



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279, ОКПО 02068574
ул. Политехническая, д. 29 литера Б,
вн. тер. г. муниципальный округ Академическое,
г. Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)552-60-80, office@spbstu.ru

№ _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор СПбПУ,
профессор, д.т.н.

В.В. Сергеев
2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

о диссертационной работе Никифорова Сергея Александровича на тему
«Трехмерная нестационарная многофазная модель течений в ванне расплава
при лазерном нагреве в ультразвуковом поле», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности
1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы диссертации

Актуальность исследования обусловлена активным развитием лазерных и аддитивных технологий, требующих повышения качества и надежности сварных соединений и наплавленных слоев. Введение ультразвуковых колебаний в процессы лазерной обработки открывает новые возможности управления структурой расплава и улучшения свойств готовых изделий, однако теоретическое и численное описание данных явлений пока развито недостаточно.

Научная и практическая значимость диссертационной работы

Практическая значимость диссертации определяется созданием методики прогнозирования геометрии и характеристик ванны расплава, что позволяет оптимизировать режимы лазерной сварки, наплавки и резки. Введение ультразвуковых колебаний показано как способ гомогенизации структуры металла, снижения дефектности и повышения эксплуатационных характеристик изделий. Разработанные модели и программные коды внедрены в образовательный процесс и используются в научных исследованиях и

промышленной практике, в том числе в составе программного комплекса «Виртуальный 3D-принтер».

Общая характеристика работы

Объем диссертации составляет 118 страниц, включая 46 рисунков и 13 таблиц. Список литературы содержит 101 наименование. Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна, практическая значимость и соответствие специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы».

В первой главе проведен обзор современного состояния исследований в области лазерной обработки металлов и моделирования процессов тепломассопереноса. Особое внимание уделено анализу моделей источников нагрева, влиянию сил Марангони и особенностям многофазного моделирования свободной поверхности расплава.

Во второй главе разработана двухфазная физико-математическая модель плавления нержавеющей стали 08X16H11M3, предложены аппроксимирующие функции для удельной теплоемкости и вязкости с учетом скрытой теплоты плавления. Проведены численные расчеты и их сравнение с физическим экспериментом.

В третьей главе исследовано влияние ультразвуковых колебаний на структуру течений в ванне расплава. Построены сопряжённые модели (прочность – гидродинамика), проведен анализ изменения скоростных полей и установлены закономерности воздействия знакопеременного давления.

В четвертой главе реализована трехмерная нестационарная многофазная модель лазерной сварки и наплавки с учетом ультразвуковых колебаний. Рассмотрены различные частоты воздействия (20–60 кГц), выполнено сравнение расчетов с натурным экспериментом, показано улучшение структуры и формы ванны расплава при введении ультразвука.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, намечены перспективные направления дальнейших исследований, в частности использование ультразвуковых колебаний в аддитивных технологиях.

Достоверность результатов подтверждается строгим выбором физических приближений, использованием современных методов вычислительной гидродинамики, сопоставлением с экспериментальными данными и

публикацией результатов в рецензируемых журналах, в том числе индексируемых в международных базах.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. создании трехмерной нелинейной многофазной модели гидродинамики вязкой жидкости с учетом объемного источника знакопеременного давления;
2. предложении функций удельной теплоемкости и вязкости с сигмоидальной аппроксимацией, учитывающей скрытую теплоту плавления;
3. программной реализации численных алгоритмов на языке C с последующей интеграцией в пакеты конечно-объемного моделирования;
4. выявлении закономерностей влияния частоты ультразвуковых колебаний на структуру течений и геометрию ванны расплава.

