

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2022. №4 (130). С. 25-33.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022. №4 (130). P. 25-33.

Обзорная статья  
УДК 621.373.826  
doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-25-33

## **Экспериментальное и численное исследование теплообмена при выращивании тонкостенных деталей методом коаксиального лазерного плавления**

**Андрей Андреевич Холопов<sup>1</sup>**, к.т.н., **Захра Мианджи<sup>2</sup>**, аспирант,  
**Иван Игоревич Бинков<sup>3</sup>**, аспирант

<sup>1,2,3</sup> *Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*  
<sup>1</sup>holopiy@yandex.ru, <sup>2</sup>mianji@bk.ru, <sup>3</sup>binkovii@bmstu.ru

**Аннотация.** Проведено численное моделирование теплового поведения тонкостенной детали из аустенитной нержавеющей стали 316L при выращивании методом коаксиального лазерного плавления с переменной и постоянной мощностью лазера. Работа проводилась с целью исследования влияния количества слоев наплавленного металла и радиуса их кривизны на тепловые поля в зоне выращивания и объем ванны расплава.

**Ключевые слова:** коаксиальное лазерное плавление, тонкостенная деталь, численное моделирование, термический цикл, объем ванны расплава

**Благодарность:** авторы выражают благодарность НИИ КМ и ТП МГТУ им. Н.Э. Баумана за предоставленное оборудование и материалы для проведения экспериментальных исследований.

**Для цитирования:** Холопов А.А., Мианджи З., Бинков И.И. Экспериментальное и численное исследование теплообмена при выращивании тонкостенных деталей методом коаксиального лазерного плавления // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №4 (130). – С. 25-33. doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-25-33.

Original article

## **Experimental and numerical study of heat transfer in the cultivation of thin-walled parts by coaxial laser melting**

**Andrey A. Kholopov<sup>1</sup>**, Cand. Sc. Tech., **Zahra Mianji<sup>2</sup>**, post graduate student,  
**Ivan I. Binkov<sup>3</sup>**, post graduate student

<sup>1,2,3</sup> *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*  
<sup>1</sup>holopiy@yandex.ru, <sup>2</sup>mianji@bk.ru, <sup>3</sup>binkovii@bmstu.ru

**Annotation.** Computer modeling of the thermal behavior of a thin-walled part made of austenitic 316L stainless steel, grown by coaxial laser melting with variable and constant laser power, has been simulated. The conducted work was aimed at investigating the effect of the number of weld deposit layers and studying the influence of bending radius in heat patterns of the growing zone, taking into account a molten pool volume.

**Keywords:** coaxial laser melting, thin-walled part, computer modeling, thermal cycle, molten pool volume

**Acknowledgements:** the authors are grateful to the Research Institute of CM and TP Bauman STU of Moscow for the equipment and materials provided for conducting experimental research.

**For citation:** Kholopov A.A., Mianji Z., Binkov I.I. Experimental and numerical study of heat transfer in the cultivation of thin-walled parts by coaxial laser melting / Science intensive Technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.4 (130), pp. 25-33. doi: 10.30987/2223-4608-2022-4-25-33.

## Введение

Коаксиальное лазерное плавление (КЛП) – это процесс послойной лазерной наплавки металлического порошка, подаваемого соосно лучу из системы сопел, формирующей сходящийся газопоршковый поток. Этот метод является одним из видов аддитивного производства и имеет ряд преимуществ над альтернативной технологией селективного лазерного плавления, среди которых высокая производительность, легкая реализация полиметаллических структур и возможность наплавления на любую криволинейную поверхность [1 – 4].

В процессе наплавки тонкостенных элементов на поверхность массивной детали возникают трудности, связанные с соблюдением их стабильной геометрии вследствие сильно меняющихся по мере роста высоты элемента тепловых полей. Вследствие этого, важной задачей является контроль размера ванны расплава, который зависит от количества подводимого тепла, температуры подложки и условий теплоотвода [5]. Этому направлению посвящено множество исследовательских работ.

Так, в работе [6] установлено, что размер ванны расплава и максимальная температура растут по мере увеличения количества слоев. В работе [5] исследовано влияние изменения кривизны и количества слоев тонкостенного контура на распределение температурного поля при прямом лазерном нанесении металла. Авторы этих работ на основании расчета и анализа эксперимента указывают на необходимость послойной корректировки мощности излучения для достижения равномерности толщины стенки при прямом выращивании тонкостенных объектов. В некоторых других работах также указывается существенная зависимость длительности термических циклов от высоты тонкой стенки, а также от ее расстояния до края стенки.

Вышеупомянутые работы по численному моделированию в основном сосредоточены на размере ванны расплава, максимальной температуре и термической истории во время процесса КЛП. Большинство авторов отмечали увеличение размера ванны расплава и степени переплавления предыдущего слоя при увеличении количества слоев, а неравномерность формы стенок связывается с постоянством значения мощности излучения. На данный момент ни один из авторов не предложил модели, позволяющей за счет варьирования мощности добиваться стабильного объема ванны

расплава при послойном выращивании тонкостенной геометрии.

