

*Избранные доклады XXIV Зимней школы по механике сплошных сред
24–28 февраля 2025 г., Пермь, ИМСС УрО РАН*

УДК 534-141, 536.33
PACS 79.20.Ds, 44.10.+i

Исследование параметров импульсного лазера для оптимизации процессов СЛП при производстве металлических изделий с улучшенными характеристиками

Д. Р. Фатталова^{1†}, Г. А. Гордеев², С. Л. Ломаев^{1‡}

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия

² Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

† w_c_b_and_a@bk.ru

‡ lomaevst@udman.ru

Применение ультразвука (УЗ) позволяет повысить качество деталей, полученных лазерным сплавлением, и улучшить характеристики металлических поверхностей и сварочных соединений за счет уменьшения пористости и формирования мелкой зернистой структуры металла. Основной эффект воздействия УЗ на качество изделия связан с процессом кавитационного схлопывания парогазовых пузырьков, которые всегда присутствуют в зоне расплава в технологии СЛП. В данной работе исследуется вопрос о технической возможности реализовать процесс кавитационного схлопывания пузырьков за счет оптоакустических эффектов, генерируемых вторым импульсным лазером в условиях, характерных для процесса СЛП. Проведено численное моделирование физических характеристик и границ зоны расплава в условии работы двух лазеров – непрерывного и импульсного. На основании расчетов предложен режим работы лазеров, при котором достигается кавитационное схлопывание пузырьков в резонансном режиме.

Ключевые слова: аддитивные технологии; лазерная обработка; оптоакустический эффект; кавитация

Поступила в редакцию 01.04.2025; после рецензии 03.06.2025; принята к опубликованию 04.06.2025

Investigation of the pulsed laser parameters for optimizing SLM processes in the manufacture of metal products with improved characteristics

D. R. Fattalova^{1†}, G. A. Gordeev², S. L. Lomaev^{1‡}

¹ Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russia

² Udmurt State University, Izhevsk, Russia

† w_c_b_and_a@bk.ru

‡ lomaevst@udman.ru

The application of ultrasound in laser fusion processes enhances the quality of manufactured items by improving metal surface characteristics and weld joint properties. This is achieved due to reduction of porosity and the formation of the fine-grained microstructure. This study investigates the technical feasibility of inducing cavitation bubble collapse through optoacoustic effects generated by a secondary pulsed laser under Selective Laser Melting (SLM) conditions. Numerical modeling was used to analyze the physical characteristics of the melt and the melt pool boundaries under simultaneous operation of continuous-wave and pulsed lasers. Based on computations, optimal laser parameters were identified to achieve cavitation bubble collapses in the resonant mode.

Keywords: additive technologies; laser processing; optoacoustic effect; cavitation

Received 01 April 2025; revised 03 June 2025; accepted 04 June 2025

doi: 10.17072/1994-3598-2025-2-47-57

1. Введение

Лазерное воздействие на металлические материалы находит широкое применение в промышленности. Особое внимание уделяется технологиям послойного выращивания изделий с помощью лазерного излучения, где плавление происходит локально в малом объеме. Примерами технологий являются селективное лазерное плавление (СЛП) и прямое лазерное выращивание (ПЛВ). Для этих процессов характерны большие градиенты температур и высокие скорости кристаллизации, в результате чего формируется вытянутая неравноосная зеренная структура металла при затвердевании. Это, в свою очередь, является причиной возникновения анизотропии свойств в готовом изделии, и понижает эксплуатационные и механические свойства, такие как пластичность, ударная вязкость, усталостная прочность и др. [1–3].

Существует ряд исследований, посвященных механизмам формирования равноосной зеренной структуры в процессе лазерной 3D-печати при воздействии ультразвука. В литературе обсуждаются различные механизмы воздействия УЗ на кристаллизацию, но большинство авторов сходятся во мнении, что основным механизмом образования мелкой равноосной структуры металла является ультразвуковая кавитация [2, 4–6].

В технологиях печати ПЛВ и СЛП наблюдается значительное количество парогазовых пузырей, что подтверждается пористостью затвердевшего материала [7–16]. Поры можно условно разделить на три типа. Первый тип – крупные (более 100 мкм), несферичные, образуются при неполном расплавлении порошка (т.е. межчастичные пустоты) или при образовании парогазовых каналов при избыточной энергии лазера. Поры второго типа сферичные, с радиусом до 100 мкм [10–11], образуются при захвате газа зоной расплава до ее кристаллизации. К третьему типу относятся мелкие сферические поры с радиусом менее 10 мкм [12]. Причиной их возникновения могут стать присутствие инертных газов в порошке после распыления [8, 11], пузырьков в сплавах с низкой температу-

рой кипения [14] или растворенного газа, не успевшего покинуть жидкость при быстром охлаждении [15].

При воздействии ультразвука на зону расплава пузырьки, находящиеся в ней, кавитируют и схлопываются, образуя ударную волну. Локально в месте схлопывания возрастают температура (до 5000°C) и давление (до 10⁸ Па), в результате чего зеренная структура измельчается [17].

В литературе описаны три метода воздействия на зону расплава посредством кавитационного схлопывания.

1. Выращивание изделия на сонотроде [4–5].

Метод основан на послойном выращивании изделия на вибрирующей подложке (сонотроде). В таком случае ультразвуковая волна непосредственно вводится в зону расплава (ЗР), активируя кавитационные процессы для формирования мелкой зеренной структуры материала, что и было продемонстрировано в исследованиях. Однако такой подход трудно реализовать для порошковых технологий печати, так как построение детали на подложке с высокointенсивным ультразвуком имеет свои ограничения. Одно из них – быстрое затухание ультразвуковых волн в материале. В этом случае структура изделия окажется неоднородной. При печати порошковыми технологиями деталь формируется послойно, при этом каждый новый слой наносится поверх предыдущего. Тогда в верхних слоях из-за ослабления ультразвукового воздействия (поглощения энергии нижними областями) структура станет анизотропной и менее однородной.

2. Использование эффекта абляции от второго импульсного наносекундного лазера [18].

