

Заключение диссертационного совета 24.2.312.11

на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 03 октября 2025 г. № 12

О присуждении Никифорову Сергею Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Трехмерная нестационарная многофазная модель течений в ванне расплава при лазерном нагреве в ультразвуковом поле» по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы», принята к защите 10 июня 2025 г., протокол № 7 диссертационным советом 24.2.312.11 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 420015, г. Казань, ул. К.Маркса, 68, приказ № 482/нк от 21.05.2024 г.

Соискатель Никифоров Сергей Александрович, 21.03.1995 года рождения, в период с 2017 г. по 2019 г. обучался в магистратуре, с 2019 г. по 2023 г. обучался в аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. В настоящее время работает старшим преподавателем кафедры Лазерных и аддитивных технологий того же университета. Диссертация выполнена на кафедре Лазерных и аддитивных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, Гильмутдинов Альберт Харисович, федеральное государственное бюджетное обра-

зовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», кафедра Лазерных и аддитивных технологий, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

- Кривилев Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный университет», заведующий лабораторией физики конденсированных сред, профессор кафедры «Общая физика»;

- Марфин Евгений Александрович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», ведущий научный сотрудник лаборатории «Теплофизики и волновых технологий» Института энергетики и перспективных технологий;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, в своем положительном заключении, составленном и подписанном Поповичем Анатолием Анатольевичем, доктором технических наук, профессором, директором Института машиностроения, материалов и транспорта и утвержденном доктором технических наук, членом-корреспондентом РАН Сергеевым Виталием Владимировичем, Первым проректором СПбПУ, указала, что диссертация является законченным научным трудом, удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Никифоров Сергей Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.9 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

В рамках диссертационного исследования опубликовано 15 работ, в том числе 5 статей в российских рецензируемых научных журналах из перечня ВАК (из них 4 статьи в журналах категории K2, 1 статья в журнале, индексируемом в Web of Science и категории K1), 10 статей – в других журналах и материалах научных конференций. Получены 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Диссертация не содержит недостоверных сведений об опубликованных соискателем ученой степени работах. В диссертационной работе отсутствует заимствованный материал без ссылки на автора или источник заимствования, также результаты научных работ, выполненных соискателем в соавторстве, без ссылок на соавторов.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Никифоров, С.А. Численное моделирование и верификация точечного лазерного нагрева нержавеющей стали AISI 316L / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов, А.И. Горунов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – № 8(140). – DOI 10.18698/2308-6033-2023-8-2295.

2. Никифоров, С.А. Исследование формы ванны расплава при лазерном воздействии на сталь AISI 316L с учетом конвекции Марангони / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.Х. Гильмутдинов, А. И. Горунов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – № 2(134). – DOI 10.18698/2308-6033-2023-2-2248.

3. Никифоров, С.А. Многофазная трехмерная модель лазерного точечного нагрева и плавления стали AISI 316L в ультразвуковом поле / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, Р.С. Рубля [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2024. – № 7(151). – DOI 10.18698/2308-6033-2024-7-2369.

4. Никифоров, С.А. Исследование влияния ультразвуковых колебаний на структуру течений в жидком металле и форму ванны расплава нержавеющей стали AISI 316L / С.А. Никифоров, И.В. Шварц, А.И. Горунов, А.Х. Гильмутдинов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2024. – № 10(155). – DOI 10.18698/2308-6033-2024-11-2398.

5. Nikiforov, S.A. Flow analysis during laser-acoustic processing of stainless steel AISI 316L / S.A. Nikiforov, I.V. Shvarts, A.Kh. Gilmutdinov, A.I. Gorunov // Computational continuum mechanics. – 2024. – Vol. 17. – No 2. – Pp. 133-142. – DOI 10.7242/1999-6691/2024.17.2.12.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

Ведущей организации: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург. Отзыв положительный.

Замечания по диссертации:

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 результатах численных экспериментов 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.

Официального оппонента, доктора физико-математических наук Кривилева М.Д. Отзыв положительный. Замечания:

1. Формулировка (2.1) баланса внутренней энергии содержит неточности.

2. При определении краевых задач в различных разделах диссертации не указывается направление вектора нормали. Неправильно указана размерность постоянной Больцмана в таблице 2.2.

3. При использовании так называемого супергауссова распределения плотности мощности лазерного излучения в уравнении (2.4) требуется ввести дополнительное уравнение связи на коэффициенты a и b , иначе лазерный источник ненор-

мирован.

