

## Моделирование формирования дорожки сканирования в процессе селективного лазерного сплавления стали 316L

А.А. Гайна<sup>1\*</sup> А.А. Можайко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, институт электроники и телекоммуникаций, инфокоммуникационные технологии и системы связи  
Россия, 194064, Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 29

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей»  
Россия, 191015, Санкт-Петербург, Шпалерная улица, д. 49  
(Поступила в редакцию 22.05.2024; подписана в печать 16.07.2024)

Селективное лазерное сплавление (СЛС) — это один из процессов аддитивного производства, который позволяет изготавливать сложные детали с высокой точностью путем плавления порошка слой за слоем с использованием лазерного излучения (ЛИ). Целью данного исследования является изучение влияния различных параметров ЛИ на размеры ванны расплава в образце. Для этого изменяются такие параметры ЛИ, как мощность, скорость сканирования и диаметр фокусного пятна. Исследования проводятся с использованием, как численных методов, так и эксперимента. Программное обеспечение COMSOL Multiphysics применяется для моделирования и прогнозирования свойств материалов и поведения системы. По результатам моделирования построены графики зависимостей размеров ванны расплава от изменяемых параметров. При увеличении мощности размеры ванны расплава увеличивались, при увеличении скорости сканирования увеличивалась только длина ванны расплава, а ширина и глубина уменьшались, при увеличении диаметра фокусного пятна размеры ванны расплава сначала увеличивались, а затем начинали уменьшаться. Экспериментальные данные, полученные путём измерения размеров ванны расплава при различных настройках расширения луча, соответствуют результатам, полученным с помощью моделирования. Это исследование помогает лучше понять процесс СЛС и может быть использовано для оптимизации параметров обработки с целью достижения желаемых свойств образцов.

PACS: 07.05.Tr; 42.62.-b

УДК: 536.3; 536.4

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, моделирование теплопередачи методом конечных элементов, аустенитная сталь, ванна расплава.

### ВВЕДЕНИЕ

Увеличение спроса на индивидуальные компоненты и легкие конструкции в промышленности привело к росту интереса к аддитивному производству (АП). С помощью АП можно создавать трехмерные объекты, наращивая их слой за слоем. Среди различных технологий АП селективное лазерное сплавление (СЛС) является одним из самых распространённых для построения металлических деталей [1]. Процесс СЛС заключается в послойном сплавлении металлических порошков под действием ЛИ с высокой плотностью энергии. Слой порошка распределяется на твердой подложке, после чего происходит плавление под действием ЛИ. При плавлении образуется ванна расплава, морфология которой влияет на микроструктуру готового изделия [2].

Кроме того, для некоторых материалов, таких как нержавеющая сталь 316L, деталь, изготовленная с использованием технологии СЛС, может превосходить по механическим свойствам детали, изготовленные литьем и ковкой [3]. Полученные с помощью СЛС изделия широко используются в биомедицинской, аэрокосмической, энергетической и автомобильной промышлен-

ности [4]. Однако на качество детали, изготовленной СЛС, влияет большое количество параметров, управление которыми требует больших затрат временных ресурсов.

На сегодняшний день уже были проведены исследования влияния параметров ЛИ на морфологию ванны расплава. Мощность лазера является одним из наиболее влияющих параметров процесса, который необходимо учитывать [5]. Увеличение мощности лазера, а также снижение скорости луча приводят к значительному повышению температуры и увеличению размеров ванны расплава [6]. Величина диаметра лазерного пучка может привести к нестабильности морфологии ванны расплава и, соответственно, процесса СЛС. При использовании лазера большого диаметра качество поверхности может снижаться из-за появления дефектов в результате не полного расплавления порошкового слоя. Кроме того, слишком малый диаметр лазерного луча может привести к испарению металла и режиму «замочной скважины» [7].

В данной статье исследованы более широкие диапазоны значений параметров (мощности ЛИ, скорости сканирования и диаметра фокусного пятна), а также использовано современное ПО для моделирования. Проведены исследования различных режимов ЛИ для оптимизации скорости и качества построения. Таким образом, целью данной работы является определение зависимости размеров ванны расплава от парамет-

