

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Гордеева Георгия Андреевича «Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при селективном лазерном плавлении», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

### **Актуальность темы**

Метод селективного лазерного плавления металлических порошков с целью послойного синтеза материала является одним из наиболее перспективных направлений аддитивной технологии. Математическое моделирование играет важную роль для определения закономерностей в процессах плавления металлических порошков под воздействием энергии лазерного излучения, последующего затвердевания расплава и оценки характеристик полученного материала. Разработка новых моделей и проведение численного моделирования в ходе исследований часто является единственным способом получить необходимую информацию. Многие задачи, имеющие важное научно-прикладное значение, до сих пор не решены, так как имеются серьезные проблемы с адекватностью предлагаемых моделей и эффективностью методов их реализации. Это обуславливает необходимость дальнейшего развития как фундаментальных основ применения математического моделирования и вычислительных методов, учитывающих особенности современных вычислительных технологий, так и написания пакетов программ позволяющих проводить большой объем численных экспериментов при изучении технологических процессов.

В связи с этим, диссертационная работа Г.А. Гордеева, посвященная разработке математических методов для описания и исследования нестационарного теплопереноса в процессах селективного лазерного плавления и последующему анализу температурных полей, пористости и усадки при обработке порошковых металлических материалов с проведением расчетов тестовых задач, имеющих как исследовательский, так и прикладной характер, несомненно, **актуальна** и имеет больше научное, а также практическое значение.

### **Содержание диссертации.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списков сокращений и основных обозначений, списка литературы из 169 наименований и 7 приложений. Общий объем работы 189 страниц, включая 57 рисунков и 6 таблиц.

**Во введении** формулируется тема диссертационной работы – исследование процессов при селективном плавлении металлических порошков под воздействием энергии лазерного импульса, обосновывается актуальность исследований, формулируются цели и методы их достижения, указывается новизна полученных результатов, их научная и практическая ценность, формулируются положения, выносимые на защиту, определяется личный вклад автора при получении результатов, приводится информация об апробации работы.

**В первой главе** содержится обзор литературы посвященной технологии селективного лазерного плавления. Рассмотрены аналитические модели теплопереноса, которые используются для получения оценок воздействия высокоэнергетических источников на тела различной геометрии и показана ограниченность их применения при описании процессов при селективном лазерном плавлении, что предполагает использование методов численного моделирования. Рассмотрены основные методы численной реализации математических уравнений в задачах переноса, их достоинства и недостатки.

Автором проведен анализ существующих математических моделей селективного лазерного плавления используемых при исследовании процессов послойного синтеза металлов. В результате очерчены контуры разрабатываемой модели сбалансированной по времени расчетов и адекватности получаемых результатов, где приняты следующие допущения:

- порошковый слой рассматривается в приближении сплошной среды, конвекция учитывается использованием эффективных теплофизических параметров теплопереноса;

- свойства спекаемого порошкового слоя описываются с помощью эффективных характеристик теплопереноса;

- скрытая теплота при фазовом переходе не учитывается явным образом, а вводится как свойство металла – энтальпия, граница фазового перехода определяется через изотермы температуры плавления материала порошка;

- энергия лазерного импульсного излучения описывается с помощью поверхностного источника;

- учитывается зависимость динамики спекания порошка и изменение теплофизических параметров от локальной пористости;

- предполагается возможность проводить серии вычислительных экспериментов с различными управляющими параметрами обработки.

**Во второй главе** предложена математическая модель селективного лазерного плавления, которая позволяет рассчитывать теплоперенос, динамику компактирования и усадки металлического порошкового слоя, а так же изменение локальной пористости в материале. Разработан алгоритм, позволяющий реализовать предложенную математическую модель методом конечных элементов. Предложены методы определения зон расплавленного металла и активного конвективного перемешивания в расплаве, а также положения локального объема спекаемого порошка. Разработанный алгоритм реализован в программе для ЭВМ.

**Третья глава** посвящена проверке адекватности предложенной модели селективного лазерного плавления металлических порошков. Получены результаты по оценке времени расчетов и максимальной температуры порошкового слоя от параметров построения конечно-элементной сетки и дискретизации модели по времени. Показана сходимость решений по расчетной сетке.

Проведено численное моделирование процессов сплавления слоя порошка железа на подложке при различных параметрах лазерного импульса. Результаты расчетов сравнивались с данными анализа обработанных образцов полученных в ходе лабораторных экспериментов. Было определено их удовлетворительное соответствие по различным характеристикам, включая значения средней локальной пористости сплавленного трека.

**В четвёртой главе** исследовано влияние параметров миллисекундных лазерных импульсов на процессы селективного плавления высокодисперсного порошка железа. Показано, что энергия и радиус лазерного луча определяют форму проплавленной зоны, а усадка порошка происходит преимущественно во время лазерного импульса. Получена оценка времени выравнивания температурного поля после лазерного импульса в зависимости от его характеристик. Предложен алгоритм определения рациональных режимов лазерной обработки, обеспечивающих качественное сплавление порошка железа. Получена оценка максимальной скорости объемной печати методом селективного плавления лазерными миллисекундными импульсами.

**В приложениях** приводится вывод уравнения теплопроводности для пористой структуры в приближении сплошной среды и уравнения положения локального объема порошкового слоя, описываются методы определения зоны расплава, зоны активного конвективного перемешивания в порошковом слое и подложке, феноменологического учета конвекции металла в расплаве с помощью эффективных теплофизических коэффициентов, дана таблица констант высокодисперсного порошка железа и верификационная база для проверки результатов расчета средней пористости сплавленного трека. Прилагается Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертации. Выводы аргументированы и полностью отражают основные научные достижения автора.

