

ОТЗЫВ

официального оппонента, к.ф.-м.н. Волков-Богородского Д.Б.,

на диссертационную работу

Орехова Александра Александровича

«Математическое моделирование технологических температурных напряжений в процессе изготовления деталей методом селективного лазерного плавления», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Диссертационная работа посвящена математическому моделированию технологических температурных напряжений, возникающих в деталях в процессе 3D печати. Аддитивные технологии являются современным и быстроразвивающимся направлением в производстве, позволяющим внедрять изделия различной сложности во многие отрасли промышленности, такие как медицина, строительство, автомобилестроение, приборостроение, а также в авиационную и ракетно-космическую технику. Рассматриваемый в настоящей работе метод послойного лазерного плавления металлопорошковой композиции является одним из наиболее перспективных способов трехмерной печати металлических изделий. Однако, процесс производства связан с высокими температурами, локализованными в небольшом пространстве, и их градиентами, вызывающими сильные деформации материала и остаточные напряжения. Поэтому детальное математическое моделирование всего технологического процесса является важной актуальной задачей. В работе предложен метод определения термонапряженного состояния в процессе изготовления изделий различной геометрии, представлены результаты механических испытаний экспериментальных образцов, разработаны новые численно-аналитические и конечно-элементные методы расчета термонапряженного состояния изделий в процессе 3D печати. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании изделий и элементов конструкций, изготавливаемых методами аддитивного производства. Поэтому, тема диссертационной работы является **актуальной и соответствует** специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность

Отдел документационного
обеспечения МАИ

29.11.2021г.

машин, приборов и аппаратуры».

Научная новизна работы определяется следующими результатами:

– Получено аналитическое решение задачи о нестационарном нагреве полупространства с подвижным источником лазерного излучения, используемое для определения технологических температурных напряжений;

– Предложен численно-аналитический метод определения технологических температурных напряжений в упругом полупространстве при воздействии на него подвижного источника тепла;

– Получены новые результаты теплофизических испытаний образцов из металлопорошковой композиции $AlSi_{10}Mg$, синтезированных методом селективного лазерного плавления в различных инертных средах и при различных стратегиях печати, а также результаты механических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб. Определены коэффициенты линейного температурного расширения этих образцов.

– В конечно-элементном программном комплексе ANSYS Additive разработана адекватная модель послойного селективного лазерного спекания металлопорошковой композиции, позволяющая численно определять термонапряженное состояние элементов конструкции с учетом анизотропных свойств материала.

– В конечно-элементном программном комплексе COMSOL Multiphysics предложен и реализован метод численного моделирования с реальными параметрами трехмерной печати технологических температурных напряжений, возникающих в монослое металлопорошковой композиции $AlSi_{10}Mg$ в процессе селективного лазерного плавления.

Диссертационная работа изложена на 130 страницах и включает в себя три главы, введение, заключение и список литературы.

Во введении проводится анализ состояния рассматриваемых вопросов, определяются цель диссертационной работы и задачи исследований.

В первой главе рассматривается современное состояние основных аспектов, составляющих процесс аддитивного производства, – методы плавления, состав оборудования и материалы, используемые при 3D печати, а также вопросы

моделирования технологического процесса 3D печати. Основной акцент делается на оборудовании для 3D печати металлопорошковой композицией и на актуальном состоянии использования материалов в аддитивном производстве на основе порошка металлов.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований физико-механических характеристик образцов из $AlSi_{10}Mg$, полученных методом селективного лазерного спекания. В главе подробно описаны процесс подготовки образцов и методика проведения испытаний для определения КЛТР, а также других физико-механических характеристик при испытаниях на растяжение, сжатие и трехточечный изгиб.

В третьей главе приведены аналитические и численные решения задачи по определению термонапряженного состояния, возникающего в процессе трехмерной печати металлопорошковой композиции в пределах одного слоя. Решена вспомогательная задача о нестационарном нагреве изотропного полупространства подвижным поверхностным источником тепла. Все компоненты напряжённого состояния определялись при помощи построенных с помощью интегрального преобразования Фурье и Лапласа функций влияния для термоупругого полупространства. Численное моделирование проводилось в программных комплексах ANSYS и COMSOL.

