



Научная статья

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2023.4.16

УДК 531/534: [57+61]

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ВЫСОКОПОРИСТЫХ ИМПЛАНТАТОВ С ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРОЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

П.Н. Килина, Л.Д. Сиротенко, М.С. Козлов, А.А. Дроздов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 15 сентября 2023  
Одобрена: 03 декабря 2023  
Принята к публикации: 04 декабря 2023

#### Ключевые слова:

металлический порошок,  
селективное лазерное плавление,  
технологические параметры,  
геометрические характеристики,  
моделирование

### АННОТАЦИЯ

Селективное лазерное плавление представляет собой процесс аддитивного производства, предполагающий послойное построение трехмерного объекта путем локального плавления слоя порошка на основе подготовленной CAD-модели. Данная технология позволяет изготавливать изделия сложной конфигурации, включающие внутренние каналы сложной геометрии. К такого рода изделиям относятся персонализированные высокопористые имплантаты, к которым предъявляются весьма жесткие требования в области упругих и прочностных свойств, обеспечивающие их соответствие свойствам заменяемых биологических объектов.

Качество высокопористых ячеистых изделий, сформированных методом селективного лазерного плавления на основе металлопорошковых композиций, определяется значительным числом факторов, совокупное влияние которых трудно поддается контролю. При этом структура и механические свойства высокопористых ячеистых материалов, полученных методом лазерного синтеза, в значительной степени определяются стабильностью формы ванны расплава, которая зависит от способности локального отвода тепла, определяемой в свою очередь геометрией сплавляемого изделия.

Представленное исследование посвящено численному анализу теплофизических параметров порошкового слоя во время процесса лазерного плавления, которое затруднительно анализировать путем прямых измерений, при этом создана вычислительная модель на основе *COMSOL Multiphysics* для прогнозирования температурного поля ванны расплава. Численная модель позволила количественно оценить влияние параметров процесса селективного лазерного плавления (мощность лазера и скорость сканирования) в сочетании с выбором материала и топологии детали на формирование температурных полей, определить технологические параметры процесса и особенности создания геометрии для аддитивного производства, позволяющие получать изделия должного качества. Методом лазерного плавления выращены ячеистые имплантаты на основе порошка *Ti6Al4V*.

© ПНИПУ

© Килина Полина Николаевна – к.т.н., доцент, e-mail: [kilinapn@mail.ru](mailto:kilinapn@mail.ru) ID:0000-0002-6272-7403  
© Сиротенко Людмила Дмитриевна – д.т.н., профессор, e-mail: [sirotenko@pstu.ru](mailto:sirotenko@pstu.ru)  
© Козлов Михаил Сергеевич – аспирант, e-mail: [m.kozloww@mail.ru](mailto:m.kozloww@mail.ru)  
© Дроздов Андрей Александрович – старший преподаватель, [dron.perm@list.ru](mailto:dron.perm@list.ru) ID:0000-0002-2248-7505



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## Введение

Развитие современной имплантологии и методов эндопротезирования базируется на использовании новых материалов, технологий, оборудования, методов проектирования и конструирования [9–14, 18, 19, 23–26]. Большая роль в развитии этих важнейших направлений медицинской отрасли принадлежит также расширению использования современных методов моделирования, расчета и прогнозирования физико-механических свойств и других критериев качества имплантатов и эндопротезов, обеспечивающих их высокую клиническую эффективность [1–4, 7, 8, 16, 24, 27, 32, 35, 36]. При этом повышению качества и эффективности медицинского обслуживания в значительной степени способствует биомеханический подход к ортопедической стоматологии и эндопротезированию [2, 5, 6, 15, 21, 37], базирующийся на сочетании различных дисциплин и научных направлений.

Технология селективного лазерного плавления (*SLM*) характеризуется рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными технологиями производства: отсутствие необходимости изготовления пресс-форм и специальной оснастки, высокий коэффициент использования материала, низкая себестоимость и короткий производственный цикл, возможность легкой корректировки формы изделия сложной геометрии и обеспечения её быстрого изготовления. Высокая скорость движения лазерного луча сопровождается быстрым изменением температуры слоя порошка с последующим плавлением, поэтому определение температурных полей в слое в процессе *SLM* путем прямых измерений представляется весьма затруднительным. В этих условиях весьма актуальными являются исследования, направленные на прогнозирование температурных процессов в зоне обработки материала, поскольку повышение температуры вследствие нагрева, обусловленного поглощением тепловой энергии лазерного луча, и охлаждения, вызванного потерями тепла, влияют на различные физические явления в материале во время сплавления и являются основой обеспечения качества изделий [1, 8, 30–33, 40].

В настоящее время высокоэффективным методом прогнозирования и оценки состояния сложных физических систем при лазерном плавлении является численное моделирование, позволяющее прогнозировать влияние геометрии, мощности лазера, скорости сканирования и других параметров процесса *SLM* на состояние ванны расплава с помощью метода конечных элементов. Такого рода модели позволили исследовать влияние технологических режимов плавления металлопорошковых композиций на качество сплавляемых изделий, оцениваемое рядом важнейших критериев.

В работе [17] на основе *COMSOL Multiphysics* разработана вычислительная модель, направленная на изучение влияния множественных лазерных импульсов на эволюцию шероховатости поверхности при лазерной обработке. В результате численного и натурального эксперимента установлено, что с увеличением частоты импульсов лазерного излучения шероховатость обрабатываемой поверхности изделий также увеличивается.

Процессы лазерного плавления характеризуются значительными температурными градиентами в зоне обработки, которые вызывают образование в готовой детали высоких остаточных напряжений [20], приводящих к снижению точности размеров и механических характеристик. Взаимодействие между тепловыми и механическими явлениями требует разработки надежных моделей термомеханической связи для анализа остаточных напряжений в процессе *SLM*. Поэтому для точного прогнозирования остаточных напряжений и коробления деталей необходима точная оценка температурного поля. Авторами статьи [31] разработана конечно-элементная термомеханическая модель, позволяющая сравнить различные стратегии сканирования с точки зрения их влияния на возникающие остаточные напряжения. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии истории переходных температур на остаточные напряжения и механические характеристики изделий.

В [19] предложена модель прогнозирования температуры в процессе селективного лазерного плавления, позволяющая оптимизировать параметры процесса согласно полученному закону изменения термического поведения ванны расплава. На основе моделирования проанализировано влияние мощности лазера и скорости сканирования на тепловое поведение порошкового слоя и ванны расплава, в результате установлена зависимость морфологии ванны расплава единичного трека от параметров процесса. Численный анализ распределения температуры вблизи ванны расплава в процессе лазерного воздействия в зависимости от локальной геометрии детали [24] является эффективным инструментом прогнозирования улучшенных параметров *SLM* для обеспечения стабильного процесса плавления и оптимизации теплового режима сплавления.

