

ОТЗЫВ

официального оппонента

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.

Развитие технологии селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting, SLM), открыло новые возможности для создания металлических изделий сложной формы с высокой степенью индивидуализации. В этом процессе используются 3D-принтеры, а в качестве исходного материала применяется пластик, металл, бетон и, в перспективе, биологические ткани. Это наиболее быстроразвивающееся направление современного машиностроения и промышленного дизайна, позволяющего изготавливать изделия сложной геометрии с высокой степенью точности и функциональности. При этом используется высокотехнологичное оборудование, современные материалы и передовые методы моделирования и управления процессом. Благодаря этому аддитивные технологии находят широкое применение в медицине, строительстве, автомобилестроении, приборостроении, а также в авиационно-космической и ракетной промышленности.

Особый интерес представляют нержавеющие мартенситные стали, такие как РН1, сочетающие высокую прочность, коррозионную стойкость и технологичность. Применение таких материалов актуально в авиационно-космической, оборонной и медицинской промышленности.

Одним из ключевых факторов, определяющих качество и надёжность изделий, является термонапряжённое и деформированное состояние, возникающее в процессе построения детали. Его исследование требует учёта нестационарного характера нагрева, геометрических особенностей зоны плавления, а также свойств материала, изменяющихся в ходе технологического процесса.

Процесс селективного лазерного плавления характеризуется воздействием концентрированного подвижного теплового источника, создающего нестационарные температурные поля и высокие градиенты температуры, которые вызывают нестационарные термоупругие напряжения, что, в свою очередь, приводит к остаточным деформациям и снижению надёжности изделий. Особенно важным становится анализ этих процессов в нестационарной постановке, адекватно отражающей реальные условия печати. Кроме того, при эксплуатации изделия подвергаются переменным нагрузкам, и для оценки их прочности необходимо учитывать результаты динамических испытаний, включая усталостное поведение материала, формированного методом селективного лазерного плавления. Из вышесказанного следует, что комплексное исследование нестационарных термоупругих процессов, включающее как математическое моделирование, так и экспериментальную оценку динамических характеристик материала, представляется крайне актуальным.

Научная новизна работы определяется следующими полученными результатами:

в диссертационной работе получено новое аналитическое решение задачи нестационарного теплового воздействия подвижного источника на полуплоскость в плоской постановке;

предложен численно-аналитический метод определения нестационарных температурных напряжений и деформаций в упругой полуплоскости при воздействии подвижного теплового источника с учётом граничных условий и параметров движения;

впервые проведены динамические испытания образцов из РН1, изготовленных методом селективного лазерного плавления, включая усталостные испытания с регистрацией процессов накопления повреждений.

проведена верификация конечно-элементной модели плоской термоупругой задачи, отражающие реальные параметры селективного лазерного плавления и физико-механических свойств материала, позволяющая оценивать термонапряжённое состояние элементов конструкции;

Практическая ценность работы заключается в создании численно-аналитической модели для решения задачи о нестационарном нагреве полуплоскости движущимся высокоинтенсивным источником лазерного излучения с учетом технологических параметров установки 3D печати, при прямолинейном движении источника.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационной работе, подтверждается использованием строго обоснованных моделей термоупругости, применением аналитических и численных методов.

Методы исследования.

В работе применены аналитические методы теории упругости и теплопроводности, теория дифференциальных уравнений и методы математической физики. Для численного анализа используется метод конечных элементов, реализованный в программном пакете COMSOL Multiphysics. Аналитические расчёты выполнены с использованием систем компьютерной алгебры Maple и языка программирования Python. Экспериментальные исследования включают динамические испытания образцов из стали РН1, а также статические испытания на растяжение, изгиб и усталость, определение температурных характеристик. Испытания проведены с использованием испытательной системы Instron и методов микроскопического анализа.

Структура диссертации состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем работы составляет 131 страницу, включая 45 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 111 источников.

Во введении сформулированы цели и задачи исследования, обоснована научная новизна и актуальность работы, раскрыта теоретическая и практическая значимость полученных результатов, обоснована их достоверность, изложены структура и объём диссертации, а также проводится список работ автора по теме исследования, и перечень конференций, на которых докладывались и обсуждались результаты данной работы.

Первая глава посвящена обзору современных технологий трёхмерной печати металлических изделий, в том числе технологии селективного лазерного плавления. Приведено описание основных методов аддитивного производства, применяемого оборудования и используемых материалов. На основании проведённого обзора обоснована целесообразность применения методов динамической термоупругости для исследования напряжённо-деформированного состояния изделий, полученных методом селективного лазерного плавления.

