

## МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2024

**А. В. Балякин** старший преподаватель кафедры технологий производства двигателей;  
Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва;  
[balaykinav@ssau.ru](mailto:balaykinav@ssau.ru)

Представлена модель для анализа процесса взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции в процессе прямого лазерного выращивания крупногабаритных камер сгорания газотурбинных двигателей. Металлопорошковая композиция подаётся в зону плавления коаксиально с лазерным излучением. Задача состоит в том, чтобы полностью расплавить порошок лазерным излучением до его попадания в ванну расплава на платформе построения. Лазерное излучение поглощается по мере прохождения через газопорошковую струю, его энергия также используется для расплавления платформы построения или предыдущего слоя. Таким образом, для определения параметров технологического режима, обеспечивающего расплавление порошинок, необходимо определить границы параметров, при которых происходит полное расплавление каждой частицы металлопорошковой композиции в газопорошковой струе. Для моделирования теплообмена внутри частицы использовался закон поглощения лазерного излучения Бера – Ламберта с применением метода сосредоточенных параметров. Необходимая энергия для расплавления порошкового материала определялась через энтальпию. Полученное одномерное дифференциальное уравнение приращения энтальпии решено численно методом Эйлера. С помощью разработанной модели определено расстояние от точки начала взаимодействия лазерного луча с металлопорошковой композицией до зоны её полного расплавления, и исследовано влияние скорости газопорошковой струи, мощности лазерного излучения, насыпной плотности металлопорошковой композиции и среднего радиуса порошинок на расстояние до зоны полного расплавления.

*Аддитивное производство; прямое лазерное выращивание; жаропрочный хромоникелевый сплав; закон Бера – Ламберта; энтальпия плавления; теплообмен внутри частиц порошка*

---

**Цитирование:** Балякин А.В. Модель взаимодействия лазерного излучения и металлопорошковой композиции в процессе прямого лазерного выращивания заготовок для деталей газотурбинных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 4. С. 99-111. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-99-111

### Введение

Аддитивное производство (АП) представляет собой современный метод, позволяющий быстро изготавливать сложнопрофильные заготовки, близкие к окончательной форме деталей [1 – 4]. Преимущества изготовления деталей с помощью АП включают: возможность получения геометрически сложных структур; уменьшение количества деталей за счёт снижения необходимости сборки нескольких компонентов; минимизацию последующей механической обработки и отходов материалов. По этим причинам АП получает большее распространение в производстве компонентов для автомобильной, аэрокосмической, медицинской, энергетической промышленности [5 – 6]. Однако, несмотря на указанные преимущества, процесс связан с появлением ряда дефектов, таких как трещины, непролавы, поры, присутствие нерасплавленных частиц порошка в синтезированном материале [7 – 8]. Качество получаемых изделий зависит от многих тех-

нологических параметров процесса, правильный выбор которых является основополагающим фактором для получения необходимых свойств изделия.

Процессы АП из металлического порошкового материала включают в себя широкий спектр методов, в том числе электронно-лучевое сплавление (ЭЛП), прямое лазерное выращивание (ПЛВ) и селективное лазерное плавление (СЛП). Эти методы АП основаны на расплавлении материала, который может представлять собой порошок или проволоку, с использованием интенсивного сфокусированного источника тепла. В этих процессах источники тепла, такие как электронный луч или лазерное излучение, перемещаются по заданной траектории в соответствии с геометрией изготавливаемой детали [9; 10]. Для создания крупных заготовок со сложной геометрией из жаропрочных никелевых сплавов используют метод прямого лазерного выращивания. Этот метод становится всё более популярным в производстве изделий из металлопорошковых композиций (МПК), включая алюминиевые, титановые, жаропрочные сплавы и нержавеющей сталь. Особенно он востребован в производстве газотурбинных двигателей (ГТД), где жаропрочные стали и сплавы используются для создания ключевых элементов двигателей, таких как камеры сгорания, корпуса, кожухи и др. В процессе ПЛВ наиболее предпочтительным является полное расплавление МПК до её попадания на платформу построения или предыдущего слоя. Более того, небольшой перегрев МПК даже лучше. Однако, для определения этого места, а значит, и расстояния между соплом и ванной расплава требуется разработка математической модели определения расстояния от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК до зоны её полного расплавления.

Неполное расплавление МПК может привести к образованию нежелательных дефектов в изготавливаемой заготовке детали, таких как поры, микротрещины или недостаточной металлургической связи между соседними слоями [11; 12]. Это приводит к снижению механических свойств изготавливаемой детали. Для прогнозирования температурного поля и его влияния в процессе АП были проведены различные исследования [13; 14]. Моделирование теплового поля в процессах АП с расплавлением порошкового материала требует больших вычислительных затрат [15; 16]. Для облегчения практического моделирования процессов АП в различных исследованиях изучались различные методы сокращения времени вычислений. Некоторые исследователи использовали метод агломерации, при котором несколько наплавленных слоев объединяются в один расчётный слой [17 – 19]. Другим методом сокращения времени вычислений является метод мгновенного нагрева, при котором к каждому слою прикладывается эквивалентный однородный источник тепла вместо того, чтобы моделировать точное взаимодействие источника тепла с материалом [20 – 22]. Хотя методы агломерации и мгновенного нагрева позволяют снизить вычислительные затраты, эти методы не могут отразить тепловое поведение МПК с высоким пространственным и временным разрешением протекание процесса АП.