В связи с большим числом параметров, влияющих на качество изделий, полученных *SLM* [20–23, 28, 29, 34, 41] особую актуальность приобретают вопросы оценки стабильности процесса сплавления на основе различных численных моделей. В статье [33] представлен метод быстрого и точного решения основных тепловых уравнений *SLM*, используемый для установления надежности формирования одиночного трека с помощью лазерного плавления посредством оценки параметров и анализа неопределенности.

Более полное раскрытие потенциала *SLM* в сочетании с расширением возможностей проектирования геометрически сложных объектов предполагает разработку аналитических и численных управляющих моделей для создания бездефектных деталей с высокой точностью размеров и заданной микроструктурой. Такие дефекты, как пористость, шероховатость поверхности и образование оксидного слоя, отрицательно влияют на механические характеристики.

В [40] представлена численная модель для прогнозирования теплового распределения в процессе *SLM* для детали произвольной формы. Прогнозирование распределения температуры в зоне лазерной обработки позволило оптимизировать значения мощности лазера, скорости и расстояния штриховки. Согласно результатам моделирования нависающие поверхности склонны к перегреву, особенно вблизи отверстий и должны обрабатываться на режимах с меньшим тепловложением. Кроме того, различные стратегии сканирования также влияют на прогнозируемое распределение температуры в объеме порошка при сплавлении.

Множество физических явлений процесса лазерного плавления в порошковом слое приводит к повышению трудоемкости численных моделей и затрудняют их использование для моделирования теплового поведения физических тепловых систем и термомеханического анализа. Авторами работы [32] предложена численная модель для изучения процесса сплавления порошковых систем *Ti6Al4V*, которая включает испарение материала, плазмообразование и, как следствие, снижение мощности лазерного луча на поверхности.

Вопросам обеспечения качества изделий, полученных методом *SLM*, уделяется все большее внимание, параметры процесса должны быть выбраны соответствующим образом для получения годных деталей. В статье [35] представлена модель искусственной нейронной сети с несколькими входами и несколькими выходами для прогнозирования процесса *SLM*. Входными данными модели являются мощность лазера, скорость сканирования, степень перекрытия и стратегия штриховки. В качестве целевых функций были выбраны такие параметры, как твердость, прочность на разрыв и пористость. На основании этой модели разработан метод оптимизации мощности лазерного излучения, целью которой является минимизация энергетического вклада в процессе *SLM* без снижения качества.

Эффективный модуль упругости, предел прочности и тип разрушения являются одними из параметров, имеющими решающее значение для оценки применимости высокопористых структур в имплантологии. Несоответствие модуля Юнга имплантата характеристикам костной ткани может привести к эффекту «экранирования напряжений»,

резорбции кости и расшатыванию имплантата [30]. В данном случае проблема заключается в высокой жесткости имплантата. Одним из способов минимизации разницы модулей Юнга является использование пористых структур с открытыми ячейками, снижающими эквивалентную жесткость структуры имплантата, способствующими прорастанию кости и, таким образом, дополнительно стабилизирующими имплантат. При этом на эффективные механические свойства высокопористых ячеечных материалов (ВПЯМ) оказывает влияние не только их макропористость, но и микропористость их элементов, что более подробно рассматривается в работах [1, 3].

Расширение использования ВПЯМ в имплантологии связано с внедрением эндопротезов с градиентной ячеистой структурой, позволяющей осуществлять локальное регулирование физико-механических свойств имплантатов. В работах [16, 34] приведены результаты проектирования и моделирования эндопротеза из градиентного материала с механическими свойствами, соответствующими механическим свойствам бедренной кости человека. Влияние топологии эндопротеза на напряженно-деформированное состояние кости и их совместную работу при различных видах активности человека оценивалось на основе численного моделирования *ANSYS Mechanical*.

Целью работы является рассмотрение теплофизических аспектов обеспечения качества высокопористых имплантатов на основе *Ti6Al4V* с ячеистой структурой, полученных методом селективного лазерного плавления.

## Материалы и методы

Создание модели, имитирующей воздействие стационарного лазерного луча на точку поверхности подложки, создавалось в программе *COMSOL Multiphysics*.

Объектом исследования являлся порошок сплава *Ti6Al4V* (аналог отечественного сплава ВТ6) – один из наиболее распространенных материалов, используемых для производства имплантатов. Химический состав материала по данным производителя и результаты проверки на соответствие ГОСТ Р ИСО 5832-3 и *ASTM F136-02a (ELI Grade 23)* с помощью спектрометра *EDX-800HS (Shimadzu)* приведены в табл. 1. Порошковый материал *Ti6Al4V* для селективного лазерного плавления, проанализированный с помощью растрового электронного микроскопа *Phenom G2 Pro*, представлен на рис. 1.

В качестве оборудования для сплавления единичных треков, плотных и ячеистых образцов использовалась установка *Realizer SLM 50*, оснащенная иттербиевым волоконным лазером мощностью 100 Вт и оптической системой, которая позволяет варьировать диаметр пятна лазера, увеличивая точность построения, и более детально прорабатывать мелкие элементы геометрии изделия.

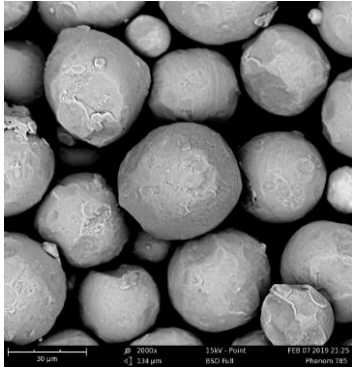


Рис. 1. СЭМ–изображение порошка *Ti6Al4V* увеличение  $\times 2000$

Таблица 1

Химический состав сплава *Ti6Al4V*, %

Элемент	Предельные значения содержания компонентов, %	Результаты анализа, %
Алюминий	От 5,5 до 6,75	6,29
Ванадий	От 3,5 до 4,5	4,09
Железо	До 0,3	-
Кислород	До 0,2	-
Углерод	До 0,08	-
Азот	До 0,05	-
Водород	До 0,015	-

Механические свойства плотных образцов, являющиеся входными параметрами для *COMSOL*, определялись в соответствии с техническими требованиями ГОСТ Р 57756–2017 на универсальной испытательной машине *Instron 5885N* (табл. 2).