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 15 публикациях, из которых 5 статей – в журналах из перечня ВАК (включая 1 – в издании категории K1). Получены 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Соответствие автореферата диссертации

Основные разделы работы, результаты и выводы представлены в автореферате. Автореферат соответствует содержанию диссертации и удовлетворяет требованиям ВАК.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертационного исследования Никифорова С.А. могут быть использованы в образовательной и научной деятельности при подготовке специалистов в области лазерных и акустических технологий, математического моделирования и вычислительной гидродинамики. Разработанные модели и программные алгоритмы уже внедрены в учебный процесс и могут служить методической основой для дальнейших исследований многофазных течений и процессов плавления металлов. Существенный практический интерес работа представляет для промышленности, где внедрение ультразвукового воздействия в процессы лазерной сварки, наплавки и резки позволит повысить качество соединений, снизить количество дефектов и обеспечить более однородную структуру материалов. Использование разработанных численных моделей при проектировании и эксплуатации лазерных технологических установок дает возможность оптимизировать режимы обработки и существенно сократить затраты на проведение натурных экспериментов. В области аддитивных технологий предложенные алгоритмы могут быть интегрированы в

отечественные программные комплексы для прогнозирования формы и свойств изделий, а также применяться в системах управления установками для повышения стабильности процессов и качества готовой продукции.

Замечания по диссертационной работе

По содержанию работы имеются следующие замечания:

1. В диссертации подробно исследовано воздействие ультразвуковых колебаний в диапазоне 20–60 кГц, однако не рассмотрено влияние более широкого спектра частот, что могло бы расширить область применимости полученных результатов.
2. При моделировании процессов лазерного нагрева и плавления не в полной мере учтены граничные условия, связанные с парообразованием и оптическим пробоем поверхности, хотя они могут существенно влиять на форму и глубину ванны расплава при высоких мощностях.
3. Используемые в работе модели термокапиллярных течений и силы Марангони рассматриваются для стали определённого химического состава. Вопросы влияния примесей и легирующих элементов требуют дополнительного анализа.
4. В представленных численных экспериментах основное внимание уделено сравнению со стационарными или квазистационарными условиями. Динамика быстрых неустойчивостей и переходных процессов могла бы быть рассмотрена более детально.
5. Несмотря на наличие экспериментальной валидации, объём натурных экспериментов ограничен, и полезным было бы расширение базы данных для повышения статистической достоверности выводов.
6. В работе показана перспектива использования ультразвука в аддитивных технологиях, однако вопросы интеграции разработанных моделей в реальные технологические циклы 3D-печати пока освещены лишь в общем виде и требуют дальнейшей проработки.

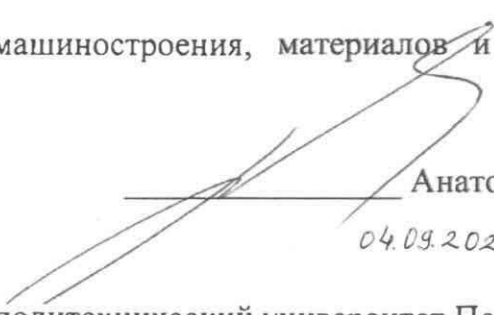
Заключение

Диссертационная работа Никифорова Сергея Александровича «Трёхмерная нестационарная многофазная модель течений в ванне расплава при лазерном нагреве в ультразвуковом поле» актуальна, обладает научной новизной и имеет теоретическую и практическую ценность. Работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи повышения физико-механических свойств материалов в процессе сварки и наплавки в ультразвуковом поле. Тема работы соответствует п. 15, 16, 25 паспорта специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа отвечает требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Никифоров Сергей Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Результаты диссертации доложены и обсуждены, отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Научного семинара 05 сентября 2025 г. (Протокол № 8). Присутствовало 15 человек, в том числе 6 докторов и 9 кандидатов наук. Результаты голосования: "за" - 15, "против" - 0, "воздержался" - 0.

Директор института машиностроения, материалов и транспорта ФГАОУ ВО «СПбПУ», д.т.н., проф.



Анатолий Анатольевич Попович

04.09.2025 г.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251,
Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, director@inmet.spbstu.ru, 8(812) 294-46-20.

Вход. № 05-8638
«14» 09 2025 г.
подпись 