



УТВЕРЖДАЮ

Врио директора  
Федерального государственного  
бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр  
«Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской  
академии наук»  
доктор с.-х. наук

 А. А. Шпедт

 2020 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук»  
о диссертационной работе Гордеева Георгия Андреевича  
«Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при  
селективном лазерном плавлении», представленной на соискание  
учёной степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Гордеева Г.А. посвящена построению и реализации математической модели нестационарного теплопереноса в процессах селективного лазерного плавления и исследованию влияния управляющих параметров на изменение температурных полей и полей пористости в порошках металлов в данных процессах.

**Актуальность исследования** связана с быстрым развитием аддитивных технологий (или технологий послойного синтеза), к которым, в частности, относится метод селективного лазерного плавления (СЛП). Данная технология используется для изготовления сложных по форме и структуре изделий из металлических порошков на основе цифровых 3D моделей. Следует заметить, что экспериментальный поиск оптимальных режимов лазерной обработки при СЛП достаточно трудоемок. Математическое моделирование процессов СЛП позволяет не только снизить трудозатраты на подбор оптимальных по качеству и времени сплавления режимов обработки, но также дает возможность исследовать процессы теплопереноса и усадки порошка в объеме порошкового слоя и подложки. В связи с этим актуальным является разработка эффективных математических моделей СЛП и их применение для оптимизации режимов работы соответствующего оборудования. Особенную важность здесь имеют модели, которые при относительно небольших вычислительных затратах

позволяют проводить серии расчетов с варьируемыми управляющими параметрами.

**Диссертационная работа** состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации 189 страниц, 57 рисунков, 6 таблиц. Во введении обосновывается актуальность исследований по теме диссертации, определяются цель и задачи работы, характеризуются ее новизна и научная значимость, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит литературный обзор технологии селективного лазерного плавления, а также подходов и методов математического моделирования СЛП. Рассмотрены аналитические модели теплопереноса и показана их ограниченность для целостного описания данного процесса. Приведено обсуждение основных допущений, которые позволяют построить сбалансированные по скорости расчетов и адекватности представления модели.

Глава 2 посвящена постановке задачи моделирования СЛП порошков металлов и сплавов, разработке соответствующей математической модели и ее программной реализации. При построении модели использован и обоснован ряд физических допущений, основными из которых являются приближение сплошной среды для порошкового слоя, учет свойств спекаемого слоя через эффективные характеристики теплопереноса, определение границы фаз через изотермы температуры, описание лазерного импульсного лазерного излучения с помощью поверхностного источника и возможность усадки порошка только в направлении силы тяжести. Объект моделирования формализован до рассмотрения однородного в исходном состоянии металлического порошкового слоя, нанесенного на подложку. Предложенная модель представляет собой систему интегро-дифференциальных уравнений для температуры, энтальпии и пористости порошкового слоя. В численной реализации модели применялся метод конечных элементов (КЭ) с использованием взвешенных невязок в классической постановке Галеркина. Для решения нестационарной задачи использовалась формула 'дифференцирования назад' линейного порядка аппроксимации. Для вычисления положения  $z$  локального объема порошкового слоя  $\Omega_P$  в модели был развит алгоритм послойного изменения геометрии сетки в области порошкового слоя. Программная реализация модели выполнена на высокоуровневом языке в средах MatLab и Comsol Multiphysics.

Глава 3 посвящена проверке адекватности предложенной модели СЛП металлических порошков. Предложены параметры построения адаптируемой КЭ сетки, изучена зависимость расчетного времени модели от параметров построения сетки и дискретизации модели по времени. Исследована зависимость максимальной температуры порошкового слоя в конце лазерного импульса от параметров построения сетки, показана сходимость расчетного алгоритма по сетке. Развита модель СЛП порошков металлов была верифицирована в задаче сплавления слоя порошка железа на подложке. Установлено хорошее соответствие между результатами численного и лабораторного экспериментов для формы и размеров зон плавления и твердофазного спекания, которые оценивались на шлифах лабораторных образцов и по результатам расчетов.

В Главе 4 исследовано влияние управляющих параметров импульсного миллисекундного лазера (радиус лазерного луча, энергия и длительность импульса) на процессы СЛП высокодисперсного порошка железа. На основе анализа полученных данных предложена феноменологическая модель, прогнозирующая период и частоту лазерной генерации, которые обеспечивают однородность лазерной обработки порошка. Предложен алгоритм поиска рациональных режимов импульсной лазерной обработки при объемной печати методом СЛП порошка железа. При поиске рациональных режимов обработки накладывались ограничения по качеству сплавляемого слоя. Проведена серия компьютерных расчетов с варьируемыми управляющими параметрами, исследованы и представлены в виде набора диаграмм рациональные режимы лазерной обработки.

**Научная новизна работы** связана с тем, что впервые предложена математическая модель для описания нестационарного теплопереноса, компактирования и усадки металлических порошков, позволяющая с высокой вычислительной эффективностью моделировать технологию СЛП. Разработаны алгоритмы реализации модели, в том числе алгоритм определения зоны активного конвективного перемешивания в подложке и алгоритм учета положения локального объема спекаемого порошкового слоя с помощью послойно-изменяющейся геометрии КЭ-сетки. Впервые разработана программа для ЭВМ для описания нестационарных полей температуры, удельной энтальпии, остаточной пористости и усадки порошка железа в процессе СЛП импульсным миллисекундным лазером. С помощью расчетов на основе предложенной модели построены диаграммы для определения рациональных режимов лазерной обработки. **Достоверность результатов** определяется соответствием между расчетными и экспериментальными данными по характеристикам сплавленных образцов, а также использованием ряда апробированных расчетных алгоритмов, сходимостью полученных численных решений по сетке.

