

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.01.09
по диссертации Гордеева Георгия Андреевича
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при селективном лазерном плавлении» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ принята к защите 16 июля 2020 года (протокол заседания № 4) диссертационным советом Д ПНИПУ.01.09, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета № 24-О от 03.03.2020 г. в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым–четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. № 1792-р.

Диссертация выполнена в Институте математики, информационных технологий и физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Удмуртский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук (05.13.18), доцент Кривилев Михаил Дмитриевич, заведующий учебно-научной лабораторией «Физика конденсированных сред» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Удмуртский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

1. Попов Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук (05.13.16 – Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов для научных исследований), главный научный сотрудник лаборатории термомеханики и прочности новых материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и

прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации;

2. Хлыбов Олег Анатольевич – кандидат физико-математических наук (специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), научный сотрудник лаборатории вычислительной гидродинамики Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, г. Красноярск (отзыв ведущей организации утвержден врио директора, д-ром сел.-хоз. наук Шпедтом Александром Артуровичем, заслушан на заседании семинара «Математические модели и методы интегрирования» Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» и подписан директором ИВМ СО РАН – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, д-ром физ.-мат. наук, профессором Садовским Владимиром Михайловичем и ведущим научным сотрудником отдела вычислительной физики, д-ром физ.-мат. наук Рыжковым Ильей Игоревичем).

По теме диссертации соискателем опубликовано 16 научных трудов, в том числе 7 работ – в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени и приравненных к ним, из них 4 работы – в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science, Scopus, соискателем получен 1 патент на изобретения, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Gordeev G.A., Ankudinov V., Kharanzhevskiy E.V., Krivilyov M.D. Numerical simulation of selective laser melting with local powder shrinkage using FEM with the

refined mesh // European Physical Journal: Special Topics, Vol. 229, No. 2-3, 2020. Pp. 205-216 (Web of Science, Scopus).

В публикации соискателем рассмотрен алгоритм численной реализации математической модели селективного лазерного плавления (СЛП) импульсным лазером (ИЛ), предложен алгоритм построения адаптивных по пространству конечно-элементных сеток, рассматривается программная реализация модели СЛП; выявлен эффект начального перегрева порошка железа, обрабатываемого импульсным лазером.

2. Гордеев Г.А., Кривилев М.Д., Анкудинов В.Е. Компьютерное моделирование селективного лазерного плавления высокодисперсных металлических порошков // Вычислительная механика сплошных сред – Computational continuum mechanics, Т. 10, № 3, 2017. С. 293-312 (ВАК).

В работе представлена разработанная соискателем математическая модель СЛП импульсным лазером, рассмотрена верификация математической модели СЛП путем сравнения результатов численного моделирования и лабораторного эксперимента; рассмотрено влияние управляющих режимов лазерной обработки на процесс СЛП.

3. Shutov I.V., Gordeev G.A., Kharanzhevskiy E.V., Krivilyov M.D. Analysis of morphology and residual porosity in selective laser melting of Fe powders using single track experiments // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, SPTM-2017 conference. Vol. 192, Iss. 1, N art. 012023, 2017. – 10 p. (Scopus).

В публикации проводится качественное и количественное сравнение полученных соискателем результатов численного моделирования технологии СЛП и лабораторного эксперимента.

4. Ankudinov V.E., Gordeev G.A., Krivilyov M.D. Numerical simulation of heat transfer and melting of Fe-based powders in SLM processing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, SPTM-2017 conference. Vol. 192, Iss. 1, N art. 012026, 2017. – 7 p. (Scopus).

В работе рассматривается теплоперенос в пористых средах, описан предложенный соискателем метод получения эффективного коэффициента теплопроводности, зависящего от локальной пористости.

5. Gordeev G.A., Ankudinov V.E., Krivilyov M.D., Kharanzhevskiy E.V. Optimization of processing parameters in laser sintering of metallic powders // IOP Conference Series:

Materials Science and Engineering, 2011, Vol. 27, Iss. 1, N art. 012079, 2011. – 7 p. (Scopus).

В публикации рассматривается теплоперенос в пористых средах, описаны результаты применения предложенного соискателем метода получения эффективного коэффициента теплопроводности, представлена модель СЛП ИЛ.

6. Кривилев М.Д., Гордеев Г.А., Анкудинов В.Е., Шутов И.В., Ипатов А.Г., Матвеева Ю.Ю., Харанжевский Е.В. Получение градиентных материалов селективным лазерным плавлением: эксперимент, моделирование, технология // Материалы III Международной Конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее». М. 2017. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). 14 с.