Метод основан на работе двух лазеров, фокусы которых направлены в одну точку. Первый лазер формирует зону расплава. Второй лазер с коротким (наносекундным) импульсом действует на зону расплава и генерирует ударные волны посредством абляции. Кавитационные процессы, а также гидродинамические потоки, инициированные ударной волной, оказывают влияние на процесс кристаллизации, в результате чего формируются мелкие равноосные зерна. Данная технология была

реализована в лабораторных условиях, однако имеет ограничения для применения в промышленном масштабе, так как требует больших затрат энергии.

3. Использование оптоакустических эффектов для резонансного кавитационного схлопывания.

Данный метод был предложен в работе [19]. Ключевая идея заключается в активации процесса кавитации в резонанском режиме посредством оптоакустического эффекта, связанного с процессом интенсивного испарения вещества. Как и в предыдущем методе, в ванну направляются два лазера, однако частота воздействия и скважность работы второго импульсного лазера подбирается в соответствии с характеристиками парогазовых пузырьков.

Генерация УЗ колебаний происходит за счет локального нагрева поверхности ЗР импульсным лазером, инициирующим процесс интенсивного испарения вещества с переменной во времени интенсивностью. Такой оптоакустический механизм генерирует звуковую волну, имеющую только fazу сжатия. Для таких условий уравнение Нолтинга–Неппайреса, описывающее динамику пузырька в расплаве, для рассматриваемого случая принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = & \frac{1}{\rho} \left[\left(P_h + \frac{2\sigma}{R} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - P_h \right. \\ & - \frac{2\sigma}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \\ & \left. + \frac{P_a}{2} (1 - \cos \omega_a t) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где $R(t)$ – радиус пузырька, точки над функцией обозначают первую и вторую производную по времени, R_0 – радиус пузырька до воздействия ультразвука, ρ – плотность среды, в которой находится пузырек (плотность расплавленного металлического порошка), P_h – давление жидкости, σ – поверхностное натяжение на границе жидкость–газ, μ – динамическая вязкость жидкости, $P_a = P_a(t)$ – акустическое давление, положительные значения имеет только на волне сжатия, ω_a – циклическая частота ультразвука.

В работе [19] было показано, что пузырек представляет собой колебательную систему, которая обладает собственной частотой колебаний, а, следовательно, существует резонансный режим схлопывания пузырьков. Таким образом, подбор частоты УЗ позволяет существенно снизить пороговое значение амплитуды УЗ колебаний (оно же реактивное, создаваемое при вылете вещества из расплава), необходимых для инициации процесса кавитации. Согласно данным, приведённым в работе [19], для пузырьков с радиусами в диапазоне $R_0 = 10^{-6} \div 10^{-4}$ м пороговые значения резонансной частоты составили $v_a = 19 \div 9300$ кГц для титаново-

го сплава ВТ6 и $v_a = 13.7 \div 6400$ кГц для стали 316L, пороговые значения акустического давления $P_A^{rth} = 0.6 \div 24$ бар (ВТ6) и $P_A^{rth} = 0.74 \div 25$ бар (316L) соответственно.

В работе [18] также была предложена модель оценки мощности импульсного лазера, достаточной для того, чтобы сгенерировать давление необходимого значения при помощи оптоакустического эффекта. Для стали 316L диапазон мощностей импульса составил $117 \div 1096$ Вт, для ВТ6 – $160 \div 1540$ Вт. Меньшие значения мощности внутри указанных диапазонов соответствуют схлопыванию пузырьков большего радиуса. Эти значения пересекаются со значениями мощностей, используемых для выращивания изделий методами СЛП и ПЛВ в лабораторных и промышленных масштабах.

Подход, предложенный в работе [19], представляется перспективным для применения на практике, однако на сегодняшний день остается неразрешенным вопрос о возможности технической реализации этого метода в условиях, характерных для технологии СЛП. Его использование может быть ограничено, если воздействие второго лазера приводит к переплаву вещества и значительному расширению зоны расплава.

В настоящей статье данный вопрос исследуется с помощью мультифизического моделирования ЗР под воздействием двух лазеров (непрерывного и импульсного). В работе были поставлены следующие задачи: 1) смоделировать формирование непрерывным лазерным источником ЗР в порошковом слое, нанесенном на подложку; 2) рассчитать границы ЗР, температурные поля внутри ЗР, на основе этих данных предложить режим работы импульсного лазера; 3) рассчитать локальный усредненный по времени нагрев зоны расплава в области воздействия второго импульсного лазера, на основании чего сделать вывод о том, насколько сильно меняются границы ЗР и наблюдается ли значительный переплав затвердевшего вещества.

Как было отмечено выше, пузырьки, присутствующие в зоне расплава, обладают широким диапазоном линейных размеров $R_0 = 10^{-6} \div 10^{-4}$ м [3–5, 20]. В рамках данного исследования рассчитываются условия схлопывания пузырьков с радиусом $R_0 = 4.5 \times 10^{-6} \div 4.5$ мкм. Связано это с двумя причинами: во-первых, пузырьки такого радиуса всегда присутствуют в зоне расплава в технологиях СЛП и ПЛВ [12]; во-вторых, при инициации процесса кавитации пузырьков малого радиуса необходимо прилагать большую энергию второго импульсного лазера, генерирующего оптоакустические эффекты, что обуславливает большой риск переплава материала и расширения зоны расплава. Если данные эффекты не будут проявляться при таких мощностях второго лазера, то можно гарантировать, что инициация кавитационных процессов с помощью оптоакустических эффектов технически реализуема для всех пузырьков с $R_0 \geq 4.5 \times 10^{-6}$ м.

Отметим также, что если в зоне расплава присутствуют крупные парогазовые пузырьки $R_0 \approx 10^{-4}$ м, то инициация процесса кавитационного схлопывания может привести к преобразованию крупных пузырей во множество мелких с $R_0 < 10^{-5}$ м [19], которые не оказывают столь негативного влияния на качество итогового изделия, как крупные пузырьки.

Таким образом, процесс кавитационного схлопывания парогазовых пузырьков может быть использован в двух качествах – как механизм улучшения микроструктуры и как средство подавления дефектов, вызванных формированием крупных парогазовых пузырьков в процессе лазерной обработки материала.