Цель данной работы – получение уравнений зависимости мощности, необходимой для формирования ванны расплава с фиксированными размерами, в зависимости от переменных условий теплоотвода, которые моделируются с использованием программного обеспечения COMSOL. Результаты моделирования были опробованы при выращивании тонкой стенки с фиксированной и переменной мощностью.

## Численное моделирование

*Физическое описание процесса КЛП.* Тепловое моделирование в процессе КЛП характеризуется следующими явлениями: подвод тепла от лазерного источника к металлу, теплопроводностью между слоями и подложкой, конвективным теплообменом, лучистым теплоотводом в атмосферу. Теплопередача внутри слоя происходит за счет теплопроводности, конвекции и излучения в среду [7, 8].

Процесс выращивания стенок описывался включением теплопроводной дорожки на каждом новом слое. Дополнительно, на каждой дорожке была добавлена граница раздела металл/воздух, представленная как изменение теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности материала. Некоторые параметры модели и физические свойства материала приведены в табл. 1.

### 1. Параметры, используемые для численного моделирования

Параметр процесса	Величина
Размер подложки	60 мм×10 мм×3 мм
Размер слоя	40 мм×2 мм×0,3 мм
Мощность лазера	800 Вт
Скорость обработки	900 мм/мин
Диаметр пятна	1,6 мм
Материал	AISI 316L
Коэффициент излучения	0,8
Коэффициент поглощения	0,36
Температура плавления	1380 °C
Скрытая теплота плавления	300 кДж/Кг
Коэффициент тепловой конвекции	20 Вт/м <sup>2</sup> ·К
Теплоемкость (порошок)	480 Дж/(кг·К)
Теплоемкость (твердый металл)	780 Дж/(кг·К)
Теплопроводность (порошок)	10 Вт/(м·К)
Теплопроводность (твердый металл)	30 Вт/(м·К)

*Тепловое моделирование.* При моделировании температурного поля КЛП в качестве источника тепла для нагрева слоя порошка используется лазерный луч. Считалось, что граничная температура модели вдали от источника тепла, тепловое излучение на поверхности материала в области высоких температур и теплообмен с окружающей средой остаются неизменными. Поэтому моделирование температурного поля КЛП осуществлялось путем

выбора теплопередачи ( $ht$ ) в поле физики COMSOL и настройки источника тепла, температуры, теплового потока и диффузной поверхности. В процессе КЛП теплопроводность является основным способом отвода тепла.

Уравнение теплового равновесия для трехмерной теплопередачи в материале с изотропными тепловыми свойствами можно описать следующим образом:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = Q + \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·К;  $T$  – температура, К;  $t$  – время взаимодействия порошка и источника тепла, с;  $Q$  – тепловыделение на единицу объема, Вт/м<sup>3</sup>;  $k$  – теплопроводность, Вт/м·К.

Начальная температура для материала задана на уровне 293 К (20 °С) и записывается в виде:

$$T(x, y, z, t)_{t=0} = 293 \text{ (K)}. \quad (2)$$

Граничные условия для решения уравнения теплопроводности (1) имеют следующий вид:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} - q + q_c + q_r = 0 \quad (x, y, z) \in S, \quad (3)$$

где  $S$  – поверхность, с которой взаимодействует источник тепла  $q$ , а также осуществляется конвективный и излучательный теплообмен;  $n$  – вектор нормали к поверхности  $S$ ;  $q$  – тепловой источник описывается уравнением (6);  $q_c$  – тепловая конвекция;  $q_r$  – тепловое излучение.  $q_c$  и  $q_r$  можно выразить как:

$$q_c = h(T - T_0); \quad (4)$$

$$q_r = \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4), \quad (5)$$

где  $h$  – коэффициент тепловой конвекции (Вт/м<sup>2</sup>·К);  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана (5,67·10<sup>-8</sup> Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_0$  – температура окружающей среды (20 °С);  $\varepsilon$  – коэффициент излучения.

*Математическое описание источника энергии.* Интенсивность лазерного луча описывается гауссовым распределением:

$$q = \frac{2AP}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right), \quad (6)$$

где  $A$  – коэффициент поглощения энергии лазера материалом;  $P$  – мощность лазера;  $R$  – эффективный радиус лазерного пучка (расстояние от оси луча, на котором плотность энергии уменьшается до  $1/e^2$ );  $r$  – расстояние от точки на поверхности порошкового слоя до оси луча.

Расстояние  $r$  задается следующим уравнением (в случае движения луча только вдоль оси  $X$ ):

$$r^2 = (x - vt - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad (7)$$

где  $(x_0, y_0)$  – точка в зоне облучения на поверхности;  $v$  – скорость перемещения луча.