В настоящей работе предлагается модель для исследования взаимодействия лазерного излучения и МПК. Модель позволяет определить эффективное расстояние фокусировки лазерного луча и газопорошковой струи и объёмный расход МПК до зоны её полного расплавления. По мере того, как ванна расплава застывает на платформе построения, образуются дорожки или валики. Ширина этих валиков напрямую связана с точностью выращивания заготовки в процессе ПЛВ. Предполагая, что поперечное сечение валика представляет собой полукруг, и зная скорость выращивания, можно определить ширину валика, а значит, и спрогнозировать точность выращиваемой заготовки.

МПК подается коаксиально в зону лазерного излучения, по мере продвижения частиц МПК происходит поглощение лазерной энергии. Порошинки нагреваются, полностью расплавляются, и далее расплав продолжает нагреваться выше температуры плавления. С другой стороны, энергия лазерного луча, проходящего через газопорошковую

струю, ослабевает. Некоторая часть энергии лазерного излучения проходит через газопорошковую струю и расплавляет поверхность подложки, образуя ванну расплава. Порошинки вовлекаются в ванну расплава и по мере удаления лазерного излучения ванна расплава затвердевает, образуя новый слой. Принципиальная схема процесса показана на рис. 1. При этом моделируется две части взаимодействия МПК и лазерного излучения: распространение лазерного излучения в газопорошковой струе и нагрев МПК. Допущения, используемые при моделировании: все лазерные лучи параллельные, т.е. лазерное излучение имеет постоянное сечение, и интенсивность лазерного излучения постоянна в пределах сечения. Кроме того, предполагается, что вся газопорошковая смесь поступает в область наплавки в пределах сечения лазерного излучения.

### Распространение лазерного излучения

Рассмотрим тепловой поток от лазерного излучения, распространяющийся через столб МПК в газопорошковой струе, как показано на рис. 1. Построим диск толщиной  $dx$ . Изменение теплового потока лазерного излучения может быть рассчитано с помощью баланса энергии лазерного излучения следующим образом:

$$Q_{\text{лазер}}(x + dx) = Q_{\text{лазер}}(x) - N dx A_p k_l Q_{\text{лазер}}(x), \quad (1)$$

где  $N$  – насыпная плотность МПК;  $A_p$  – проекционная площадь сферичного порошка;  $k_l$  – коэффициент поглощения лазерного излучения материала МПК;  $Q_{\text{лазер}}(x)$  – тепловой поток лазерного излучения в точке  $x$ , т.е. точке, положение которой соответствует расстоянию до неё от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК.

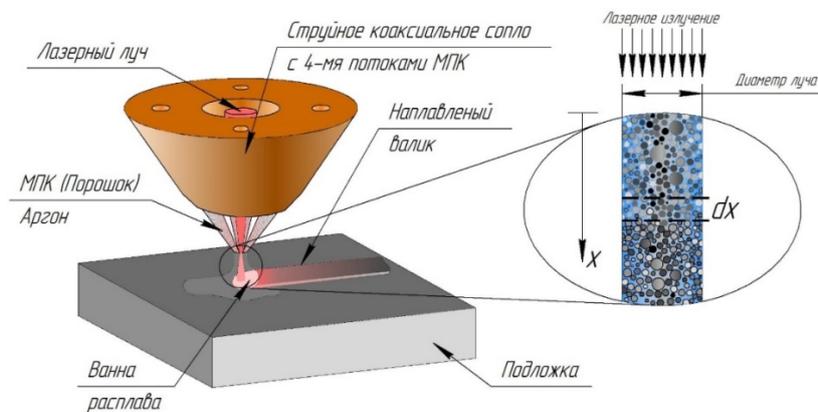


Рис. 1. Схема взаимодействия лазерного излучения с металлопорошковой композицией

Из (1) для бесконечно малых значений  $dx$  можно получить соответствующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dQ_{\text{лазер}}}{dx} = -NA_p k_l Q_{\text{лазер}}(x), \quad (2)$$