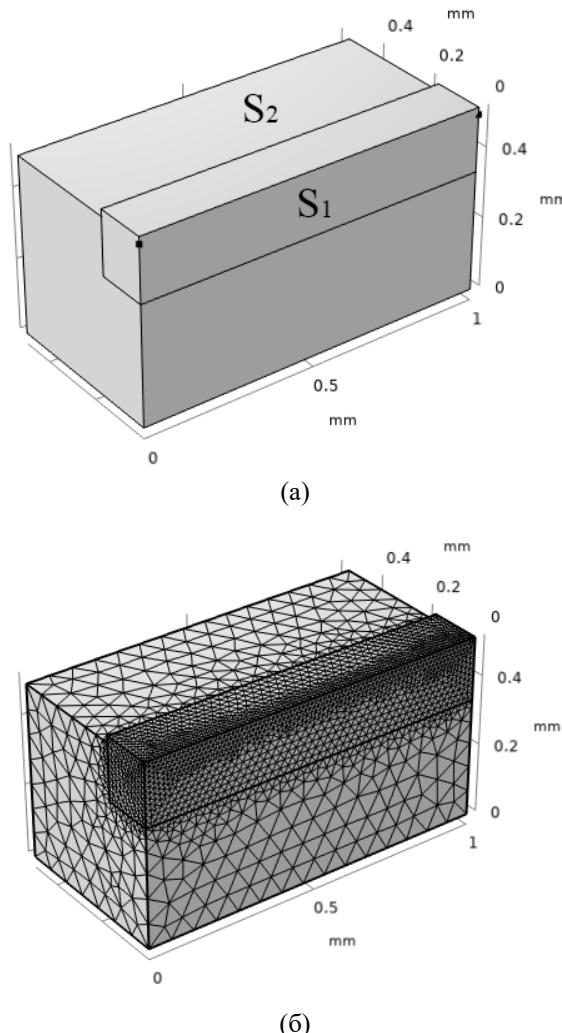


Рис. 1. Геометрия расчетной области: а) – S_1 – область, которая может быть переплавлена в ходе лазерной обработки, вверх области, выше подложки, имеет в начальный момент времени свойства порошка, а оставшаяся нижняя часть свойства монолитного материала, S_2 – застывший монолитный материал подложки; б) – аддитивная треугольная сетка

2. Моделирование зоны расплава стали 316L

Режимы лазерного излучения для выращивания изделий методами СЛП и ПЛВ разнообразны и используются в зависимости от конкретных задач и изделий. Диапазон мощностей для выращивания методами СЛП находится в районе от 100 до 400 Вт для нержавеющих сталей и титанового сплава BT6 [20,21], для технологии ПЛВ – от 500 до 5000 Вт [22] при скоростях сканирования 500–2000 мм/с для СЛП и 5–30 мм/с для ПЛВ.

С учетом стандартных параметров, применяемых при печати изделий, и расчетной мощности вспомогательного лазера, приведенной в исследовании [19], оценим возможность реализации предложенного метода путем моделирования зоны расплава, создаваемой двумя лазерами.

Задача обладает плоскостью симметрии, проведенной вдоль траектории движения луча лазера и перпендикулярной подложке, поэтому в расчетах моделируется только половина расчетной области. Лучи обоих лазеров проходят вдоль плоскости симметрии. Расчетная область разделена на две части (рис. 1): зона S_1 представлена областью, которая может быть переплавлена в ходе лазерной обработки, вверх области, выше подложки, имеет в начальный момент времени свойства порошка, а оставшаяся нижняя часть – свойства монолитного материала, зона S_2 соответствует застывшему монолитному материалу стали 316L.

В зоне S_1 под действием лучей лазера происходит компактирование порошка, изменяется пористость и коэффициент теплопроводности. Зависимость коэффициента теплопроводности $k(\varepsilon)$ от пористости ε приведена на рис. 2.

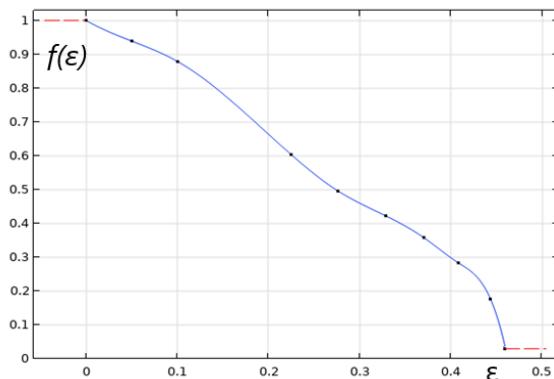


Рис. 2. Вид зависимости коэффициента теплопроводности $k(\varepsilon)$ от локальной пористости ε в области S_1

Переход от порошка к монолитному слою осуществляется путем компактирования порошка и вводится в модель с помощью зависимой переменной – локальной пористости ε материала (рис. 3). Динамика компактирования зависит от температуры локальной области и имеет вид, по-

добный уравнению Аррениуса. Пористость ε_0 соответствует начальной пористости насыпки.

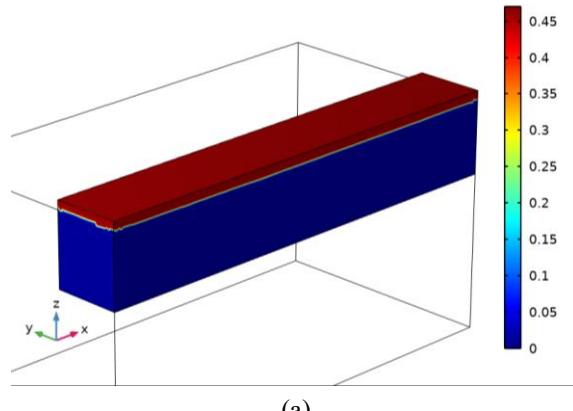
На верхнюю границу зоны S_1 направлены оба лазера. Здесь решаются уравнения Навье–Стокса (2) и теплопроводности (3):

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) &= \\ &= \nabla (-P\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) + \mathbf{F}, \quad (2) \\ \nabla \mathbf{u} &= 0, \end{aligned}$$