В качестве материала для моделирования была выбрана коррозионностойкая аустенитная сталь AISI 316L.

## Результаты и анализ

*Равномерность ширины детали по высоте.* На рис. 1 показаны тонкостенные детали с распределением температуры в различных слоях. Видно, что с увеличением количества слоев максимальная температура и размер ванны расплава растет.

На рис. 2 показано изменение объема ванны расплава с увеличением количества слоев во время процесса КЛП.

В начале слоя источник тепла движется слева направо, формируя наплавленный валик и нагревая подложку. При смене направления движения, объем ванны расплава сначала резко увеличивается и затем плавно достигает своего стационарного состояния, что связано с недостатком времени на остывание слоя в начале пути и наложением термических циклов. В верхних слоях этот эффект проявляется сильнее, и накапливается больше тепла. Как отмечено в публикациях других авторов с увеличением номера слоя предсказываемая температура возрастает. Повышение температуры связано с тем, что при нанесении первых нескольких слоев основной теплоотвод осуществляется в холодную массивную ку, а по мере роста количества слоев сечение для теплоотвода становится меньше, из-за чего теплота не успевает уходить в подложку.

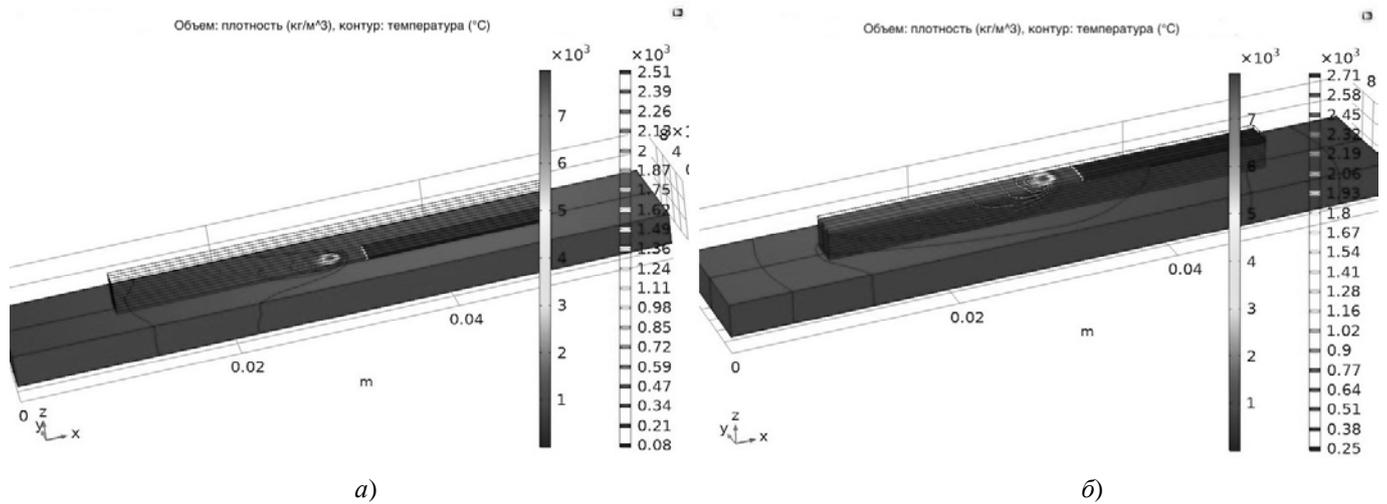


Рис. 1. Распределение температурного поля:  
а – 1-го слоя; б – 9-го слоя

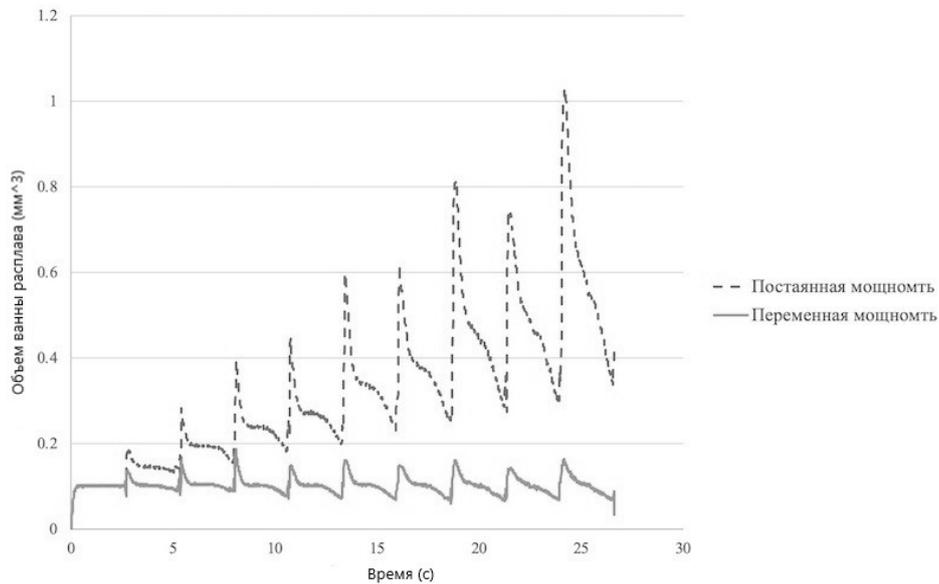


Рис. 2. Сравнение объема ванны расплава при наплавке с переменной и постоянной мощностью