В качестве основного модуля использовался *Heat Transfer in Solids* (теплопередача в твердых телах), включающий в себя элементы: *Boundary Heat Source* (тепловой поток лазерного излучения), *Heat Flux* (тепловой поток конвективного охлаждения поверхности), *Thermal insulation* (теплоизоляция), *Open Boundary* (свободная граница), *Diffuse Surface* (рассеивание тепла посредством излучения), *Phase change* (фазовые превращения). Исследуемая область задавалась в двумерном виде и имитировала влияние лазерного луча определенной мощности, а также распределение температурных полей в зоне сплавления.

Исходные данные для решения тепловой задачи при селективном лазерном спекании ВПЯМ включали следующие основные характеристики:

1. Свойства порошка и металлической подложки.
2. Геометрические характеристики профиля подложки с расположенным на её поверхности слоем порошка.
3. Распределение мощности лазера по площади пятна сплавления.

Встроенная в *COMSOL* стандартная функция *Gaussian Pulse* отображает нормальное распределение мощности лазерного излучения по площади пятна сплавления одной точки (рис. 2). Функция гауссова импульса характеризуется параметром *standard deviation*

(стандартное отклонение), равным трети радиуса пучка лазера, т.е.  $r_{spot} / 3$ .

Следующим этапом моделирования являлось создание геометрии профиля подложки с расположенным на её поверхности слоем порошка. Прямоугольник малого размера в левом верхнем углу профиля – заданная область лазерного воздействия, подвергающаяся сплавлению. Зоне, представляющей на рис. 3 слой порошка, «присвоен» материал *Ti6Al4V*. Такая же процедура была повторена для металлической подложки, для которой был выбран тот же самый, но компактный материал.

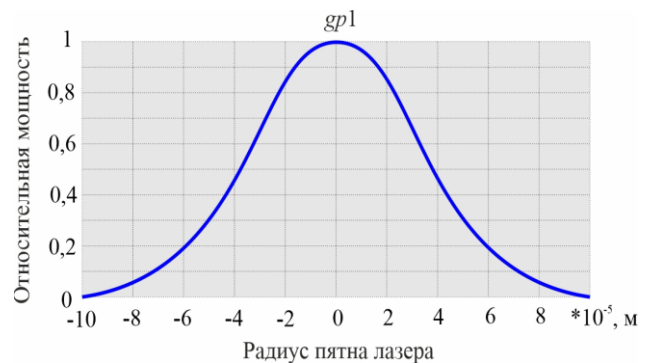


Рис. 2. Нормальное распределение мощности лазерного излучения

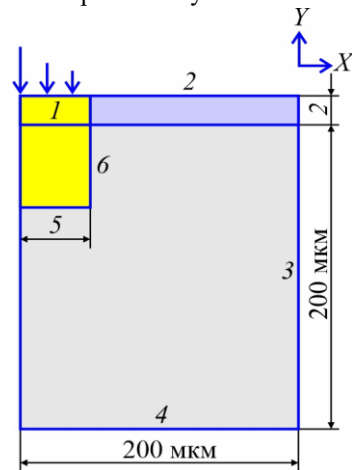


Рис. 3. Геометрия профиля подложки с расположенным на её поверхности слоем порошка и зоны граничных условий

Таблица 2

Механические свойства сплава *Ti6Al4V*

Характеристики	Значения
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	4430
Модуль упругости, ГПа	110
Коэффициент Пуассона, МПа	0,3
Предел текучести, МПа	1050
Предел прочности, МПа	1180

Для задания температурного распределения по поверхности слоя порошка и подложки использовался модуль *Heat Transfer in Solids* (теплопередача в твердых телах). В данном модуле для лазерного луча назначаются поверхности (см. рис. 3), по которым проходит лазерный луч (зона 1), на которых происходит естественное конвекционное охлаждение и излучение (зоны 2, 3), по которым проходит теплоизолированная граница (зона 4), а также задаются нейтральные зоны (границы 5, 6).

На рис. 4 представлены граничные условия, предполагаемые постановкой задачи теплообмена при селективном лазерном сплавлении.

В табл. 3 представлено основное уравнение теплопроводности и граничные условия для задачи теплообмена при селективном лазерном сплавлении. Обозначения в табл. 3:  $\rho$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>);  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении (Дж/кг

К);  $k$  – теплопроводность (Вт/м<sup>2</sup> К);  $T$  – температура (К);  $t$  – время (сек);  $x$  и  $y$  – координаты;  $P_g$  – средняя плотность мощности лазера в форме 1 м<sup>2</sup>;  $h$  – коэффициент теплопередачи (Вт/м<sup>2</sup> К);  $\varepsilon$  – излучательная способность;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана (Вт/м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>);  $T_a$  – температура окружающей среды (К).

В процессе разбивки исследуемой области на конечные элементы (рис. 5) была выбрана треугольная сетка *triangular*, которая отдельно накладывалась на зону сплавления и на неактивную часть процесса лазерной обработки. На рабочую часть наложена мелкая сетка с размерами от  $1 \times 10^{-6}$  до  $5 \times 10^{-5}$  м.

Мультифизический вычислительный подход включает различные физические явления для прогнозирования профиля поверхности во время одноимпульсной лазерной обработки порошкового материала (рис. 6).