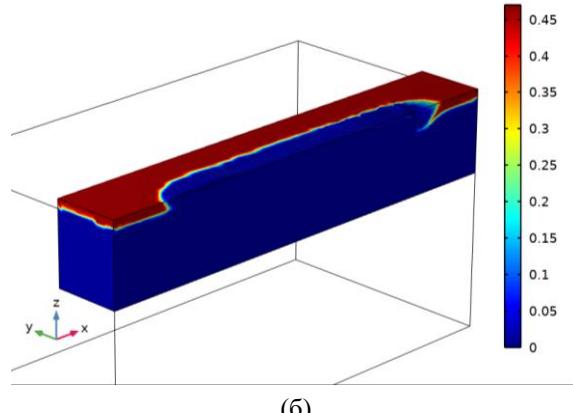
здесь ρ – плотность жидкости, \mathbf{u} – вектор скорости конвективного течения в зоне расплава, t – время, P – давление, μ – динамическая вязкость, \mathbf{I} – единичный тензор, \mathbf{F} – вектор массовых сил:

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} &= Q, \quad (3) \\ \mathbf{q} &= -k \nabla T, \end{aligned}$$

где C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, T – температура, \mathbf{q} – вектор теплового потока, Q – объемный источник тепла, k – коэффициент теплопроводности металла.



(a)



(б)

Рис. 3. Трехмерное распределение полей локальной пористости ε (а) в начальный момент времени $t = 0$ с, (б) при выходе на «стационарный» режим, когда ширина и длина зоны расплава практически не изменяются. Синий цвет соответствует сплавленному треку, красный – несплавленному порошку

Верхняя стенка области S_1 представлена свободной поверхностью с давлением:

$$P = P_A + P_r(T), \quad (4)$$

где P_A – атмосферное давление, $P_r(T)$, – давление насыщенных паров (5) [19].

$$P_r = \left(1 - \frac{\varphi}{2}\right) P_0 e^{A_{Me} - \frac{B_{Me}}{T}}, \quad (5)$$

где φ – доля испарившегося вещества, не вернувшегося в зону расплава, P_0 – давление, равное 1 Па, A_{Me} и B_{Me} – феноменологические константы насыщенных паров металла.

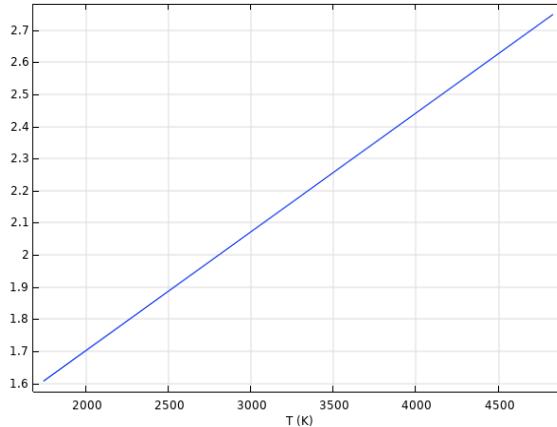


Рис. 4. Вид зависимости коэффициента поверхностного натяжения от температуры

В зависимости от давления паров материала, коэффициент φ может изменяться от 0 до 82 [23]. Чем больше давление насыщенного пара металла, тем коэффициент выше. Изменение коэффициента поверхностного натяжения от температуры учитывался как линейная функция с положительным знаком эффекта Марангони [24]. Зависимость поверхности натяжения от температуры приведена на рис. 4.

На верхней границе S_1 задавалось условие лазерного воздействия (уравнение (6) – непрерывный лазер, формирующий зону расплава, уравнение (7) – вспомогательный лазер):

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_T &= \\ &= k_{abs} \frac{P_{laser}}{2\pi R_b^2} \cdot \\ &\cdot \exp \left(-\frac{(x_b - x)^2 + (y_b - y)^2}{2R_b^2} \right) + q_{rad} \quad (6) \\ &+ q_{conv} + q_{boil}, \\ x_b &= x_0 + f_x(v, t), y_b = y_0 + f_y(v, t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_T &= \\ &= k_{abs} \frac{P_{laser_2}}{2\pi R_b^2} \cdot \\ &\cdot \exp \left(-\frac{(x_b - l - x)^2 + (y_b - y)^2}{2R_b^2} \right) + q_{rad} \quad (7) \\ &+ q_{conv} + q_{boil}, \\ x_b &= x_0 + f_x(v, t), y_b = y_0 + f_y(v, t), \end{aligned}$$

где лазерное излучение задавалось нормальным распределением, P_{laser} – номинальная мощность первого лазера, P_{laser_2} – номинальная мощность вспомогательного лазера x_0 , y_0 – положение лазерного луча в начальный момент времени, $f_x(v, t)$, $f_y(v, t)$ – закон движения, определяемый способом сканирования поверхности лазерным лучом, R_b – радиус лазерного нагрева, l – расстояние между лазерами. Слагаемые q_{rad} , q_{conv} , q_{boil} описывают охлаждение за счет конвективного охлаждения q_{conv} , излучения q_{rad} и кипения q_{boil} . Зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения твердым материалом постоянна и принималась равной $k_{abs} = 0.3$. Техофизические параметры стали 316L представлены в табл. 1.

Табл. 1. Техофизические параметры стали 316L, используемые в модели

Параметр	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Плотность твердой фазы	ρ_{solid}	8000	кг/м ³
Плотность жидкой фазы	ρ_{melt}	6900	кг/м ³
Динамическая вязкость твердой фазы	μ_{solid}	100	Па·с
Динамическая вязкость жидкой фазы	μ_{melt}	$5.5 \cdot 10^{-3}$	Па·с
Давление жидкости	P_h	10^5	Па
Температура кипения при стандартном давлении	T_{boil}	3090	К
Температура плавления	T_{melt}	1660	К
Удельная теплоемкость твердой фазы	C_{p_solid}	480	Дж/(кг·К)
Удельная теплоемкость жидкой фазы	C_{p_melt}	950	Дж/(кг·К)
Коэффициент температуропроводности	α	$0.59 \cdot 10^{-5}$	м ² /с
Удельная теплота испарения	L_{vap}	$7.45 \cdot 10^6$	Дж/кг
Постоянные насыщенного пара	A_{Me}	25.6	
	B_{Me}	$43.3 \cdot 10^3$	
Доля испарившегося вещества, не вернувшегося в расплав	φ	0.82	

Для моделирования непрерывного лазера, формирующего ЗР, используются стандартные настройки лазера, применяемые в печати методами СЛП. Входящие параметры непрерывного лазера представлены в табл. 2.

