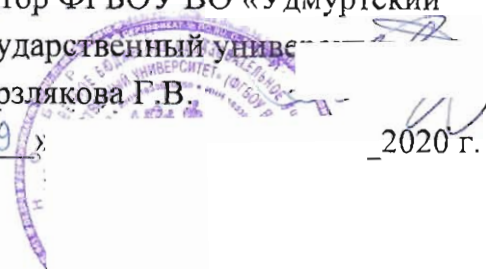


УТВЕРЖДАЮ  
Ректор ФГБОУ ВО «Удмуртский  
государственный университет»  
Мерзлякова Г.В.  
« 29 » \_\_\_\_\_ 2020 г.



**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**  
**ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО**  
**ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Диссертация «Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при селективном лазерном плавлении» выполнена в Институте математики, информационных технологий и физики в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Удмуртский государственный университет» Минобрнауки России. В период подготовки соискатель Гордеев Георгий Андреевич работал в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Удмуртский государственный университет» в учебно-научной лаборатории «Физика конденсированных сред» в должности инженер.

Соискатель в 2010 г. окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Удмуртский государственный университет» по специальности прикладная информатика (в юриспруденции), в 2013 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Удмуртский государственный университет» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (период обучения 03.11.2010-10.11.2013).

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2017 г. федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Удмуртский государственный университет».

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

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертация автора является законченной самостоятельной работой, обобщающей результаты, полученные лично автором, а также полученные в соавторстве. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится постановка краевой задачи теплопереноса в порошках металлов при селективном лазерном плавлении (СЛП), вывод численной реализации модели СЛП, разработка компьютерной реализации модели СЛП, верификация математической модели СЛП, анализ влияния управляющих параметров лазерной обработки на процесс СЛП, оптимизация параметров селективного лазерного плавления порошка железа. Математическая модель, предложенная в работе, имеет существенное значение для науки и промышленности РФ в связи с определением аддитивных технологий (селективное лазерное плавление – перспективное направление аддитивных технологий) как доминанты национальной технологической инициативы (в частности, решение III международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, г. Москва, 23 марта 2017 г.).

Автор диссертации принимал личное участие в постановке краевой задачи теплопереноса в порошках металлов при селективном лазерном плавлении, формализации модели селективного лазерного плавления. Автором совместно с научным руководителем и коллективом проведен качественный анализ и обсуждение допущений для модели обработки порошка в приближении сплошной среды, проведено сравнения численной модели с лабораторным экспериментом. Автором лично выполнены вывод численной реализации модели теплопереноса и усадки при СЛП в слабой форме, разработка алгоритма решения численной модели, разработка компьютерной модели в программных средах COMSOL MultiPhysics и MatLab, оптимизация селективного лазерного плавления порошка железа, проведены расчеты селективного лазерного спекания с различными управляющими параметрами обработки, проведена постобработка и визуализация результатов для последующего анализа, проведен количественный анализ влияния управляющих параметров лазерной обработки на процесс селективного лазерного плавления. Автором совместно с научным руководителем и коллективом проведен качественный анализ влияния управляющих параметров лазерной обработки на процесс селективного лазерного плавления. Цели и задачи исследований по диссертационной работе сформулированы совместно с научным руководителем. Обсуждение результатов для опубликования в печати проводилось совместно с научным руководителем и соавторами.

Достоверность полученных результатов обеспечивается хорошим соответствием результатов, полученных численно, с результатами, полученными в ходе лабораторных экспериментов. Кроме того, численные расчеты хорошо соответствуют данным, полученным другими научными группами (в том числе с

данными группы Кинга, Ливермольской национальной лаборатории, США; Крута, Левенский университет, Бельгия; Шишковского И. В., СФ ФИАН, г. Самара, Харанжевского Е. В., УдГУ, г. Ижевск). Выводы, сделанные в диссертации, логически следуют из результатов расчетов, их анализа и сравнения с экспериментальными данными и не противоречат современным научным представлениям.

В работе впервые разработана математическая модель теплопереноса в высокодисперсных порошках металлов при селективном лазерном плавлении с учетом усадки и компактирования порошка, разработана численная усадки порошка при селективном лазерном плавлении, разработана адекватная компьютерная программа ЭВМ для прогнозирования теплопереноса и усадки порошка при селективном лазерном плавлении, проведена оптимизация процесса селективного лазерного плавления порошка железа.

Полученные в работе результаты позволяют качественно и количественно оценить влияние основных управляющих параметров на процесс теплопереноса и усадки порошков металла при лазерной обработке, сравнить между собой эффективность влияния таких параметров на различные аспекты процесса селективного лазерного плавления. Результаты применимы в современной высокотехнологичной индустрии и технологии изготовления деталей методом металлической 3D-печати. Опубликованные научные работы имеют высокий уровень и востребованность. Разработанная математическая модель и программа для ЭВМ, позволяющая прогнозировать теплоперенос и усадку порошка при селективном лазерном плавлении, может быть полезна, как для технологов и научных работников, использующих СЛП и СЛС методы печати металлических изделий, так и для производителей СЛП и СЛС 3D-принтеров. Также полученные результаты могут быть использованы студентами и аспирантами в учебном процессе.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

В 16 опубликованных работах Гордеева Г.А. полностью отражено содержание диссертации.

