

# СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

**Диссертационный совет:** Д 212.125.05

**Соискатель:** Орехов Александр Александрович

**Тема диссертации:** Математическое моделирование технологических температурных напряжений в процессе изготовления деталей методом селективного лазерного плавления

**Специальность:** 01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:** на заседании «15» декабря 2021 года, протокол 24, диссертационный совет пришел к заключению о том, что диссертационное исследование Орехова Александра Александровича является законченной научно-квалификационной работой, имеет важное прикладное значение и содержит элементы фундаментального исследования. Достоверность полученных результатов обоснована и сомнений не вызывает.

Диссертация Орехова Александра Александровича отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842. На заседании «15» декабря 2021 года, протокол 24, диссертационный совет принял решение присудить Орехову Александру Александровичу ученую степень кандидата технических наук.

**Присутствовали:** заместитель председателя диссертационного совета Фирсанов В.В., ученый секретарь диссертационного совета Федотенков Г.В.

**Члены диссертационного совета:** Вестяк В.А., Гришанина Т.В., Дмитриев В.Г., Дудченко А.А., Зверьяев Е.М., Кузнецов Е.Б., Лурье С.А., Медведский А.Л., Меркурьев И.В., Нерубайло Б.В., Рабинский Л.Н., Рыбаков Л.С., Сидоренко А.С., Солдатенков И.А., Туркин И.К., Тютюнников Н.П.

Заместитель председателя  
диссертационного совета Д 212.125.05,  
д.т.н., профессор

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.05,  
к.ф.-м.н., доцент

« 15 » 12 2021 г.

  
Фирсанов В.В.

  
Федотенков Г.В.

Начальник отдела  
Т.А. Александров



**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**  
**ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.05**  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от «15» декабря 2021 г. № 24

О присуждении Орехову Александру Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Математическое моделирование технологических температурных напряжений в процессе изготовления деталей методом селективного лазерного плавления» по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» принята к защите «14» октября 2021 г., протокол заседания № 23 диссертационным советом Д 212.125.05, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, приказ о создании диссертационного совета Д 212.125.05 – № 105/нк от «11» апреля 2012 г.

Соискатель Орехов Александр Александрович, 3 марта 1993 года рождения, в 2017 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» с присвоением степени «Магистра» по направлению: «Авиастроение» с отличием.

Диплом магистра серия 107718, номер 0961705, выдан 30 июня 2017 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

В период подготовки диссертации соискатель, Орехов Александр Александрович обучался в очной аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский

авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ с 01.09.2017 по 31.08.2021.

Диплом об окончании аспирантуры серия 107718, номер 1178927, выдан 12 июля 2021 г. ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Соискатель работает ассистентом и младшим научным сотрудником в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства образования и науки РФ.

Диссертация выполнена на кафедре 910Б «Механика наноструктурных материалов и систем» института №9 «Институт общепрофессиональной подготовки» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук, профессор, **Рабинский Лев Наумович**, директор Дирекции института №9 «Институт общепрофессиональной подготовки», зав. каф. 903 «Перспективные материалы и технологии аэрокосмического назначения», проф. каф. 902 «Сопротивление материалов, динамика и прочность машин» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты:

**Попов Виктор Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов.

**Волков-Богородский Дмитрий Борисович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной механики Российской академии наук» (ИПРИМ РАН), г. Москва, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта»**, г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, профессором, заведующим кафедрой «Транспортное строительство» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)» Локтевым Алексеем Алексеевичем, заверенный секретарем кафедры, заведующей лабораторией

Федоровой Снежаной Владимировной и утвержденным доктором технических наук, доцентом, проректором ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)» Савиным Александром Владимировичем, указала, что диссертация Орехова Александра Александровича представляет собой завершённую квалификационную работу, в которой решена важная практическая задача об определении технологических температурных напряжений, возникающих в процессе изготовления деталей методом селективного лазерного плавления. Диссертация соответствует всем требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Соискатель имеет 21 опубликованную работу по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. А.С. Курбатов, А.А. Орехов, Л.Н. Рабинский. Анализ задачи потери устойчивости тонкостенных конструкций, выполненных методом селективного лазерного спекания, при интенсивном нагреве. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 12. – С. 513-519.

2. С. И. Жаворонок, А. С. Курбатов, А. А. Орехов, Л. Н. Рабинский. Устойчивость панели термоупругой оболочки при действии подвижного точечного краевого источника тепла. СТИН. – 2019. – № 4. – С. 17-20.

3. Kurbatov, A.S., Orekhov, A.A., Rabinskiy, L.N. Solution of the problem of thermal stability of a thin-walled structure under non-stationary thermal action arising in the process of creating articles by the method of selective laser sintering (2018) Periodico Tche Quimica, 15 (Special Issue 1), pp. 441-447.