решением которого является зависимость, известная как закон Бера – Ламберта:

$$Q_{\text{лазер}}(x) = Q_{\text{лазер}}(0) \text{Exp}[-NA_p k_l x]. \quad (3)$$

### Теплообмен

Рассмотрим теплообмен в МПК при действии на него лазерного излучения. Как отмечают авторы статьи [23] число Био для порошкового материала  $Bi = h L_c / k$ , и обычно очень мало (гораздо меньше 0,1). Здесь  $h$  – коэффициент теплопередачи от порошка к его окружению;  $L_c$  – характерная длина ( $r/3$  для сферы радиусом  $r$ );  $k$  – теплопроводность материала порошка. Если число Био меньше 0,1, то изменения температуры внутри порошинок очень малы. Следовательно, теплообмен можно смоделировать методом сосредоточенных параметров [24]:

$$\rho V v_p \frac{dH}{dx} = k_l \int_A Q_{\text{лазер}}(x) \vec{i} \cdot \vec{n} dA - hA(T - T_{3z}) - \varepsilon \sigma A(T^4 - T_{\text{окр.}}^4), \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность материала МПК;  $C_p$  – теплоёмкость,  $V$  – объёмный расход МПК,  $v_p$  – проекция скорости движения МПК в направлении  $x$ ;  $H$  – энтальпия;  $A$  – площадь проекции поверхности порошинки в направлении  $x$ ;  $\vec{i}$  – единичный вектор в направлении  $x$ ;  $\vec{n}$  – внешняя нормаль к поверхности порошка;  $T$  – температура МПК;  $T_{3z}$  – температура защитного газа;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $T_{\text{окр.}}$  – температура окружающей среды.

Уравнение (4) представляет собой энергетический баланс порошка при его падении на подложку. Для сферического порошка:  $V = 4/3 \pi r^3$  и  $A = 4\pi r^2$ , где  $r$  – радиус частицы порошка (мкм). Заметим, что интеграл от теплового потока лазера приобретает вид  $k_l \pi r^2 Q_{\text{лазер}}$ . Тогда уравнение (4) можно представить в виде:

$$\rho v_p \frac{r_{cp}}{3} \frac{dH}{dx} = \frac{1}{4} k_l \cdot Q_{\text{лазер}}(x) - h(T - T_{3z}) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{окр.}}^4), \quad (5)$$

где  $r_{cp}$  – средний радиус порошинок МПК.

В уравнении (5), называемом формулой энтальпии, имеются две зависимые переменные – энтальпия  $H$  и температура  $T$ . Оно очень удобно для моделирования процесса плавления порошка. Однако его необходимо дополнить уравнением состояния, связывающим энтальпию и температуру и наоборот:

$$H - H_3 = \begin{cases} C_{мс} (T - T_3), & T < T_{нл}, \\ \lambda_{нл} + C_{мс} (T_{нл} - T_3), & T = T_{нл}, \\ C_{жс} (T - T_{нл}) + C_{мс} (T_{нл} - T_3) + \lambda_{нл}, & T > T_{нл}, \end{cases} \quad (6)$$

или

$$T = \begin{cases} \frac{H - H_3}{C_{мс}} + T_3, & H < H_{нл}, \\ T_m, & H_{нл} < H < H_{нл} + \lambda_{нл}, \\ \frac{H - H_{нл} - \lambda_{нл}}{C_{жс}} + T_{нл}, & H > H_{нл} + \lambda_{нл}, \end{cases} \quad (7)$$

где

$$H_{nl} = C_{m6} (T_{nl} - T_3) + H_3. \quad (8)$$

Здесь  $H_3$  – эталонная энтальпия;  $H_{nl}$  – энтальпия плавления;  $T_3$  – эталонная температура;  $T_{nl}$  – температура плавления;  $C_{m6}$  – теплоёмкость твёрдого тела;  $C_{ж}$  – теплоёмкость жидкого расплава;  $\lambda_{nl}$  – удельная теплота плавления.

В итоге уравнение (5) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка, с начальным условием на поверхности порошинки:

$$T = \frac{T_i at}{x^2} = 0, \quad (9)$$

где  $at$  – коэффициент температуропроводности. Тогда начальная энтальпия может быть найдена с помощью уравнения (6).

### Численные методы

Математическая модель, описываемая уравнениями (3), (5) – (9), может быть решена численно с использованием метода Эйлера. Конечно-разностная форма уравнения (5) имеет вид:

$$H_n = H_{n-1} + \frac{3\Delta x}{\rho C_p v_p r_{cp}} \left( \frac{k_l}{4} Q_{лазер}(x_{n-1}) - h(T_{n-1} - T_{3z}) - \varepsilon \sigma (T_{n-1}^4 - T_{окр}^4) \right). \quad (10)$$

Подстрочные индексы « $n-1$ » и « $n$ » обозначают соответственно текущий и следующий временные шаги. Уравнения (6) – (8) представляют собой простые алгебраические функции, которые могут быть реализованы в виде функциональных подпрограмм. Численный и аналитический методы были успешно протестированы и показали хорошую сходимость. При выполнении расчётов в данной работе величина  $\Delta x = x_n - x_{n-1}$  составила  $10^{-7}$  м.

### Результаты и обсуждение

В настоящей работе пучок лазерного излучения имел гауссово распределение, длину волны 1070 нм, фокус коллимирующей линзы 200 мм, фокус коллиматора 100 мм. В качестве МПК использовался жаропрочный сплав на никелевой основе ЭП648 (ХН50ВМТЮБ), свойства которого приведены в табл. 1. Технологические параметры процесса ПЛВ приведены в табл. 2. Сплав ЭП648 широко применяется в отечественном двигателестроении для изготовления деталей камер сгорания и корпусов ГТД.