Для сохранения устойчивого объема ванны расплава, необходимо сохранять баланс вводимого и отводимого тепла, чего в самом простом случае можно добиться путем выдерживания паузы между слоями, либо уменьшением количества вводимого тепла для каждого нового слоя. Наиболее целесообразно в данном случае изменять мощность лазера (рис. 2). При помощи программы для моделирования методом конечных элементов COMSOL получено уравнение, описывающее зависимость необходимой для поддержания стабильной ванны расплава мощности излучения в зависимости от номера слоя для приведенных выше входных параметров:

$$P = -113,8 \ln(n) + 796,49 \quad (8)$$

где  $P$  – мощность лазера;  $n$  – номер слоя.

График, описывающий данное уравнение представлен на рис. 3.

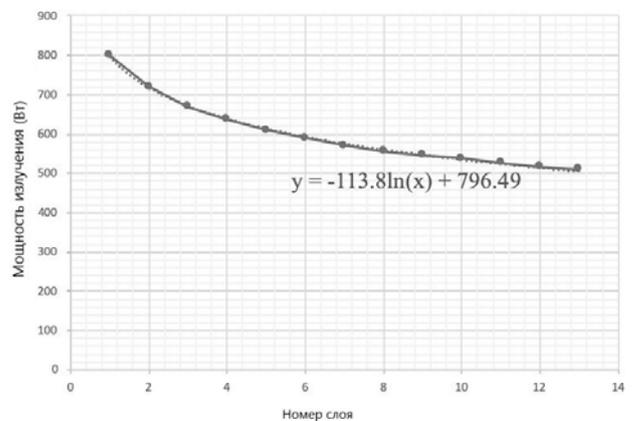
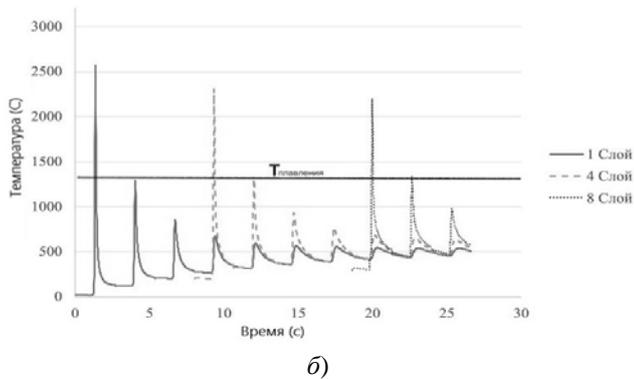
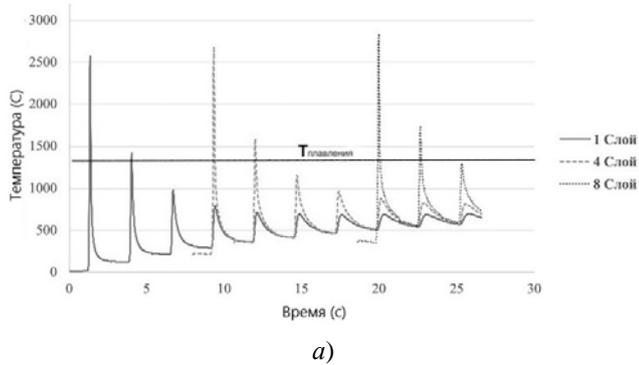


Рис. 3. График послойного изменения мощности лазерного источника

Зависимости на рис. 4, *а* показывают, что термические циклы в центральной точке в основании 1-го, 4-го и 8-го слоев представляют собой затухающие всплески максимальной температуры.



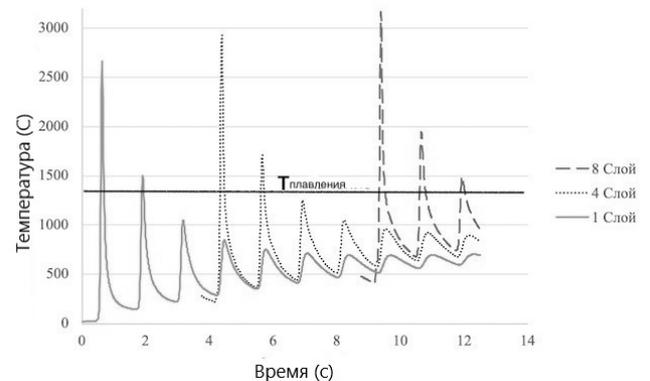
**Рис. 4. Термический цикл в 1-м, 4-м и 8-м слоях:**  
*а* – при постоянной мощности; *б* – при переменной мощности