В работе представлен подход к определению технологических режимов получения градиентных покрытий с помощью, проведенный с помощью численных расчетов модели СЛП ИЛ; рассматриваются диаграммы рациональных режимов лазерной обработки при СЛП ИЛ высокодисперсного порошка железа.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **предложена** оригинальная комплексная математическая модель для описания нестационарного теплопереноса, консолидации и усадки металлических порошков; модель позволяет описывать технологические процессы получения изделий на основе аддитивных технологий с использованием селективного лазерного плавления (СЛП) импульсным лазером (ИЛ) металлических порошков.
- **разработан** алгоритм определения области активного конвективного перемешивания расплава в подложке; предложены способы вычисления параметров построения такой области для численной реализации модели;
- **разработана** феноменологическая модель для определения периода и длительности лазерной импульсной генерации в СЛП высокодисперсного порошка железа, которая обеспечивает равномерную термическую обработку порошкового слоя;
- **построены** диаграммы для определения рациональных режимов лазерной обработки порошка железа, позволяющие получить оценки качества печатаемого изделия и прогнозировать производительность процесса СЛП.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- **разработана** комплексная математическая модель для описания нестационарного теплопереноса, консолидации и усадки металлических порошков;

- **разработан** программный продукт, позволяющий эффективно численно реализовать предложенную модель;
- **изучен и проанализирован** эффект начального перегрева порошка железа, обрабатываемого импульсным лазером;
- **показано**, что результаты расчетов для одного импульса позволяют получать качественные и количественные оценки результатов воздействия лазерной импульсной обработки при последующих импульсах.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что: **разработана** программа для ЭВМ, позволяющая рассчитывать нестационарные поля температуры, удельной энтальпии, остаточной пористости и усадки порошка железа в процессе СЛП импульсным миллисекундным лазером. Получено свидетельство об интеллектуальной собственности на программу для ЭВМ. Созданная программа для моделирования СЛП, а также полученные диаграммы рациональных режимов лазерной обработки могут использоваться на практике для определения рациональных режимов СЛП ИЛ в организациях или на предприятиях, ориентированных на аддитивное производство. Развитая математическая модель СЛП является одной из базовых моделей, на основе которой в настоящее время разрабатывается компьютерная платформа – цифровой двойник СЛП – для промышленного заказчика.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- Обоснованность результатов диссертационной работы определяется корректностью постановки задачи.
- Достоверность подтверждается хорошим соответствием результатов, полученных численно, с данными, установленными в ходе лабораторного эксперимента.
- Показана сеточная сходимость и устойчивость численной реализации.
- Сформулированные основные выводы хорошо согласуются с рядом известных результатов.

Личный вклад соискателя состоит в следующем: автор лично осуществил разработку численной и компьютерной реализации модели теплопереноса и усадки при СЛП; провел численные расчеты СЛП с различными управляющими параметрами обработки; провел количественный анализ влияния управляющих параметров лазерной обработки на процесс СЛП и верификацию математической

модели СЛП. Автором совместно с научным руководителем поставлены цель и задачи исследований по диссертационной работе, выполнена постановка краевой задачи исследования теплопереноса в порошках металлов при СЛП, проведены обсуждение и интерпретация полученных результатов. Автором совместно с коллегами получены: зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от локальной пористости, феноменологическое соотношение для определения конвективной составляющей в эффективном коэффициенте теплопроводности.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и Порядком присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 09 января 2018 г. № 1-О: в ней содержится модель теплопереноса, компактирования и усадки порошка при селективном лазерном плавлении металлических порошков, позволяющая получать диаграммы рациональных режимов обработки, что имеет важное значение для создания компьютерной платформы – цифрового двойника СЛП.

На заседании «22» сентября 2020 г. диссертационный совет Д ПНИПУ.01.09 принял решение присудить Гордееву Георгию Андреевичу ученую степень кандидата физико-математических наук (протокол заседания № 6).

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 14, против присуждения ученой степени – 0.

Председатель диссертационного совета Д ПНИПУ.01.09,

д-р физ.-мат. наук, пр.

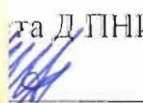


/Трусов Петр Валентинович/

(подпись)

Ученый секретарь диссертационного совета Д ПНИПУ.01.09,

канд. физ.-мат. наук, д-р



/Швейкин Алексей Игоревич/

(подпись)

«24» сентября 2020 г. _____ м.п.