

ОТЗЫВ

официального оппонента Попова Виктора Сергеевича
на диссертационную работу Орехова Александра Александровича
на тему «Математическое моделирование технологических температурных напряжений в процессе изготовления деталей методом селективного лазерного плавления» по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук

Диссертационная работа Орехова А.А. посвящена математическому моделированию технологических температурных напряжений, возникающих в деталях в процессе трехмерной печати. В последние годы методы аддитивного производства активно применяются для изготовления изделий и элементов конструкций различного назначения. Однако, такие методы принципиально отличаются от традиционных, что влечет за собой необходимость определения физико-механических характеристик получаемых деталей и создание новых численно-аналитических и конечно-элементных моделей для определения термонапряженного состояния в процессе аддитивного производства. В диссертационной работе предложены новые подходы к определению напряжений и деформаций, возникающих в процессе создания изделий методами трехмерной печати, что делает эту работу **актуальной и соответствующей** специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Научная новизна работы определяется следующими полученными результатами:

- получено аналитическое решение задачи о нестационарном нагреве полупространства подвижным источником лазерного излучения, для определения возникающих технологических температурных напряжений;
- предложен численно-аналитический метод определения технологических температурных напряжений в упругом полупространстве, при воздействии на его поверхность подвижного источника тепла;
- получены новые результаты теплофизических и механических испытаний образцов из алюминиевого сплава AlSi10Mg, изготовленных методом селективного лазерного плавления в различных инертных средах и при различном направлении печати;
- в пакете Ansys разработана и реализована адекватная конечно-элементная модель послойного селективного лазерного спекания металлопорошковой композиции алюминиевого сплава AlSi10Mg, позволяющая определять термонапряженное состояние элементов конструкции с учетом анизотропных свойств материала;
- впервые предложен и реализован в конечно-элементном комплексе COMSOL Multiphysics метод численного моделирования технологических

температурных напряжений, возникающих в монослое в процессе селективного лазерного плавления металлопорошковой композиции AlSi10Mg с учетом реальных параметров трехмерной печати.

Структура диссертации.

Диссертационная работа включает в себя введение, три главы, заключение и список литературы. Работа содержит 130 страниц основного текста, включая 54 рисунка и 119 ссылок на литературу.

Во введении представлена краткая характеристика работы, дается обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы. Перечислены научные мероприятия, на которых проводилась апробация работы, представлен список публикаций автора по теме диссертационного исследования.

В первой главе приведен достаточно подробный обзор существующих методов, установок и материалов, используемых в аддитивном производстве изделий из металлопорошковых композиций на основе различных металлических сплавов. Дан краткий обзор существующих методов конечно-элементного моделирования процессов аддитивного производства.

Во второй главе представлены общие сведения об экспериментальных образцах, полученных из металлопорошковой композиции алюминиевого сплава AlSi10Mg методом селективного лазерного плавления на отечественной установке трехмерной печати. Приведены методика и результаты термических и механических испытаний экспериментальных образцов, приводятся данные о физико-механических характеристиках образцов, изготовленных методом 3D печати.

В третьей главе дается постановка задачи об определении технологических температурных напряжений в деталях, изготавливаемых методами 3D печати, вызванных нестационарным тепловым потоком в результате воздействия лазерного излучения. Численно-аналитически решается вспомогательная задача о нестационарном нагреве полупространства подвижным источником тепла и ее решение используется для определения технологических напряжений. Описывается предложенный автором подход к конечно-элементному моделированию процесса 3D печати в пространственной постановке для монослоя. Для моделирования использовался программный комплекс COMSOL Multiphysics. Результаты численно-аналитического расчета и конечно-элементного моделирования коррелируют друг с другом. Также представлены результаты расчетов конечно-элементной модели компоновочного решения, состоящего из нескольких образцов, печать которых производится в различном направлении, относительно платформы построения (вертикально, горизонтально и под углом 45°). Расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS.

Обоснованность и достоверность определяется использованием строгих и апробированных подходов механики деформируемого твердого тела,

математическим описанием физических процессов с использованием известных моделей термоупругости. Достоверность полученных результатов обоснована сопоставлением численных и аналитических результатов моделирования. Численное моделирование реализовано с использованием известного программного обеспечения Ansys и COMSOL Multiphysics, а при построении конечно-элементных моделей использовалась сетка высокой плотности.

Теоретическая и практическая значимость.

Представлены методики численно-аналитического расчета для определения технологических температурных напряжений, возникающих в деталях при их изготовлении методом селективного лазерного плавления. В ходе их реализации были получены численно-аналитические решения для определения нестационарных температурных градиентов, являющихся причиной возникновения нормальных и касательных напряжений в процессе 3D печати. Разработанные подходы позволяют приближенно оценивать термонапряженное состояние в процессе изготовления деталей без привязки к геометрии. Представленные конечно-элементные модели имеют важное практическое значение и могут быть использованы при проектировании изделий, получаемых методами аддитивных технологий.

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 научной работе, из них 2 научные работы в журналах, рекомендованных перечнем ВАК РФ, 4 работы в международных журналах, индексируемых Scopus, 11 публикаций в виде тезисов докладов на конференциях, в том числе международных, а также 4 свидетельства о госрегистрации программ для электронных вычислительных машин.

Работа написана хорошим научно-техническим языком, автореферат диссертации достаточно полно отражает основные положения и результаты проведенного исследования.

Замечания по диссертационной работе и автореферату:

1. В диссертации в таблице 12 не указано, в каких единицах представлены значения коэффициента теплообмена на поверхности β .
2. При постановке задачи в главе 3 диссертации не указаны значения используемых параметров, таких как радиус пятна, мощность лазерного излучения, коэффициенты поглощения и теплообмена, а также свойства материала.
3. В диссертационной работе не дано обоснование выбора материала при изготовлении экспериментальных образцов.
4. В автореферате рисунок 8 (а) плохо читаемый, на нем отсутствуют обозначения координатных осей, а по рисунку 11 сложно судить о геометрических размерах, представленных на нем деталей.

Указанные замечания носят уточняющий и редакционный характер и не снижают уровня и научной ценности полученных результатов, а также общее положительное суждение оппонента о диссертации и ее автореферате.

Оценивая работу в целом, необходимо отметить, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, посвященной решению практически важной и научно значимой задачи, по исследованию термонапряженного состояния растущего тела при учете влияния технологических параметров процесса трехмерной печати на его физико-механические свойства. Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на научных конференциях и симпозиумах, опубликованы в профильных журналах ВАК и Scopus, а программно-реализованные методики расчета термонапряженного состояния выращиваемых изделий защищены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Поэтому считаю, что представленная диссертация **соответствует** квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК к диссертационным работам, в том числе соответствует требованиям п.9 действующего Положения «О порядке присуждения учёных степеней». Автор диссертации Орехов Александр Александрович, **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Официальный оппонент, профессор,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Прикладная математика и системный анализ»
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»

19.11.2021



Попов Виктор Сергеевич

Адрес места работы: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Тел.: +7 (927) 162-68-26.

E-mail: vic_p@bk.ru

Научная специальность, по которой защищена докторская диссертация:

01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Ученое звание профессора по кафедре «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика».

Подпись профессора, доктора технических наук Попова Виктора Сергеевича удостоверяю.

Ученый секретарь Ученого совета
СГТУ имени Гагарина Ю.А.



Н.В. Тищенко