При прохождении лазерного луча через исследуемую точку температура в ней мгновенно возрастает до максимального значения, превышающего температуру плавления (пересечение графиком температуры прямой, задающей уровень температуры плавления, равный 1380 °С, соответствует фазовому переходу в данной точке), а затем снижается. На графике видно несколько таких переходов для каждой исследуемой точки, что говорит о наличии повторного переплавления металла в них. Кроме того, заметна тенденция к росту максимальной температуры основного и повторного переплавления. Главным образом это связано с ухудшением условий теплоотвода. В некоторых работах зарубежных авторов показано, что по мере роста тонкостенной конструкции количество таких пиков, пересекающих уровень плавления, может возрастать.

Для достижения постоянной толщины тон-

кой стенки необходимо послойно уменьшать мощность излучения. На рис. 4, *б* видно, что, изменяя мощность в исследуемых точках обработки, можно избежать повторного переплавления, т.е. выровнять объем ванны расплава от слоя к слою.

Для моделирования влияния кривизны замкнутой траектории обхода на геометрию тонкостенной конструкции и тепловые поля при ее выращивании целесообразно использовать кольцевую схему перемещения как наиболее характерный частный случай. На рис. 5 горизонтальной линией отмечена температура плавления нержавеющей стали 316L, а остальными линиями – термические циклы в центральной точке 1-го, 4-го и 8-го слоев соответственно.



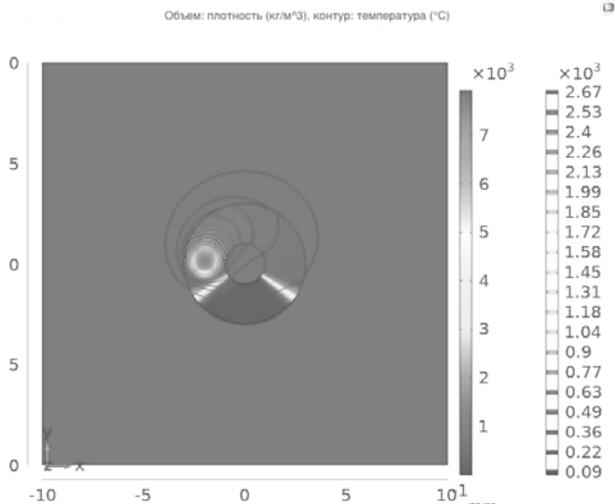
**Рис. 5. Термический цикл в 1-м, 4-м и 8-м слое тонкостенного цилиндра**

Сравнивая графики на рис. 4, *а* и рис. 5 можно увидеть, что в связи с более эффективным накоплением тепла при выращивании по замкнутой криволинейной траектории наблюдается возрастание количества переплавленных слоев в сравнении с выращиванием по прямым траекториям.

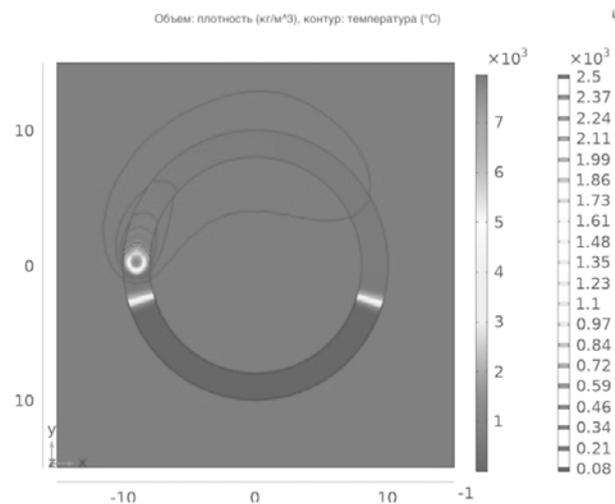
На рис. 6 показаны распределения температур при выращивании тонкостенных цилиндров радиусами 2 мм и 9 мм соответственно.

Видно, что с увеличением радиуса кривизны максимальная температура и площадь ванны расплава существенно уменьшаются. Задавая разные радиусы колец можно оценить влияние радиуса кривизны траектории на температуру и объем ванны расплава.

На рис. 7 показан рост объема ванны расплава в процессе выращивания на постоянной мощности лазера цилиндров с различными радиусами ( $R = 2, 3, 4, 6, 9$  и 15 мм).



