

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Саратовский государственный
технический университет
имени Гагарина Ю.А.»
(СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054

Телефоны: (8452) 99-88-11;

факс (8452) 99-88-10;

(8452) 99-86-03; факс (8452) 99-86-04

E-mail: sstu_office@sstu.ru

№ _____

На № _____

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по науке
и инновациям федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования «Саратовский
государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»,
доктор физико-математических
наук, профессор

А.И. Землянухин

2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Терещенко Татьяны Сергеевны «Исследование динамического поведения конструктивных элементов, изготовленных методом послойного лазерного плавления», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин

Актуальность диссертационного исследования

Развитие современных технологий селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting, SLM) позволяет создавать металлические изделия с высокой степенью геометрической и функциональной адаптивности, что делает их перспективными для использования в авиационно-космической и других высокотехнологичных отраслях. Однако высокая локализованность теплового воздействия в процессе формирования каждого слоя приводит к возникновению нестационарных температурных полей и связанных с ними динамических напряжений, способных существенно влиять на прочность, жёсткость и ресурс таких изделий.

В условиях стремительного расширения применения аддитивных технологий остро встаёт задача создания надёжных теоретико-механических моделей, позволяющих описывать и прогнозировать поведение конструктивных элементов при сложных тепловых воздействиях. Особенно актуальными являются задачи динамической термоупругости, связанные с анализом переходных процессов и колебательных режимов, возникающих в телах под действием подвижных источников тепла — задач, традиционно входящих в предметную область теоретической механики и динамики машин.

На современном этапе наблюдается явный дефицит интегральных подходов, объединяющих строгое математическое моделирование, надёжные численные

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

1

«03» 09 2025 г.

методы и экспериментальную верификацию при исследовании конструкций, полученных методом SLM. Это ограничивает применение таких элементов в ответственных узлах, где требуется надёжный прогноз их термонапряжённого состояния и остаточной прочности.

В этой связи актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки экспериментально-расчётных методов анализа динамического поведения элементов конструкций, изготовленных аддитивными методами, с использованием моделей механики сплошной среды, теории термоупругости и методов численного моделирования.

Результаты работы могут найти практическое применение при проектировании и оценке надёжности компонентов, изготавливаемых по технологии SLM для изделий аэрокосмической техники, энергетического и машиностроительного профиля, где высоки требования к усталостной долговечности, точности прогнозирования остаточных напряжений и соответствию изделия расчётным характеристикам.

Целью работы является разработка экспериментально-расчётных методов достоверного определения динамических термоупругих характеристик и оценки напряжённо-деформированного состояния конструктивных элементов из нержавеющей стали PH1, изготовленных методом послойного лазерного плавления (SLM), с учётом параметров технологического процесса и нестационарных тепловых воздействий.

Научная новизна работы определяется следующими полученными результатами:

- получено аналитическое решение задачи о нестационарном нагреве полуплоскости подвижным тепловым источником, учитывающее особенности процесса селективного лазерного плавления (SLM), включая влияние граничных условий и параметров движения источника;
- предложен численно-аналитический метод расчёта нестационарных температурных напряжений и деформаций в упругой полуплоскости на основе функций влияния и принципа суперпозиции;
- впервые проведены динамические испытания образцов из нержавеющей стали PH1, изготовленных методом SLM, включая усталостные испытания с регистрацией процессов накопления повреждений;
- проведено конечно-элементное моделирование плоской задачи о технологических температурных напряжениях с учётом реальных параметров процесса печати.

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов диссертации обусловлена использованием строгих и проверенных подходов теории термоупругости, теории дифференциальных уравнений и механики сплошной среды, теории теплопроводности с учетом динамики процесса. Для моделей с учётом запаздывания теплового отклика (Грина–Нагди II типа, Максвелла–Каттанео) получены аналитические решения, проверяемые на корректность граничных и начальных условий. Используются обобщённые постановки задач термоупругости для нестационарных температурных полей,

что позволило адекватно описать возникновение и эволюцию температурных напряжений при локализованном нагреве.