**Работы в изданиях, входящих в Перечень ВАК или базы цитирования Scopus, Web of Science:**

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).
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 (БАК).

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).

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).

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).

6. Кривилев М.Д., Афлятунова Д.Д., Анкудинов В.Е., Гордеев Г.А. Многомасштабное теоретическое описание структурообразования в ультрадисперсных системах // Материаловедение, № 1, 2012. С. 2-6 (БАК).

7. Кривилев М.Д., Харанжевский Е.В., Гордеев Г.А., Анкудинов В.Е. Управление лазерным спеканием металлических порошковых смесей // Управление большими системами, Вып. 31, 2010. С. 299-322 (БАК).

#### **Программа для ЭВМ:**

8. Свид. 2017614588 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа СЛПСол для моделирования процессов селективного лазерного плавления и спекания металлических порошков / Гордеев Г.А.; заявитель и патентообладатель Гордеев Г.А. – № 2017611819; заявл. 27.02.2017; опубл. 19.04.2017. Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

#### **Патент на изобретение:**

9. Пат. 2513670 Российская Федерация, МПК С23С 24/08 (2006.01), В22F 3/105 (2006.01). Способ повышения коррозионной стойкости нелегированной стали / Решетников С.М., Харанжевский Е.В., Кривилев М.Д., Садиоков Э.Е., Гильмутдинов Ф.З., Писарева Т.А., Гордеев Г.А.; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО "УдГУ", Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт Уральского Отделения РАН – № 2012129138/02; заявл. 10.07.2012; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11. – 9 с.

#### **Прочие полнотекстовые публикации:**

10. Кривилев М.Д., Гордеев Г.А., Анкудинов В.Е., Шутов И.В., Харанжевский Е.В. Современные численные модели и программные продукты в аддитивном производстве // Материалы IV Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 30 марта 2018 г.). М.: ФГУП ВИАМ, 2018. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). 15 с.



11. 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» (Москва, 23 марта 2017 г.). М.: ФГУП ВИАМ, 2017. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). 14 с.
12. Гордеев Г.А., Кривилев М.Д., Анкудинов В.Е., Богданов А.А. Компьютерное моделирование селективного лазерного плавления порошка карбонильного железа // Материалы II Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 16 марта 2016 г.). М.: ФГУП ВИАМ, 2016. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). 15 с.
13. Кривилев М.Д., Анкудинов В.Е., Гордеев Г.А., Решетников С.М., Харанжевский Е.В., Галенко П.К. Метод трехмасштабного моделирования селективного лазерного сплавления композитных металлических порошков при импульсной обработке // Материалы II Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее» (Москва, 16 марта 2016 г.). М.: ФГУП ВИАМ, 2016. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). 15 с.
14. Гордеев Г.А., Кривилев М.Д., Анкудинов В.Е. Численное моделирование лазерной обработки металлических порошковых материалов методом конечных элементов // Вестник Удмуртского университета. Физика. Химия. Вып. 3, 2014. С. 15-22.
15. Кривилев М.Д., Гордеев Г.А., Анкудинов В.Е., Харанжевский Е.В. Нестационарный теплоперенос при фазовых переходах в пористых материалах // Вестник Удмуртского университета. Физика. Химия. Вып. 1, 2010. С. 43-55.
16. Анкудинов В.Е., Гордеев Г.А., Кривилев М.Д., Харанжевский Е.В. Моделирование нестационарного теплопереноса при высокоинтенсивном лазерном спекании порошковых материалов // Материалы конференции «Трехмерная визуализация научной, технической и социальной реальности». Ижевск: Изд-во УдГУ, Т.1, 2010. С. 69-72.

Материалы диссертации были полностью изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Публикации [1,2,4–7,13–15] соискателя из вышеприведенного списка посвящены постановке математической модели СЛП и ее численной реализации, публикации [2,3,8,12,13] посвящены верификации математической модели СЛП, публикации [1,2,4–7,9–12,16] посвящены описанию воздействия управляющих параметров обработки на процесс СЛП, поиску рациональных режимов лазерной обработки при СЛП порошка железа. В диссертации соискатель ученой степени ссылается на автора и (или) источник заимствования материалов или отдельных результатов при использовании таких материалов и результатов, соответственно. При использовании в диссертации результатов научных работ, выполненных

соискателем ученой степени лично и (или) в соавторстве, соискатель ученой степени отмечает в диссертации это обстоятельство.

Диссертация «Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при селективном лазерном плавлении» Гордеева Георгия Андреевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Заключение принято на заседании ученого совета Института математики, информационных технологий и физики, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет».

Присутствовало на заседании 18 чел. Результаты голосования: «за» - 18 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 5 от «17» июня 2020 г.

\_\_\_\_\_

Петров Н.Н.,  
д.ф.-м.н., профессор,  
директор Института математики,  
информационных технологий и физики