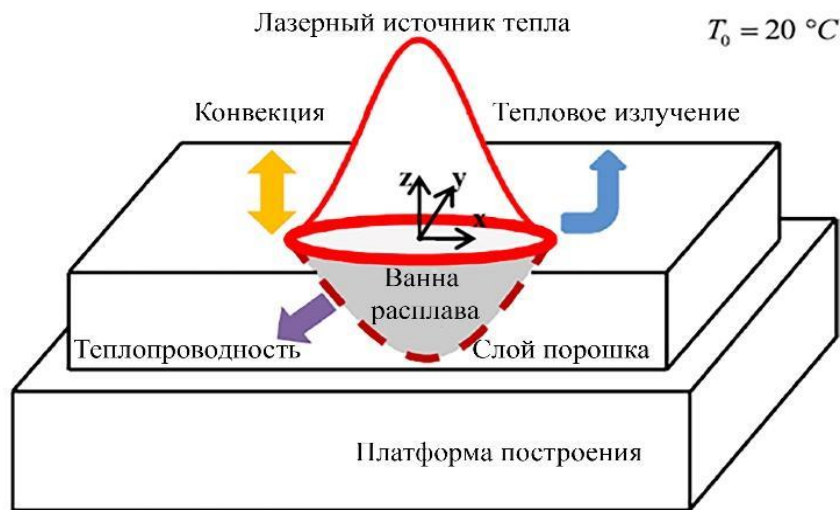


Рис. 4. Схема граничных условий

Таблица 3

Основное уравнение и граничные условия модели теплообмена

Граница №	Граничные условия	Уравнения	№
Вся геометрия	Основное уравнение	$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} \right] = k \left[ \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \right]$	(1)
1	Тепловой поток, естественное конвекционное охлаждение и излучение	$-k \frac{\partial T}{\partial x} = P_g - h[T - T_a] - \varepsilon \sigma [T^4 - T_a^4]$ $0 \text{ мкм} \leq X \leq 50 \text{ мкм}$	(2)
2	Естественное конвекционное охлаждение и излучение	$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h[T - T_a] - \varepsilon \sigma [T^4 - T_a^4]$ $50 \text{ мкм} \leq X \leq 200 \text{ мкм}$	(3)
3	Естественное конвекционное охлаждение и излучение	$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h[T - T_a] - \varepsilon \sigma [T^4 - T_a^4]$ , $-0 \text{ мкм} \leq Y \leq 220 \text{ мкм}$	(4)
4	Теплоизоляция	$\frac{\partial T}{\partial y} = 0$	(5)

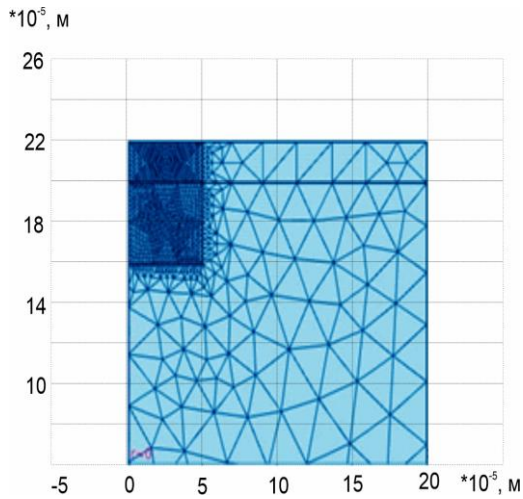


Рис. 5. Генерация сетки

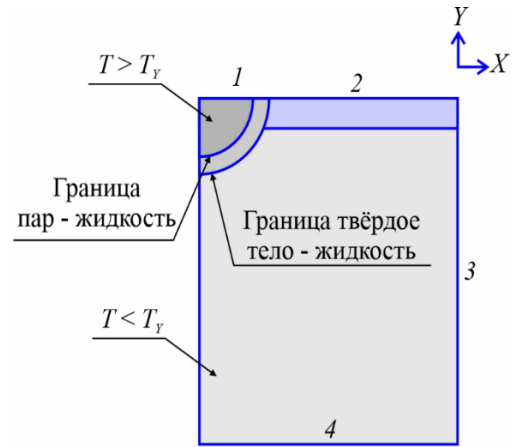
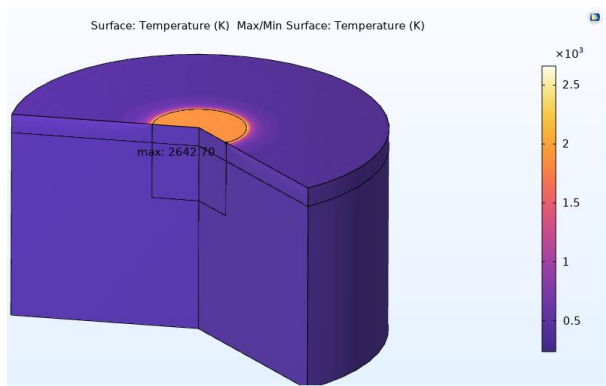
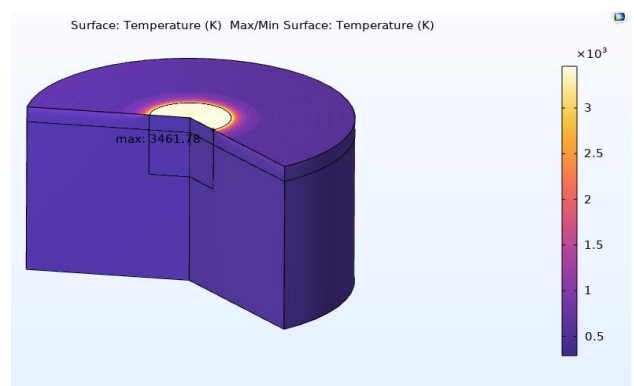


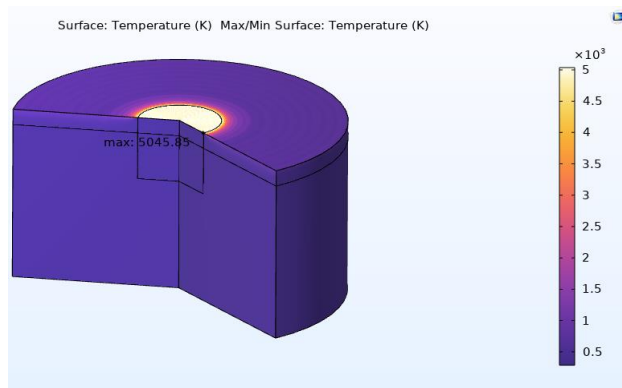
Рис. 6. Схема физической модели в процессе моделирования для прогнозирования температуры в зоне сплавления



а



б



в

Рис. 7. Схема распределения температурных полей: а – 25 Вт; б – 69 Вт; в – 100 Вт

## Результаты

В результате была получена схема распределения температурных полей в зоне сплавления, где  $T$  (К) – расчетное значение температуры,  $T_y$  (К) – температура плавления сплава  $Ti6Al4V$  (рис. 7). Диапазон распределения температуры в зоне сплавления, полученный в результате численного моделирования при варьировании мощности от 25 до 100 Вт, составил 2642,7–5045,85 К.

Для подтверждения достоверности модели прогнозируемые ширина ванны расплава и глубина

проплавления сравнивались с фактическими геометрическими характеристиками сплавленных дорожек единичной ширины. Сравнение ширины дорожки и глубины проплавления при экспериментальном исследовании и моделировании для 27 режимов селективного лазерного плавления представлены на рис. 8 и 9. В табл. 4 представлена выборка результатов лазерного сплавления единичных дорожек для ряда режимов сплавления, представленных на рис. 8, 9 и иллюстрирующих результаты сравнения прогнозируемых и экспериментальных геометрических характеристик дорожек сплавления.