Преимущественный диапазон рассеивания диаметров МПК в пределах  $D_{II} = 73 \dots 200$  мкм, радиус основной фракции МПК составляет 99 мкм, для расчётов принимаем средний радиус  $r_{cp, np.} = 100$  мкм, насыпная плотность МПК составляет  $N = 4,9$  г/см<sup>3</sup>, скорость движения газопорошковой струи  $V_{cmp} = 3,5$  м/с. Мощность лазера составляет 2000 Вт.

Таблица 1. Свойства металлопорошковой композиции жаропрочного сплава ЭП648

Свойство	Символ	Значение
Температура плавления, К	$T_{пл}$	1673,15
Температура кипения, К	$T_{кип}$	1973,15
Плотность материала МПК, кг/м <sup>3</sup>	$\rho$	8747,9
Теплопроводность 25/500/900 °С, Вт/м К	$k$	22/46/60
Теплоёмкость твёрдого тела 100/500/900 °С, Дж/кг К	$C_{тв}$	105/125/140
Теплоёмкость жидкого расплава, Дж/кг К	$C_{ж}$	302,08
Коэффициент поглощения лазерного излучения	$k_{л}$	0,1
Удельная теплота плавления, кДж/кг	$\lambda_{пл}$	303
Эталонная температура, К	$T_э$	200
Эталонная энтальпия, Дж/кг	$H_э$	0
Постоянная Стефана – Больцмана, Вт/м <sup>2</sup> К <sup>4</sup>	$\sigma$	$5,76 \cdot 10^{-8}$

Таблица 2. Параметры процесса выращивания

Параметр	Символ	Значение
Тепловой поток лазера, Вт/м <sup>2</sup>	$Q_{лазер}$	346,6
Насыпная плотность МПК, гр/см <sup>3</sup>	$N$	4,9
Скорость газопорошковой струи МПК, м/с	$V_{стр}$	3,5...5
Средний принятый радиус порошинок в МПК, мм	$r_{ср.пр.}$	0,1
Расстояние перемещения МПК, мм	$S$	11
Радиус струи МПК, мм	$R_{стр}$	1,25
Начальная температура, К	$T_{нач}$	300
Температура защитного газа, К	$T_{зз}$	300
Температура окружающей среды, К	$T_{окр}$	300
Коэффициент теплопередачи, Вт/м <sup>2</sup> К	$h$	50

### Зависимость энтальпии и температуры от расстояния

На рис. 2 показаны зависимости температуры и энтальпии от параметра  $x$  ( $x$  – расстояние от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК до зоны её полного расплавления).

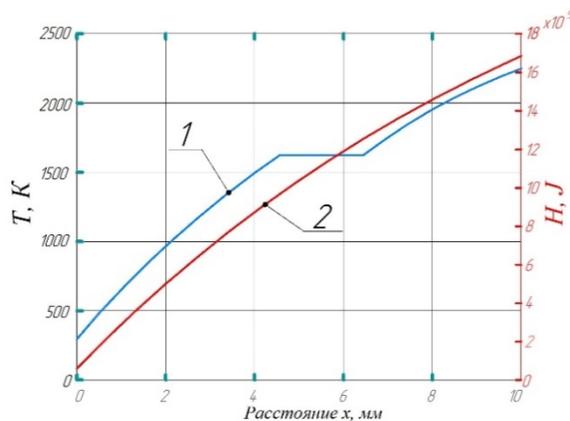


Рис. 2. Зависимости температуры (1) и энтальпии МПК (2) от величины параметра  $x$  при мощности лазера 2000 Вт,  $N = 4,9$  гр/см<sup>3</sup>,  $r_{ср.пр.} = 0,1$  мм и  $V_{стр} = 3,5$  м/с

Как и ожидалось, энтальпия порошка растёт с увеличением параметра  $x$ . Кривая имеет нелинейный характер, что свидетельствует о наличии конвекции лазерного излучения. Из температурной кривой хорошо виден характерный процесс плавления. Порошок начинает расплавляться при  $x = 3,5$  мм и полностью расплавляется при  $x = 4,51$  мм. После этой точки порошок, как и следовало ожидать, продолжает поглощать лазерную энергию, повышая свою температуру.

Для определения технологического режима, обеспечивающего возможность расплавления частиц порошка и определения диапазона параметров технологического режима процесса ПЛВ, при котором происходит полное расплавление каждой частицы МПК в газопорошковой струе с образованием ванны расплава на поверхности заготовки, можно воспользоваться представленной моделью.

### Влияние скорости подачи порошка

Исследовано влияния скорости газопорошковой струи на расстояние до зоны расплавления МПК при следующих параметрах процесса: мощность лазера 2000 Вт, радиус порошка 100 мкм, насыпная плотность МПК 4,9 гр/см<sup>3</sup>. В табл. 3 приведены результаты зависимости расстояния до зоны расплавления МПК и объёмного расхода МПК от скорости газопорошковой струи.

