

В диссертационный совет
24.2.327.13, созданный на базе
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)»
Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва
125993, e-mail: mai@mai.ru

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 представленной диссертационной работы обусловлена стремительным развитием аддитивных технологий, в частности селективного лазерного плавления (Selective Laser Melting, SLM), открывающих принципиально новые возможности в производстве металлических изделий сложной геометрии. Широкое распространение данной технологии в различных отраслях промышленности (от медицины и приборостроения до авиационно-космического комплекса) требует глубокого понимания физических процессов, сопровождающих формирование структуры и свойств материала в ходе послойного построения изделия. Особенно востребованы эти технологии в авиационной и ракетно-космической промышленности, где предъявляются жесткие требования к массогабаритным характеристикам, надежности и ресурсу изделий.

Отсутствие универсальных и верифицированных моделей, учитывающих реальные условия SLM, в том числе движение концентрированного теплового источника, пространственно-временную эволюцию температурных и напряженных состояний, а также изменение свойств материала в процессе построения, существенно затрудняет оптимизацию технологии и повышение надежности производимых изделий. Особенно это критично для авиационной и ракетно-космической отраслей, где цена конструктивных ошибок чрезвычайно высока.

Среди множества материалов, используемых в металлической 3d печати, нержавеющей мартенситные стали, такие как PH1, сочетающие высокую прочность, коррозионную стойкость и технологичность, представляют особый интерес. Применение подобных материалов в SLM сопряжено с рядом научных и инженерных вызовов, связанных с управлением структурой и свойствами в процессе построения. Поведение материала при интенсивном локальном нагреве и последующем охлаждении характеризуется сложными нелинейными эффектами, влияющими на формирование остаточных напряжений, микроструктуру и усталостную прочность.

В работе представлен комплексный подход, сочетающий в себе аналитические подходы к решению задачи динамической термоупругости, численное и конечно-

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«03» 09 2025 г.

элементное моделирование и экспериментальные исследования, что несомненно является актуальным.

Научная новизна работы определяется следующими полученными результатами:

- 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 учетом граничных условий и параметров движения;
- впервые проведены динамические испытания образцов из стали РН1, полученных с применением аддитивных технологий, включая усталостные испытания с регистрацией процессов накопления повреждений;
- разработана конечно-элементная модель для плоской термоупругой задачи, учитывающая реальные параметры селективного лазерного плавления и физико-механических свойств материала, позволяющая оценивать термонапряженное состояние геометрии конструкции на каждом шаге построения.

Практическая значимость выполненного исследования состоит в разработке численно-аналитической модели, предназначенной для описания нестационарного теплового воздействия на полуплоскость со стороны движущегося высокоинтенсивного лазерного источника. Модель учитывает технологические параметры установки аддитивного формообразования и ориентирована на случаи прямолинейного движения теплового источника, что соответствует реальным условиям процесса 3D-печати.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной постановкой задачи, использованием адекватных моделей термоупругости и применением проверенных аналитических и численных методов.

Методы исследования.

В диссертационной работе использован комплексный подход, объединяющий аналитические, численные и экспериментальные методы исследования. Теоретическая часть базируется на применении классических методов теории упругости, теплопроводности, дифференциальных уравнений и математической физики. Для численного моделирования использован метод конечных элементов, реализованный в среде COMSOL Multiphysics. Аналитические расчеты выполнены с использованием систем компьютерной алгебры Maple, а также с применением языка программирования Python.

Экспериментальная часть включает проведение динамических испытаний образцов из мартенситной стали РН1, а также серии статических испытаний на растяжение, изгиб, усталость и определение температурных характеристик материала. Все испытания выполнены с использованием испытательной системы Instron и средств микроструктурного анализа.

Краткий обзор диссертационной работы.

Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников (111 наименований). Общий объем работы составляет 131 страницу.

Во введении представлены цели и задачи исследования, обоснованы актуальность темы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены аргументы в пользу их достоверности. Также дана характеристика структуры и объема диссертации, перечислены публикации автора по теме работы и приведен перечень научных конференций, на которых докладывались и обсуждались основные результаты исследования.

Первая глава содержит обзор современных подходов к трехмерной печати металлических изделий, с акцентом на технологии селективного лазерного плавления. Рассматриваются основные методы аддитивного производства, типы используемого оборудования и применяемые материалы. На основе проведенного анализа обоснована необходимость применения методов динамической термоупругости для изучения напряженно-деформированного состояния конструкций, формируемых посредством технологии SLM.