\* gajna.aa@edu.spbstu.ru

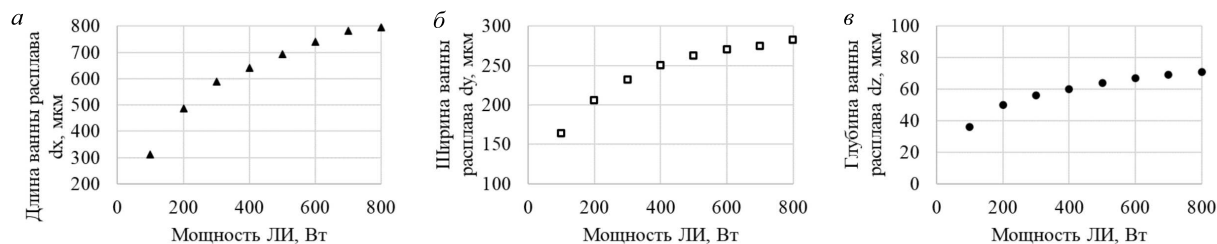


Рис. 1. Зависимости длины (а), ширины (б) и глубины (в) ванны расплава от мощности ЛИ

ров ЛИ, таких как мощность, скорость сканирования и диаметр лазерного луча.

На первом этапе моделируется процесс СЛС и исследуются зависимости размеров ванны расплава от параметров ЛИ. На втором этапе происходит сравнение результатов моделирования с экспериментальными образцами.

В данной работе для моделирования использовался пакет COMSOL Multyphysics 6.0 [8, 9]. Его преимуществом является широкий набор функций, позволяющий создать модели, с высокой точностью воспроизводящие реальные физические процессы. В модели задаются все необходимые параметры образца (размеры, материал, окружающая среда), параметры ЛИ (стратегия сканирования, мощность, скорость сканирования и диаметр фокусного пятна), а также тепловое воздействие ЛИ на поверхность образца. По результатам моделирования было получено распределение температур в исследуемом образце [10].

## 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве основного инструмента расчета процесса селективного лазерного сплавления выбран конечно-элементный пакет COMSOL Multiphysics. Был построен образец с размерами  $6 \times 3 \times 2$  мм. В качестве материала при моделировании использовалась сталь 316L. Данный сплав отличается улучшенными антикоррозионными свойствами, сопротивляемостью к ползучести, прочностью и возможностью эксплуатации в агрессивных средах. Он широко используется в аэрокосмической, медицинской и автомобильной промышленности. В модели физические характеристики материала, такие как теплопроводность, теплоемкость задаются нестационарными по температуре. Теплоперенос описывается уравнением теплопроводности. На границах образца заданы условия конвективного и радиационного теплообмена, при достижении температуры кипения задается поток пара с поверхности. Более подробное математическое описание модели представлено в ранее написанных статьях [10, 11].

Были рассмотрены различные режимы с изменением мощности ЛИ, скорости сканирования и диаметра лазерного пучка. Они представлены в таблице.

Оценка размеров ванны расплава проводится с использованием значений поверхностной плотности энергии,

которая рассчитывается по формуле:

$$E_d = P / (v \cdot d_{spot}). \quad (1)$$

При проведении эксперимента в качестве исходного материала использовался порошок аустенитной нержавеющей стали марки 321 с дисперсностью 0–60 мкм. Опытные образцы были изготовлены методом СЛС с использованием установки EOSINT M270, в которой был установлен расширитель луча для изменения диаметра фокусного пятна ЛИ. Были изготовлены три партии образцов с различными значениями расширения луча, соответствующими диаметру лазерного пятна в фокальной плоскости: 1, 2 и 4.5. Микроструктурный анализ проводился с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены зависимости размеров ванны расплава от мощности ЛИ. При увеличении мощности увеличиваются и размеры ванны расплава. Из таблицы видно, что с увеличением мощности увеличивается плотность энергии, что приводит к более интенсивному нагреву материала. При дальнейшем увеличении мощности ЛИ наблюдается затухающая зависимость размеров ванны расплава. Это может быть связано с кипением и последующим испарением материала как в глубине, так и на поверхности.

На рис. 2 представлены зависимости размеров ванны расплава от скорости сканирования. При увеличении скорости сканирования плотность энергии уменьшается (таблица), из-за чего ширина и глубина ванны расплава уменьшаются. При этом длина ванны расплава увеличивается, что может быть связано с тем, что скорость застывания ванны расплава меньше скорости сканирования.

На рис. 3 представлены зависимости размеров ванны расплава от диаметра фокусного пятна лазера. При увеличении диаметра лазерного пучка (до 200 мкм) увеличиваются в основном ширина и длина ванны расплава из-за увеличения области воздействия и малого изменения плотности энергии. В то же время глубина почти не меняется. Это может быть связано с кипением материала. В дальнейшем при увеличении диаметра фокусного пятна лазера все размеры ванны расплава уменьшаются из-за уменьшения плотности энергии (1).