Таблица 3. Расстояние до зоны расплавления металлопорошковой композиции, объёмный расход и ширина валика в зависимости от скорости газопорошковой струи

Скорость газопорошковой струи, м/с	Расстояние до зоны расплавления, мм	Объёмный расход МПК, мм <sup>3</sup> /с	Ширина валика, мм
3,5	2,23	6,25	2,51
4	4,49	12,49	2,63
4,5	7,11	18,74	2,69
5	10,10	24,97	2,71

Из данных табл. 3 видно, что с увеличением скорости газопорошковой струи увеличивается расстояние до зоны его расплавления. Это вполне ожидаемый эффект. Другой переменной является объёмный расход расплавляемой МПК. При попадании МПК в ванну расплава на платформе построения происходит его расплавление. При движении лазерного луча по платформе построения образуется наплавленный валик. Этот валик является базовым параметром процесса ПЛВ. Точность процесса ПЛВ напрямую зависит от объёмного расхода МПК, который, в свою очередь, зависит от скорости наплавления и формы поперечного сечения валика. Площадь поперечного сечения валика представляет собой полукруг, его ширина составляет:

$$W = 2 \sqrt{\frac{V_{\text{расход порошка}} \cdot \pi}{V_{\text{наплавки}}}} \quad (11)$$

Ширина валика напрямую связана с точностью изготавливаемой заготовки. Из табл. 3 видно, что ширина валика увеличивается с ростом скорости газопорошковой струи. Таким образом, точность уменьшается с увеличением скорости движения газопорошковой струи.

### Влияние мощности лазера

Исследовано влияние мощности лазера на расстояние до зоны расплавления порошинок при следующих параметрах процесса: радиус порошинок МПК 100 мкм, скорость газопорошковой струи 3,5 м/с, насыпная плотность МПК 4,9 гр/см<sup>3</sup>. В табл. 4 приведены зависимости расстояния до зоны расплавления МПК от мощности лазера.

Таблица 4. Расстояние до зоны расплавления металлопорошковой композиции, объёмный расход и ширина валика в зависимости от мощности лазера

Мощность лазера, Вт	Расстояние до зоны расплавления, мм	Объёмный расход МПК, мм <sup>3</sup> /с	Ширина валика, мм
1600	7,12	12,5	2,5
1800	4,81	12,5	2,5
2000	4,49	12,5	2,5

С увеличением мощности лазера, как следует из анализа данных табл. 4, расстояние до зоны расплавления уменьшается. Вместе с тем объёмный расход и ширина валика остаются постоянными, т.е. не зависят от мощности лазера.

### **Влияние насыпной плотности МПК**

Параметры процесса: радиус порошинок МПК 100 мкм, скорость газопорошковой струи 3,5 м/с, мощность лазера 2000 Вт. В табл. 5 приведены результаты исследования влияния насыпной плотности МПК на расстояние до зоны расплавления МПК, объёмный расход и ширину валика.

Таблица 5. Расстояние до зоны расплавления металлопорошковой композиции, объёмный расход и ширина валика в зависимости от насыпной плотности металлопорошковой композиции

Насыпная плотность МПК, гр/см <sup>3</sup>	Расстояние до зоны расплавления, мм	Объёмный расход МПК, мм <sup>3</sup> /с	Ширина валика, мм
3,0	4,22	5,01	2,3
4,9	4,49	12,5	2,5
6,0	4,80	19,99	2,7

Из приведённых данных видно, что с ростом насыпной плотности МПК увеличиваются как расстояние до зоны расплавления МПК, так и объёмный расход и ширина валика.

### **Влияние радиуса частиц МПК**

Рассмотрено влияние радиуса порошинок МПК. Заданы следующие параметры процесса: скорость газопорошковой струи 3,5 м/с, мощность лазера 2000 Вт, насыпная плотность МПК 4,9 гр/см<sup>3</sup>. В табл. 6 приведены зависимости расстояния до зоны расплавления МПК, объёмного расхода и ширины валика от радиуса частиц МПК.

Таблица 6. Расстояние до зоны расплавления металлопорошковой композиции, объёмный расход и ширина валика в зависимости от радиуса частиц металлопорошковой композиции

Радиус частиц МПК, мкм	Расстояние до зоны расплавления, мм	Объёмный расход МПК, мм <sup>3</sup> /с	Ширина валика, мм
50	2,78	3,7	2,1
75	4,49	12,5	2,37
100	7,07	29,6	2,51

Данные, представленные в табл. 6, позволяют оценить влияние среднего радиуса частиц МПК на расстояние до зоны расплавления, а также объёмный расход и ширину валика. Видно, что с ростом радиуса частиц МПК наблюдается рост всех характеристик, указанных в табл. 6.

По результатам численного эксперимента, базирующегося на разработанной математической модели, установлены диапазоны рациональных значений технологических параметров процесса ПЛВ для жаропрочного сплава на никелевой основе ЭП648, представленные в табл. 7.

