

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Гордеева Георгия Андреевича на тему: «Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при селективном лазерном плавлении», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертация Гордеева Георгия Андреевича посвящена построению математической модели селективного лазерного плавления (СЛП) - перспективной технологии 3D-печати изделий из пластика и металлов (сплавов). В настоящее время при разработке технологии СЛП существует проблема, связанная с тем, что удовлетворительные по качеству слои для каждого конкретного металла или сплава формируются только в узком диапазоне режимов лазерного излучения. Развитая автором математическая модель СЛП порошков металлов и сплавов позволит специалистам, использующим данную технологию, снизить трудозатраты на подбор наилучших режимов по качеству и времени спекания порошков.

**Научная новизна** представленной работы присутствует одновременно в трех областях: математическом моделировании, численных методах и комплексах программ, что соответствует необходимым требованиям паспорта специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Автором предложена оригинальная комплексная математическая модель для описания нестационарного теплопереноса, компактирования и усадки металлических порошков, позволяющая с высокой вычислительной эффективностью моделировать технологию СЛП импульсным лазером металлических порошков. Гордеев Г.А. разработал феноменологическую модель для определения периода и частоты лазерной импульсной генерации при СЛП высокодисперсного порошка железа, которая обеспечивает равномерную термическую обработку порошкового слоя, и построил диаграммы для определения рациональных режимов лазерной обработки при СЛП миллисекундным ИЛ высокодисперсного порошка железа. Автором были развиты оригинальные аналитические алгоритмы: алгоритм определения зоны активного конвективного перемешивания и алгоритм учета положения локального объема спекаемого порошкового слоя. Кроме того, Гордеевым Г.А. была разработана программа для ЭВМ, реализующая модель СЛП порошка железа импульсным лазером. На программу ЭВМ полученное свидетельство о регистрации (№2017614588).

В автореферате раскрыта **практическая значимость** проделанных исследований, показана **достоверность результатов** и **личный вклад** автора. В



частности, полученные диссертантом диаграммы рациональных режимов обработки имеют высокий потенциал для практического использования. Результаты работы опубликованы в профильных научных журналах (8 публикаций изданы в журналах, рекомендованных ВАК), представлены на ведущих научных конференциях.

В **первой главе** диссертационной работы содержится литературный обзор технологии селективного лазерного плавления, а также подходов и методов математического моделирования СЛП. **Вторая глава** посвящена содержательной и концептуальной постановке задачи моделирования СЛП, а также формулировке математической модели селективного лазерного плавления импульсным лазером порошков металлов и сплавов. В работе сделан ряд физических допущений, кратко приведенных в автореферате. В **третьей главе** проводится проверка адекватности развитой модели СЛП металлических порошков. Развитая автором модель СЛП была верифицирована решением задачи сплавления слоя порошка железа на подложке. Сравнение результатов лабораторного и численного экспериментов проводилось для формы и размеров зон плавления и твердофазного спекания. Гордеевым Г. А. было показано хорошее соответствие численной модели СЛП и натурального эксперимента. В **четвертой главе** исследовано влияние управляющих параметров импульсного миллисекундного лазера на процессы СЛП высокодисперсного порошка железа, проведен поиск рациональных режимов импульсной лазерной обработки при 3D-печати методом СЛП порошка железа. Все положения, выносимые на защиту, являются актуальными и обоснованными.

В качестве **замечания** стоит отметить, что формы сечения сплавленного трека в численном и натурном эксперименте не всегда совпадают (рис. 6 автореферата). Почему в математической модели отдельно не вычисляется форма поверхности расплава после лазерной обработки при СЛП?

**Замечание.** При численной реализации Гордеев Г.А. использует формулу «дифференцирования назад» линейного порядка аппроксимации. Из текста автореферата не ясно, почему не используется формула «дифференцирования назад» более высоких порядков аппроксимации? Возможно такой подход бы дал выигрыш в скорости вычислений модели СЛП.

**Замечание.** Из текста автореферата непонятно, как в численном эксперименте (рис. 7 автореферата) находились максимальное и минимальное значения характеристик, сравниваемых с экспериментальными данными при верификации компьютерной модели СЛП.

**Замечание.** Из текста автореферата непонятно, каким способом вычисляется максимальная оценка производительности  $\max(\Pi)$  качественного сплавленной порошкового слоя с подложкой из диаграммы (г) рис. 8 автореферата.

Необходимо отметить, что все замечания носят уточняющий характер.

Предложенная к защите научная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ и соответствует специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Считаю, что Гордеев Георгий Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.


Я, Стародумов Илья Олегович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Гордеева Георгия Андреевича, и их дальнейшую обработку.

Стародумов Илья Олегович, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Лаборатории многомасштабного математического моделирования ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», адрес организации: 620002, г. Екатеринбург, пр. Мира, 19; тел.: +7 343 3899477; e-mail: [ilya.starodumov@urfu.ru](mailto:ilya.starodumov@urfu.ru)



Стародумов Илья Олегович

31.08.2020

Подпись   
Заворяю: вед.  