Влияние технологических режимов процесса лазерного плавления на геометрические характеристики перемычек ячеистых материалов описывается следующими регрессионными зависимостями:

$$b = 101,77 + 0,85P - 1,65t - 2,41L + 0,07Pt - 0,005PL - 0,02tL - 0,003PtL \quad (5)$$

$$z = 157,84 + 0,68P - 6,25t - 5,33L + 0,18Pt - 0,02PL - 0,27tL - 0,006PtL \quad (6)$$

где  $P$  – мощность лазерного излучения, Вт;  $t$  – время засветки, мкс;  $L$  – расстояние между точками засветки, мкм;  $b$  – ширина дорожки, мкм;  $z$  – глубина проплавления, мкм.

## Обсуждение

Физические явления в зоне воздействия лазерного излучения определяются взаимодействием процессов повышения температуры, связанным с поглощением тепловой энергии лазерного луча и теплопроводностью обрабатываемого материала, и охлаждением, вызванным потерями тепла из-за внешнего естественного конвективного охлаждения и излучения.

Анализ численных расчетов и экспериментальных исследований свидетельствует о том, что стабильность процесса плавки, размерная точность, качество поверхности сплавляемых дорожек и элементов конструкций на основе ВПЯМ, полученных селективным

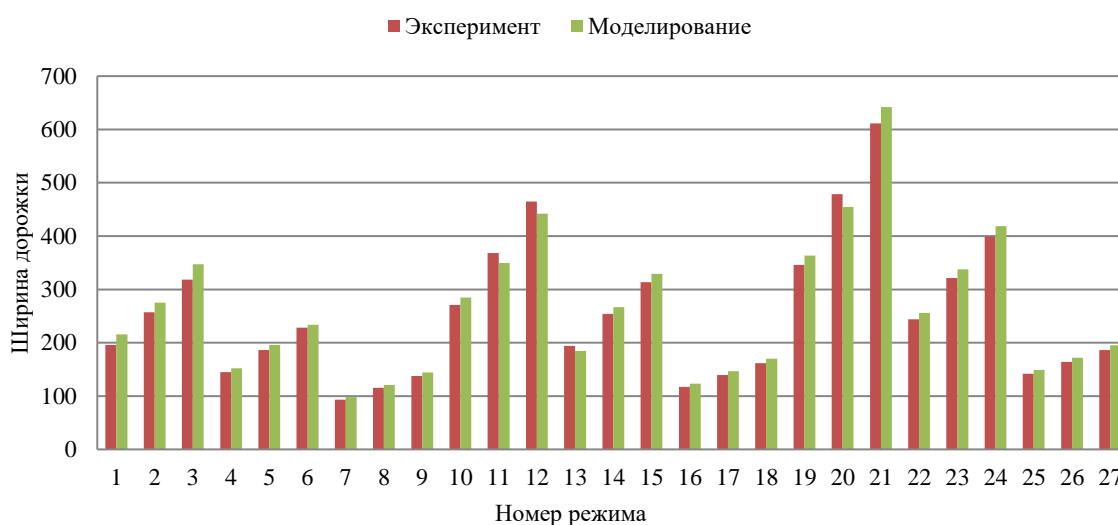


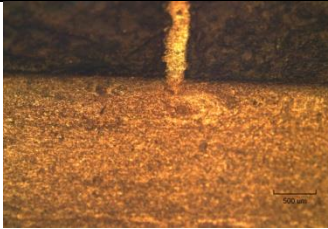
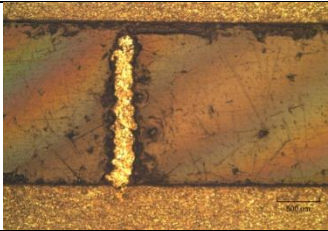

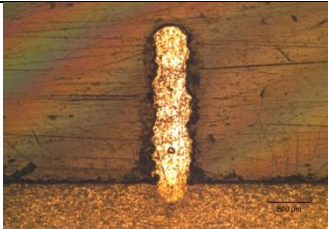
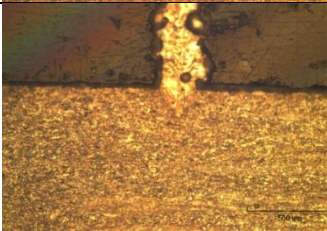
Рис. 8. Результаты сравнения ширины дорожки при эксперименте и моделировании



Рис. 9. Результаты сравнения глубины проплавления при эксперименте и моделировании

Таблица 4

## Результаты металлографического анализа дорожек сплавления

№ опыта	Режимы лазерного плавления			Профиль дорожки единичной ширины	Средняя ширина дорожки $b$ , мкм	Средняя глубина проплавления $h$ , мкм
	Мощность $P$ , Вт	Время $t$ , мкс	Дистанция $L$ , мкм			
11	69	40	5		368,11	398,77
12	100	40	5		465,05	606,68
15	100	40	15		313,43	457,57
20	69	60	5		478,83	504,82
24	100	60	15		398,77	588,75

лазерным сплавлением, зависят от сочетания основных параметров режимов работы импульсного лазера: мощности, времени сплавления одной точки и расстояния между точками засветки. Интервалы изменения этих параметров в процессе исследований составили: мощность 25–100 Вт, время сплавления одной точки 20–60 мкс, расстояние между точками засветки 5–25 мкм.

Одним из наиболее значимых факторов, влияющим на стабильность процесса сплавления, является мощность лазерного воздействия на обрабатываемую поверхность. При этом влияние данного параметра неразрывно связано со скоростью сканирования,

определяемого сочетанием времени сплавления одной точки и расстояния между точками засветки.

Так, сочетание минимальной мощности  $P = 25$  Вт и максимальной скорости сканирования (время засветки  $t = 20$  мкс, расстояние между точками засветки  $L = 25$  мкм) сопровождается образованием недостаточных объемов ванны расплава, наименьшими значениями глубины проплавления, неравномерностью структуры, возникновением пористости и, как следствие, снижением механических свойств. При данных технологических режимах сплавления среднее значение ширины дорожки составило 48,0 мкм, а среднее значение глубины зоны проплавления – 29,0 мкм.



В то же время сочетание максимальной мощности 100 Вт с минимальной скоростью сканирования (время засветки  $t = 60$  мкс, расстояние между точками засветки  $L = 5$  мкм) характеризуется образованием избыточного объема ванны расплава, частичным испарением материала, выбросом частиц из зоны сплавления, плазмообразованием, что в совокупности приводит к последующему ухудшению качества поверхности. При данных технологических режимах сплавления среднее значение ширины дорожки составило 611,0 мкм, а среднее значение глубины зоны проплавления – 820,0 мкм.