Табл. 2. Параметры лазерного излучения, используемые в модели

Параметр	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность непрерывного лазера	P_{laser}	200	Вт
Скорость сканирования	v	0.7	м/с
Радиус лазерного пятна	R_b	50	мкм
Расстояние между лазерами	l	130	мкм

Второй лазер, инициирующий процессы кавитации, следует за первым и направлен в ЗР. Варианты расположения его фокуса могут быть различны, один из них – направление фокуса луча в хвост зоны расплава. В нашей модели расстояние между лазерами составляет 130 мкм.

В работе [19] ультразвуковая волна, инициирующая кавитационные процессы, рассматривалась в приближении плоской волны, представленной синусоидой. Для генерации такой волны скважность импульсного лазера составила 0.5. Для схлопывания пузырьков в резонансном режиме была рассчитана мощность вспомогательного лазера P_{laser_2} (8):

$$P_{laser_2} = \pi R_b^2 I, \quad (8)$$

где I – интенсивность лазерного излучения (9) [19]:

$$I = \frac{1}{k_{abs}} \left(\frac{\varphi L_{vap}}{(2 - \varphi) v_{vap}} P_r + \frac{C_{p_melt} \rho v_T (2T_s - T_0)(T_s - T_0)}{(3T_s - T_0)\xi} \right), \quad (9)$$

здесь v_{vap} – средняя составляющая скорости по оси z (ось направлена перпендикулярно поверхности зоны расплава) произвольной молекулы, испаряющейся с поверхности, T_0 – температура на поверхности зоны расплава до воздействия импульса, T_s – температура на поверхности зоны расплава во время действия импульса, C_{p_melt} – теплоемкость жидкого металла, ρ – плотность металла, v_T – скорость распространения тепла (10)

$$v_T \approx \sqrt{\frac{\alpha}{\Delta t}}, \quad (10)$$

здесь α – коэффициент температуропроводности, Δt – время воздействия импульса ($\Delta t = 10^{-6}$ с). ξ определяется относительным перемещением фронтов нагрева и кипения и для нашего случая $\xi \approx 1$.

Пороговая мощность импульса, необходимая для резонансного схлопывания пузырьков радиуса

4.5 мкм в стали 316L рассчитывалась на основании модели, представленной в формулах (8) и (9), и составляет 323 Вт [19].

Основной задачей данной статьи являлась оценка усредненного количества переплавленного вещества и изменения границ ЗР за счет воздействия второго импульсного лазера. Мощность лазера рассчитывалась на основании модели, предложенной в работе [19]. Для корректного моделирования зоны расплава необходимо оценить, какая доля энергии второго лазера тратится на разогрев вещества, остающегося в зоне расплава.

Часть интенсивности излучения второго лазера тратится на разогрев и испарение вылетающего из зоны расплава вещества I_{vap} . Другая часть – на разогрев вещества, остающегося в зоне расплава I_{heat} . Таким образом, интенсивность второго лазера, поглощенная зоной расплава, включает в себя два слагаемых:

$$k_{abs}I = I_{vap} + I_{heat}, \quad (11)$$

Оба этих слагаемых представлены в уравнении (9):

$$I_{vap} = \frac{\varphi L_{vap} P_a}{(2 - \varphi) v_{vap}}. \quad (12)$$

$$I_{heat} = \frac{C_{p_melt} \rho v_T (2T_s - T_0)(T_s - T_0)}{(3T_s - T_0)\xi}. \quad (13)$$

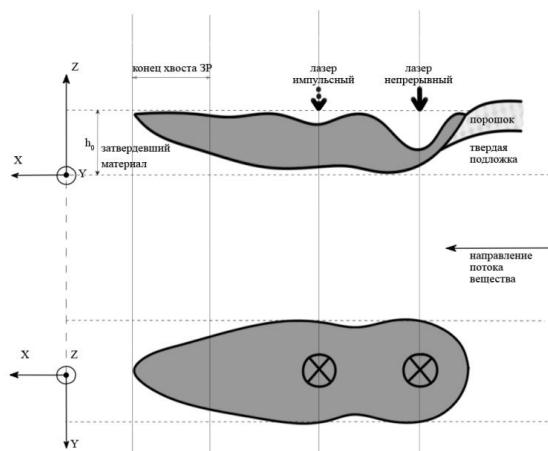


Рис. 5. Расположение лазеров. Рассстояние между фокусами – 130 мкм, скорость сканирования – 0.7 м/с, радиусы лазеров – 50 мкм, мощность первого непрерывного лазера – 200 Вт, второго (импульсного, но в приближении непрерывного) – 57.9 Вт

Для упрощения численных расчетов данная задача решалась в рамках модели, в которой импульсный лазер рассматривается как непрерывный с усредненной по времени мощностью лазерного источника. Принимая во внимание долю интенсивности лазерного излучения, ушедших на нагрев,

испарение и поглощение металлом, усредненное значение мощности вспомогательного лазера составило 57.9 Вт. Это значение и использовалось в модели зоны расплава (7).

Схематичное изображение расположения лазеров показано на рис. 5.

В решении используется аддитивная треугольная сетка, измельченная вдоль траектории движения луча лазера (см. рис. 1, б). Численная модель была реализована с помощью метода конечных элементов в классической постановке Галеркина в программном пакете COMSOL Multiphysics.

3. Результаты и обсуждение

По результатам моделирования были рассчитаны температурные поля для технологии печати СЛП (рис. 6).