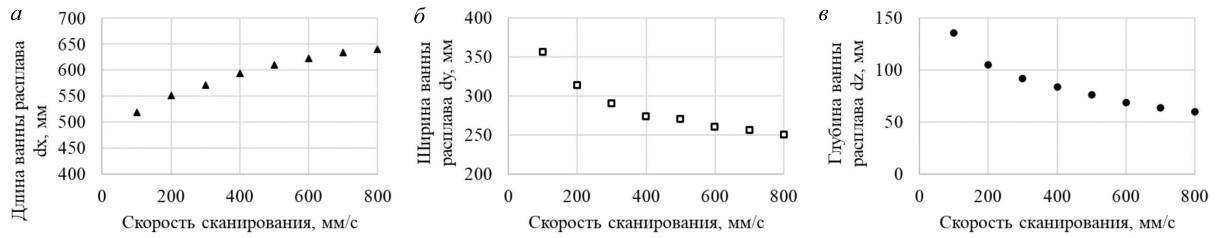


Рис. 2. Зависимости длины (а), ширины (б) и глубины (в) ванны расплава от скорости сканирования

Таблица. Таблица характеристик исследуемых режимов

№ режима	Мощность $P$ , Вт	Скорость сканирования $v$ , мм/с	Диаметр фокусного пятна $d_{spot}$ , мкм	Плотность энергии, $E_d$ Дж/мм <sup>2</sup>
1	100	800	100	1.25
2	200			2.50
3	300			3.75
4	400			5.00
5	500			6.25
6	600			7.50
7	700			8.75
8	800			10,00
9	400	100	100	40.00
10		200		20.00
11		300		13.33
12		400		10.00
13		500		8.00
14		600		6.67
15		700		5.71
16		800		5.00
17	200	800	50	5.00
18			100	2.50
19			150	1.67
20			200	1.25
21			250	1.00
22			300	0.83

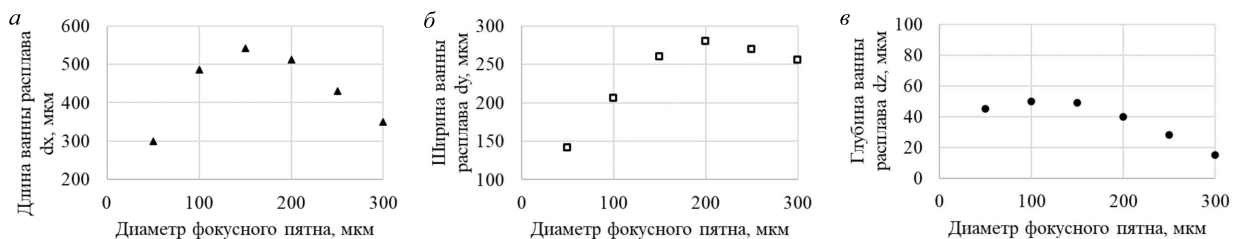


Рис. 3. Зависимости длины (а), ширины (б) и глубины (в) ванны расплава от диаметра фокусного пятна лазера

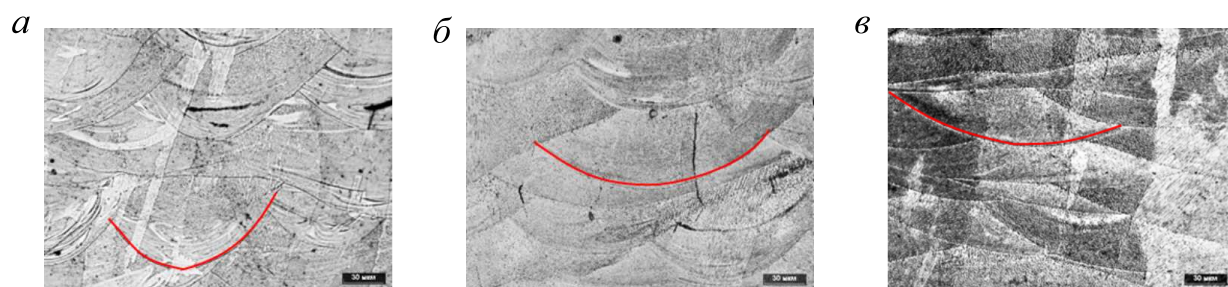


Рис. 4. Влияние диаметра фокусного пятна лазера на геометрию ванны расплава с расширением луча в *a* — 1, *b* — 2 и *v* — 4.5 раза