#### **Научная новизна полученных результатов.**

Несомненной новизной обладают результаты, полученные автором при разработке математической модели и методов ее численной реализации для исследования селективного

плавления высокодисперсного порошка железа при воздействии энергии лазерных импульсов. В частности,

- предложена комплексная математическая модель, описывающая процессы нестационарного теплопереноса, компактирования и усадки металлических порошков, фазовые переходы и теплоотдачи в окружающую среду, с коэффициентами теплопроводности и поглощения лазерного излучения зависящими от характеристик материала порошкового слоя;

- разработана феноменологическая модель для определения периода и частоты лазерной импульсной генерации, обеспечивающей равномерную термическую обработку порошкового слоя;

- построены диаграммы для определения рациональных режимов обработки порошка железа миллисекундным лазерным импульсом, позволяющие оценивать степень повторного оплавления ранее полученных слоев, максимальные температуры разогрева, шероховатость боковых поверхностей и скорость объемной печати изделий.

- разработан алгоритм реализации математической модели селективного лазерного плавления при воздействии энергии лазерного импульса для высокоскоростных расчетов при ряде обоснованных допущений в модели и при построении пространственной и временной сеток;

- усовершенствован алгоритм определения положения локального объема спекаемого порошкового слоя с помощью послойно-изменяющейся геометрии конечно-элементной сетки в области термического воздействия;

- реализована программа для ЭВМ для расчета нестационарных полей температуры, удельной энтальпии, остаточной пористости и усадки порошка железа в процессе селективного плавления миллисекундными лазерными импульсами, что позволяет выявлять влияние параметров лазерной обработки на характеристики получаемых изделий.

**Обоснование и достоверность** результатов диссертационной работы обеспечивается корректностью поставленной физической задачи, корректностью и согласованностью математических моделей, обеспечивающих выполнение законов сохранения, большим количеством данных полученных в ходе решения тестовых задач и их согласованностью, как с теоретическими предпосылками, так и с результатами, полученными в ходе лабораторных экспериментов. Сформулированные основные выводы имеют ясный смысл, базируются на результатах изложенных в диссертации и хорошо согласуются с рядом известных результатов. Результаты диссертации докладывались на российских и международных научных конференциях, обсуждались на семинарах в Институте механики сплошных сред УрО РАН и в ВУЗах России, опубликованы в различных изданиях, включая рецензируемые журналы, из которых 7 из перечня ВАК. Оформлена государственная регистрация программы для ЭВМ и патента РФ. Всё это позволяет считать полученные результаты обоснованными и достоверными.

#### **Научно-практическая значимость результатов работы.**

Разработка аппарата математического моделирования для исследования условий и режимов формирования изделий из порошков металлов при воздействии энергии лазерных импульсов – необходимый этап, предшествующий оптимизации режимов эксплуатации установок объемной печати. Поэтому, предложенные новая математическая модель и алгоритм ее реализации, реализованные в виде комплекса программ для проведения расчетов нестационарных полей температуры, удельной энтальпии, остаточной пористости и усадки порошка железа при воздействии энергии миллисекундных лазерных импульсов, позволяют сделать важный шаг, как в развитие методов математического моделирования, так и в решение проблемы оптимизации режимов лазерной обработки.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и дает представление о выполненной работе.

Несмотря на высокий научный уровень полученных результатов, по диссертационной работе имеются следующие **замечания**.

1) В модели предполагается, что энергия лазерного импульса воздействует только на поверхность порошкового слоя. Однако из литературных источников, и это указано в диссертации, порошковый слой можно рассматривать как частично проницаемую среду и, возможно, в модели следовало бы использовать объемный источник энергии, а получаемые результаты могли бы достаточно серьезно измениться.

2) Нумерация формул (2.3.а,б,в,г) на страницах 63-64 диссертации не соответствует последующему тексту на стр. 64, где используется нумерация (2.3.4), (2.3.5).

Сделанные выше замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

### **Заключение.**

Диссертация Гордеева Георгия Андреевича соответствует специальности 05.13.18 и является завершённой научно-квалификационной работой, которая на основании выполненных автором исследований и полученных результатов вносит значительный вклад как в развитие методов математического и численного моделирования, так и в решение важной научной проблемы по управлению процессами аддитивной технологии послойного синтеза материала с использованием метода селективного лазерного плавления металлических порошков. Диссертационная работа соответствует требованиям п.9 "Положения о присуждении учёных степеней" постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор Гордеев Георгий Андреевич достоин присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,  
главный научный сотрудник лаборатории Термомеханики /  
и прочности новых материалов ИТПМ СО РАН,  
д.ф.-м.н.  
3 сентября 2020 г.

  
— В.Н. Попов

Подпись д.ф.-м.н.,  
ученый секретарь ИТПМ  
к.ф.-м.н.



зеряю  
— Ю.В. Кратова

Попов Владимир Николаевич  
д.ф.-м.н., специальность ВАК 05.13.16 – «Применение вычислительной техники и математических методов в научных исследованиях. Математика»,  
главный научный сотрудник лаборатории Термомеханики и прочности новых материалов  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной механики Сибирского отделения РАН <http://www.itam.nsc.ru/>  
Адрес: Российская Федерация, 60090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1  
Телефон: +7(383)3302713  
Эл. почта: [porov@itam.nsc.ru](mailto:porov@itam.nsc.ru)