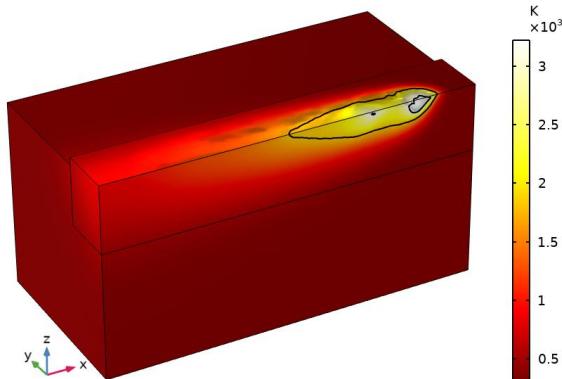


Рис. 6. Поле температур для технологии СЛП при выходе на «стационарный» режим, когда ширина и длина зоны расплава практически не изменяются. Черной линией обозначены изотермы плавления (граница твердое тело–жидкость) и испарения

Максимальная значение температуры на поверхности ЗР в области влияния второго лазера, рассматриваемого как непрерывный, составляет 3300 К (рис. 7). Толщина слоя порошка после сплавления равна 0.02 мм, глубина зоны расплава составляет 0.04 мм. Это соответствует нормальным параметрам СЛП и не является признаком переплава. При таких глубинах расплава происходит подплавление нижележащего слоя, что обеспечивает достаточное проплавление для надежной адгезии между слоями. Это исключает такие дефекты, как несплавление, высокая пористость и образования крупных пор между слоями. При этом отсутствует сильный перегрев нижележащего слоя, который мог способствовать формированию больших размеров зерен металла. В то же время второй лазер с минимальными затратами энергии лазера инициирует процессы кавитации для достижения формирования мелкой зернистой структуры.

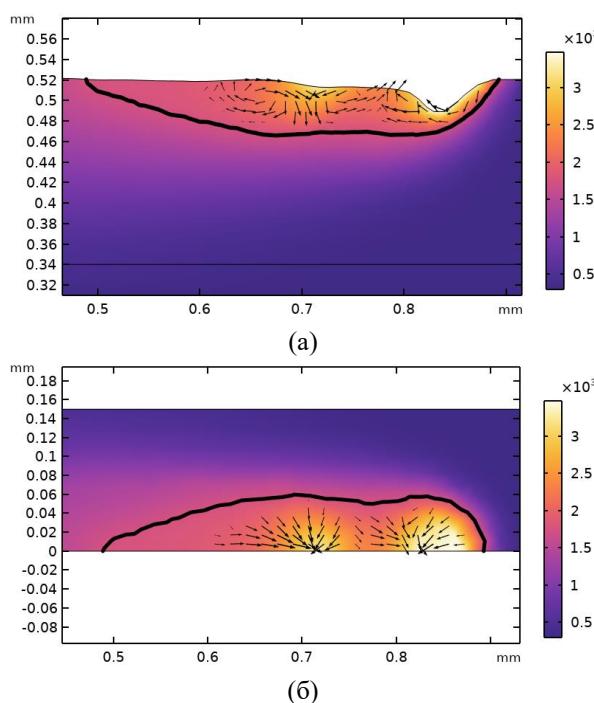


Рис. 7. Зона расплава: (а) – в плоскости XZ (граница симметрии); (б) – в плоскости XY (верхняя граница). Черной линией обозначена граница твердое тело-жидкость

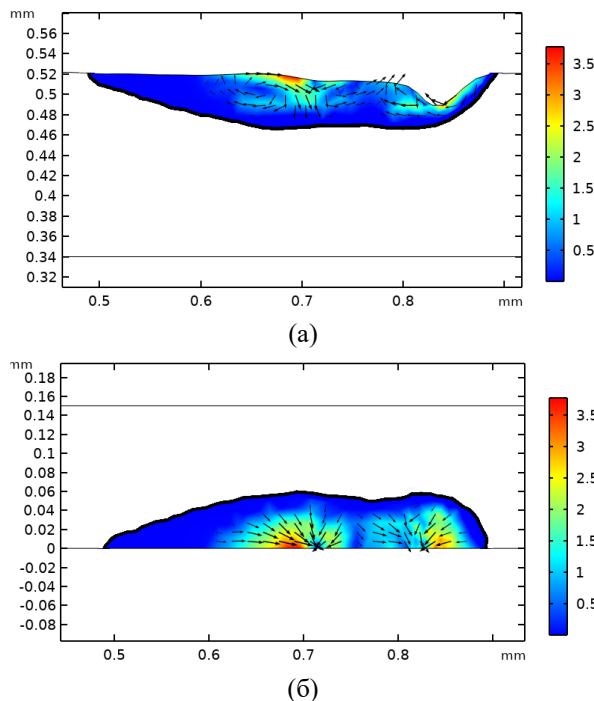


Рис. 8. Скорость потока жидкости в зоне расплава: а) – в плоскости XZ (граница симметрии); б) – в плоскости XY (верхняя граница). Черной линией обозначена граница твердое тело-жидкость

Скорость потока максимальна под лучами лазеров и уменьшается ближе к периферии зоны расплава. Максимальные скорости потока в рас-

лаве изменяются от 1 до 3 м/с (рис. 8) – это условия, при которых вероятность возникновения кейхол-эффекта увеличивается. Второй лазер обеспечивает кавитацию и дробление крупных пор, потенциально образуемых первым лазером при формировании и схлопывании кейхола. Таким образом, правильная локализация дополнительного импульсного лазера может не только инициировать процессы кавитации с целью формирования мелкой зернистой структуры, но и предотвращать образования пор, образованных кейхол-эффектом благодаря тому, что воздействие второго лазера формирует в ЗР дополнительный гидродинамический вихрь.

Численные исследования показывают, что применение метода печати двумя лазерами с целью формирования мелкозернистой структуры за счет активации процессов кавитации реализуемо. Используя импульсный лазер, можно воздействовать на зону расплава, локально действуя на его поверхность, и генерировать акустические волны с малыми затратами энергии.

4. Вывод

Резонансное кавитационное схлопывание парогазовых пузырьков $R_0 = 4.5 \times 10^{-6}$ м в расплаве стали 316L может быть реализовано при обработке поверхности зоны расплава вторым лазером, генерирующими импульсы мощностью 323 Вт на частоте 660 кГц и скважностью 0.5.

