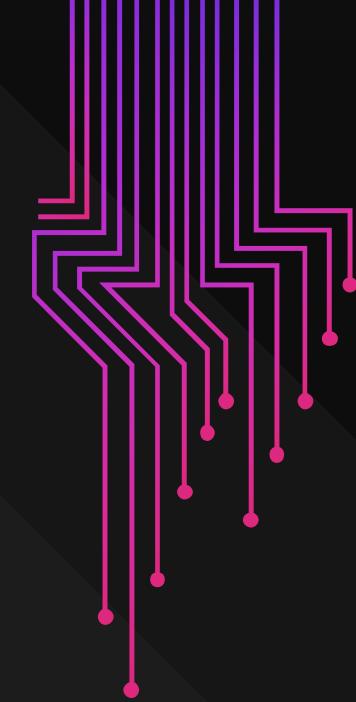


# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ПОРОШКОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Выполнил: студент группы Б05-206 Корниенко С. М.

Научный руководитель: д.ф.-м.н., доцент, профессор  
кафедры информатики и вычислительной математики МФТИ  
Голубев В. И.



# Введение

## Аддитивные технологии:

- Важность оптимизации параметров для создания деталей послойным методом.

## Селективное лазерное плавление:

- Используется для титановых (Ti-6Al-4V) и алюминиевых (AlSi10Mg) сплавов.
- Диапазон мощности: 50–300 Вт, скорость: 500–1500 мм/с.
- Проблема: Необходимость моделирования для минимизации дефектов и улучшения свойств материалов.

# Математическая постановка задачи

Классическая задача Стефана:

- Уравнение теплопроводности для трёхфазной системы (порошок, расплав, твёрдая фаза).
- Условия на границах фазовых переходов.

Энталпийная формулировка:

- Упрощает расчёты, не требуя явного выделения границ фаз.
- Уравнение:  $\frac{\partial E}{\partial t} = \nabla(k(E)\nabla T(E))$

# Численная схема решения

## Метод:

- Явная конечно-разностная схема с использованием метода конечных объемов.

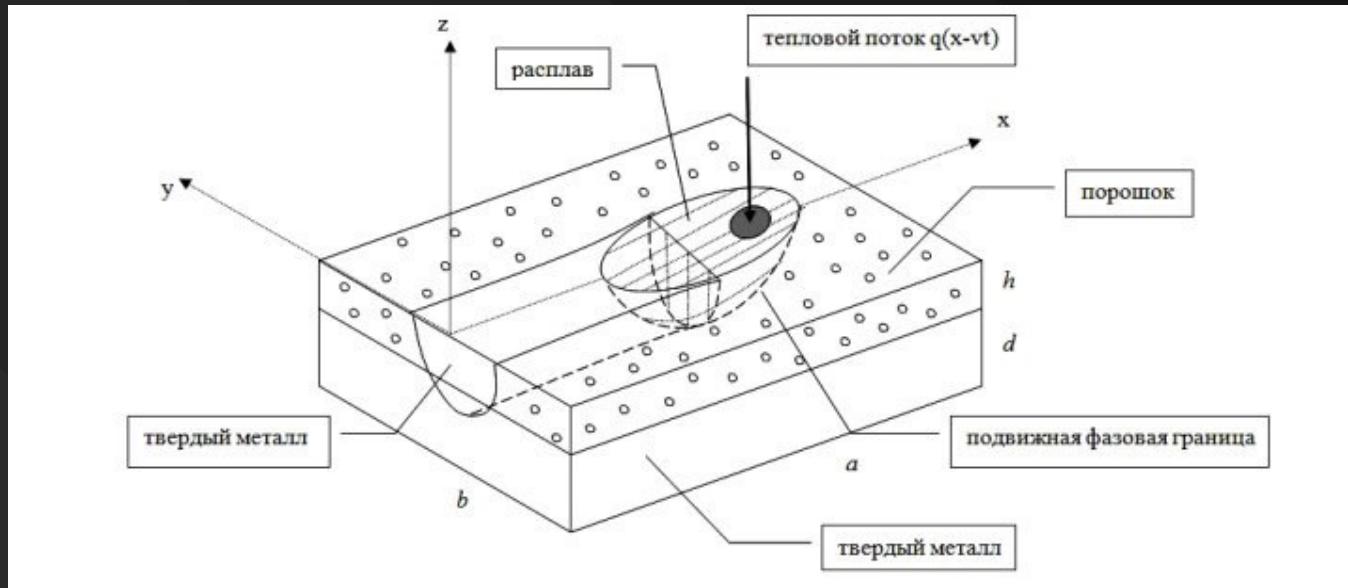
## Аппроксимация:

