

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Кривилева Михаила Дмитриевича на диссертационную работу Давлятшина Романа Позоловича «Моделирование процесса аддитивного формирования металлических материалов с применением вибрационных воздействий методом гидродинамики сглаженных частиц», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы

Математическое моделирование процессов аддитивного производства и построение на его основе систем инженерного анализа – одно из наиболее активно развивающихся в последнее десятилетие направлений машиностроения. Основной особенностью моделей описываемых процессов является их зависимость от множества параметров, включающих как свойства материала, так и режимы аддитивной наплавки. В результате для результативного исследования необходимо провести тщательный анализ вкладов различных факторов для разработки работоспособного программного обеспечения, применимого в реальном технологическом процессе.

В связи с этим тема и постановка задачи, выбранные соискателем и его научным руководителем, являются актуальными и имеющими самое прямое применение в современных инженерных науках. Следует отметить, что при концептуальной постановке работы были правильно определены и локализованы наиболее важные научно-технические проблемы, связанные с аддитивной наплавкой проволокой. Все это свидетельствует о высокой научной и технической значимости представленной к защите диссертации.

Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа включает введение, четыре основные главы, заключение, список литературы, насчитывающий 179 источников, и

приложение. Общий объем составляет 134 страницы, с 23 таблицами и 58 рисунками, что отражает значительный объем проведенного анализа и графического представления результатов. Структура исследования выстроена логично и охватывает все ключевые аспекты, обеспечивая последовательное раскрытие темы.

Во **введении** обосновывается актуальность исследования, формулируются цель и задачи, определяются объект и предмет исследования, а также подчеркиваются преимущества метода гидродинамики сглаженных частиц (SPH) для моделирования процессов, связанных с подвижными границами и вибрационными воздействиями, что задает базу для дальнейшего изучения.

Первая глава посвящена обзору современных подходов к математическому моделированию процессов теплопереноса в аддитивном производстве с акцентом на технологию проволочной наплавки. В рамках обзора проведен сравнительный анализ сеточных и бессеточных численных методов, где метод SPH выделяется как эффективный инструмент для задач с высокими градиентами деформаций и свободной поверхностью. На основе анализа литературы сформулирована гипотеза о зависимости геометрических характеристик наплавляемых валиков от параметров вибрационных воздействий.

Вторая глава фокусируется на создании математической модели процесса аддитивного формирования металлических изделий с учетом вибрационных воздействий. Модель включает уравнения Навье-Стокса для описания течения расплава как вязко-текучей несжимаемой среды, а также уравнения теплопереноса и фазовых переходов. Вибрации моделируются посредством граничных условий, задающих периодическое смещение подложки, что позволяет изучить их влияние на динамику расплавленной ванны.

Третья глава описывает реализацию модели на базе программной платформы LAMMPS с учетом модификаций для моделирования

поверхностного натяжения, испарения и вибрационных эффектов. Проведена верификация модели на тестовых задачах, таких как оплавление проволоки и подложки, и валидация с использованием экспериментальных данных для сталей, алюминиевых и титановых сплавов. Разработанный алгоритм калибровки коэффициента поверхностного натяжения способствует повышению точности расчетов.

Четвертая глава анализирует результаты численных и экспериментальных исследований, демонстрируя влияние частоты, амплитуды и направления вибраций на геометрические параметры валиков. Установлено, что вертикальные вибрации усиливают глубину проплавления за счет интенсификации термокапиллярных течений, тогда как горизонтальные вибрации преимущественно изменяют ширину валика.

В **заключении** обобщаются полученные результаты, формулируются основные выводы и определяются направления дальнейших исследований, включая учет турбулентности и моделирование сложных геометрий.

Работа демонстрирует комплексный подход, охватывающий теоретические, численные и экспериментальные аспекты исследования. Особое внимание уделено изучению влияния вибраций на формирование валиков, что составляет центральный элемент исследования. Применение метода SPH обосновано для моделирования процессов с подвижными границами, однако сравнительный анализ с сеточными методами мог бы дополнительно подтвердить преимущества выбранного подхода.

Научная новизна диссертационной работы

Диссертационная работа вносит существенный вклад в развитие численного моделирования аддитивной технологии наплавки проволокой, предлагая новые научные результаты, отличающиеся высокой степенью оригинальности. Впервые разработана математическая модель процесса тепломассопереноса при проволочной наплавке с учетом вибрационных воздействий, основанная на методе гидродинамики сглаженных частиц (SPH).

Данная модель интегрирует уравнения гидродинамики, теплопереноса и фазовых переходов, что обеспечивает возможность учета сложных физических явлений, включая термокапиллярные течения, процессы испарения и воздействие давления паров.