В работе было проведено численное моделирование зоны расплава стали 316L в условиях, характерных для технологии СЛП, с применением двух лазеров. Основной непрерывный лазер мощностью 200 Вт осуществляет плавление порошка и формирование зоны расплава, второй импульсный лазер воздействует на хвостовую часть зоны расплава (расстояние между лазерными пятнами 130 мкм) и генерирует ультразвуковые колебания с помощью оптоакустического эффекта. Вклад второго лазера в температурные поля считался в модели усредненным по времени.

Исследования показали, что глубина зоны расплава достигает 0.04 мм, что обеспечивает сплавление трека с предыдущим слоем и отсутствие зон несплавления. При этом воздействие второго лазера не приводит к формированию зон переплава.

Таким образом данное исследование показало, что технология использования второго импульсного лазера для инициации процесса кавитационного схлопывания парогазовых пузырьков с $R_0 \geq 4.5 \times 10^{-6}$ м в резонансном режиме с помощью оптоакустического механизма возможна в условиях, характерных для технологии СЛП.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ (№ FUUE-2024-0011).

Список литературы

1. Mostafaei A. et al. Defects and anomalies in powder bed fusion metal additive manufacturing // Current Opinion in Solid State and Materials Science. 2022. Vol. 26. N. 2, 100974. DOI: 10.1016/j.cossms.2022.100974.
2. Shu D. et al. A high-speed imaging and modeling study of dendrite fragmentation caused by ultrasonic cavitation // Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. (43). DOI: 10.1007/s11661-012-1191-8
3. Zhang T. et al. In situ design of advanced titanium alloy with concentration modulations by additive manufacturing // Science. 2021. Vol. 374. No. 6566. P. 478-482. DOI: 10.1126/science.abj3770
4. Todaro C. J. et al. Grain refinement of stainless steel in ultrasound-assisted additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2021. Vol. 37, 101632. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101632
5. Todaro C. et al. Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound // Nature Communications. 2020. Vol. 11, 142. DOI: 10.1038/s41467-019-13874-z
6. Сиромюк М. Г. Экспериментальное исследование процесса развития ультразвуковой кавитации на частоте 500 кГц // Акустический журнал. 1962. Т. 8. № 2. С. 216–219.
7. Snell R. et al. Methods for rapid pore classification in metal additive manufacturing // JOM. 2020. Vol. 72. P. 101–109. DOI: 10.1007/s11837-019-03804-1
8. Svetlizky D. et al. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: physical characteristics, defects, challenges and applications // Materials Today. 2021. Vol. 49. P. 271–295. DOI: 10.1016/j.mattod.2021.03.020.
9. Cunningham R. et al. Synchrotron-based X-ray microtomography characterization of the effect of processing variables on porosity formation in laser power-bed additive manufacturing of Ti-6Al-4V // JOM. 2017. Vol. 69. P. 479–484. DOI: 10.1007/s11837-016-2234-1
10. King W. et al. Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing // Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214. P. 2915–2925. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005
11. Cunningham R. et al. Evaluating the effect of processing parameters on porosity in electron beam melted Ti-6Al-4V via synchrotron X-ray microtomography // JOM. 2016. Vol. 68. P. 765–771. DOI: 10.1007/s11837-015-1802-0.
12. Ahsan M. N., Bradley R., Pinkerton A. J. Microcomputed tomography analysis of intralayer porosity generation in laser direct metal deposition and its causes // Journal of Laser Applications. 2011. Vol. 23. N. 2, 22009. DOI: 10.2351/1.3567961.
13. Gong H. et al. Analysis of defect generation in Ti-6Al-4 V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes // Additive Manufacturing. 2014. Vol. 1–4. P. 87–98. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.002
14. Zhang B., Li Y., Bai Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2017. Vol. 30. P. 515–527. DOI: 10.3901/CJME.2017.0317.045.
15. Prabhu A. W. et al. Effect of microstructure and defects on fatigue behaviour of directed energy deposited Ti-6Al-4V // Science and Technology of Welding and Joining. 2015. Vol. 20. N. 8. P. 659–669. DOI: 10.1179/1362171815Y.0000000056
16. Voroshilov E. S. et al. Capillary effects and consolidation kinetics during selective laser melting of 316L powder // Physics of Fluids. 2024. Vol. 36, 043306. DOI: 10.1063/5.0195071
17. Eskin G., Eskin D. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts. Boca Raton: CRC Press, 2014. 346 p.
18. Sohn H. et al. Real-time porosity reduction during metal directed energy deposition using a pulse laser // Journal of Materials Science and Technology. 2022. Vol. 116. P. 214–223. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.11.027.
19. Lomaev S. L. et al. Quantitative efficiency of optoacoustic ultrasonic treatment in SLM, DED, and LBW applications // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. N. 1, 1887. DOI: 10.1038/s41598-024-56789-6
20. Yuan T., Kou S., Luo Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool // Acta Materialia. 2016. Vol. 106. P. 144–154. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.01.016
21. Kruth J. P. et al. Selective laser melting of iron-based powder // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 149. N. 1–3. P. 616–622. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051
22. Yap C. Y. et al. Review of selective laser melting: Materials and applications // Applied Physics Reviews. 2015. Vol. 2. N. 4, 041101. DOI: 10.1063/1.4935926
23. Klassen A., Scharowsky T., Korner C. Evaporation model for beam based additive manufacturing using free surface lattice Boltzmann methods // Journal of Physics D: Applied Physics. 2014. Vol. 47, 275303. DOI: 10.1088/0022-3727/47/27/275303
24. Frazier W. E. Metal additive manufacturing: a review // Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. Vol. 23. P. 1917–1928. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z

25. Kim J. et al. Experimental and numerical investigation on the dent resistance of a dual phase steel originated from the yield-point phenomenon //Journal of Materials Processing Technology. 2021. Vol. 289, 116929.
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116929