В ходе работы был также проведен эксперимент [12] по исследованию зависимости глубины и ширины ванны расплава от диаметра фокусного пятна. На рис. 4 красными линиями показана полученная в образцах форма ванны расплава в поперечном сечении. В ходе эксперимента нельзя точно указать размер фокусного пятна. Происходило увеличение в 2 и 4.5 раза. Можно заметить, что при изменении диаметра фокусного пятна в 2 раза значительно уменьшается глубина ванны расплава и увеличивается ширина. Далее при изменении диаметра фокусного пятна в 4.5 раза глубина продолжает уменьшаться, ширина изменяется незначительно. Данные результаты согласуются с зависимостями, полученными при моделировании.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был изучен процесс формирования дорожки сканирования в процессе СЛС стали марки 316L экспериментальным и численным методом. Исследования размеров ванны расплава осуществлялись

путем регулирования мощности лазера, скорости сканирования и диаметра фокусного пятна лазера. На основании проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Размеры ванны расплава увеличивались при увеличении мощности лазера.
2. Ширина и глубина ванны расплава уменьшались, а длина увеличивалась при увеличении скорости сканирования.
3. В ходе эксперимента было выявлено, что с увеличением диаметра фокусного пятна лазера глубина ванны расплава уменьшалась, а ширина увеличивалась. Это соответствовало малым значениям диаметра (до 100–200 мкм) при моделировании. При малом значении диаметра фокусного пятна, ширина и длина изменялись пропорционально изменяемому параметру, а глубина практически не менялась из-за кипения материала. С дальнейшим увеличением диаметра пятна размеры ванны расплава уменьшались.

- 
- [1] *Gatoes D., Alves R., Alves B., Vieira M.T.* // *Materials*. **15**, N 21. 7575. (2022).
  - [2] *Caffrey T., Campbell I., Wohlers T.* *Wohlers Report 2016-3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Fort Collins, 2016.
  - [3] *Bartolomeu F., Buciumeanu M., Pinto E. et al.* // *Additive Manufacturing*. **16**. 81 (2017).
  - [4] *Bahl S., Mishra S., Yazar K.U. et al.* // *Additive Manufacturing*. **28**, 65 (2019).
  - [5] *Prashanth K.G., Scudino S., Maity T. et al.* // *Materials Research Letters*. **5**, N 6. 386 (2017).
  - [6] *Kazemi Z., Soleimani M., Rokhgireh H., Nayebi A.* // *International Journal of Thermal Sciences*. **176**. 107538. (2022).
  - [7] *Zamindar N.* *Thermal simulation of selective laser melting made components*. Diss. Politecnico di Torino, 2021.
  - [8] *Pryor R.W.* *Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach*. Jones & Bartlett Publishers, 2009.
  - [9] *Bayat M., Mohanty S., Hattel J.H.* // *COMSOL Conference*, 2018.
  - [10] *Kuznetsov P., Mozhayko A., Shakirov I. et al.* // *Advanced Additive Manufacturing*. 187. (2022).
  - [11] *Можайко А.А., Геращенко Д.А., Старицын М.В.* // *Вопросы материаловедения*. **110**, № 2. 44 (2022).
  - [12] *Shakirov I., Kuznetsov P., Staritsyn M. et al.* // *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences. **315**. 13001. (2020).

## Modeling of the scanning track formation in the selective laser melting process of 316L steel

A.A. Gajna<sup>1,a</sup>, A.A. Mozhaiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of electronics and telecommunications, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
St. Petersburg 194064, Russia*

<sup>2</sup>*«Kurchatov Institute» – Central Research Institute of KM «Prometheus»  
St. Petersburg 191015, Russia  
E-mail: <sup>a</sup>gajna.aa@edu.spbstu.ru*

Selective laser melting (SLM) is a process that allows to create complex parts with high precision. It involves melting the powder layer by layer using laser radiation to create a solid object. The purpose of this research is to study how different laser parameters affect the size of the melt pool size in the sample. To achieve this goal, the power, scanning speed and diameter of the focal spot of the laser are adjusted. It is reached through numerical modeling and experimental methods. COMSOL Multiphysics model material properties and system behavior. The results of the simulation are graphs of the dependence of the melting zone on the variable parameters. With increasing laser power, the size of the melting zone also increases. As the scanning speed increases, only the length of the zone increases, while the width and depth decrease. Increasing the size of the focal spot first increases the size, but then begins to reduce them. The experimental data obtained because of measuring the dimensions corresponds to the simulation results. This research helps to better understand the SLM process and can be used to optimize processing parameters to achieve desired sample properties.

PACS: 07.05.Tr; 42.62.Cf.

*Keywords:* selective laser melting, finite element heat transfer modeling, austenitic steel, melt pool.

*Received 22 May 2024.*

### Сведения об авторах

1. Гайна Анна Алексеевна — студент; e-mail: gajna.aa@edu.spbstu.ru.
2. Можайко Анна Анатольевна — инженер; тел.: (812) 335-58-44, e-mail: annaanna-1996@mail.ru.