**По содержанию работы следует сделать следующие замечания:**

1. В расчетах используется связь между энтальпией и температурой, задаваемая полиномом согласно формуле (2.9). В качестве одного из основных уравнений модели выступает дифференциальное следствие из этой связи, получаемое путем дифференцирования по времени (уравнение (2.1)). Это уравнение можно было бы исключить из системы, переписав уравнение энергии (2.2) в терминах температуры с помощью (2.1) и (2.9), предварительно выразив из последнего соотношения зависимость энтальпии от температуры. Это позволило бы повысить скорость расчетов за счет отказа от дискретизации уравнения (2.1) и вычисления соответствующих невязок на основе метода Галеркина, см. уравнения (2.32).

2. В состав модели также входит уравнение (2.3.4), которое описывает усадку порошка путем расчета координаты верхней границы порошкового слоя. Эта координата определяется только начальной и средней пористостью локального объема (последняя зависит лишь от локальной пористости). В связи с этим не ясно, зачем осуществляется дискретизация данного уравнения с вычислением соответствующих невязок. В рамках предложенной модели можно было бы ограничиться дискретизацией уравнений переноса тепла и изменения

локальной пористости, а все остальные величины (в том числе высоту пористого слоя) вычислять и корректировать на каждом шаге на основе значений температуры и пористости.

3. Изложение математической модели и методики расчетов недостаточно проработано и представляет некоторые трудности для понимания. Например, автор называет  $(x, y, Z)$  подвижной системой координат на стр. 64, в то время как  $Z$  выступает в качестве начального положения границы порошка на стр. 72. Далее, на стр. 64 автор вводит обозначение  $z_0$  для начального положения локального объема порошка. В приложении А средняя пористость вычисляется путем интегрирования по локальному объему с переменной верхней границей  $z$ , а в формуле (2.5) это граница почему-то заменяется на постоянное значение  $z_0$ . Как тогда учитывается изменение положения границы при расчете? Также не ясно, зачем автор вводит цилиндрическую систему координат для вычисления положения локального объема (эта система никак не используется в данных вычислениях).

4. В работе имеется ряд опечаток и неточностей. Например, отсутствуют номера формул на стр. 63–64 и 174, причем ссылки на эти формулы в тексте имеются. В уравнении переноса тепла (1.1) в левой части отсутствует плотность. Некоторые величины не определяются после первого их появления в тексте (например, функция под интегралом в формуле (1.6)).

Высказанные замечания не носят критического характера для работы. В целом, общая оценка работы является положительной.

**Результаты диссертации опубликованы** в 11 печатных работах, из них 4 статьи в журналах из списка ВАК (одна из которых индексируется Web of Science и Scopus) и 5 статей в материалах конференций (3 из них входят в Scopus и формально попадают в список ВАК). Следует также отметить, что автором получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. К сожалению, результаты работы не были представлены в высокорейтинговых журналах уровня Q1, хотя научный уровень работы вполне позволяет это сделать. Результаты диссертации также были доложены на ряде профильных международных и всероссийских конференций ('Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии', 'Национальный Суперкомпьютерный Форум', 'Аддитивные технологии: настоящее и будущее', 'Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий').

Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Тема диссертационной работы и её содержание соответствуют пунктам 1, 3, 4, 5 паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

В целом, диссертация Гордеева Г.А. является завершённой научно-квалификационной работой, в которой разработана и программно реализована математическая модель селективного лазерного плавления порошков металлов и установлены закономерности влияния управляющих параметров на процесс плавления. Результаты работы могут использоваться для подбора оптимальных режимов лазерной обработки, созданию и настройке оборудования для объемной печати изделий методом СЛП для конкретных производственных задач.



Представленная работа по форме и содержанию отвечает требованиям, предъявляемым Высшей аттестационной комиссией при Минобрнауки России к кандидатским диссертациям, удовлетворяет критериям пунктов 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор, Гордеев Георгий Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составлен ведущим научным сотрудником отдела Вычислительной физики Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН (далее – ИВМ СО РАН) доктором физико-математических наук Рыжковым Ильей Игоревичем.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании семинара ИВМ СО РАН «Математические модели и методы интегрирования», протокол № 14/2020 от 2 сентября 2020 г.

Ведущий научный сотрудник отдела  
Вычислительной физики  
Института вычислительного моделирования  
Сибирского отделения Российской академии  
обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО  
д.ф.-м.н.

И. И. Рыжков

Директор  
Института вычислительного моделирования  
Сибирского отделения Российской академии  
обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО  
д.ф.-м.н., профессор



В. М. Садовский

«7» сентября 2020 г.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН);  
адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50;  
тел.: +7 (391) 290-79-88; e-mail: [fic@ksc.krasn.ru](mailto:fic@ksc.krasn.ru).