Апробация результатов работы диссертационного исследования докладывалась и обсуждалась на конференциях:

1. Т.С. Терещенко. Динамические испытания образцов, полученных по технологии послойного лазерного спекания (SLM). Актуальные и перспективные научные исследования: сборник статей VII Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2025, стр. 34-40.
2. Т.С. Терещенко. Экспериментальные исследования образцов, полученных по технологии послойного лазерного спекания (SLM). От концепции к реализации – создание будущего через науку и практику: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (Ижевск, 29 марта 2025г.). – Стерлитамак: АМИ, 2025. – стр. 109-114.
3. А.А. Орехов, Т.С. Терещенко. Анализ распределения температуры в полупространстве при воздействии объемного источника тепла. Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию БелИИЖТа - БелГУТа, Гомель, 16–17 ноября 2023 года. – Гомель: Учреждение образования "Белорусский государственный университет транспорта", 2023. – С. 131. – EDN SYETAN.
4. А.А. Орехов, Л.Н. Рабинский, Т.С. Терещенко. Определение поля температур в полуплоскости при нестационарном воздействии теплового потока. Проблемы безопасности на транспорте: Материалы XIII международной научно-практической конференции, посвященной Году качества. В 2-х частях, Гомель, 21–22 ноября 2024 года. Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2024. С. 187. EDN ISZVDA.

По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 2 статьи в периодическом издании, включенном в перечень ВАК РФ и 1 статья в журнале, входящем в МСЦ, остальные публикации являются тезисами докладов на конференциях, в том числе, международных.

Практическая ценность работы определяется возможностью использования разработанных подходов к прогнозированию и контролю термоупругого состояния изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления (SLM), на всех стадиях их жизненного цикла – от проектирования режимов печати до оценки эксплуатационной надёжности. Поэтому полученные результаты могут найти применение для научных разработок в институте проблем машиностроения Российской академии наук (ИПМ РАН), Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) и в институте прикладной механики Российской академии наук (ИПРИМ РАН). Кроме того, материалы работы могут быть использованы в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана, Московском авиационном институте (национальном

исследовательском университете), Казанском национальном исследовательском техническом университете имени А.Н. Туполева – КАИ, Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете имени Н.И. Лобачевского, Саратовском национальный исследовательском государственном университете имени Н.Г. Чернышевского, Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. в процессе обучения бакалавров, магистров, специалистов и аспирантов в лекционных курсах по теории упругости и механике сплошных сред, динамики и прочности машин, уравнениям математической физики, вычислительной механике сплошных сред.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность работы, ставятся цели и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая ценность полученных результатов, а также их достоверность.

В первой главе дается обзор современного состояния проблемы. Рассматриваются принципы аддитивного производства, влияние параметров печати на качество изделий, методы решения задач динамической термоупругости.

Во второй главе описывает экспериментальные исследования образцов, полученных по технологии SLM. Представлены результаты статических и динамических испытаний, включая испытания на ударный изгиб, механическое определение динамического модуля упругости, усталостные испытания, а также измерение коэффициента линейного температурного расширения.

В третьей главе представлена постановка и решение задачи о динамическом поведении упругой полуплоскости при интенсивном нагреве. Приведены модели теплопроводности (Фурье, Грина–Нагди II типа, Максвелла–Каттанео), аналитические решения для температурного и напряжённо-деформированного состояния.

В четвертой главе проведено конечно-элементное моделирование термонапряжённого состояния. Выполнены расчёты с использованием комплекса COMSOL Multiphysics с учётом различных режимов лазерного плавления и влияния технологических параметров.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертационном исследовании. Диссертация и автореферат диссертации изложены хорошим научно-техническим языком. Автореферат достаточно полно отражает основное содержание диссертационной работы.