На основе численных экспериментов выявлено и подтверждено экспериментальными данными влияние направления вибрационных воздействий на геометрические параметры наплавляемых валиков и характеристики фронта плавления. Эти результаты имеют ключевое значение для разработки уточненных моделей, описывающих формирование зеренной структуры материала.

Впервые установлен физический механизм увеличения глубины проплавления под воздействием вибраций, обусловленный повышением эффективности теплопереноса за счет интенсификации термокапиллярных течений в ванне расплава, что представляет собой значимый вклад в понимание процессов аддитивного производства проволокой.

Практическая и теоретическая значимость результатов работы

Практическая значимость. Разработанная математическая модель, реализованная в виде программного комплекса (свидетельство о регистрации № RU 2022616021), обеспечивает численное моделирование нестационарных полей температуры, скоростей течения расплава, давления, а также геометрических параметров расплавленной ванны и наплавляемого валика. Установленные зависимости геометрических характеристик одиночных валиков от параметров аддитивного процесса могут служить основой для создания эмпирических моделей, применяемых на этапах отработки и внедрения технологий. Программа для ЭВМ применима для оптимизации режимов наплавки проволокой на установке промышленного типа.

Теоретическая значимость. Работа углубляет понимание физических механизмов, лежащих в основе влияния вибрационных воздействий на динамику расплава и процесс кристаллизации. Данные о форме фронта

кристаллизации и градиентах температуры в его окрестности, полученные в ходе численных экспериментов, могут быть использованы для дальнейших исследований формирования зеренной структуры.

Основные сильные стороны диссертации

- 1) Постановка задач и целей диссертационного исследования являются несомненно актуальными и связаны с разработкой программных средств для управления режимами установки при аддитивной наплавке проволокой *с привязкой к режимам оборудования*.
- 2) Диссертация написана грамотным и лаконичным языком, материал читается легко, вся работа сформулирована емко, без излишних деталей, это плюс представленной к защите работы.
- 3) Очень хорошо теоретически раскрыт механизм вибрационного воздействия, отмечены главные (определяющие) физические и технические факторы. Сделанные соискателем результаты обоснованы как сравнением с другими литературными данными, так и с собственными экспериментальными данными.
- 4) Глава 4 написана емко и содержит полномасштабную верификацию на модельном эксперименте. Исследованы три различных сплава для различных режимов вибрационного воздействия. Для диссертаций по математическому моделированию это исключительно сильный результат – всесторонняя проверка математической модели.

Вопросы и замечания к диссертации

- 1) В целом концептуальная постановка в разделе 2.1 сделана правильно, но в области моделирования процессов переноса принят другой подход. Вначале производится оценка характеристических чисел переноса, далее отдельные эффекты включаются или исключаются из уравнений на основании проведенных оценок. Сделанные соискателем допущения не были подтверждены такими оценками.

- 2) При математической постановке задачи в разделе 2.2 вязкость расплава зависит от температуры, которая варьируется в пространственных координатах. В связи с этим выносить вязкость из-под знака дивергенции безосновательно.
- 3) В уравнения (2.7), (2.8) и (2.9) пропущены скобки и нарушена связность математической записи. В связи с этим было невозможно разобрать и проанализировать уравнения.
- 4) Результаты диссертации, приведенные в разделе 4.2 отчетливо показали, что метод SPH корректно воспроизводит физические и гидродинамические процессы в зоне наплавки проволокой, но существенно ограничен в использовании высокими вычислительными затратами. По этой причине я не согласен с автором, что предложенный метод является оптимальным по точности и ресурсоемкости. Сеточные метод Стефана-Больцмана опережает метод SPH по общему балансу характеристик.

Заключение

Указанные замечания не умаляют научной ценности представленной диссертационной работы и профессионального уровня диссертанта. Диссертация представляет собой завершенное научно-квалификационное исследование, выполненное под руководством доктора технических наук, профессора кафедры сварочного производства, метрологии и технологии материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета Д.Н. Трушников, и содержит результаты, решающие значимую научную задачу в области математического моделирования процессов металлического аддитивного производства, что соответствует паспорту специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, а содержание диссертации, автореферата и ключевых публикаций автора полно отражает суть выполненной работы.

Диссертация удовлетворяет требованиям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакциях от 21.04.2016 № 335 и от 12.10.2018 № 1168), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук по специальности 1.2.2 (05.13.18) – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, доцент, профессор кафедры общей физики, заведующий учебно-научной лабораторией «Физика конденсированных сред», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», 426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1, тел. раб. 8 (3412) 916-230, эл. почта mk@udsu.ru.

_____ / М.Д. Кривилев
10

Я, Кривилев Михаил Дмитриевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Давлятшина Романа Позоловича, и их дальнейшую обработку.

_____ / М.Д. Кривилев
10

Подпись официального оппонента заверяю.

Учёный секретарь
Учёного совета ФГБОУ ВО «УдГУ»