Анализ величин среднего значения глубины зоны проплавления в интервале исследуемых в работе технологических режимов свидетельствует о том, что для достижения требуемого качества сплавленного слоя глубина зоны проплавления должна превышать толщину

слоя порошка (30 мкм), обеспечивая не только плавление частиц обрабатываемого слоя, но и сплавление его с предыдущим, формируя при этом достаточную прочность сцепления между слоями. В то же время количество тепловой энергии, подаваемой в зону обработки, должно быть ограничено значениями, при превышении которых процесс плавления в зоне обработки теряет стабильность, ухудшая качество сплавленного изделия.

Отклонения размеров стенок экспериментальных образцов от номинальных находятся в диапазоне 5–10% (рис. 10).

Результаты использования режимов опытов № 11, 12, 15, 20, 24 (см. табл. 4) для изготовления высокопористых имплантатов методом селективного лазерного плавления представлены на рис 10-11.

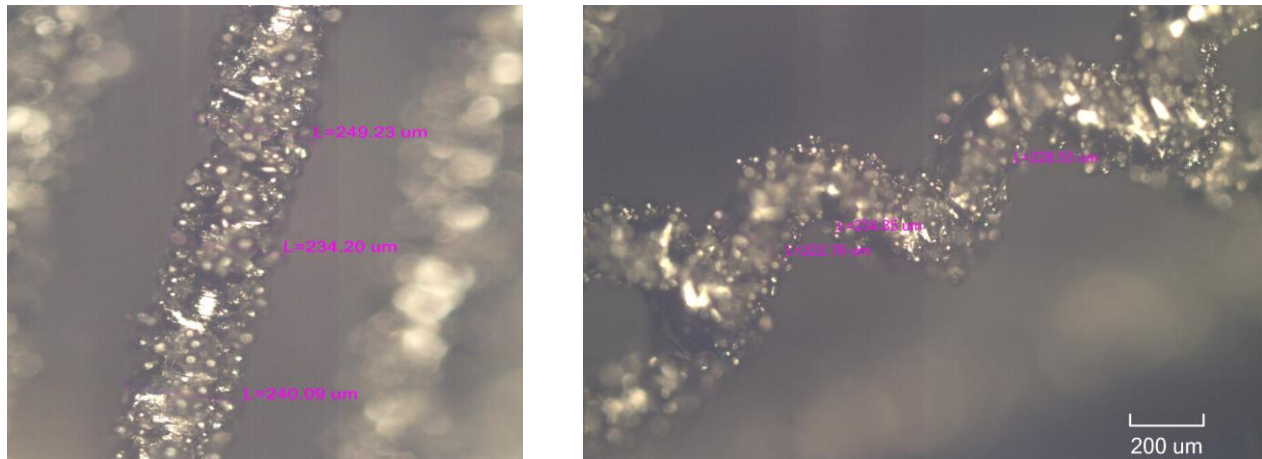


Рис. 10. Структурные элементы имплантатов из титана, полученные методом SLM

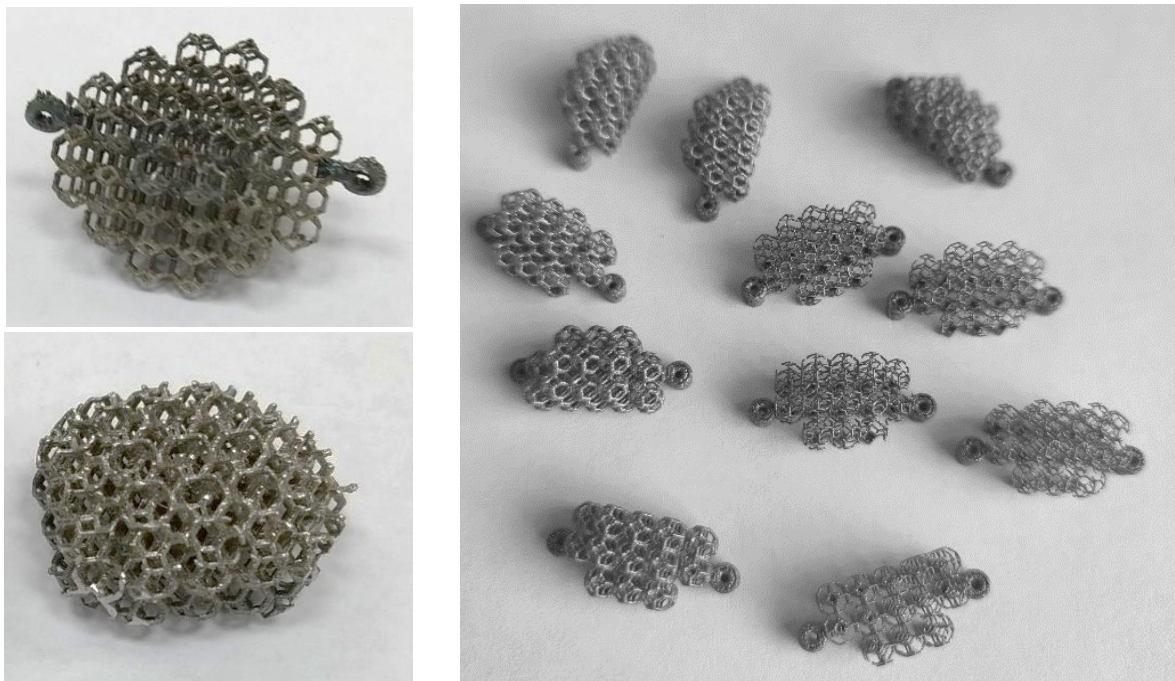


Рис.11. Имплантаты из титана, полученные методом SLM

## Заключение

С помощью встроенного программного обеспечения *Realizer Control Software* построены предназначенные для исследования контуры единичных дорожек и установлены соответствующие режимы. На установке *Realizer SLM 50* проведено сплавление контуров на 27 режимах.

Проведено сравнение прогнозируемых геометрических характеристик зоны сплавления с шириной дорожек и глубиной проплавления, полученных экспериментально. Отклонения экспериментальных данных от данных, полученных в процессе моделирования, отличаются на 5–7 %, в единичных случаях отклонение составило 10 %, что соответствует допустимому максимуму.

Полученный в результате численного моделирования диапазон распределения температуры в зоне сплавления, составивший при варьировании мощности от 25 до 100 Вт интервал 2642,7–5045,85 К., позволяет полностью расплавить единичный слой порошка, что является необходимым минимумом для сплавления с предыдущим слоем.

В результате моделирования и экспериментальных исследований плавления дорожек на основе порошка *Ti6Al4V*, имитирующих геометрию перемычек ячеистого материала, выявлены технологические режимы, которые характеризовались формированием стабильных образцов с равномерным проплавлением по всему объему.

Установлены режимы, обеспечивающие минимальные отклонения толщины стенок от 3D модели, ширину дорожки и глубину проплавления, позволяющие сформировать бездефектные элементы каркаса тонкостенных и ячеистых материалов.

