На правах рукописи

Гордеев Георгий Андреевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРОШКАХ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЕЛЕКТИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПЛАВЛЕНИИ

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Ижевск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск.

Научный руководитель:	Кривилев Михаил Дмитриевич, доктор физико-математических наук, доцент.
Официальные оппоненты:	Попов Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск), Лаборатория термомеханики и прочности новых материалов, главный научный сотрудник
	Хлыбов Олег Анатольевич, кандидат физико-математических наук, Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь), Лаборатория вычислительной гидродинамики, научный сотрудник
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского

Защита диссертации состоится «22» сентября 2020 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.01.09, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 4236.

отделения Российской академии наук»

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (http://pstu.ru).

Автореферат разослан « » _____ 2020 года

Ученый секретарь

диссертационного совета Д ПНИПУ.01.09,

кандидат физико-математических наук, доцент

А.И. Швейкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Аддитивные технологии (АТ) или технологии послойного синтеза сегодня являются быстроразвивающимся направлением мировой промышленности. Метод селективного лазерного плавления (СЛП) металлических порошков является одним из наиболее перспективных АТ методов. Большая часть промышленных машин для объемной печати металлических изделий методом СЛП использует непрерывные лазеры, однако применяются также и импульсные лазеры (ИЛ). При этом экспериментальный поиск рациональных и оптимальных режимов лазерной обработки при СЛП крайне трудоемок. Численное моделирование СЛП не только позволяет снизить трудозатраты на подбор рациональных и оптимальных по качеству и времени сплавления режимов обработки, но также дает возможность исследовать процессы теплопереноса и усадки порошка, проходящие во всем объеме порошкового слоя и подложки. Все множество предложенных в литературе моделей СЛП можно разбить на два класса. К первому классу относятся «подробные» модели, где порошок рассматривается в виде отдельных частиц, осуществлено моделирование трассировки лучей лазера, произведен прямой расчет гидродинамики в расплаве. Ко второму классу относятся «упрощенные» модели, где порошковая среда рассматривается в приближении сплошной, динамика спекания и конвекция в расплаве не учитываются. «Упрощенные» модели при меньших затратах расчетных мощностей дают возможность проводить расчеты быстрее чем «подробные» модели, что позволяет использовать «упрощенные» модели для проведения серий расчетов с варьируемыми управляющими параметрами. При этом «упрощенные» модели не обладают достаточной точностью расчетов для адекватного описания импульсной лазерной обработки.

В связи с актуальностью темы математического моделирования СЛП поставлена исследовательской работы: построение реализация цель И математической модели для описания нестационарного теплопереноса в процессах СЛП с анализом изменения температурных полей и полей плотности в порошках металлов в таких процессах. Объект исследования – порошковые металлические материалы, подвергающиеся высокоэнергетическому тепловому воздействию лазером. Предмет исследования – нестационарный теплоперенос и процессы усадки при лазерной обработке порошковых металлических материалов.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести аналитический литературный обзор моделей, позволяющих проводить исследование СЛП процессов с высокими скоростями расчетов.

2. Разработать математическую модель для описания процесса селективного лазерного плавления порошков металлов ИЛ, базирующуюся на постановке и методах решения нелинейной нестационарной краевой задачи тепломассопереноса с учетом локальной пористости и усадки порошка.

3. Переформулировать нелинейную краевую задачу исследования процесса СЛП порошка железа импульсным лазером к виду системы линейных уравнений с помощью метода конечных элементов в классической постановке Галеркина и методов линеаризации. Реализовать развитый алгоритм реализации модели СЛП в виде программы для ЭВМ, написанной на высокоуровневом языке среды *MatLab* и *ComsolMultiphysics 4.3*.

4. Провести верификацию модели СЛП высокодисперсного порошка железа миллисекундным ИЛ путем сравнения результатов численного эксперимента и лабораторного эксперимента с одинаковыми параметрами лазерной обработки.

5. Изучить влияние управляющих параметров импульсной лазерной обработки на процесс СЛП порошка железа, исследовать процессы теплопереноса и усадки порошка при СЛП порошка железа ИЛ.