Таблица 7. Диапазоны рациональных значений технологических параметров процесса прямого лазерного выращивания

Мощность, Вт	1800...2000
Скорость, мм/с	23,2...25,8
Расход порошка, г/мин	23...33
Технологическая пауза между слоями, с	30...50

### Заключение

В настоящей статье представлена математическая модель процесса взаимодействия лазерного излучения и МПК в процессе коаксиальной лазерной наплавки. Для моделирования теплообмена внутри частицы использовался закон поглощения лазерного излучения Бера – Ламберта с применением метода сосредоточенных параметров. Полученное дифференциальное уравнение первого порядка приращения энтальпии частицы решалось методом Эйлера. Необходимая энергия лазерного излучения определялась через накопленную частицами порошка энтальпию до момента их полного расплавления. Представлена зависимость энтальпии и температуры от точки начала взаимодействия лазерного луча с МПК до зоны ее полного расплавления. На температурной кривой выявлено расстояние от точки начала взаимодействия лазерного излучения с МПК до зоны, в которой происходит полное расплавление МПК,  $x = 6,5$  мм. Исследовано влияние скорости движения газопорошковой струи, мощности лазера, насыпной плотности МПК и радиуса частиц МПК на расстояние до зоны расплавления МПК, объёмный расход и ширину валика. Установлено, что увеличение скорости газопорошковой струи от 3,5 до 5 м/с приводит к увеличению ширины получаемого валика от 2,51 до 2,71 мм; увеличение мощности лазера от 1600 до 2000 Вт приводит к уменьшению расстояния, необходимого для расплавления порошинок МПК, от 7,12 до 4,81 мм. Полученные результаты полезны для определения условий работы в процессе создания технологического процесса изготовления заготовок ГТД путём прямого лазерного выращивания.

Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSS-2024-0018).

### Библиографический список

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3Dprinting, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. New York: Springer, 2015. 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3
2. Алексеев В.В., Бобров А.Н., Калугин К.С. Исследование комплексных прочностных характеристик моделей газовых турбин, изготовленных аддитивными методами // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 2. С. 43-50.
3. Смелов В.Г., Кокарева В.В., Чупин П.В., Дмитриев Д.Н. Проектирование технологического процесса селективного лазерного сплавления жаропрочного сплава для изготовления горелочного устройства // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30, № 1. С. 131-141. DOI: 10.34759/vst-2023-1-131-141
4. Балякин А.В., Олейник М.А., Злобин Е.П., Скуратов Д.Л. Обзор гибридного аддитивного производства металлических деталей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 2. С. 48-64. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-48-64
5. Смуров И.Ю., Конов С.Г., Котобан Д.В. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность // Новости материаловедения. Наука и техника. 2015. № 2 (14). С. 11-22.

6. Кравчук А.Д., Маряхин А.Д., Потапов А.А., Панченко В.Я., Комлев В.С., Новиков М.М., Охлопков В.А., Дувидзон В.Г., Латышев Я.А., Челушкин Д.М., Чобулов С.А., Александров А.П., Шкарубо А.Н. Применение аддитивных технологий в нейрохирургии // *Материалы V Международной конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее»* (22 марта 2019 г., Москва). М.: ВИАМ, 2019. С. 253-274.

7. Куликов М.Ю., Ларионов М.А., Гусев Д.В., Шевчук Е.О. Улучшение шероховатости поверхностей деталей из полимерных материалов, полученных с помощью аддитивных технологий // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2021. № 7 (104). С. 12-18. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-7-12-18

8. Белов П.С. Влияние параметров постобработки на шероховатость поверхности изделий, получаемых методами аддитивных технологий // *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2019. № 1 (48). С. 57-61.

9. Земляков Е.В., Туоминен Я., Поздеева Е.Ю., Туричин Г.А., Комарова Е.А. Формирование поверхностных слоёв при лазерной наплавке с использованием мощных волоконных лазеров // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2013. № 1 (166). С. 231-236.

10. Ольшанская Т.В., Саломатова Е.С. Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2016. Т. 18, № 4. С. 169-187. DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.13

11. Балякин А.В. Процесс прямого лазерного выращивания жаропрочного сплава: влияние мощности и термической обработки на микроструктуру и механические характеристики // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023. № 4 (46). С. 64-78. DOI 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-64-78

12. Максимов П.В., Сметанников О.Ю. Численное моделирование остаточных напряжений в авиационных деталях, произведённых методами аддитивного послойного синтеза // *Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСПИС'2019)* (24-31 мая 2019 г., Алушта). М.: МАИ, 2019. С. 299-301.

13. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process // *Optics and Lasers in Engineering*. 2004. V. 41, Iss. 6. P. 849-867. DOI: 10.1016/S0143-8166(03)00063-0

14. Vastola G., Zhang G., Pei Q.X., Zhang Y.-W. Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling // *Additive Manufacturing*. 2016. V. 12, Part B. P. 231-239. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2016.05.010

15. Cao X., Ayalew B. Control-oriented MIMO modeling of laser-aided powder deposition processes // *Proceedings of the American Control Conference* (July, 01-03, 2015, Chicago, IL, USA). 2015. P. 3637-3642. DOI: 10.1109/ACC.2015.7171895

16. Hoadley A.F.A., Rappaz M. A thermal model of laser cladding by powder injection // *Metallurgical Transactions B*. 1992. V. 23. P. 631-642. DOI: 10.1007/BF02649723