Методом селективного лазерного плавления выращены тонкостенные и ячеистые изделия из порошков *Ti6Al4V*.

## Список литературы

1. Агаповичев А.В., Сотов А.В., Смелов В.Г. Математическое моделирование процесса селективного лазерного сплавления порошка титанового сплава ВТ // *Машиностроение и машиноведение*. – 2020. – Т. 19, № 2. – С. 53–62.
2. Аль-Сандокачи М.Х.А. Моделирование теплопроводности порошковой среды применительно к задаче селективного лазерного плавления // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. – 2017. – Т. 17, № 1. – С. 55–63.
3. Андрюшкин А.Ю., Мещеряков С.А., Михайлов К.Н. Влияние пористости на механические свойства полученных селективным лазерным плавлением металлических изделий // *Вопросы оборонной техники*. – 2020. – Т. 16, № 7. – С. 7–8.
4. Богданович В.И., Гиорбелидзе М.Г., Сотов А.В., Проничев Н.Д., Смелов В.Г., Агаповичев А.В. Математическое моделирование процессов плавления порошка в технологии селективного лазерного плавления // *Известия*

- Самарского научного центра Российской академии наук. – 2017. – Т. 19, № 4. – С. 105–113.
5. Джалалова М.В., Степанов А.Г. Изучение поверхности циркониевого зубного имплантата в наномасштабе атомно-силовым микроскопом // *Российский журнал биомеханики*. – 2020. – Т. 24, № 4. – С. 469–474.
6. Джалалова М.В., Степанов А.Г., Апресян С.В., Оганян А.И. Численное исследование напряженно-деформированного состояния штифтовых культевых конструкций из диоксида циркония, изготовленных с использованием CAD/CAM-технологий // *Российский журнал биомеханики*. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 22–30.
7. Джеббар Н., Бачири А., Бутабут Б. Трехмерный конечно-элементный анализ влияния ударной нагрузки от импактора переменной массы на распределение напряжений на поверхности «кость – имплант» // *Российский журнал биомеханики*. – 2023. – Т. 27, № 1. – С. 10–21.
8. Долбачев А.П., Белов Н.А., Акопян Т.К. Экспериментальное изучение единичных треков, полученных из смеси порошков Ti и Al при варьированных параметрах процесса селективного лазерного плавления // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 51–58.
9. Коллеров М.Ю., Давыдов Е.А., Завгородняя Е.В., Афонина М.Б. Особенности изготовления и клинического применения пористых имплантатов из титана для лечения травм и заболеваний позвоночника // *Российский журнал биомеханики*. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 73–84.
10. Маслов Л.Б., Дмитриук А.Ю., Жмайло М.А., Коваленко А.Н. Конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния эндопротеза тазобедренного сустава при ходьбе // *Российский журнал биомеханики*. – 2021. – Т. 25, № 4. – С. 414–433.
11. Маслов Л.Б., Дмитриук А.Ю., Жмайло М.А., Коваленко А.Н. Исследование прочности эндопротеза тазобедренного сустава из полимерного материала // *Российский журнал биомеханики*. – 2022. – Т. 26, № 4. – С. 19.
12. Мельникова М.А., Таксанц М.В., Холопов А.А., Тарева А.А., Волкова А.А. Исследование особенностей создания одномерных объектов методом импульсного селективного лазерного плавления // *Известия высш. уч. зав. Машиностроение*. – 2020. – № 11. – С. 26–34.
13. Перельмутер М.Н. Концентрация напряжений в костных тканях и винтовых дентальных имплантатах // *Российский журнал биомеханики*. – 2023. – Т. 27, № 2. – С. 18–29.
14. Розов Р.А., Хигучи К.У., Брунски Дж., Трезубов В.Н., Смердов А.А., Мишнев М.Л. Трехмерный конечно-элементный анализ влияния утраты дентального имплантата на распределение напряжения в имплантационном протезе нижней челюсти // *Российский журнал биомеханики*. – 2023. – Т. 27, № 3. – С. 24–35.
15. Сапрыкина Н.А., Сапрыкин А.А., Шаркеев Ю.П., Ибрагимов Е.А., Химич М.А. Влияние режимов селективного лазерного воздействия на пористость образцов из порошков кобальта, хрома и молибдена // *Вестник Брянского ГТУ*. – 2021. – Т. 105, № 8. – С. 22–28.
16. Суфияров В.Ш., Орлов А.В., Попович А.А., Чуковенкова М.О., Сохлаков А.В., Михалюк Д.С. Расчетное исследование прочности эндопротеза из материала с градиентной ячеистой структурой // *Российский журнал биомеханики*. – 2021. – Т. 25, № 1. – С. 64–77.
17. Федорова Н.В., Ларичкин А.Ю., Шевела А.А. Моделирование нагрузок, создаваемых мостовидным