Во второй главе представлена методика проведения и результаты экспериментальных исследований образцов из металлопорошковой композиции РН1, изготовленных по технологии послойного лазерного спекания металла при различной

ориентации образцов в процессе печати. Подробно рассмотрены случаи экспериментальное определение коэффициента линейного температурного расширения для напечатанных образцов, которые проводилось на универсальной электрической установке. Исследованы диаграммы напряжение-деформация, полученные в результате механических испытаний. Подробно изложены испытания на ударный изгиб проводился на маятниковом копре, а также определение динамического модуля упругости.

Третья глава посвящена аналитическому исследованию термонапряжённого состояния материала при воздействии концентрированного подвижного теплового источника в процессе селективного лазерного плавления. Приводится анализ различных моделей теплопроводности. Для исследования напряженно-деформированного состояния материала рассматривается несвязанная термоупругая задача в плоской постановке.

В четвертой главе рассматривается конечно-элементное моделирование термонапряженного состояния упругой полуплоскости по определению температурных напряжений и деформаций, возникающих в процессе селективного лазерного плавления. В ходе моделирования была реализована двумерная конечно-элементная модель, включающая учет временной и пространственной динамики нагрева и охлаждения материала в процессе аддитивного производства, и проводилось с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics.

В заключении диссертации подробно перечислены основные результаты, полученные в ходе проведенного исследования.

Публикации по теме диссертации.

По теме диссертации опубликовано 9 работ в научных журналах, в том числе 2 научные статьи в издании, входящем в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ (категория K1) и 2 научные статьи в журнале, входящем в МСЦ. Апробация результатов диссертационной работы проводилась на различных международных симпозиумах и научно-практических конференциях.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов подтверждается использованием строгих и апробированных методов теории термоупругости. Экспериментальные исследования проводились с использованием современного и широко известного оборудования, в соответствии с существующими стандартами проведения испытаний. Конечно-элементный расчет проводился при помощи известного программного комплекса мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics. При конечно-элементном анализе также был проведен подбор параметров сетки для оценки сходимости результатов расчета.

Замечания по диссертации и автореферату.

1. Почему в работе не использовалась теория связанной термоупругости?
2. Почему при исследовании напряженно-деформированного состояния упругой полуплоскости использовались гиперболические модели теплопроводности, в частности модель Максвелла–Каттанео?
3. В диссертации присутствует незначительное количество орфографических опечаток.
4. В тексте диссертации, в главе три, рисунки 3.8 и 3.9 пропущены, в связи с чем есть путаница в тексте на стр. 76, где ссылки на эти рисунки присутствуют.
5. В автореферате, стр. 23, диаграммы не очень хорошо видны.

Сделанные замечания не являются критическими и не снижают общую положительную оценку работы, а также теоретическую и практическую значимость полученных результатов.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

Заключение.

Представленная диссертация Терещенко Татьяны Сергеевны «Исследование динамического поведения конструктивных элементов, изготовленных методом послойного лазерного плавления» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне и посвященной актуальной проблеме в области динамики машин. Полученные в работе результаты являются новыми, представляют как научный, так и практический интерес. Основное содержание работы соответствует паспорту специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин, в частности, в пунктах 13, 14, 15.

Результаты диссертационной работы, докладывались на 7 научно-технических конференциях, опубликованы в 9 научных работах в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ и в изданиях из международной системы цитирования Scopus.

Считаю, что диссертационная работа Терещенко Татьяны Сергеевны **соответствует** критериям и требованиям пунктов 9-14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 «О порядке присуждения ученых степеней» (с изменениями и дополнениями), а ее автор Терещенко Татьяна Сергеевна, **заслуживает** присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Машиноведения и инженерной графики»
Казанского национального исследовательского
технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ.

Митрайкин В.И.



« 26 » 08

2025г.

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Адрес места работы: 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д.10. Телефон+7 (843) 231 00 89, E-mail: vmitryaykin@bk.ru

Научная специальность, по которой защищена диссертация: 05.07.03 «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов». Ученое звание профессора по кафедре «Машиноведения и инженерной графики».

Подпись профессора, доктора технических наук Митрайкина Виктора Ивановича удостоверяю

С отзывом ознакомлен

01.09.2025г.

Т. С. Терещенко 

Подпись 
заверяю. Начальник управления
делопроизводства и контроля