4. На рисунке 2.4(а) принято снижение плотности стали 08X16H11M3 на 50% при переходе в жидкое состояние, что расходится с общепринятыми данными.

5. В разделе 4.1.1 верхний диапазон УЗ воздействия сильно завышен.

6. В рамках диссертационного исследования Р.П. Давлятшина (ПНИПУ, 2025) было показано, что при вибрационных воздействиях наблюдается увеличение высоты валика и уменьшение его ширины как в экспериментальных, так и в численных результатах. При отсутствии вибраций форма капли полностью округлая, при наличии вибраций капли имеют угловатую форму. В настоящей работе получен противоположный результат, когда капля уплотняется и становится шире.

Официального оппонента, кандидата технических наук Марфина Е.А. Отзыв положительный. Замечания:

1. В главах 4.1 и 4.3 представлены постановки задач, близкие по физическому содержанию, однако используются различные значения мощности лазера и шагов по времени. Представляется целесообразным пояснить причины выбора разных параметров, чтобы у читателя не возникало вопросов при сопоставлении результатов.

2) В работе отсутствуют подробные данные о методике проведения натурных экспериментов (параметры оборудования, условия измерений, статистика), что затрудняет оценку воспроизводимости результатов.

3) Анализ влияния ультразвука проведён только в диапазоне 20–60 кГц без обоснования выбора этих границ и изучения экстремальных режимов.

4) В таблице 2.4 показано, что величина расхождения между расчетными и экспериментальными данными по глубине ванны расплава при изменении мощности остаётся на одном уровне (около 9,5%). В тексте же указывается тенденция роста погрешности. Возможно, следовало бы уточнить, что речь идёт о других показателях или о тенденции в более широком диапазоне условий.

5) Отсутствует экономическое обоснование. Не приведены расчёты целесообразности внедрения ультразвукового воздействия с точки зрения энергозатрат, себестоимости и производительности технологического процесса.

6) Верификация модели выполнена только для точечного нагрева, тогда как для лазерной наплавки (глава 4) представлены лишь качественные сравнения без

количественных оценок погрешности.

7) Выводы не содержат конкретных технологических инструкций (например, оптимальные сочетания мощности лазера, частоты УЗ и скорости обработки) для внедрения результатов в производство.

8) В работе имеют место стилистические неточности и опечатки.

Отзывы на автореферат диссертации:

1. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров, подписанный к.ф.-м.н., начальником научно-исследовательского отдела Института теоретической и математической физики Быковым А.Н. Отзыв положительный. Замечания:

1. В автореферате недостаточно подробно раскрыты ограничения предложенной математической модели, такие как учет нелинейных эффектов при высокочастотном ультразвуковом воздействии (например, кавитационные явления).

2. Отсутствует детальный анализ вычислительной сложности алгоритмов, что важно для оценки их применимости в реальном времени.

2. ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа, подписанный д.т.н., профессором, заведующим кафедрой прикладной гидромеханики Целищевым В.А. Отзыв положительный. Замечания:

1. В автореферате недостаточно подробно описана методика выбора частот ультразвукового воздействия (20–60 кГц).

2. В автореферате не указаны ограничения модели для материалов с высокой вязкостью (например, титановые сплавы).

3. Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Набережные Челны, подписанный к.т.н., доцентом, доцентом кафедры высокоэнергетических процессов и агрегатов Болдыревым А.В. Отзыв положительный. Замечание:

1. В автореферате недостаточно подробно освещены вопросы, связанные с верификацией численных моделей на различных режимах обработки.

2. Следовало бы более детально представить анализ погрешностей предлагаемых математических моделей.

Желательно включить более подробное описание перспектив практического применения разработанных методик.

4. ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, к.т.н., доцентом, доцентом кафедры технологии обработки материалов Есовым В.Б. Отзыв положительный. Замечания:

1. В автореферате недостаточно подробно освещены вопросы, связанные с устойчивостью численных алгоритмов при моделировании многомасштабных процессов, а также ограничения предложенной модели применительно к различным классам материалов. Кроме того, было бы полезным включить в автореферат более детальное описание методики верификации модели на экспериментальных данных.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что Кривилев М.Д. – д.ф.-м.н., доцент, заведующий лабораторией физики конденсированных сред, профессор кафедры «Общая физика» ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет», является крупным специалистом в области математического моделирования процессов тепломассопереноса и процессов аддитивного производства; Марфин Е.А. – к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Теплофизики и волновых технологий» Института энергетики и перспективных технологий ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», является специалистом в области влияния акустических воздействий на свойства вязких сред; ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» является одной из ведущих организаций Российской Федерации в области математического моделирования и лазерной обработки материалов. Все оппоненты и представители ведущей организации имеют достаточное количество публикаций в рецензируемых научных журналах, соответствующих тематике исследований соискателя.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработана математическая модель гидродинамики ванны расплава при лазерной обработке с учётом ультразвуковых колебаний, обогащающая научную концепцию численного исследования многофазных нестационарных процессов

тепломассопереноса и взаимодействия внешнего акустического воздействия с термокапиллярной конвекцией в задачах лазерной сварки и наплавки.

Предложен новый подход к моделированию многофазной нелинейной трёхмерной нестационарной математической модели лазерной сварки и наплавки в ультразвуковом поле с учётом конвективных и радиационных тепловых потерь, а также возникновения термокапиллярных течений, показавший необходимость учета граничного условия конвекции Марангони на свободной поверхности ванны расплава.

Доказана перспективность использования предложенного подхода численного моделирования для разработки эффективных систем прогнозирования геометрии и структуры сварных соединений и наплавленных слоёв в различных технологических процессах обработки металлов и наплавки производства.

Введены понятия «супергауссово» распределение плотности мощности лазерного излучения и «объёмный источник знакопеременного акустического давления», позволяющие получить более точные результаты численного моделирования течений в ванне расплава и расширяющие возможности описания начальных и граничных условий при исследовании многофазных процессов теплообмена.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Доказана эффективность предложенных методов и алгоритмов численной реализации многофазной трёхмерной нестационарной модели течений в ванне расплава с учётом ультразвукового воздействия, вносящих вклад в расширение представлений о формировании и использовании математических моделей гидродинамики и теплообмена при лазерной сварке и наплавке в условиях физической неопределённости и многофакторности процессов.

Применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс базовых методов анализа и моделирования, в том числе методы вычислительной гидродинамики и математического моделирования многофазных сред, численного решения уравнений теплообмена и гидродинамики, статистического анализа, объектно-ориентированного и функционального программирования (Python, MATLAB, язык C для пользовательских функций Ansys Fluent), а также экспериментальной проверки результатов.

Изложены этапы структурной (обоснование выбора системы уравнений сохранения, граничных условий и определяющих соотношений) и параметрической идентификации (определение и обоснование коэффициентов «супергауссова» распределения плотности лазерного излучения, параметров сигмоидальных функций теплоемкости и вязкости, амплитудно-частотных характеристик ультразвукового воздействия) разработанной трехмерной нестационарной многофазной модели, являющиеся теоретической и методической основой для формирования корректного прогнозного описания структуры течений и формы ванны расплава.

Изучены особенности формирования течений в ванне расплава в условиях сложного тепло- и массообмена, определяющие вид и параметры объемных источников тепла и сил (лазерного излучения, ультразвукового давления, конвекции Марангони), а также особенности взаимодействия термокапиллярной конвекции с внешним акустическим полем при различных частотах ультразвукового воздействия.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что на основе разработок реализованы программный комплекс на базе ANSYS Fluent с пользовательскими функциями на языке C, используемый в учебном процессе КНИТУ-КАИ, и модули «Лазерной газопорошковой наплавки» в составе комплекса «Виртуальный 3D-принтер» для РФЯЦ-ВНИИЭФ. В рамках гранта Российского научного фонда (проект №23-29-00219) использовались методы моделирования лазерной наплавки с подачей материала, программная реализация объемных источников и методика сравнительного анализа режимов с ультразвуковым воздействием и без него.

Определены перспективы дальнейшего развития диссертационного исследования, связанные с совершенствованием математических моделей и методов численного моделирования для повышения точности прогнозирования процессов лазерно-ультразвуковой обработки материалов, в том числе за счет учета нелинейных эффектов при высокочастотном акустическом воздействии, разработки моделей для материалов с высокой вязкостью, интеграции разработанных подходов в реальные технологические циклы аддитивного производства, а также с созданием комплексных методик оптимизации параметров обработки для различных классов ма-

териалов и технологических процессов.