References

1. Mostafaei A., et al. Defects and anomalies in powder bed fusion metal additive manufacturing. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2022, vol. 26, 100974.
DOI: 10.1016/j.costrstr.2022.100974.
2. Shu D., et al. A high-speed imaging and modeling study of dendrite fragmentation caused by ultrasonic cavitation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, vol. 43, pp. 3755-3766.
DOI: 10.1007/s11661-012-1191-8.
3. Zhang T., et al. In situ design of advanced titanium alloy with concentration modulations by additive manufacturing. *Science*, 2021, vol. 374, pp. 478-482. DOI: 10.1126/science.abj3770.
4. Todaro C. J., et al. Grain refinement of stainless steel in ultrasound-assisted additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 2020, vol. 32, 101032. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101032.
5. Todaro C., et al. Grain structure control during metal 3D printing by high-intensity ultrasound. *Nature Communications*, 2020, vol. 11, 142. DOI: 10.1038/s41467-019-13874-z.
6. Sirotyuk M. G. Eksperimental'noe issledovanie protsessov razvitiya ul'trazvukovoi kavitsii na chaste 500 kgts [Experimental study of ultrasonic cavitation development at 500 kHz]. *Akusticheskii zhurnal* [Acoustic Journal], 1962, vol. 8, no. 2, pp. 216–219. (In Russian).
7. Snell R., et al. Methods for rapid pore classification in metal additive manufacturing. *JOM*, 2020, vol. 72, no. 1, pp. 101–109. DOI: 10.1007/s11837-019-03804-1.
8. Svetlizky D., et al. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 2021, vol. 49, pp. 271–295. DOI: 10.1016/j.mattod.2021.03.020.
9. Cunningham R., et al. Synchrotron-based X-ray microtomography characterization of the effect of processing variables on porosity formation in laser power-bed additive manufacturing of Ti-6Al-4V. *JOM*, 2017, vol. 69, no. 3, pp. 479-484. DOI: 10.1007/s11837-016-2234-1.
10. King W., et al. Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, vol. 214, no. 12, pp. 2915–2925. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005.
11. Cunningham R., et al. Evaluating the effect of processing parameters on porosity in electron beam melted Ti-6Al-4V via synchrotron X-ray microtomography. *JOM*, 2016, vol. 68, no. 3, pp. 765–771. DOI: 10.1007/s11837-015-1802-0.
12. Ahsan M. N., Bradley R., Pinkerton A. J. Microcomputed tomography analysis of intralayer porosity generation in laser direct metal deposition and its causes. *Journal of Laser Applications*, 2011, vol. 23, no. 2, 22009. DOI: 10.2351/1.3567961.
13. Gong H., et al. Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*, 2014, vol. 1-4, pp. 87-98. DOI: 10.1016/j.addma.2014.08.002.
14. Zhang B., Li Y., Bai Q. Defect formation mechanisms in selective laser melting: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 30, pp. 515–527. DOI: 10.3901/CJME.2017.0317.045.
15. Prabhu, A.W., et al. Effect of microstructure and defects on fatigue behaviour of directed energy deposited Ti-6Al-4V. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, vol. 20 (8), pp. 659–669. DOI: 10.1179/1362171815Y.0000000056
16. Voroshilov E. S. et al. Capillary effects and consolidation kinetics during selective laser melting of 316L powder. *Physics of Fluids*, 2024, vol. 36, 043306. DOI: 10.1063/5.0195071
17. Eskin G., Eskin D. *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*. Boca Raton: CRC Press, 2014. 346 p.
18. Sohn H., et al. Real-time porosity reduction during metal directed energy deposition using a pulse laser. *Journal of Materials Science and Technology*, 2022, vol. 116, pp. 214–223. DOI: 10.1016/j.jmst.2021.11.027.
19. Lomaev S.L., et al. Quantitative efficiency of optoacoustic ultrasonic treatment in SLM, DED, and LBW applications. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, no. 1, 1887. DOI: 10.1038/s41598-024-56789-6.
20. Yuan, T., Kou, S., Luo, Z. Grain refining by ultrasonic stirring of the weld pool. *Acta Materialia*, 2016, vol. 106, pp. 144–154. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.01.016.
21. Kruth J.P., et al. Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 149, no. 1-3, pp. 616-622. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051.
22. Yap C.Y., et al. Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2015, vol. 2 (4), 041101. DOI: 10.1063/1.4935926.
23. Klassen A., Scharowsky T., Korner C. Evaporation model for beam based additive manufacturing using free surface lattice Boltzmann methods. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, vol.

- 47, 275303. DOI: 10.1088/0022-3727/47/27/275303
24. Frazier W.E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23 (6), pp. 1917-1928. DOI: 10.1007/s11665-014-0958-z.
25. Kim, J., et al. Experimental and numerical investigation on the dent resistance of a dual phase steel originated from the yield-point phenomenon. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, vol. 289, 116929. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116929.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Фатталова Д. Р., Гордеев Г. А., Ломаев С. Л. Исследование параметров импульсного лазера для оптимизации процессов СЛП при производстве металлических изделий с улучшенными характеристиками // Вестник Пермского университета. Физика. 2025. № 2. С. 47–57. doi: 10.17072/1994-3598-2025-2-47-57

Please cite this article in English as:

Fattalova D. R., Gordeev G. A., Lomaev S. L. Investigation of the pulsed laser parameters for optimizing SLM processes in the manufacture of metal products with improved characteristics. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2025, no. 2, pp. 47–57. doi: 10.17072/1994-3598-2025-2-47-57

Сведения об авторах

1. *Фатталова Динара Робертовна*, аспирант, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, ул. Имени Татьяны Барамзиной, 34, Ижевск, 426067
2. *Гордеев Георгий Андреевич*, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории физики конденсированного состояния, Удмуртский государственный университет, ул. Университетская, 1, Ижевск, 426034
3. *Ломаев Степан Леонидович*, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории физики неравновесных металлических систем отдела физики и химии наноматериалов ФТИ УдмФИЦ УрО РАН, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, ул. Татьяны Барамзиной, 34, Ижевск, 426067

Author information

1. *Dinara R. Fattalova*, Postgraduate Student, Udmurt Federal Research Center UB RAS; 34, Tatiany Baramzinoi st., Izhevsk, 426067, Russia.
2. *Georgy A. Gordeev*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Condensed Matter Physics, Udmurt State University; 1, Universitetskaya st., Izhevsk, 426034, Russia.
3. *Stepan L. Lomaev*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Non-Equilibrium Metal Systems, Department of Physics and Chemistry of Nanomaterials, Institute of Physics and Technology, Udmurt Federal Research Center UB RAS; 34, Tatiany Baramzinoi st., Izhevsk, 426067, Russia.