- Интегрирование уравнения по объёму ячейки.
- Учёт граничных условий (тепловые потоки, подвижный лазерный луч).

## Устойчивость:

- Шаг по времени определяется условием устойчивости для параболического уравнения.

# Графическая схема задачи о подвижном тепловом потоке от лазерного луча при его воздействии на слой порошка с образованием ванны расплава.



# Многопоточные вычисления в моделировании СЛП

## Проблема:

- 3D-моделирование СЛП требует больших вычислительных ресурсов.
- Необходимость ускорения расчётов для параметрических исследований.

## Решение:

- Использование гибридного подхода: MPI + OpenMP.
- MPI – для распределения задач между узлами кластера.
- OpenMP – для параллелизации внутри одного узла (многопоточность).

# Реализация MPI

## Применение:

- Распределение расчётной сетки по узлам кластера.

## Пример:

- Каждый MPI-процесс обрабатывает свою часть пространства (слои порошка).
- Обмен данными на границах областей (используется MPI\_Send/MPI\_Recv).

## Преимущества:

- Масштабируемость для больших задач (тысячи ядер).
- Эффективность для задач с чётким разделением данных.

# Реализация OpenMP

## Применение:

- Параллелизация циклов в пределах одного узла.

## Примеры:

- Расчёт тепловых потоков в ячейках сетки.
- Обработка граничных условий.

## Преимущества:

- Простота внедрения (директивы `#pragma omp parallel`).
- Минимизация накладных расходов для мелкозернистого параллелизма.

# Гибридный подход (MPI + OpenMP)

## Схема работы:

- MPI распределяет крупные блоки данных между узлами.
- OpenMP ускоряет вычисления внутри каждого узла.

## Результаты:

- Ускорение расчётов в 5-10 раз (зависит от числа ядер).
- Оптимальное использование ресурсов кластера.

## Пример архитектуры:

- 4 узла  $\times$  8 ядер на узел = 32 потока.
- Каждый узел обрабатывает свой слой порошка с помощью OpenMP.

# Источники

- Никитин И.С., Голубев В.И., Никитин А.Д., Стратула Б.А. Численное моделирование процесса селективного лазерного плавления порошков из титановых и алюминиевых сплавов // Математическое моделирование. - 2025. - Т.37 - №1. - С. 61-80. DOI: 10.20948/mm-2025-01-04
- [https://www.youtube.com/playlist?list=PLCnfPWRs\\_359x8DEtOnIjeF\\_GUm0HM-eD](https://www.youtube.com/playlist?list=PLCnfPWRs_359x8DEtOnIjeF_GUm0HM-eD)
- [https://www.youtube.com/playlist?list=PLCnfPWRs\\_35\\_xeqa2hinVjBowXJREAxIM](https://www.youtube.com/playlist?list=PLCnfPWRs_35_xeqa2hinVjBowXJREAxIM)
- [https://github.com/Neriston/SLM\\_CPP\\_PRLL/tree/def](https://github.com/Neriston/SLM_CPP_PRLL/tree/def)
- Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений. - М.: Национальный Открытый Университет ИНТУИТ, 2016. - 500 с.