В заключении диссертации представлены выводы о работе и перечислены основные результаты проведенного исследования.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертации обуславливается использованием строгих подходов механики деформируемого твердого тела и применением известных, хорошо отработанных моделей термоупругости. Результаты аналитических расчетов были подтверждены численным конечно-элементным моделированием.

Практическая ценность работы заключается в создании численно-аналитической модели для решения задачи о нестационарном нагреве полупространства движущимся высокоинтенсивным источником лазерного излучения с учетом таких реальных параметров установки 3D печати, как мощность лазера, диаметр пятна лазерного излучения, скорость сканирования,

толщина слоя и тип штриховки (т.е. траектории движения лазерного пятна). В работе на основе конечно-элементного моделирования была разработана методика проведения численных расчетов для определения напряжений, возникающих в результате воздействия лазерного излучения на материал в процессе трехмерной печати методом селективного лазерного плавления металлопорошковых композиций. Предложенная методика может быть использована для подбора оптимальных параметров, при которых технологические температурные напряжения будут минимальными.

По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе: 2 научные работы в изданиях из списка ВАК, 4 научные работы в изданиях, индексируемых Scopus, и 4 свидетельства на программы для электронных вычислительных машин. Содержание диссертации соответствует содержанию опубликованных работ. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе:

1. При решении задачи о напряженно-деформированном состоянии полупространства в результате действия подвижного источника лазерного излучения соответствующие функции влияния получены в виде несобственных интегралов (1.30) на стр. 74. В работе ничего не сказано о том, каким образом происходит вычисление этих интегралов. Однако известно, что это непростая задача, поскольку они фактически определяют формулы обратного преобразования Фурье и Лапласа.
2. На стр.73-76 произошла сбивка нумерации, и номера некоторых формул повторяются дважды, а номера некоторых формул относятся к другому разделу диссертации (к первой главе).
3. 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.

4. В разделе 3.2, где демонстрируется пример численного моделирования процесса трехмерной печати по технологии SLM в конечно-элементном комплексе ANSYS Additive, механические параметры образцов из $AlSi_{10}Mg$ по каким-то причинам были заданы существенно отличными от параметров, полученных ранее в результате испытаний в разделе 2. В работе не дано объяснений на этот счет.
5. Результаты численного моделирования процесса трехмерной печати в конечно-элементных комплексах ANSYS Additive и COMSOL Multiphysics представлены в виде обширного числа однотипных рисунков, демонстрирующих распределение температуры и напряженно-деформируемого состояния в различные моменты времени (рисунки 3.17-3.23 и 3.27-3.36). Однако, в работе отсутствует анализ этих рисунков и комментарии к ним. Без этого воспринимать результаты численного моделирования трудно.
6. В работе по смыслу формул (3.6) на стр.55 и (3.31) на стр. 74, видимо, неправильно трактуется функция Хевисайда (пороговая функция), которая принимает нулевое значение при отрицательном аргументе, тогда как в формулах (3.6) и (3.31) обрезать надо значения при положительном аргументе.

Сделанные замечания не имеют принципиального значения и не влияют на положительную оценку работы. В целом диссертационная работа представляет собой завершенное исследование, посвященное решению актуальной проблемы, и апробирована на научных конференциях и симпозиумах достаточно высокого уровня, включая международные.

Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о

присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор, Орехов Александр Александрович, **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Официальный оппонент

Волков-Богородский Дмитрий Борисович,

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник

ФГБУН «Институт прикладной механики

Российской академии наук» (ИПРИМ РАН)

Адрес места работы: 125040, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 7, стр. 1.

Тел.: +7 (909) 659-54-75

E-mail: v-b1957@yandex.ru

Специальность ВАК, по которой защищена
диссертационная работа – 01.01.07 «Вычислительная
математика».

Волков-Богородский

Д.Б. Волков-Богородский

Подпись старшего научного сотрудника, кандидата физико-математических наук
Волков-Богородского Дмитрия Борисовича достоверяю.

Ученый секретарь ИПРИМ Р



Ю.Н. Карнет

Ю.Н. Карнет

25.11.2021 г.