17. Ganeriwala R.K., Strantz M., King W.E., Clausen B., Phan T.Q., Levine L.E., Brown D.W., Hodge N.E. Evaluation of a thermomechanical model for prediction of residual stress during laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V // *Additive Manufacturing*. 2019. V. 27. P. 489-502. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.034

18. Hodge N.E., Ferencz R.M., Vignes R.M. Experimental comparison of residual stresses for a thermomechanical model for the simulation of selective laser melting // *Additive Manufacturing*. 2016. V. 12, Part B. P. 159-168. DOI: 10.1016/j.addma.2016.05.011

19. Lu X., Lin X., Chiumenti M., Cervera M., Hu Y., Ji X., Ma L., Yang H., Huang W. Residual stress and distortion of rectangular and S-shaped Ti-6Al-4V parts by directed energy

deposition: Modelling and experimental calibration // Additive Manufacturing. 2019. V. 26. P. 166-179. DOI: 10.1016/j.addma.2019.02.001

20. Костенков С.Н., Харанжевский Е.В., Кривилев М.Д. Метод определения характеристик взаимодействия лазерного излучения с нанокompозитными порошковыми материалами // Физика металлов и металловедение. 2012. Т. 113, № 1. С. 98-103.

21. Сычев А.Е., Вадченко С.Г., Боярченко О.Д., Vrel D., Сачкова Н.В. Особенности взаимодействия интерметаллидов на основе Ti-Al, Ni-Al с металлическими подложками Ti и Ni в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Перспективные материалы. 2012. № 2. С. 15-20.

22. Qi H., Mazumder J., Ki H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct metal deposition // Journal of Applied Physics. 2006. V. 100, Iss. 2. DOI: 10.1063/1.2209807

23. Liu Ch.-Y., Lin J. Thermal processes of a powder particle in coaxial laser cladding // Optics and Laser Technology. 2003. V. 35, Iss. 2. P. 81-86. DOI: 10.1016/S0030-3992(02)00145-7

24. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. 1080 p.

## MODEL OF INTERACTION BETWEEN LASER RADIATION AND METAL POWDER COMPOSITION DURING DIRECT LASER GROWTH

© 2024

**A. V. Balyakin** Senior Lecturer of the Department of Engine Production Technology;  
Samara National Research University, Samara, Russian Federation;  
[balaykinav@ssau.ru](mailto:balaykinav@ssau.ru)

This paper presents a model for analyzing the interaction of laser radiation and a metal-powder composition in the process of direct laser growing of large-sized combustion chambers of gas turbine engines. The metal-powder composition is fed into the melting zone coaxially with laser radiation; the task is to completely melt the powder with laser radiation before it enters the melt bath on the construction platform. The laser radiation is absorbed as it passes through the gas-powder jet, and its energy is also used to melt the construction platform or the previous layer. Thus, in order to determine the parameters of the operating conditions that provide the possibility of melting powder particles, it is necessary to determine the boundaries of the parameters at which each particle of the metal-powder composition completely melts in a gas-powder jet. To simulate heat transfer inside a particle, the Beer – Lambert laser radiation absorption law was used using the lumped parameter approach. The required energy for melting the powder material was determined through enthalpy. The resulting one-dimensional differential equation of enthalpy increment is solved numerically by the Euler method. Using this model, the distance from the point of origin of the interaction of the laser beam with a metal-powder composition to the zone of its complete melting was determined and the effect of the velocity of the gas-powder jet, the power of laser radiation, the bulk density of the metal-powder composition and the average radius of the powder particles on the distance to the zone of complete melting was studied.

*Additive manufacturing; direct laser growth; heat-resistant chromium-nickel alloy; Beer – Lambert law; enthalpy of fusion; heat transfer within powder*

---

**Citation:** Balyakin A.V. Model of interaction between laser radiation and metal powder composition during direct laser growth. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 4. P. 99-111.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-4-99-111