4. Zhavoronok, S.I., Kurbatov, A.S., Orekhov, A.A., Rabinskii, L.N. Stability of Panels of a Thermoelastic Shell Heated at the Edge by a Mobile Point Source (2019) Russian Engineering Research, 39 (9), pp. 793-796. DOI: 10.3103/S1068798X19090259

5. Babaytsev, A.V., Orekhov, A.A., Rabinskiy, L.N. Properties and microstructure of AlSi10Mg samples obtained by selective laser melting (2020) Nanoscience and Technology, 11 (3), pp. 213-222. DOI: 10.1615/NanoSciTechnolIntJ.2020034207

6. A. A. Orekhov, L. N. Rabinskiy, G. V. Fedotenkov, T. Z. Hein. Heating of a Half-Space by a Moving Thermal Laser Pulse Source. Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021., Vol. 42., No 8., pp. 1912-1919., DOI 10.1134/S1995080221080229

В этих и остальных работах изложены и обоснованы основные результаты автора по математическому моделированию технологических температурных напряжений в процессе изготовления деталей методом селективного лазерного плавления.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

от **научного руководителя, ведущей организации и официальных оппонентов**, отзывы положительные;

от **Шуршалова А.И.**, кандидата технических наук, ведущего инженера конструктора, **Яшутина А.Г.**, начальника отделения прочности, **Авраменко А.Ф.**, начальника бригады, ПАО «Корпорация Иркут», отзыв положительный;

от **Хроматова Василия Ефимовича**, кандидата технических наук, профессора кафедры «Робототехника, мехатроника, динамика и прочность машин», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», заверенный заместителем начальника управления по работе с персоналом, Людмилой Ивановной Полевой, отзыв положительный;

от **Мартиросовой Елены Ивановны**, кандидата технических наук, генерального директора ЗАО «ВСТ – Спецтехника», отзыв положительный;

от **Вермель Владимира Дмитриевича**, доктора технических наук, заслуженного машиностроителя РФ, начальника научно-технического центра научно-производственного комплекса ФГУП «ЦАГИ», профессора МФТИ, утвержденный Первым заместителем Генерального директора ФГУП «ЦАГИ», доктором физико-математических наук, профессором Медведским А.Л., отзыв положительный.

В поступивших отзывах отмечена актуальность темы диссертационного исследования, дан краткий обзор работы по главам, отмечены новизна и достоверность полученных автором результатов, и их практическая и фундаментальная ценность.

В поступивших отзывах от официальных оппонентов и ведущей организации имеются следующие основные замечания:

1. В диссертационной работе не дано обоснование выбора материала при изготовлении экспериментальных образцов.

2. В разделе 3.1.5, где даны результаты решения задачи о напряженно-деформированном состоянии полупространства в результате действия подвижного источника лазерного излучения, для полноты картины имело бы смысл дать распределение температурных напряжений не только по глубине, но и на поверхности полупространства. Поскольку в аналогичной задаче о

нагреве полупространства подвижным источником лазерного излучения (разделы 3.1.1 – 3.1.4) это было сделано.

В отзывах на автореферат следует отметить такие критические замечания:

1. В автореферате приведены диаграммы напряжение-деформация образцов из различных материалов при растяжении, сжатии, трехточечном изгибе, но не приведено описание особенностей поведения материалов, характерные напряжения, соответствующие упругой, упруго пластической стадии деформации.

2. Отсутствует информация об оценке величин возможного коробления деталей в аддитивном процессе изготовления по SLM-технологии с использованием полученных расчетных соотношений или в конечно-элементном расчете.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается** тем, что официальные оппоненты являются высокопрофессиональными специалистами в данной области и имеют публикации, связанные с направлением исследований диссертации, а в ведущей организации работают специалисты, достижения которых широко известны, в том числе и в области науки, соответствующей тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны** математическая модель определения технологических температурных напряжений, возникающих в деталях в процессе их изготовления методом селективного лазерного плавления металлопорошковой композиции;

**предложен** метод конечно-элементного моделирования технологических температурных напряжений, возникающих в процессе производства изделий методом селективного лазерного плавления;

**доказана** перспективность использования разработанных методов и подходов для расчета температурных напряжений, возникающих в процессе изготовления деталей методами трехмерной печати, в частности методом послойного селективного лазерного плавления металлопорошковой композиции;

**новые термины и понятия** не вводились.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что:

**доказана** правомерность и обоснованность предложенных методов решения задач определения термонапряженного состояния в процессе изготовления деталей методом селективного лазерного плавления;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован** метод функций влияния и принцип суперпозиции;

**изложены** новые идеи и подходы для определения технологических температурных напряжений, возникающих в процессе производства изделий методом селективного лазерного плавления;