6. Построить диаграммы управляющих параметров, диаграммы характеристик динамики процесса СЛП и диаграммы качества сплавляемого слоя, позволяющие устанавливать рациональные режимы лазерной обработки при СЛП миллисекундным ИЛ высокодисперсного порошка железа.

Методология и методы исследования:

Для изучения процесса СЛП использовались методы и подходы математического моделирования. Описание сложных закономерностей в объекте проводилось методами вычислительной механики и теплофизики сплошных сред. Численное моделирование дифференциальных уравнений в частных производных осуществлялось с помощью метода конечных элементов (МКЭ), метода взвешенных невязок в классической постановке Галеркина, модифицированного метода Ньютона-Рафсона, метода Ньютона-Канторовича.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель для описания СЛП ИЛ металлических порошков.

2. Метод определения зоны расплава и зоны активного конвективного перемешивания в расплаве при СЛП в областях порошкового слоя и подложки.

3. Метод учета положения локального объема спекаемого порошкового слоя в численной модели с помощью послойно-изменяющейся геометрии конечноэлементной (КЭ) сетки в области порошкового слоя.

4. Алгоритм реализации модели СЛП ИЛ и созданная на его основе программа ЭВМ, обладающая сходимостью и устойчивостью, верифицированная для высокодисперсного порошка железа.

5. Феноменологическая модель для определения периода и частоты лазерной импульсной генерации при СЛП высокодисперсного порошка железа, которая обеспечивает равномерную термическую обработку порошкового слоя.

6. Диаграммы для установления рациональных режимов лазерной обработки при СЛП миллисекундным импульсным лазером высокодисперсного порошка железа, позволяющие оценивать качество и скорость объемной печати изделий.

Научная новизна

В области математического моделирования:

1. Впервые предложена комплексная математическая модель для описания теплопереноса, компактирования нестационарного И усадки металлических порошков, позволяющая с высокой вычислительной эффективностью моделировать технологию СЛП ИЛ металлических порошков. Модель учитывает фазовые переходы, тепловые потери при излучении и испарении порошка под действием осуществляется лазерным излучением, феноменологический нагрева учет конвективного переноса и динамики локальной пористости в расплаве. Учитываются компактирования порошка неравномерная интенсивность внутри объема порошкового слоя, зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры и локальной пористости, зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения от пористости. Параметры, входящие в уравнения динамики локальной пористости и зависимость теплопроводности от локальной пористости, вычисляются на более низком пространственном масштабном уровне конгломератов частиц порошка в отдельных моделях.

2. Разработана феноменологическая модель для определения периода и частоты лазерной импульсной генерации при СЛП высокодисперсного порошка железа, которая обеспечивает равномерную термическую обработку порошкового слоя.

3. Построены диаграммы для определения рациональных режимов лазерной обработки при СЛП миллисекундным ИЛ высокодисперсного порошка железа, 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.

В области численных методов:

4. Разработан алгоритм реализации модели СЛП ИЛ для высокоскоростных расчетов за счет обоснованных допущений, сделанных в математической модели. Разработан алгоритм определения зоны активного конвективного перемешивания в подложке с помощью параметров построения указанной зоны. Предложены способы вычисления параметров построения такой зоны для численной реализации модели. При разработке модели обоснованы алгоритмы построения сетки и дискретизации решения по времени.

5. Развит алгоритм учета положения локального объема спекаемого порошкового слоя в численной модели с помощью послойно-изменяющейся геометрии КЭ-сетки в области термической зоны воздействия. Развитый алгоритм ставит положение локального объема во всех узлах КЭ-сетки порошкового слоя во взаимно-однозначное соответствие с рассчитываемым в модели положением промежуточных движущихся границ. Промежуточные свободно движущиеся границы располагаются в порошковом слое, параллельны между собой и параллельны границе между порошком и подложкой.

В области комплексов программ:

6. Разработана программа для ЭВМ, впервые реализующая развитый алгоритм комплексного описания нестационарных полей температуры, удельной энтальпии, остаточной пористости и усадки порошка железа в процессе СЛП импульсным миллисекундным лазером. Высокая скорость компьютерных расчетов, достигнутая в реализованной модели СЛП, дает возможность проводить серии расчетов с различными параметрами модели. Такой подход позволяет выявлять влияние управляющих параметров лазерной обработки на различные характеристики как самого процесса СЛП, так и характеристики сплавленных слоев после СЛП. Получено свидетельство об интеллектуальной собственности на программу для ЭВМ.

Практическая значимость

Разработанная программа ЭВМ для моделирования СЛП, а также полученные диаграммы для установления рациональных режимов лазерной обработки могут использоваться при внедрении ИЛ обработки порошков металлов на практике, позволяя подбирать оптимальные режимы обработки и настраивать оборудование для объемной печати изделий методом СЛП под конкретную задачу производства. Более того, представленная модель СЛП может стать одной из ключевых точек компьютерной платформы – цифрового двойника технологии СЛП.

Достоверность результатов обеспечивается хорошим соответствием результатов, полученных численно, с результатами, полученными в ходе

лабораторного эксперимента. Кроме того, частные тестовые численные расчеты соответствуют данным, полученным другими научными группами (в том числе, данным групп из Ливермольской национальной лаборатории, США под руководством В. Кинга, Левенского университета, Бельгия под руководством Ж.-П. Крута, Сколтех, г. Москва под руководством И.В. Шишковского, Удмуртского государственного университета, г. Ижевск под руководством Е.В. Харанжевского). Выводы, сделанные в диссертации, логически следуют из результатов расчетов, их анализа и сравнения с экспериментальными данными И не противоречат современным научным представлениям. Математическая модель обладает сходимостью сетке по приближенного решения к точному.

Личный вклад. Диссертация автора является самостоятельной работой, обобщающей результаты, полученные полностью лично автором, а также в соавторстве. Автор лично выполнил постановку краевой задачи теплопереноса в порошках металлов при СЛП, разработку численной и компьютерной реализации модели теплопереноса и усадки при СЛП; создал феноменологическую модель для определения периода и частоты лазерной импульсной генерации при СЛП порошка железа, провел поиск рациональных режимов обработки порошка железа. Автором осуществлены расчеты СЛП с различными управляющими параметрами обработки; проведен количественный анализ влияния управляющих параметров лазерной обработки на процесс СЛП. Автором совместно с научным руководителем поставлены цель задачи исследований ПО диссертационной работе, И сформулированы допущения для модели СЛП. Автором совместно с коллегами получены: зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от локальной пористости, учет конвективной составляющей в эффективном коэффициенте теплопроводности, вывод уравнения динамики локальной пористости. Автором лично проведено сравнение результатов численного эксперимента с лабораторным (лабораторный эксперимент и визуализация его результатов проведены без участия автора), а также качественный анализ влияния управляющих параметров лазерной обработки на процесс СЛП.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались И обсуждались на 19 международных, всероссийских и республиканских конференциях, Всероссийские конференции В том числе: с международным участием «Кристаллизация: компьютерные модели, эксперимент, технологии», г. Ижевск, 2019, 2016; Всероссийская научно-практическая конференция "Национальный Суперкомпьютерный Форум", г.Переславль-Залесский, 2018; II, III, IV Международные конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее», ФГУП ВИАМ, Москва, 2018,2017,2016; II, IV Всероссийские научные семинары с международным участием «Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий», ТПУ, Томск, 2018,2016 и др. Работа полностью докладывалась и обсуждалась на семинарах кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ (руководитель – д.ф.-м.н., проф. П.В. Трусов), Института механики сплошных сред УрО РАН PAH, (руководитель _ академик д.т.н., проф. В.П. Матвеенко), кафедры композиционных материалов и конструкций ПНИПУ (руководитель – д.т.н., проф. А.Н. Аношкин).

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 31 печатных изданиях, 8 из которых изданы в журналах, рекомендуемых ВАК; 7 – в трудах конференций и прочих изданиях; 15 – в тезисах докладов конференций; 1 – в

учебном пособии; в соавторстве получен 1 патент на изобретение РФ (№2513670); зарегистрирована 1 программа для ЭВМ (№2017614588).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, списка сокращений и основных обозначений, четырех глав, выводов, семи приложений и списка использованной литературы. Работа изложена на 189 страницах, содержит 57 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 169 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава содержит литературный обзор технологии селективного лазерного плавления (СЛП), а также подходов и методов математического моделирования СЛП. Рассмотрены аналитические модели теплопереноса, которые могут использоваться при получении качественных и количественных оценок воздействия высокоэнергетических источников на тела различной геометрии, в том числе при СЛП. Показана ограниченность данных моделей для целостного описания процесса СЛП. Для описания СЛП, определяемого сложной системой использовать взаимосвязанных процессов, предлагается численные методы моделирования. Рассмотрены основные методы дискретизации математических уравнений в задачах переноса, их достоинства и недостатки. Для моделирования СЛП предложено использовать метод конечных элементов в классической постановке Галеркина.

В главе рассмотрены математические модели СЛП ведущих научных групп под руководством: Ф.Х. Мирзаде, А.Г. Князевой, А.В. Гусарова, J. Goldak, W.E.King, N.E. Hodge, S.A. Khairallah, A.G. Demir, R. Ganeriwala, D. Riedlbauer, T.M. Shao, Q. Chen, C.D. Boley, N. Shen, Y. Zhang, D. Pal, Y. Lee, исследующих методы послойного синтеза. Из всего множества рассмотренных моделей СЛП сбалансированным по скорости расчетов и адекватности представления является класс моделей, где приняты следующие допущения: а) порошковый слой исследуется в приближении сплошной среды, конвекция либо не учитывается, либо введена в эффективные теплофизические параметры теплопереноса; б) свойства спекаемого порошкового слоя вводятся в модель с помощью эффективных характеристик теплопереноса; в) граница раздела фаз при кристаллизации и плавлении определяется через изотермы температуры Т плавления порошка; г) фазовый переход учитывается с помощью ввода в модель удельной энтальпии Н как зависимой переменной; д) лазерное высокоэнергетическое импульсное излучение вводится в модель с помощью поверхностного источника. Также было показано, что при моделировании СЛП ИЛ актуально исследовать динамику спекания порошка и зависимость теплофизических параметров от локальной пористости. Использование предложенного класса моделей позволяет проводить серии с большим количеством расчетов с различными управляющими параметрами обработки. В результате становится возможным исследовать влияние управляющих параметров на технологию СЛП и проводить оптимизацию параметров обработки. При этом данные модели не описывают динамику спекания порошка и не учитывают влияние конвективных потоков в расплаве, что особенно важно при ИЛ обработке. На основе представленных выводов были сформированы задачи диссертационной работы, в главе 2 обоснована и предложена математическая модель СЛП порошков металлов ИЛ.

<u>Вторая глава</u> посвящена содержательной и концептуальной постановке задачи моделирования СЛП, а также формулировке математической модели СЛП ИЛ

порошков металлов и сплавов. При построении математической модели СЛП металлических порошков использован и обоснован ряд физических допущений, часть из которых отмечена выше, сделаны дополнительные допущения: е) в модели проводился учет фазового перехода «расплав-пар» при испарении материала на поверхности путем введения зависимости коэффициента теплообмена $h_{eff}(T)$; ж) эффект экранирования лазерного излучения плазменным факелом не учитывался; 3) описании кинетики затвердевания пренебрегали зональной ликвашией при компонентов для сплавов и зависимостью ликвидуса от химического состава; и) скорость течения в расплаве высока, поэтому предполагается, что за $\Delta t < \tau_{imp}$, где τ_{imp} – импульса, происходит перемешивание расплава усреднение длительность И локальной пористости; характерная скорость течения расплава внутри зоны активного конвективного переноса принимается константой v_{melt} ; к) усадка порошка происходит только вдоль направления действия сил тяжести; л) граница между порошком и подложкой неподвижна.



Рисунок 1 – Схема трехмерной расчетной области, где Ω_P и Ω_S определяют порошковый слой (powder) и подложку (substrate) соответственно. Границы обозначены символами с нижним индексом

Объект моделирования СЛП формализован до рассмотрения однородного в исходном состоянии металлического порошкового слоя Ω_P , нанесенного на подложку Ω_S (рис.1). Представительным в слое порошка выбран объем, содержащий от 3³ до 6³ частиц. Подложкой Ω_S в процессе СЛП являются сплавленные на предыдущих этапах обработки слои. При исследовании прямолинейного движения лазерного луча по поверхности порошкового слоя трехмерная модель СЛП процесса будет обладать симметрией относительно плоскости $\partial \Omega_{Sym}$, полученной осью *x*, соответствующей направлению движения лазерного луча, и осью Z (рис. 1). Для описания теплофизических процессов, происходящих в порошковой среде Ω_P , использовалась система интегро-дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t}, \qquad (1) \qquad (1-\varepsilon) \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T), \qquad (2)$$

$$\psi(\varepsilon, T, \varepsilon_{mm}, \Omega_P, \Omega_m):$$

$$\begin{bmatrix} \overline{\Omega_m} \cap \Omega(\varepsilon \le \varepsilon_m) : \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0, \\ \overline{\Omega_m} \cap \Omega(\varepsilon \ge \varepsilon_m) : \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -\varepsilon A \exp\left(-\frac{E_a(T)}{RT}\right), \\ \Omega_m: \varepsilon(t + \Delta t) = \varepsilon_{mm} - \int_t^{t+\Delta t} \varepsilon_{mm}(t) A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dt, \qquad (3)$$

$$z = z_0 \left(\frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon_{cp}} \right), \quad \varepsilon_{cp} = \frac{\int_{Z_B}^{Z_B + z_0} \varepsilon \, dZ}{z_0}, \tag{4}$$

где уравнение в частных производных (2) является расширенным уравнением теплопроводности на случай теплопереноса в пористой среде. Дифференциальное уравнение связи (1) отвечает за описание фазовых переходов при высокоскоростном плавлении и кристаллизации. Таким образом, состояние изучаемой системы описывается двумя переменными: температурой Т и удельной энтальпией Н. Дополнительно решается кинетическое уравнение связи $\psi(\varepsilon, T, \varepsilon_{mm}, \Omega_m)$ (3) для нахождения локальной пористости є порошкового слоя. Интегральное уравнение (4) используется для вычисления усадки порошка через зависимую переменную – координату z, которая определяет положение центра масс локального объема в порошковом слое Ω_P , где ε_0 – начальная пористость порошка, z_0 – начальное положение локального объема порошка на оси Z относительно границы $\partial \Omega_{Between}$ (с начальным положением Z_B), $\varepsilon_{cp}(x,y)$ – средняя локальная пористость порошка между локальным объемом порошка и границей $\partial \Omega_{Between}$. Уравнение (3) учитывает три механизма изменения локальной пористости є: уменьшение пористости за счет образование «перешейков» между частицами порошка, уменьшение пористости за счет образование и вывода газовых пор и конвективное перемешивание газовых пор в зоне расплава. При достижении критической пористости ε_m механизм уменьшения пористости за счет образования и вывода газовых пор последовательно сменяет механизм уменьшение пористости за счет образование «перешейков». Уравнение (3) включает зависимость от температуры аррениусовского типа с энергией активации Е_а и предэкспоненциальным множителем А. Параметр ε_{mm} определяет среднюю пористость зоны Ω_m расплава с активным конвективным перемешиванием. Зона Ω_m расплава с активным конвективным перемешиванием была определена И параметризована для порошкового слоя и подложки в математической модели. Также были предложены механизмы вычисления в математической модели параметров построения такой зоны. В модели использовался эффективный коэффициент теплопроводности:

$$k_{eff} = k(T) f_k(\varepsilon) + C_p(T_m) \rho(T_m) \frac{v_{melt}(h_{\varepsilon} + h_{sub})}{\ln \left(\frac{T_{boil}}{T_m}\right)},$$
(5)

позволяющий учитывать зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, теплоперенос в пористых средах и конвективный теплоперенос в зоне Ω_m расплава с активным конвективным перемешиванием, где T_{boil} , T_m – характерные температуры зоны расплава, а h_{ε} и h_{sub} – параметры, описывающие зону Ω_m . Пористость в подложке принималась равной нулю, поэтому уравнение (3) для подложки не применялось, а уравнение (2) было модифицировано для полностью сплавленного металла. На границах $\partial \Omega_{Sym}$, $\partial \Omega_{Back}$, $\partial \Omega_{Left}$ и $\partial \Omega_{Right}$ задавались условия нулевого теплового потока.

На границе $\partial \Omega_{Between}$ порошкового слоя и подложки задается непрерывность температуры и теплового потока. На верхней границе $\partial \Omega_{Top}$ полагали поверхностный источник *F*, соответствующий нагреву лазерным лучом и охлаждению за счет конвекции и излучения:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_{\mathbf{H}} \Big|_{\partial\Omega Top} = F\left(x, y, t\right) + h_{eff}\left(T\right)\left(T_{amb} - T\right) + \sigma\sigma_{SB}\left(T_{amb}^{4} - T^{4}\right),\tag{6}$$



Рисунок 2 – Схема алгоритма реализации модели СЛП

где σ – коэффициент излучения, σ_{SB} – константа Стефана-Больцмана, вектор нормали **n** направлен внутрь расчетной области Ω . В правой части этого выражения второе слагаемое отвечает за конвективное охлаждение, а третье – за тепловое излучение образца. Мощность излучения лазерного импульсного источника *F* имеет гауссово распределение с максимумом в фокусе подвижного лазерного луча. На нижней границе $\partial \Omega_{Bot}$ задавалось условие фиксированного значения температуры окружающей среды T_{amb} и удельной энтальпии $H(T_{amb})$.

В главе описан алгоритм (рис. 2), позволяющий реализовать математическую модель СЛП методом конечных элементов. В численной реализации модели СЛП применялся метод взвешенных невязок в классической постановке Галеркина, использовалась слабая постановка задачи. Для решения нестационарной задачи использовалась формула «дифференцирования назад» линейного порядка аппроксимации. Для вычисления положения *z* локального объема порошкового слоя Ω_P в модели был развит алгоритм послойной изменения геометрии КЭ-сетки в области порошкового слоя, где в качестве КЭ используются трехгранные призмы. Развитый алгоритм ставит положение *z* локального объема во всех узлах КЭ-сетки

10

порошкового слоя во взаимно-однозначное соответствие с рассчитываемым в модели положением промежуточных движущихся границ $\{\partial \Omega_i\}$ (рис.3). Промежуточные свободно движущиеся границы $\{\partial \Omega_i\}$ располагаются в порошковом слое и изначально параллельны между собой и параллельны границе между порошком и подложкой.



Рисунок 3 – Увеличенный фрагмент КЭсетки с обозначенными определениями слоев {∂Ω_i}, позволяющих рассчитывать изменение геометрии КЭ-сетки при усадке порошка Ω_P





Рисунок 4 – Графики зависимости $I_I(t)$ и $I_2(t_{\kappa})$, выражающие тепловую энергию $E_{\text{тепл}}$ в расчетной области Ω , рассчитанные с помощью интегрирования удельной энтальпии H и источника лазерного излучения Fсоответственно. Синей линией обозначена функция $I_I(t)$, серая линия обозначает подведенную за время расчета (t_{κ}) энергию $I_2(t_{\kappa})$



Рисунок 5 – Шлифы поперечного сечения одиночного трека на подложке в образцах, полученных при различных управляющих параметрах лазерной обработки, где h_m - глубина зоны активного конвективного перемешивания в подложке; d_m – ширина сплавленного порошкового слоя с подложкой; $r_m=d_m/2$, h_{ε} и d_{ε} – толщина и ширина трека, $r_{\varepsilon}=d_{\varepsilon}/2$. Темный фон (сверху) соответствует эпоксидному клею, которым заливался образец.

Детально рассмотрены этапы численной реализации: построения локальных матриц жесткости, векторов столбцов и ансамблирование системы при формировании глобальной матрицы жесткости [K], глобального вектора столбца $\{F\}$. При линеаризации численной модели использовались методы Ньютона-Рафсона и Ньютона-Канторовича. В предложенном алгоритме (рис. 2) также исследовались построение КЭ-сетки, условия ee послойного изменения И перестройки, дискретизация задачи СЛП по времени. В главе разработана компьютерная модель, реализующая на высокоуровневом языке среды MatLab и ComsolMultiphysics 4.3 развитый в работе алгоритм расчета СЛП. На программу для ЭВМ, реализующую модель СЛП, было получено свидетельство о государственной регистрации № 2017614588.

<u>Третья глава</u> посвящена проверке адекватности развитой модели СЛП металлических порошков. В главе изучена зависимость времени реализации модели СЛП порошка железа на ЭВМ от параметров построение КЭ сетки и дискретизации модели по времени. Предложены параметры построения адаптируемой КЭ сетки

(рис. 3). Также была исследована зависимость максимальной температуры порошкового слоя в конце импульса в модели СЛП порошков металлов от параметров построения КЭ сетки. Показана сходимость по сетке для развитой компьютерной реализации модели СЛП.



Рисунок 6 – (*a*) Визуализация численного моделирования локальной пористости ε образца в порошковом слое Ω_P и переплавляемом слое подложки Ω_{S_TOP} после лазерной обработки; (*б*-*д*) сечения трека, перпендикулярные траектории движения луча лазера. Рисунки (*б*,*г*) получены с помощью численного моделирования и демонстрируют локальную пористость

Развитая модель СЛП порошков металлов была верифицирована в задаче сплавления слоя порошка железа на подложке. Сравнение результатов лабораторного и численного экспериментов проводилось для формы и размеров зон плавления и твердофазного спекания, которые оценивались на шлифах лабораторных образцов (рис. 5) и по результатам расчетов (рис. 6). Эксперимент выполнялся при различных значениях эффективного радиуса лазерного луча: *R*_b=200, 300 и 400 мкм. Для каждого значения R_b варьировались параметры длительности импульса τ_{imp} от 1 до 4,5 мс и энергии одного импульса E_{imp} от 0,4 до 4,7 Дж. Сравнение результатов численного и лабораторного экспериментов показало их хорошее соответствие (рис. 7). Также было показано соответствие между значением средней локальной пористости сплавленного трека, определенной с использованием численных моделей и в проведенном лабораторном эксперименте (рис. 6). Хорошее соответствие подтверждает адекватность разработанной модели И возможность ee использования для дальнейшего анализа процесса СЛП металлических порошков.



Рисунок 7 – Зависимости от энергии импульса E_{imp} следующих характеристик спеченного трека: (*a*) – h_{sub} ; (*б*) – d_m ; (*в*) – d_ε ;, полученные в численных расчетах (линии и определяют, соответственно, максимальное и минимальное значения исследуемой характеристики) и в лабораторном эксперименте (•) (рис.5)

В <u>четвертой главе</u> исследовано влияние управляющих параметров импульсного миллисекундного лазера на процессы СЛП высокодисперсного порошка железа. Показано, что параметр энергии импульса E_{imp} в рабочих диапазонах СЛП и радиус лазерного луча R_b определяют форму краев проплавленной зоны. Усадка порошка железа происходит преимущественно в течение длительности τ_{imp} лазерного импульса. Обнаружен и проанализирован эффект начального перегрева порошка железа, обрабатываемого импульсным лазером.

Изучена зависимость времени выравнивания температурного поля после лазерного импульса от управляющих параметров: радиуса лазерного луча R_b , энергии импульса E_{imp} и длительности импульса τ_{imp} . На основе анализа полученных данных предложена феноменологическая модель, прогнозирующая период τ_{gen} и частоту v лазерной генерации:

$$\tau_{gen} = 0,00755E_{imp} - 0,26E_{imp}\tau_{imp} + 0,78\tau_{imp} + 0,0009, \ \nu = \frac{1}{\tau_{gen}},\tag{7}$$

13



Рисунок 8 – Диаграммы зависимости управляющих параметров лазерной обработки – (a) оптимальной длительности импульса τ_{imp} , (b) глубины проплавления в подложку h_m , (b) длины краев Δ_{ε} сплавленной зоны; (c) Диаграмма зависимости максимальной оценки производительности max(Π) качественного сплавленная порошкового слоя с подложкой от параметров (J_{max} , R_b , τ_{imp} , τ_{gen}), где J_{max} – пиковая плотность мощности лазера τ_{imp} определен через диаграмму (a), τ_{gen} определен через (7). Черные точки соответствуют значениям параметров (J_{max} , R_b), для которых проводились компьютерные расчеты. Белая область диаграммы соответствует режимам обработки, при которых не выполняются ограничения на качество лазерной обработки

которая обеспечивает однородность лазерной обработки порошка для случая, когда достигаются температуры, близкие к температуре кипения железа. Предложен алгоритм поиска рациональных режимов ИЛ обработки при объемной печати методом СЛП порошка железа. При поиске рациональных режимов обработки на процесс СЛП порошка железа ИЛ накладывались ограничение по качеству сплавляемого слоя. С использованием предложенного алгоритма проведена серия компьютерных расчетов с варьируемыми параметрами обработки. При этом были исследованы и представлены в виде набора диаграмм рациональные режимы лазерной обработки, обеспечивающие качественное *сплавление порошка железа*:

• Рациональные параметры лазерной обработки: R_b , $\tau_{imp}(J_{max}, R_b)$ (рис. 8*a*), $E_{imp}(J_{max}, R_b, \tau_{imp})$, $\tau_{gen}(J_{max}, R_b, \tau_{imp})$; характеристики качества сплавленного слоя: $h_m(J_{max}, R_b, \tau_{imp})$ (рис. 86), $\Delta_{\varepsilon}(J_{max}, R_b, \tau_{imp})$ (рис. 86), разрешающая способность печати $D_{def}(J_{max}, R_b, \tau_{imp})$;• Характеристика процесса СЛП – диаграмма максимальной температуры $T_{max}(J_{max}, R_b, \tau_{imp})$, достигаемой при СЛП порошка железа на поверхности;• Характеристики эффективности сплавления при СЛП: площадь качественного сплавления порошка с подложкой $S_m(J_{max}, R_b, \tau_{imp})$, максимальная оценка скорости (производительности) качественного сплавления порошка с подложкой max(Π) ($J_{max}, R_b, \tau_{imp}, \tau_{gen}$) (рис. 8*г*).

Выявлено, что прогнозируемая максимальная скорость объемной печати методом СЛП импульсными миллисекундными лазерами порошка железа составила:

14

 $v_{C\Pi\Pi} \approx 0.8 \text{ см}^{3/4}$ час. Показано, что при печати с меньшими радиусами лазерного пятна R_b и большим значением параметра энергии импульса E_{imp} достигаются режимы, обеспечивающие высокое качество изделий - решетчатых и тонкостенных структур.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Разработана математическая модель СЛП с учетом физических допущений при формализации объекта моделирования до нанесенного на подложку однородного порошкового слоя, подвергающегося лазерному воздействию. Развитая математическая модель позволяет рассчитывать нестационарный теплоперенос, динамику компактирования и усадки многофазной системы – металлического порошка – с учетом фазовых переходов и конвективных течений в расплаве при селективном лазерном плавлении порошкового слоя, где в качестве зависимых переменных выступают: температура, удельная энтальпия, локальная пористость и положение локального объема порошкового слоя.

2) На основе математической модели с помощью МКЭ в классической постановке Галеркина развит алгоритм реализации модели СЛП. Разработана программа для ЭВМ, реализующая математическую модель СЛП на высокоуровневом языке среды *MatLab* в связке с вычислительной средой *ComsolMultiphysics 4.3*. В математической модели усадка порошкового слоя реализована с помощью механизмов перестройки и изменения геометрии КЭ-сетки. Модель СЛП порошков металлов была верифицирована на примере сплавления высокодисперсного порошка железа ИЛ на подложке.

3) Изучено влияние управляющих параметров ИЛ обработки на процесс СЛП порошка железа, в частности, на теплоперенос, компактирование и усадку порошка железа. Обнаружен и проанализирован эффект начального перегрева порошка железа, обрабатываемого импульсным лазером.

4) Предложена методика поиска рациональных режимов ИЛ обработки методом СЛП. Построены диаграммы управляющих параметров, диаграммы характеристик динамики процесса СЛП и диаграммы, характеризующие геометрию зон спекания/сплавления и позволяющие устанавливать рациональные режимы лазерной обработки при СЛП миллисекундным ИЛ высокодисперсного порошка железа. Найдены значения набора управляющих параметров лазерной обработки, определяющего наиболее производительный по скорости объемной печати режим. Было показано, что СЛП при исследуемых условиях неэффективно для объемной печати изделий средних и больших габаритов. Однако исследуемая лазерная обработка порошков металлов и сплавов позволяет эффективно получать объемные тонкостенные и решетчатые структуры, а также функциональные градиентные покрытия.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ 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).

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).

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 (ВАК).

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 (ВАК).

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. 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.

12. 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.

13. 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.