Замечания по диссертации и автореферату

1. В диссертации рассмотрены три типа моделей теплопроводности (Фурье, Грина–Нагди II типа, Максвелла–Каттанео). Однако отсутствует количественный анализ различий в прогнозах температурных полей и напряжений при использовании каждой из моделей. Более детальное сопоставление результатов позволило бы глубже оценить область применимости соответствующих моделей к задачам лазерной обработки.

2. В работе приведены данные механических и тепловых испытаний, однако валидация результатов конечно-элементного моделирования напряжений представлена ограниченно. Для повышения достоверности численных оценок целесообразно было бы включить сравнение с независимыми экспериментальными данными по остаточным напряжениям, полученными методами механических или физико-химических измерений.
3. Хотя в работе исследуются образцы, изготовленные методом послойного лазерного плавления, влияние конкретных параметров процесса (энергетическая плотность, скорость сканирования, форма траектории) на формирование микроструктуры и, соответственно, на прочностные характеристики, рассмотрено частично. Это снижает применимость выводов к задачам оптимизации режимов печати.
4. Феномен анизотропии и направленной пористости в изделиях, полученных методом SLM, известен и отмечен автором, однако не подвергнут количественному анализу. Включение этой составляющей в постановку задач и численные расчёты позволило бы повысить точность прогноза поведения конструкций при эксплуатационных нагрузках.
5. В работе анализируется динамическая прочность при кратковременных воздействиях, но не рассматриваются циклические тепломеханические нагружения, характерные для реальных условий эксплуатации. Отсутствие оценки накопления повреждений при термоциклировании ограничивает полноту анализа надёжности.
6. Постановка задач в главах 3 и 4 базируется на ряде упрощений (например, полуплоскость, симметричное нагружение), однако в тексте недостаточно аргументов в пользу выбора именно таких условий как репрезентативных для реального процесса селективного лазерного плавления.
7. В работе отсутствует обсуждение возможности калибровки численных моделей на основе экспериментальных данных, например, с использованием методов обратных задач или оптимизационной подгонки параметров. Это могло бы существенно повысить точность численного прогноза термоупругих процессов.
8. В ряде мест (введение, главы 1 и 2) встречаются повторяющиеся формулировки и перегруженные предложения.

Приведенные замечания не снижают общей ценности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы.

Содержание диссертации полно и всесторонне раскрывает постановку задач, применяемые теоретические и численные методы, а также полученные научные результаты. Итоги работы отличаются научной новизной и высокой практической значимостью в области динамики машин. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Заключение

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям пунктов 9-11,13,14 Положения о присуждении ученых степеней ВАК РФ, утвержденного

постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. Полученные в диссертации результаты представляют решение научной задачи по изучению влияния нестационарных тепловых процессов на механическое поведение элементов конструкций, формирующихся методом трехмерной печати, и имеющей существенное значение для развития исследований динамики машин и конструкций. Предложенные подходы и решения могут быть применены при проектировании и анализе конструкций, работающих в условиях переменных тепловых нагрузок – в частности, в узлах авиационной и космической техники, а также в компонентах, изготавливаемых методами аддитивного производства. Основное содержание диссертации соответствует пунктам 13, 14, 15 паспорта научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин. Соискатель Терещенко Татьяна Сергеевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Прикладная математика и системный анализ» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», протокол № 2 от 29 августа 2025 г.

Председательствующий,
профессор кафедры
«Прикладная математика и
системный анализ» СГТУ
имени Гагарина Ю.А., д.т.н.,
профессор



В.С. Попов

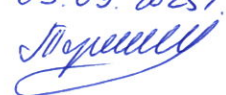
Контактные данные организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Адрес: 410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Телефон: +7 (8452) 99-88-11

E-mail: rectorat@sstu.ru

Официальный сайт: <https://www.sstu.ru>

С отзывом ознакомлена.
03.09.2025.
 Т.С. Терещенко