а)



б)

Рис. 6. Распределение температурных полей в кольцевых траекториях радиусом:

а – 2 мм; б – 9 мм

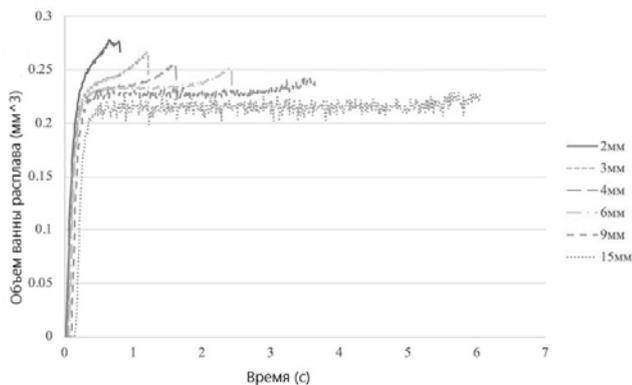


Рис. 7. Временная зависимость объема ванны расплава для разных радиусов

Установлено, что, начиная с определенного радиуса, объем ванны расплава перестает расти на всем промежутке времени. Фиксируя значение необходимого объема ванны рас-

плава можно рассчитать зависимость мощности от радиуса кривизны траектории наплавки. Такая зависимость, полученная для объема  $0,2 \text{ мм}^3$ , описывается уравнением:

$$P = 15,828 \ln(r) + 734,4 \quad (9)$$

где  $r$  – радиус кривизны дуги.

График, описывающий данное уравнение представлен на рис. 8.

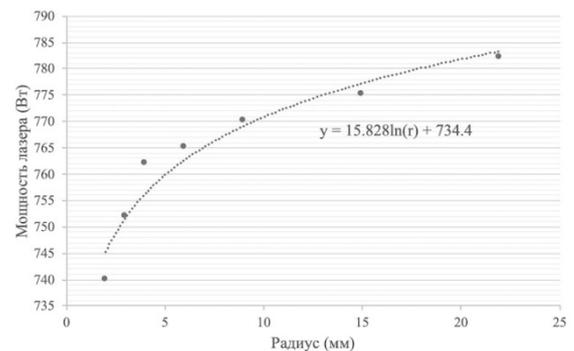


Рис. 8. Тенденция изменения мощности лазера в зависимости от радиуса траектории

## Материалы и методы

Для экспериментальной верификации модели и полученных результатов были изготовлены тонкостенные прямолинейные образцы. Эксперименты проводились на установке для выращивания методом коаксиального лазерного плавления КЛП-400, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана. В данном комплексе используется волоконный лазерный излучатель ЛС-3 с максимальной выходной мощностью 3 кВт. Порошок подается транспортировочным газом аргоном от питателя к лазерной технологической головке Precitec UC 52 коаксиально с лазерным лучом. Для защиты от окисления во время процесса также использовался поток аргона, направленный в место обработки. В качестве материала для наплавки использовался порошок из коррозионностойкой аустенитной стали AISI 316L с размером частиц от 53 до 150 мкм. Химический состав порошка приведен в табл. 2.

### 2. Химические свойства стали 316L

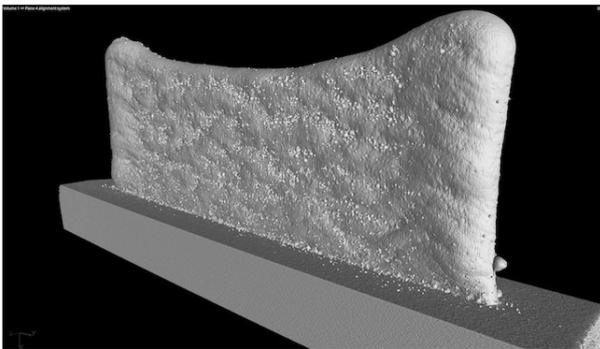
Марка	C	Si	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn
316L	≤ 0,03	0,8	Баланс	17,0	12,0	2,5	1,5

Траектория обработки и параметры процесса полностью соответствовали параметрам, используемым для моделирования, как показано в табл. 3.

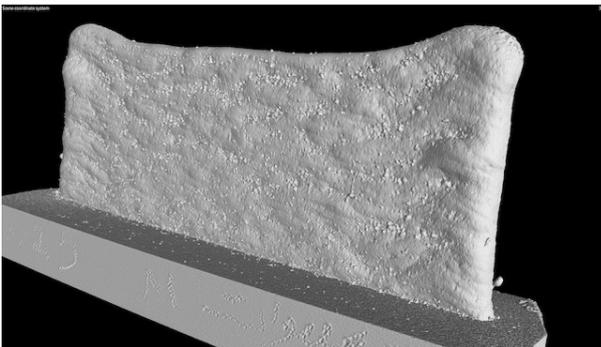
3. Параметры, используемые для эксперимента

Параметры	Значение
Мощность лазера	800 Вт
Расход пороша	9,93 г/мин
Скорость перемещения	900 мм/мин
Высота слоя	0,25 мм
Диаметр пятна	1,6 мм
Фокусное расстояние	200 мм
Зазор между соплом и подложкой	11,5 мм
Расход защитного газа (Ar)	12 л/мин
Расход транспортировочного газа (Ar)	15 л/мин

Образцы, состоящие из 60 слоев, выращивались в двух различных вариантах: с постоянной мощностью лазерного излучения и переменной мощностью, изменяемой от слоя к слою по закону, описанному уравнением (8). Полученные образцы были вырезаны из подложки и просканированы на аппарате для рентгеновской компьютерной томографии Phoenix v|tome|x m. В результате сканирования были получены изображения топографии поверхности (рис. 9) и поперечного сечения (рис. 10) тонких стенок для обоих случаев.