Создан комплекс программных средств для реализации трехмерной нестационарной многофазной математической модели, проведения вычислительных экспериментов и анализа результатов, включающий пользовательские функции на языке C для пакета ANSYS Fluent, программы постобработки данных на языках Python и MATLAB, а также методику численного моделирования гидродинамики ванны расплава при лазерно-ультразвуковом воздействии.

Представлены результаты вычислительных экспериментов по верификации разработанной трехмерной нестационарной многофазной модели, исследованию влияния ультразвуковых колебаний на структуру течений и геометрию ванны расплава, оценке эффективности предложенных математических подходов и алгоритмов, а также результаты практического применения модели для прогнозирования параметров лазерной обработки нержавеющей стали 08X16H11M3.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Теория построена на уравнениях сохранения, вычислительной гидродинамики и волновых уравнениях в акустических частотах, а также согласуется с опубликованными результатами других авторов по теме диссертации и смежным областям знаний.

Раскрыты недостатки существующих подходов к математическому моделированию гидродинамики ванны расплава при лазерном воздействии, заключающиеся, с одной стороны, в ограниченности учета лишь стационарных или квазистационарных процессов без адекватного описания быстрых переходных процессов и неустойчивостей, а с другой стороны - в отсутствии комплексного моделирования совместного влияния лазерного нагрева и знакопеременного ультразвукового воздействия на структуру течений, свободную поверхность и конечную геометрию зоны термического влияния, что не позволяет полноценно прогнозировать результаты реальных технологических процессов лазерной сварки и наплавки.

Идея базируется на анализе работ, обобщении передового опыта российских и зарубежных ученых в области математического моделирования гидродинамики ванны расплава, лазерной обработки материалов и акустического воздействия на жидкие среды.

Использовано сравнение результатов численного моделирования гидродинамики ванны расплава с экспериментальными данными, а также с известными результатами других авторов в области лазерной обработки материалов и акустического воздействия на жидкие среды;

Установлено качественное и количественное соответствие результатов численного моделирования экспериментальным данным, а также преимущество разработанной трехмерной нестационарной многофазной модели перед известными подходами за счет комплексного учета совместного воздействия лазерного излучения и ультразвукового поля, термокапиллярных эффектов и реальных теплофизических свойств материала.

Личный вклад соискателя состоит в постановке научно-технической проблемы, цели и задач диссертационного исследования, выборе объекта и методов исследования, непосредственном участии на всех этапах исследования, в том числе при разработке трехмерной нестационарной многофазной математической модели, создании программного комплекса на базе ANSYS Fluent с пользовательскими функциями на языке C, проведении вычислительных экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировании выводов по диссертации. Автору принадлежит решающая роль в апробации результатов исследования, разработке математической модели гидродинамики ванны расплава, разработке новых методов и алгоритмов численного моделирования совместного лазерно-ультразвукового воздействия, а также подготовке основных публикаций по выполненной работе.

По своему содержанию диссертация отвечает паспорту специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы, а именно пунктам:

П15. – Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах;

П16. – Тепломассоперенос в газах и жидкостях;

П25. – Влияние поверхностных сил на динамику жидкости и газа.

В ходе защиты диссертации не было высказано критических замечаний; соискатель исчерпывающе ответил на все вопросы, задаваемые ему в ходе заседания, привел собственную аргументацию. С рядом высказанных замечаний соискатель согласился.

Диссертационным советом сделан вывод, что диссертация Никифорова С.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена важная научно-практическая задача повышения эффективности лазерной обработки металлов за счет разработки и верификации трехмерной нестационарной многофазной математической модели тепломассопереноса в ванне расплава при совместном лазерно-ультразвуковом воздействии, имеющая важное значение для развития аддитивных технологий и лазерной обработки материалов в Российской Федерации. Диссертация соответствует п. 15, 16 и 25 паспорта специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы и отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, и её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы.

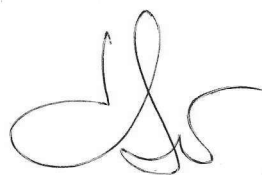
На заседании 03.10.2025 г. диссертационный совет принял решение присудить Никифорову С.А. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 10 человек, из них 4 докторов наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы», участвовавших в заседании, из 14 человека, входящих в состав совета, проголосовал: «за» - 10, «против» - нет, недействительных бюллетеней - нет.

Председатель

диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



Сергей Иванович

Пони́каров

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент



03.10.2025 г.