smoothed particle hydrodynamics for simulating multiphase flow // Applied mathematical modelling. – 2016. – Vol. 40. – P. 9625-9655. DOI: 10.1016/j.apm.2016.06.030

161. Fourey G., Hermange C., Touzé D., Oger G. An efficient FSI coupling strategy between Smoothed Particle Hydrodynamics and Finite Element methods // Computer Physics Communications. – 2017. – Vol. 217. – P. 66-81. DOI: 10.1016/j.cpc.2017.04.005

162. Long T., Hu D., Yang G., Wan D. A particle-element contact algorithm incorporated into the coupling methods of FEM-ISPH and FEM-WCSPH for FSI problems // Ocean Engineering. – 2016. – Vol. 123. – P. 154-163. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.06.040

163. Adami S., Hu X. Y., Adams N. A transport-velocity formulation for smoothed particle hydrodynamics // Journal of Computational Physics. – 2013. – Vol. 241. – P. 292-307. DOI: 10.1016/j.jcp.2013.01.043

164. Cleary P. W., Monaghan J. J. Conduction Modelling Using Smoothed Particle Hydrodynamics // Journal of ComputationalPhysics. – 1999. – Vol. 148. – P. 227-264. DOI: 10.1006/jcph.1998.6118

165. Stukowski A. Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO–the Open Visualization Tool // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. –2009. –Vol. 18. – 015012

166. Thompson A.P., Aktulga H.M., Berger R. LAMMPS – a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales // Computer Physics Communications. –2022. – Vol. 271. – 108171

167. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616021 «Реализация метода SPH для моделирования процесса проволочной наплавки в среде LAMMPS» / Р.П. Давлятшин. – Заявка №2022615479. Дата

поступления 24.03.2022. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.04.2022.

168. Arashiro E.Y.,Demarquette N.R. Use of pendant drop method to measure interfacial tension between molten polymers // Materials Research. – 1999. – Vol. 2, No. 1. – P. 23-32

169. Rai R., Palmer T.A., Elmer J.W., Debroy T. Heat transfer and fluid flow during electron beam welding of 304L stainless steel alloy // Welding Journal. – 2009. – Vol. 88, Is. 3. – P. 54-61

170. Неулыбин С.Д., Пермяков Г.Л., Трушников Д.Н., Щицын Ю.Д., Беленький В.Я., Белинин Д.С. Плазменная наплавка: математическая модель, численная реализация и верификация // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2017. – Т. 19. – № 4. – С. 7-23.

171. Davlyatshin, R.P. Mathematical modeling the process of wire surfacing by the smoothed particle hydrodynamics method / R.P. Davlyatshin, D.N. Trushnikov, G.L. Permyakov, Y.V. Bayandin, R.M. Gerasimov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1730, №1. – P. 012003. (Scopus)

172. Davlyatshin, R.P. Simulation of the multi-beam electron-beam wire-feed additive manufacturing process in a vacuum / R.P. Davlyatshin, R.M. Gerasimov, Y.V. Bayandin, F.R. Saucedo-Zendejo, D.N. Trushnikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2275, №1. – Art. 012006. (Scopus)

173. Трушников, Д.Н. Разработка и совершенствование технологий и оборудования для электронно-лучевого выращивания изделий / Д.Н. Трушников, Г.Л. Пермяков, С.В. Варушкин, Р.П. Давлятшин, Ю.В. Баяндин, Ш. Панг // СТИН. – 2021. – №6. – С. 38-40. (ВАК)

174. Permyakov, G.L. Numerical analysis of the process of electron beam additive deposition with vertical feed of wire material / G.L. Permyakov, R.P. Davlyatshin, V.Y. Belenkiy, D.N. Trushnikov, S.V. Trushnikov, S. Pang // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. – 2022. – Vol. 24, №3. – P. 6–21. (Scopus)

175. Трушников, Д.Н. Способ управления процессом трехмерной наплавки / Д.Н. Трушников, М.Ф. Карташев, Р.П. Давлятшин, Ф.Р. Сауседо-Зендехо // СТИН. – 2022. – №8. – С. 29-31. (ВАК)

176. Galleguillos-Silva R., Vargas-Hernández Y., Gaete-Garretón L. Wettability of a surface subjected to high frequency mechanical vibrations // Ultrasonics Sonochemistry. Elsevier, 2017. Vol. 35. P. 134–141. doi: 10.1016/J.ULTSONCH.2016.09.011

177. Давлятшин, Р.П. Моделирование влияния вибраций на поверхностное натяжение капли жидкости с применением бессеточных методов / Р.П. Давлятшин, А.В. Перминов, Ю.В. Баяндин, Ф.Р. Сауседо-Зендехо, Д.Н Трушников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 2. – С. 73–84. (ВАК)

178. Трушников, Д.Н. Численное моделирование наплавки проволоки из сплава АМг5 в условиях вибрационных воздействий / Д.Н. Трушников, М.Ф. Карташев, Р.П. Давлятшин, И.А. Мосягин, Ф.Р. Сауседо-Зендехо // СТИН. – 2023. – №6. – С. 44-47. (ВАК)

179. Davlyatshin, R.P. Numerical modeling of vibration effects on the surface tension of aliquid drop in additive technologies with SPH / R.P. Davlyatshin, A.V. Perminov, Y.V. Bayandin, C. Castillo-Rodriguez, F.R. Saucedo-Zendejo, D N. Trushnikov // Computational Particle Mechanics. – 2023. – Vol. 10. – P. 911-928. (Scopus)

Приложение А

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022616021

Реализация метода SPH для моделирования процесса проволочной наплавки в среде LAMMPS

Правообладатель: ***Давлятшин Роман Позолович (RU)***

Автор(ы): ***Давлятшин Роман Позолович (RU)***

Заявка № **2022615479**
Дата поступления **24 марта 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***04 апреля 2022 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14c40f0a94edbd24145d5c7
Владелец Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов