**Гордеев Георгий Андреевич Моделирование теплофизических процессов в порошках металлов при селективном лазерном плавлении**

**ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**кандидат наук Гордеев Георгий Андреевич**

**Оглавление**

**Стр.**

**Введение**

**Глава 1. Литературный обзор**

**1.1 Технология селективного лазерного плавления (СЛП) 12 1.1.1 Сравнение импульсного и непрерывного режимов СЛП обработки**

**1.2 Характерные физические процессы при СЛП порошков металлов и 16 сплавов**

**1.3 Методология математического моделирования**

**1.4 Обзор существующих аналитических моделей нагрева металлических 19 тел высокоэнергетическим тепловым локальным источником (лазером)**

**1.4.1 Аналитические одномерные модели нагрева металлических тел 21 тепловым источником**

**1.4.2 Аналитические пространственные модели нагрева металлических 22 тел тепловым источником. Неподвижные тепловые источники**

**1.4.3 Аналитические пространственные модели нагрева металлических 25 тел тепловым источником. Движущиеся тепловые источники**

**1.4.4 Аналитические нелинейные модели нагрева металлических тел 28 тепловым источником**

**1.4.5 Преимущества и недостатки аналитических методов**

**1.5 Методы численного моделирования**

**1.5.1 Метод конечных разностей (метод сеток, МКР)**

**1.5.2 Метод конечных объемов (МКО)**

**1.5.3 Метод конечных элементов 34 1.5.3а Дискретизация расчетной области в МКЭ 35 1.5.3б Выбор функций формы в МКЭ 36 1.5.3в Формирование СЛАУ в МКЭ 40 1.5.3г Метод Ритца минимизации функционала 41 1.5.3д Метод взвешенных невязок 42 1.5.3е Достоинства и недостатки МКЭ**

**1.6 Метод многомасштабного моделирования 45 1.6.1 Многомасштабное моделирование СЛП**

**1.7 Макроскопические численные модели СЛП 51 Выводы по главе 1 59 Глава 2. Модель СЛП порошков металлов**

**2.1.1 Содержательная постановка задачи моделирования СЛП**

**2.1.2 Концептуальная постановка задачи моделирования СЛП**

**2.2 Математическая модель СЛП**

**2.3 Численная реализация модели**

**2.4 Алгоритм реализации модели**

**2.5 Компьютерная реализация модели**

**Выводы по главе 2:**

**Глава 3. Проверка адекватности компьютерной модели СЛП порошков**

**металлов**

**3.1 Факторы модели СЛП, влияющие на время расчета**

**3.2 Построение КЭ сетки**

**3.3 Исследование сходимости компьютерной реализации модели по сетке**

**3.4 Проверка баланса энергии в компьютерной реализации модели**

**3.5 Верификация модели СЛП порошка железа 104 Выводы по главе 3 112 Глава 4. Анализ теплофизических процессов и процессов усадки при СЛП 114 порошка железа**

**4.1 Влияние управляющих параметров лазерной обработки на процесс 116 СЛП**

**4.1.1 Влияние длительности импульса Timp и энергии импульса Eimp при 116 фиксированном значении пиковой мощности Jmax**

**4.1.2 Влияние энергии импульса Eimp при фиксированном значении 117 длительности импульса Timp**

**4.1.3 Влияние длительности импульса Timp при фиксированном значении 119 энергии импульса Eimp**

**4.2 Анализ динамики процесса спекания порошка железа**

**4.3 Феноменологическая модель для периода и частоты лазерной 127 генерации при СЛП порошка железа**

**4.4 Алгоритмы поиска рациональных режимов СЛП порошка железа**

**4.5 Поиск рациональных режимов СЛП обработки**

**4.5.1 Поиск оптимальных управляющих параметров лазерной обработки: 135 длительности импульса Timp, энергии импульса Eimp**

**4.5.2 Исследование площади сплавления порошка с подложкой Sm при 137 лазерной обработке с оптимальными управляющими параметрами**

**4.5.3 Исследование характеристик качества сплавляемого слоя: глубины 140 проплавления в подложку hm, длины краев сплавленной зоны Де, оценки разрешающей способности Дм при лазерной обработке с оптимальными управляющими параметрами**

**4.5.4 Поиск оптимального управляющего параметра периода Tgen лазерной 143 генерации и исследование максимального предела тах(Л) скорости (производительности) сплавления порошка железа с подложкой**

**4.5.5 Определение рациональных режимов лазерной обработки при СЛП 144 порошка железа**

**4.6 Поиск режима лазерной импульсной обработки оптимального по 146 скорости качественного сплавления порошка железа при СЛП**

**Выводы по главе**

**Заключение**

**Список сокращений**

**Условные обозначения**

**Список литературы**

**Приложение**

**Приложение А. Вывод уравнения теплопроводности для пористой**

**структуры в приближении сплошной среды. Вывод уравнения положения z локального объема порошкового слоя**

**Приложение Б. Определение зоны расплава и зоны активного**

**конвективного перемешивания в порошковом слое и подложке**

**Приложение В. Феноменологический учет конвекции металла в зоне**

**расплава с помощью эффективного параметра теплопроводности**

**Приложение Г. Вычисление некоторых уравнений и эффективных**

**теплофизических коэффициентов в численной реализации модели**

**Приложение Д. Промежуточные этапы преобразований численной**

**реализации модели**

**Приложение Е. Таблица параметров (констант) математической модели**

**СЛП высокодисперсного порошка железа**

**Приложение Ж. Свидетельство о государственной регистрации**

**программы для ЭВМ**

**Приложение З. Верификационная база для проверки результатов расчета**

**средней пористости emm сплавленного трека**