## References

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive manufacturing technologies: 3Dprinting, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition. New York: Springer, 2015. 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3
2. Alekseev V.V., Bobrov A.N., Kalugin K.S. Study of complex strength characteristics of gas turbine models fabricated by additive methods. *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta*. 2019. V. 26, no. 2. P. 43-50. (In Russ.)
3. Smelov V.G., Kokareva V.V., Chupin P.V., Dmitriev D.N. Technological process design for selective laser fusion of a heat-resistant alloy for the burner device manufacturing. *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta*. 2023. V. 30, no. 1. P. 131-141. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2023-1-131-141
4. Balyakin A.V., Oleynik M.A., Zlobin E.P., Skuratov D.L. A review of hybrid additive manufacturing of metal parts. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 2. P. 48-64. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-48-64
5. Smurov I.Yu., Konov S.G., Kotoban D.V. On the implementation of additive technologies and manufacturing into the Russian industry. *Novosti Materialovedeniya. Nauka i Tekhnika*. 2015. No. 2 (14). P. 11-22. (In Russ.)
6. Kravchuk A.D., Maryakhin A.D., Potapov A.A., Panchenko V.Ya., Komlev V.S., Novikov M.M., Okhlopkov V.A., Duvidzon V.G., Latyshev Ya.A., Chelushkin D.M., Chobulov S.A., Aleksandrov A.P., Shkarubo A.N. Primenenie additivnykh tekhnologiy v neyrokhirurgii. *Materialy V Mezhdunarodnoy Konferentsii «Additivnye Tekhnologii: Nastoyashchee i Budushchee» (March, 22, 2019, Moscow)*. Moscow: VIAM Publ., 2019. P. 253-274. (In Russ.)
7. Larionov M.A., Gusev D.V., Shevchuk E.O. Surface roughness improvement of parts made of polymeric materials obtained by means of additive technologies. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2021. No. 7 (104). P. 12-18. (In Russ.). DOI: 10.30987/1999-8775-2021-7-12-18
8. Belov P.S. Influence of post-processing parameters on the surface roughness of products obtained by additive technologies. *Vestnik MSTU «Stankin»*. 2019. No. 1 (48). P. 57-61. (In Russ.)
9. Zemlyakov E.V., Tuominen J., Pozdeeva E.Yu., Turichin G.A., Komarova E.A. Formation of surface layers during laser cladding using a powerful fiber laser. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*. 2013. No. 1 (166). P. 231-236. (In Russ.)
10. Olshanskaya T. V., Salomatova E. S. Review of modern methods of management of the electron beam when the electron-beam welding. *Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science*. 2016. V. 18, no. 4. P. 169-187. (In Russ.). DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.13
11. Balyakin A.V. Process of direct laser growth of heat-resistant alloy: influence of power and heat treatment on microstructure and mechanical characteristics. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023. No. 4 (46). P. 64-78. (In Russ.). DOI: 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-64-78
12. Maksimov P.V., Smetannikov O.Yu. Chislennoe modelirovanie ostatochnykh napryazheniy v aviatsionnykh detalyakh, proizvedennykh metodami additivnogo posloynnogo sinteza. *Proceedings of the XXI International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (CMMASS'2019) (May, 24-31, 2019, Alushta, Crimea)*. Moscow: MAI Publ., 2019. P. 299-301. (In Russ.)
13. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process. *Optics and Lasers in Engineering*. 2004. V. 41, Iss. 6. P. 849-867. DOI: 10.1016/S0143-8166(03)00063-0

14. Vastola G., Zhang G., Pei Q.X., Zhang Y.-W. Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling. *Additive Manufacturing*. 2016. V. 12, Part B. P. 231-239. DOI: 10.1016/J.ADDMA.2016.05.010
15. Cao X., Ayalew B. Control-oriented MIMO modeling of laser-aided powder deposition processes. *Proceedings of the American Control Conference (July, 01-03, 2015, Chicago, IL, USA)*. 2015. P. 3637-3642. DOI: 10.1109/ACC.2015.7171895
16. Hoadley A.F.A., Rappaz M. A thermal model of laser cladding by powder injection. *Metallurgical Transactions B*. 1992. V. 23. P. 631-642. DOI: 10.1007/BF02649723
17. Ganeriwala R.K., Strantza M., King W.E., Clausen B., Phan T.Q., Levine L.E., Brown D.W., Hodge N.E. Evaluation of a thermomechanical model for prediction of residual stress during laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*. 2019. V. 27. P. 489-502. DOI: 10.1016/j.addma.2019.03.034
18. Hodge N.E., Ferencz R.M., Vignes RM. Experimental comparison of residual stresses for a thermomechanical model for the simulation of selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2016. V. 12, Part B. P. 159-168. DOI: 10.1016/j.addma.2016.05.011
19. Lu X., Lin X., Chiumenti M., Cervera M., Hu Y., Ji X., Ma L., Yang H., Huang W. Residual stress and distortion of rectangular and S-shaped Ti-6Al-4V parts by directed energy deposition: Modelling and experimental calibration. *Additive Manufacturing*. 2019. V. 26. P. 166-179. DOI: 10.1016/j.addma.2019.02.001
20. Kostenkov S.N., Kharanzhevskii E.V., Krivilev M.D. Determination of characteristics of laser radiation interaction with nanocomposite powder materials. *Physics of Metals and Metallography*. 2012. V. 113, Iss. 1. P. 93-97. DOI: 10.1134/S0031918X12010061
21. Sytshev A.E., Vadchenko S.G., Boyarchenko O.D., Vrel D., Sachkova N.N. SHS joining of Ti-Al and Ni-Al intermetallics to mechanoactivated Ti and Ni substrates. *Perspektivnye Materialy*. 2012. No. 2. P. 15-20. (In Russ.)
22. Qi H., Mazumder J., Ki H. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in coaxial laser cladding process for direct metal deposition. *Journal of Applied Physics*. 2006. V. 100, Iss. 2. DOI: 10.1063/1.2209807
23. Liu Ch.-Y., Lin J. Thermal processes of a powder particle in coaxial laser cladding. *Optics and Laser Technology*. 2003. V. 35, Iss. 2. P. 81-86. DOI: 10.1016/S0030-3992(02)00145-7
24. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011. 1080 p.