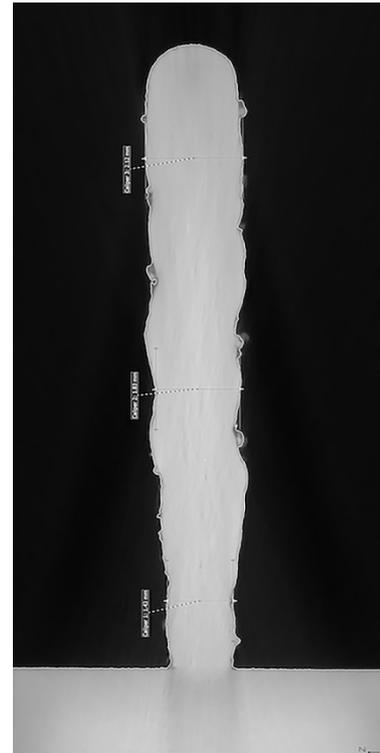
а)



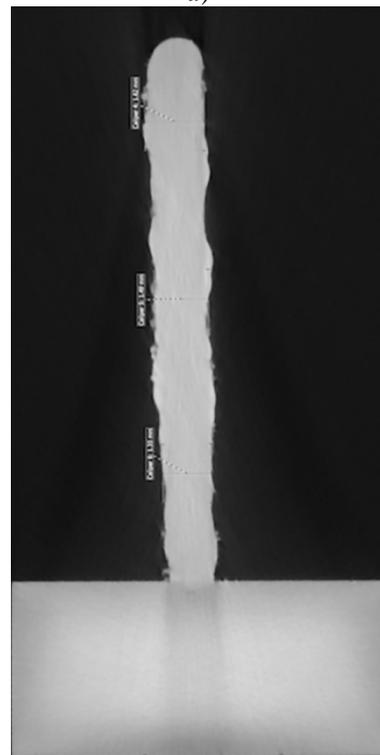
б)

Рис. 9. Общий вид тонкой стенки при выращивании:

а – с постоянной мощностью лазера; б – с переменной мощностью лазера



а)



б)

Рис. 10. Поперечные сечения тонкой стенки при выращивании:

а – с постоянной мощностью лазера; б – с переменной мощностью лазера

На образце, выращенном при постоянной мощности лазера равной 800 Вт (см. рис. 9, а),

наблюдается выраженная неравномерность высоты и толщины в центре и по краям образца [9]. Кроме того, в связи с повторным переплавлением слоев, его общая высота ниже по сравнению с высотой образца, полученного на переменной мощности. Также наблюдаются наплывы по краям из-за краевого дефекта [10]. Эффект утолщения стенки по ее краям связан с возвратно-поступательной схемой траектории наплавки и может быть минимизирован за счет применения однонаправленной схемы.

При выращивании стенки на постоянной мощности толщина стенки увеличивается по мере наплавления слоев материала за счет увеличения объема ванны расплава (см. рис. 10, а). Также с увеличением высоты стенки, интенсивность роста ее толщины снижается из-за изменяющихся условий теплоотвода. В начале процесса наплавка осуществлялась на холодную массивную подложку, что способствовало быстрому объемному отводу тепла. По мере роста количества слоев характер теплоотвода принимает двумерный вид, а его скорость снижается и после 10-го слоя изменяется незначительно. Таким образом, объем ванны расплава перестает расти, и толщина стенки становится неизменной.

На рис. 9, б и рис. 10, б представлен внешний вид и поперечное сечение образца, выращенного с переменной мощностью. Мощность изменялась на каждом слое в соответствии с уравнением (8). Анализ геометрии образцов показал существенное повышение однородности их толщины при выращивании их на переменной мощности. Толщина стенки остается почти неизменной по всей высоте, а ее общая геометрия более соответствует предполагаемой.

Таким образом, для поддержания стабильного объема ванны расплава по уравнениям (8), (9) для каждого слоя тонкостенной детали может быть рассчитан необходимый уровень мощности лазерного излучения. Объединив функции, проиллюстрированные на рис. 3 и рис. 8, можно добиться более равномерной толщины тонкостенной цилиндрической детали. Такой подход может быть востребован при аддитивном производстве сложных массивных деталей с наращиваемыми полыми тонкостенными элементами.