Во второй главе изложена методика и приведены результаты экспериментальных исследований образцов, изготовленных из металлопорошковой композиции РН1 с использованием технологии послойного лазерного спекания. Особое внимание уделено влиянию пространственной ориентации образцов в процессе печати на их физико-механические характеристики.

Рассмотрено экспериментальное определение коэффициента линейного температурного расширения, проведенное с использованием универсальной электротермической установки. Приведен анализ диаграмм «напряжение-деформация», полученных в ходе статических механических испытаний. Также подробно описаны испытания на ударный изгиб, выполненные на маятниковом копре, и процедура определения динамического модуля упругости материала.

Третья глава направлена на аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния материала, возникающего при воздействии подвижного теплового источника в процессе селективного лазерного плавления. Рассматриваются различные подходы к описанию теплопереноса, включая анализ альтернативных моделей теплопроводности. Для описания возникающих термомеханических эффектов исследуется несвязанная задача динамической термоупругости в плоской постановке.

В четвертой главе изложены подходы к конечно-элементному моделированию термонапряженного состояния упругой полуплоскости, возникающего в процессе селективного лазерного плавления. Выполнено построение двумерной конечно-элементной модели, учитывающей пространственно-временную динамику теплового воздействия. Расчеты выполнены с применением программного комплекса COMSOL Multiphysics, что позволило получить распределения температурных напряжений и деформаций, характерные для заданных условий аддитивного производства.

В заключении приведено последовательное изложение основных научных результатов, полученных в ходе проведенного исследования, с акцентом на их теоретическую и прикладную значимость.

Публикации по теме диссертации.

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, включая 2 статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ (категория K1), а также 2 статьи в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах данных (MCIJ). Основные результаты исследования прошли апробацию на ряде международных симпозиумов и научно-практических конференций.

Замечания по диссертации и автореферату.

1. Каковы теоретические основания и физические предпосылки для применения плоской постановки при математическом моделировании динамики процесса селективного лазерного плавления?

2. В рамках выбранной математической модели использование несвязанного приближения термоупругости представляется недостаточно обоснованным и может привести к существенной погрешности в описании напряженно-деформированного состояния.

3. В тексте диссертации (глава 3) отсутствуют рисунки 3.8 и 3.9, что создаёт затруднения при восприятии материала на странице 76, где содержатся прямые ссылки на указанные иллюстрации.

4. На графиках, представленных на рис. 3.12, отсутствует подпись к ординате, что затрудняет их чтение.

5. В главе 2 не дано объяснения выбора скорости проведения испытаний, выбора расстояния между опорами при испытаниях на изгиб.

6. В таблице 2.2 представлены результаты испытаний только на растяжение, что усложняет анализ изменения свойств материала в зависимости от вида нагружения.

7. В работе не указано как именно проводилась проверка сходимости решения при конечно-элементном моделировании. Варьировались ли параметры и плотность сетки?

Отмеченные замечания носят рекомендательный и уточняющий характер и не умаляют общей положительной оценки диссертационной работы, а также ее теоретической и практической значимости.

Содержание автореферата полностью отражает основное содержание диссертационной работы.

Заключение.

Диссертационная работа Терещенко Татьяны Сергеевны на тему «Исследование динамического поведения конструктивных элементов, изготовленных методом послойного лазерного плавления» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне и посвящена актуальным задачам в области динамики машин. Полученные результаты обладают научной новизной и представляют интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения. Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин, в частности, пунктам 13, 14 и 15.

На основании вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа Терещенко Татьяны Сергеевны **соответствует** критериям и требованиям пунктов 9-14 Положения о присуждении ученых 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 научной специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Официальный оппонент:

Кандидат технических наук,
Ведущий инженер-конструктор
ООО «АУРУС-АЭРО»

03.09.25



А.В. Хомченко

Научная специальность, по которой защищена диссертация:
1.1.8 – «Механика деформируемого твердого тела».

Подпись Хомченко Антона Васильевича удостоверяю:

Заместитель начальника отдела
по работе с персоналом
ООО «АУРУС-АЭРО»



Г.И. Маскинская

Полное наименование организации:

Общество с ограниченной ответственностью «АУРУС-АЭРО».

Адрес места работы: 125315, г. Москва, Ленинградский просп., 72, корп. 3.

Телефон: нет. E-mail: office@aurus-aero.ru

Генеральный директор
ООО «АУРУС-АЭРО»



А.В. Степин

С отзывом ознакомлена
03.09.2025
Т.С. Терещенко