

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Хлыбова О.А. на диссертацию 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»

Диссертационная работа посвящена численному исследованию процессов теплопереноса, усадки и компактирования материала в порошковой среде, подвергающейся тепловому воздействию в процессе обработки по аддитивной технологии селективного лазерного плавления.

Актуальность темы работы определяется практическим интересом современной мировой промышленности к аддитивным технологиям послойного синтеза для производства широкого спектра объектов, в том числе сложной топологии, для которых традиционные производственные технологии оказываются неприменимы. Рассматриваемая в диссертации технология селективного лазерного плавления металлических порошков с использованием импульсного лазера представляет особый интерес с точки зрения высокоточной объемной печати изделий сложной формы, тонкостенных изделий, изделий с решетчатой структурой.

Научная новизна работы. Впервые предложена комплексная математическая модель для описания нестационарного теплопереноса, компактирования и усадки металлических порошков, позволяющая с высокой вычислительной эффективностью моделировать технологию селективного импульсного лазерного плавления металлических порошков. Модель учитывает фазовые переходы, тепловые потери излучением и испарением материала, неравномерную интенсивность компактирования порошка внутри объема порошкового слоя, зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры и локальной пористости, зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения от пористости. Учет конвективного переноса и динамики локальной пористости в расплаве осуществляется феноменологически. Также представлена модель для определения периода и частоты лазерной импульсной генерации при селективном лазерном плавлении высокодисперсного порошка железа, которая обеспечивает равномерную термическую обработку порошкового слоя.

Практическая значимость работы состоит в представленной численной реализации разработанной математической модели процесса селективного лазерного плавления металлического порошка импульсным лазерным излучением. Разработанный программный пакет успешно применен

для численного исследования процесса селективного лазерного плавления высокодисперсного порошка железа миллисекундным импульсным лазером. Результатом проведенного параметрического анализа являются представленные диаграммы для определения рациональных режимов работы, позволяющие оценивать качество обработки: степень повторного оплавления предыдущих слоев, максимальные температуры лазерной обработки, разрешающая способность печати, шероховатость боковых поверхностей изделия и скорость объемной печати изделий. По теме работы диссертантом в соавторстве получен патент на изобретение и лично свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Достоверность представленных результатов обеспечивается хорошим соответствием результатов, полученных численно, с результатами, полученными в ходе лабораторных экспериментов. Так же имеется частичное соответствие с результатами, полученными другими научными группами. Выводы, сделанные в диссертации, логически следуют из результатов расчетов, их анализа и сравнения с экспериментальными данными и не противоречат современным научным представлениям.

Диссертация общим объемом 189 стр. состоит из введения, четырех глав, заключения, списков сокращений, условных обозначений, литературы (169 наименований), восьми приложений. В тексте диссертации приведены 57 рисунков и 6 таблиц.

Первая глава диссертации содержит литературный обзор по теме диссертации. Рассмотрены особенности применения различных режимов работы лазеров в контексте применения к технологии селективного лазерного плавления. Представлен обзор физических процессов, протекающих при селективном лазерном плавлении металлических порошков. Приведен весьма подробный обзор аналитических моделей для исследования процессов теплопереноса в твердых телах при нагреве высокоэнергетическим локализованным тепловым источником. Разобран метод конечных элементов в применении к исследуемой проблеме. Приведен подробный анализ численных моделей для многомасштабного моделирования процессов селективного лазерного плавления.

Вторая глава посвящена математической постановке проблемы селективного лазерного плавления металлических порошков и его численной реализации. Приведены физические допущения, использованные при построении математической модели. Обосновано применение феноменологического подхода к учету конвективного теплопереноса с введением эффективного коэффициента теплопроводности и к учету локальной пористости в условиях рассматриваемой задачи. Подробно описан численный алгоритм решения и механизм генерации и перестройки используемой конечноэлементной сетки. Представлено описание реализации численного алгоритма в виде комбинированного кода в системах Matlab и Comsol.

Третья глава диссертации посвящена проведению численного эксперимента с использованием разработанного программного кода. Представлены данные по влиянию размера частиц порошка, размера и параметров перестройки сетки, временного шага на время счета. Исследованы вопросы сеточной сходимости и проверка баланса энергии. Проведена верификация численного кода на данных лабораторного эксперимента по сплавлению порошка железа со стальной подложкой. Проведено исследование формы и размеров зон плавления и спекания на шлифах лабораторных образцов и в данных численных расчетов. Продемонстрировано хорошее соответствие результатов численного и лабораторного экспериментов.

Четвертая глава диссертации посвящена анализу теплофизических процессов и процессов усадки в исследуемой задаче, а также параметрическому анализу полученных результатов в широком диапазоне управляющих параметров. Подробно исследованы вопросы длительности и мощности лазерного импульса на динамику плавления и компактификации материала. На основе анализа полученных данных представлена феноменологическая модель для временных характеристик лазерного излучения и предложен алгоритм нахождения управляющих параметров для выбора оптимального скоростного режима объемной печати.

Материалы диссертационного исследования со всей полнотой изложены в 31 публикации автора, включая 8 публикаций в изданиях из списка ВАК. Содержание автореферата соответствует основному содержанию диссертации.

В целом, диссертация производит весьма позитивное впечатление. Тем не менее, имеются следующие вопросы и замечания:

1. В математической постановке задачи нестационарное уравнение теплопереноса (2.2) приведено в лабораторной (неподвижной) системе координат. В условиях быстрой деформации вычислительной сетки без интерполяции поля температуры между временными слоями необходим учет переноса значений движущимися узлами сетки. Из текста диссертации остался неясен применяемый механизм компенсации данного эффекта.

2. В отличие от подробного описания математической постановки задачи, особенности программной реализации описаны весьма поверхностно. В частности, представляет интерес вопрос принципиальной необходимости применения пакета Matlab при использовании Comsol. Так же за рамками текста диссертации остались вопросы распределения работ между пакетами и объема и типа ручной работы при кодировании алгоритма.

3. Не достаточно четко обоснованы причины необходимости ручного построения конечноэлементной сетки при наличии существующих генераторов сеток.

4. Представляют определенный интерес критерии выбора пакета MUMPS для решения СЛАУ и количественные характеристики проведенных численных экспериментов: максимальное количество степеней свободы и число ненулевых элементов в матрице, пиковое потребление памяти, эффективность распараллеливания.

5. В (2.19) вводится безразмерный параметр F_1 , по факту соответствующий устоявшемуся термину «коэффициент заполнения» в теории импульсных систем.

6. В (2.56) при определении числа степеней свободы решаемой СЛАУ не ясен смысл множителей 2.

Так же в тексте диссертации в достаточном количестве присутствуют погрешности оформления: описки, опечатки, нарушения форматирования, которые, тем не менее, не носят принципиального характера и не нарушают восприятие материала.

Заключение. Диссертация Гордеева Г.А. «МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРОШКАХ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПЛАВЛЕНИИ» является оригинальной, завершенной научно-квалификационной работой, имеющей научную и практическую ценность. Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Гордеев Георгий Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник Лаборатории вычислительной
гидродинамики Института механики сплошных
сред УрО РАН

Хлыбов Олег Анатольевич

Хлыбов
09.09.2020



Институт механики сплошных сред УрО РАН <http://www.icmm.ru>
614013 г. Пермь, ул. Академика Королева, 1.

Хлыбов Олег Анатольевич <okhlybov@yandex.ru> +7(342)2378331