**раскрыто** влияние параметров трехмерной печати на физико-механические свойства образцов, изготавливаемых методом селективного лазерного плавления;

**изучено** влияние распределения температуры на величину возникающих в процессе трехмерной печати температурных напряжений;

**проведена модернизация** аналитических и численно-аналитических методов, и алгоритмов определения технологических температурных напряжений, возникающих в деталях в процессе их изготовления методом селективного лазерного плавления металлопорошковых композиций;

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны** новые методы и подходы, применимые для определения технологических температурных напряжений, возникающих в деталях в процессе их изготовления методами селективного лазерного плавления;

**определены** перспективы дальнейшего использования разработанных численно-аналитических и конечно-элементных моделей для анализа термонапряженного состояния изделий в процессе синтеза металлопорошковой композиции методом селективного лазерного плавления;

**созданы** новые эффективные численно-аналитические и конечно-элементные модели для определения технологических температурных напряжений в процессе изготовления изделий методом селективного лазерного плавления металлопорошковых композиций;

**представлены** результаты численно-аналитических и конечно-элементных расчетов термонапряженного состояния изделий в процессе их создания методом селективного лазерного плавления;

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**для экспериментальных работ использовалось** сертифицированное и широко известное оборудование, а именно: универсальная электромеханическая испытательная машина Instron 5969 с программным обеспечением Bluehill 3, высокотемпературная печь Instron 3119-406 и видеоэкстензометр Instron 2663-821.

**теория** и методы построены на известных и обоснованных методах механики деформируемого твердого тела, теории термоупругости, строительной механики и сопротивления материалов, методы решения математически строгие и непротиворечивы;

**идея базируется** на обобщении метода функций влияния применительно к исследованию технологических температурных напряжений, возникающих в деталях, изготавливаемых методом селективного лазерного плавления;

**использованы** сравнения полученных результатов численно-аналитических и конечно-элементных расчетов определения технологических температурных напряжений, возникающих в деталях в процессе выборочного лазерного плавления с применением современной методики сбора и обработки исходной информации;

**установлена** возможность получения достоверных оценок возникающих технологических температурных напряжений в процессе изготовления деталей методом селективного лазерного плавления;

**использованы** современные программные комплексы математического и численного моделирования, а именно: программный пакет, система компьютерной алгебры Maple, универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа ANSYS и COMSOL Multiphysics.

**Личный вклад** соискателя состоит в постановке задачи и получении новых аналитических и численных решений для оценки технологических температурных напряжений, возникающих в деталях в процессе селективного лазерного плавления. А также, в подготовке статей по теме диссертации, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, и статей, опубликованных в журналах, цитируемых в базе данных Scopus.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. В основных результатах у Вас написано, что разработан аналитический метод, упоминается упругое полупространство, правильно? Расскажите поподробнее об упругом полупространстве, как оно нагружено, конкретнее можно?

2. Как влияет коэффициент температурного расширения, как он учитывается?

3. В чем разработанный Вами метод лучше, чем уже существующие?

4. Соискатель Орехов А.А. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

5. Упругое полупространство ограничено на поверхности  $z=0$ . Нагрузка в виде теплового потока действует на поверхность полупространства.



Полупространство обладает свойствами, которые соответствуют свойствам материала: удельная теплоемкость, плотность, теплопроводность. Также на поверхности полупространства имеется конвективный поток. В начальный момент времени температура равна нулю, а перемещения и напряжения отсутствуют.

6. Влияние коэффициента теплового расширения не исследовалось, так как использовалось значение для конкретного материала.

7. В литературе мне не встречались решения подобных задач в пространственной постановке, решения данных задач приводится в двумерной постановке, у меня же используется пространственная постановка. Полученные модели позволяют прогнозировать величину напряжений, которые возникают в процессе трехмерной печати, что важно, так как печать изделий может производиться с разными параметрами. Данная модель позволяет это учитывать и подбирать оптимальные параметры для трехмерной печати.


На заседании 15 декабря 2021 года диссертационный совет принял решение присудить Орехову Александру Александровичу ученую степень кандидата технических наук, поскольку представленная диссертация является законченным научно-квалификационным исследованием, которое содержит решение задачи, имеющее важное значение в области динамики, прочности машин, приборов и аппаратуры.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 4 доктора технических наук по специальности 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры», участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 18, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя  
диссертационного совета Д 212.125.05,  
д.т.н., профессор

  
Фирсанов  
Валерий Васильевич

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 212.125.05,  
к.ф.-м.н., доцент

  
Федотенков  
Григорий Валерьевич

«15» 12 2021 г.

Начальник диссертационного совета Д 212.125.05 МАИ  
Т.А. Анисимов