- зубным протезом с опорой на имплантаты верхней челюсти // Российский журнал биомеханики. – 2022. – Т.23, № 2. – С. 56–66.
18. Bandyopadhyay A., Mitra I., Avila J.D., Upadhyayula M., Bose. S. Porous metal implants: processing, properties, and challenges // *Int. J. Extrem. Manuf.* – 2023. – Vol. 5, No. 3. – Article no. 032014.
19. Costanza G., Solaiyappan D., Tata M.E. Properties, applications and recent developments of cellular solid materials: a review // *Materials.* – 2023. – Vol. 16, No. 22. – P. 7076.
20. Dejene N.D., Lemu H.G., Gutema E.M. Critical Review of Comparative Study of Selective Laser Melting and Investment Casting for Thin-Walled Parts // *Materials.* – 2023. – Vol. 16, No. 23. – Article no. 7346.
21. Fabris D., Mesquita-Guimarães J., Pinto P., Souza J.C.M., Fredel M. C., Silva F.S. Henriques B. Mechanical properties of zirconia periodic open cellular structures // *Ceramics International.* – 2019. – Vol.45, No. 13. – P. 15799–15806.
22. Gao B., Zhao H., Peng L., Sun Z.A Review of research progress in selective laser melting (SLM) // *Micromachines.* – 2023. – Vol. 14, No. 1. – Article no. 57.
23. Hu R., Su K., Lao Z., Cai Y., Fu B., Yuen M.M.F., Gao Z., Cao M., Wang Y. Process of pure copper fabricated by selective laser melting (SLM) Technology under moderate laser power with re-melting strategy // *Materials.* – 2023. – Vol. 16, No. 7. – Article no. 2642.
24. Ilin A., Logvinov R., Kulikov A., Prihodovsky A., Xu H, Ploshikhin V, Günther B., Bechmann F. Computer aided optimisation of the thermal management during laser beam melting process // *Physics Procedia.* – 2014. – Vol. 56. – P. 390–399.
25. Jadhav S.D., Dadbakhsh S., Goossens L., Kruth J-P, Humbeeck J.V., Vanmeensel K. Influence of selective laser melting process parameters on texture evolution in pure copper // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2019. – Vol. 270. – P. 47–58.
26. Kaya G., Yıldız F., Korkmaz İ. H., Kaymaz İ., Yetim A.F., Ergüder T.O., Şen Ç. Effects of process parameters on selective laser melting of Ti6Al4V-ELI alloy and parameter optimization via response surface method // *Materials Science and Engineering: A.* – 2023. – Vol. 885. – Article no. 145581.
27. Kuchumov A.G., Nyashin Y.I., Samartsev V.S., Tuktamyshev V.S., Lokhov V.A., Shestakov A.P. Mathematical modelling of shape memory stent placing at endobiliary interventions // *Russian Journal of Biomechanics.* – 2017. – Vol. 21, No. 4. – P. 394–404.
28. Kuntoğlu M., Salur E., Canli E., Aslan A., Gupta M. K., Waqar S., Krolczyk G. M., Xu J. A state of the art on surface morphology of selective laser-melted metallic alloys // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2023. – Vol. 127. – P. 1103–1142.
29. Liu B., Fang G., Lei L., Yan X. Predicting the porosity defects in selective laser melting (SLM) by molten pool geometry // *International Journal of Mechanical Sciences.* – 2022. – Vol. 228, No.15. – Article no. 107478.
30. Loginov Y.N., Koptuyug A., Popov V.V. Jr., Belikov S.V., Mukanova G., Golodnov A.I., Stepanov S.I. Compression deformation and fracture behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V cellular structures // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture.* – 2022. – Vol. 5, No. 1. – P.126–135.
31. Marques B.M., Andrade C.M., Neto D. M., Oliveira M.C., Alves J.L., Menezes L.F. Numerical Analysis of Residual Stresses in Parts Produced by Selective Laser Melting Process // *Procedia Manufacturing.* – 2020. – Vol. 47. – P. 1170–1177.
32. Mishra A. K., Kumar A. Development and validation of a material evaporation assisted thermal model for time-efficient calculation of thermal and solidification parameters during laser powder bed fusion process for Ti6Al4V // *Additive Manufacturing.* – 2023. – Vol. 66. – Article no. 1103453.
33. Mohanty S., Hattel J.H. Numerical model based reliability estimation of selective laser melting process // *Physics Procedia.* – 2014. – Vol. 56. – P. 379–389.
34. Pimenov D.Y., Berti L.F., Pintaude G., Peres G. X., Chaurasia Y., Khanna N., Giasin K. Influence of selective laser melting process parameters on the surface integrity of difficult-to-cut alloys: comprehensive review and future prospects // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2023. – Vol. 127. – P. 1071–1102.
35. Sabuj R., Afshari S. S., Liang. X. Selective laser melting part quality prediction and energy consumption optimization // *Measurement Science and Technology.* – 2023. – Vol.34, No. 7. – Article no. 075902.
36. Sufiiarov V.Sh., Orlov A.V., Borisov E.V., Sokolova V.V., Chukovenkova M.O., Soklakov A.V., Mihaluk D.S., Popovich A.A. Modeling the mechanical properties of lattice structures made by selective laser melting // *Letters on Materials.* – 2020. – Vol. 10, No.2. – P. 123–128.
37. Trusov G.V., Tarasov A.B., Moskovskikh D.O., Rogachev A.S., Mukasyan A.S. High porous cellular materials by spray solution combustion synthesis and spark plasma sintering // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2019. – Vol. 779. – P. 557–565.
38. Vora H.D., Santhanakrishnan S., Harimkar S.P., Boetcher S.K.S., Dahotre N.B. One-dimensional multipulse laser machining of structural alumina: evolution of surface topography // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2013. – Vol. 68. – P. 69–83.
39. Yang D., Xinyu Y., Fengbin Q, Lijie G, Zhengwu L. A model for predicting the temperature field during selective laser melting // *Results in Physics.* – 2019. – Vol. 12. – P. 52–60.
40. Yang Y., Keulen F., Ayas C.A computationally efficient thermal model for selective laser melting // *Additive Manufacturing.* – 2020. – Vol. 31. – Article no. 100955.
41. Zadpoor A.A. Additively manufactured porous metallic biomaterials // *J. Mater. Chem. B.* – 2019. – Vol. 7. – P. 4088–4117.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01284, <https://rscf.ru/project/23-79-01284>

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

# QUALITY ASSURANCE THERMOPHYSICAL ASPECTS OF HIGHLY POROUS IMPLANTS WITH CELLULAR STRUCTURE OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING

P.N. Kilina, L.D. Sirotenko, M.S. Kozlov, A.A. Drozdov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

---

## ARTICLE INFO

Received: 15 September 2023  
Approved: 03 December 2023  
Accepted for publication: 04 December 2023

---

### Key words:

metal powder, selective laser melting, technological parameters, geometrical characteristics, modeling

---

## ABSTRACT

Selective laser melting (SLM) is an additive manufacturing process that involves the layer-by-layer construction of a three-dimensional object by local melting of a powder layer based on a prepared CAD model. This technology makes it possible to manufacture products of complex configuration, including internal channels of complex geometry. Such products include personalized highly porous implants, which are subject to very strict requirements in the field of elastic and strength properties, ensuring their compliance with the properties of the biological objects being replaced.

The quality of highly porous cellular products formed by the selective laser melting method based on metal powder compositions is determined by a significant number of factors, the combined influence of which is difficult to control. At the same time, the structure and mechanical properties of highly porous cellular materials (HPCM) obtained by laser synthesis are largely determined by the melt bath shape stability, which depends on the ability of local heat dissipation, which in turn is determined by the fused product geometry. Under these conditions, simulation of thermal processes, including the prediction of the part fusion temperature modes, is of paramount importance.

This study focuses on the numerical analysis of the powder layer thermophysical parameters during the laser melting process, which is difficult to analyze by direct measurements, and a computational model based on COMSOL Multiphysics has been created to predict the melt bath temperature field. The numerical model made it possible to quantify the influence of the selective laser melting process parameters (laser power and scanning speed) in combination with the choice of material and topology of the part on the temperature fields formation to determine the process technological parameter and the features of creating geometry for additive manufacturing, which make it possible to obtain products of proper quality. Cellular implants based on Ti6Al4V powder have been grown by selective laser melting.

---

© PNRPU