### Выводы

1. При неизменной мощности лазерного излучения максимальная температура и объем

ванны расплава возрастают, изменяя геометрические параметры поперечного сечения тонкостенных конструкций. На основе предложенной модели можно рассчитать значение мощности для каждого слоя, необходимое для поддержания постоянного объема ванны расплава.

2. Результаты экспериментальной проверки модели показали ее адекватность и возможность применения для подготовки управляющих программ для конкретных деталей.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И., Третьяков, Р.С. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.

2. Shojarazavi, R. Additive construction with direct laser deposition, First. Tehran: Malek-Ashtar University of Technology, 2019.

3. Direct Laser Fabrication process with coaxial powder projection of 316L steel. Geometrical characteristics and microstructure characterization of wall structures / H.El. Cheikh, B. Courant et al. // Opt. Lasers Eng. – 2012. – vol. 50, no. 12, pp. 1779-1784.

4. Toyserkani, E., Khajepour, A., Corbin, S. Laser Cladding // Laser Cladding, 2017. vol. 11, no. 2.

5. Numerical simulation of thermal behavior during laser direct metal deposition / G. Zhu, A. Zhang et al. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2011. – vol. 55. – no. 9-12, pp. 945-954.

6. Liu, Y., Zhang, J., Pang, Z. Numerical and experimental investigation into the subsequent thermal cycling during selective laser melting of multi-layer 316L stainless steel // Opt. Laser Technol., 2018, vol. 98, pp. 23-32.

7. Мианджи, З., Холопов, А.А. Численное и экспериментальное исследования тепловых процессов при выращивании тонкостенных деталей методом коаксиального лазерного плавления металла из нержавеющей стали 316L // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – Вып. 7. – С. 19-29.

8. Хоменко, В. Сопряженные процессы теплопереноса, конвекции и формирования микроструктуры при лазерной наплавке с коаксиальной подачей металлических порошков: автореферат. дис. канд. тех. наук. Москва, 2019.

9. Мианджи, З., Таксанц, М.В., Холопов, А.А. Регрессионные модели показателей технологического процесса послойного выращивания изделия из порошка стали 316L методом коаксиального лазерного плавления // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – Вып. 6. – С. 13-22.

10. Захра, М., Холопов, А.А., Мисюров, А.И., Мельникова, М.А. Особенности получения тонкостенных структур из нержавеющей стали методом коаксиального лазерного плавления: Сборник Электронно-лучевая сварка и смеж-

ные технологии. Материалы третьей международной конференции. – 2020. – С. 350-357.

## REFERENCES

1. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I., Tretyakov, R.S. Laser additive technologies in mechanical engineering. Moscow: Publ. House of Bauman Moscow State Technical University, 2018
2. Shojarazavi, R. Additive construction with direct laser deposition, First. Tehran: Malek-Ashtar University of Technology, 2019
3. Direct Laser Fabrication process with coaxial powder projection of 316L steel. Geometrical characteristics and microstructure characterization of wall structures / H.El. Cheikh, B. Courant et al. // Opt. Lasers Eng. – 2012. – vol. 50, no. 12, pp. 1779-1784.
4. Toyserkani, E., Khajepour, A., Corbin, S. Laser Cladding // Laser Cladding, 2017. vol. 11, no. 2.
5. Numerical simulation of thermal behavior during laser direct metal deposition / G. Zhu, A. Zhang et al. // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2011. – vol. 55. – no. 9-12, pp. 945-954.
6. Liu, Y., Zhang, J., Pang, Z. Numerical and experimental investigation into the subsequent thermal cycling during selective laser melting of multi-layer 316L stainless steel // Opt. Laser Technol., 2018, vol. 98, pp. 23-32.
7. Miandzhi, Z., Kholopov, A.A. Numerical and experimental studies of thermal processes in the cultivation of thin-walled parts by the method of coaxial laser melting of metals made of 316L stainless steel / News of higher educational institutions, Mashinostroenie, 2021, Issue 7, pp. 19-29.
8. Khomenko, V. Adjoint processes of heat transfer, convection and microstructure formation during laser surfacing with coaxial feeding of metal powders. Extended Abstract of Ph.D. Thesis, Moscow, 2019.
9. Miandzhi, Z., Taxants, M.V., Kholopov, A.A. Regression models of technological process indicators for layer-by-layer cultivation of a 316L steel powder product by coaxial laser melting / News of higher educational institutions, Mashinostroenie, 2021, Issue 7, pp. 19-29.
10. Zahra, M., Kholopov, A.A., Misyurov, A.I., Melnikova, M.A. Features of obtaining thin-walled structures from stainless steel by coaxial laser melting. / Electron beam welding and related technologies. Proceedings of the Third International Conference, 2020, pp. 350-357.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.01.2022; одобрена после рецензирования 28.01.2022; принята к публикации 29.02.2022.

The article was submitted 12.01.2022; approved after reviewing 28.01.2022; accepted for publication 29.22.2022.

