

УДК 621.375

doi: 10.18698/0536-1044-2021-6-13-22

Регрессионные модели показателей технологического процесса послойного выращивания изделия из порошка стали 316L методом коаксиального лазерного плавления

З. Мианджи, М.В. Таксанц, А.А. Холопов, А.И. Мисюров

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Regression Models of Technological Process Indicators for Layer-by-Layer Product Growth of a 316L Steel Powder by Coaxial Laser Melting

Z. Miandji, M.V. Taksanc, A.A. Kholopov, A.I. Misyurov

Bauman Moscow State Technical University

Коаксиальное лазерное плавление — это аддитивный метод производства металлических деталей, позволяющий существенно уменьшить время изготовления и себестоимость изделий сложной геометрии при единичном и мелкосерийном производстве, а также сократить потери материала при механической обработке. Типичными объектами этой технологии служат детали, содержащие тонкостенные структуры. Определение параметров режима коаксиального лазерного плавления при выращивании таких структур в условиях изменяющегося теплоотвода является непростой задачей, а многочисленные работы, посвященные анализу влияния технологических параметров процесса на геометрию формообразующих валиков, достаточно противоречивы и не всегда учитывают ограниченную теплоемкость тонких стенок. На основании результатов эксперимента с использованием метода математического планирования получены регрессионные модели расчета размеров верхних формообразующих валиков для тонкостенных конструкций из коррозионно-стойкой стали 316L. Установлена связь основных параметров режима коаксиального лазерного плавления с геометрическими характеристиками единичных валиков. Выявлена полная корреляция экспериментальных и расчетных данных, а также высокая точность предсказания результатов. Анализ регрессионных зависимостей выявил оптимальный режим коаксиального лазерного плавления, позволяющий получить максимальную площадь сечения при минимальном проплавлении подложки.

Ключевые слова: послойное выращивание, регрессионные модели, сталь 316L, коаксиальное лазерное плавление, тонкостенная структура

Coaxial laser melting is a method of manufacturing metal parts related to additive manufacturing processes significantly reducing the manufacturing time and cost of complex geometry parts in single and small batch production, as well as reducing material losses during machining. The typical objects of this technology are parts containing thin-walled structures. Determining coaxial laser melting regimes of such structures when grown under conditions of varying heat sink is a daunting task, and numerous papers devoted to the analysis of the influence of process parameters on the geometry of the forming clads are contradictory and do not always take into account the limited heat capacity of the thin walls.

Based on the results of the experiment using the mathematical planning method, regression models for calculating the dimensions of the upper forming clads for thin-walled structures made of corrosion-resistant steel 316L were obtained. The relationship between the main parameters of the coaxial laser melting regime and the geometric characteristics of single clads has been established. A complete correlation of the experimental and calculated data was found, as well as a high accuracy in predicting the results. The analysis of regression characteristics allowed finding the optimal regimes of coaxial laser melting i.e. the maximum cross-sectional area with the minimum substrate penetration.

Keywords: layered growing, regression models, 316L steel, coaxial laser melting, thin-wall

Аддитивные технологии или технологии послойного синтеза — динамично развивающееся направление цифрового производства. Одним из процессов аддитивного производства является коаксиальное лазерное плавление (КЛП). По сути, это процесс объемной лазерной наплавки, позволяющий получить объекты последовательным послойным нанесением металла по заданному контуру [1, 2].

Построение объекта происходит послойно по компьютерным моделям, созданным с помощью систем трехмерного моделирования (3D CAD). Деталь разбивается на тонкие слои. В процессе изготовления лазерный луч совершает перемещение относительно подложки по программируемой траектории. Одновременно в зону обработки через специальное сопло коаксиально лазерному лучу подается порошок. При переплаве присадочного материала получается наплавленный слой. Далее слой за слоем формируется деталь.

Этот метод позволяет создавать изделия любой степени сложности из широкого спектра материалов. Такой процесс можно использовать для изготовления деталей или их ремонта, а также для получения покрытий со специальными свойствами или формирования объемных элементов на подложке [3, 4].

При решении практических задач по созданию деталей стремятся обеспечить максимальный объем наплавленного металла, определяемый размерами и формой наплавленного валика в условиях минимизации глубины подплавления основы. Особенно это важно при выращивании тонкостенных изделий в условиях сильно изменяющегося теплоотвода. Таким образом, для назначения режима лазерной наплавки требуются знания о влиянии его параметров на размеры формообразующего валика.

Анализу влияния технологических параметров на размеры формообразующих валиков и их свойствам посвящено достаточно большое

количество работ. Исследования проводили для порошков различного состава. Это порошки на основе железа с различным фазовым составом [5, 6], никеля [7, 8], кобальта [9, 10], титана [11], цветных металлов и сплавов [12].

Установлено, что в зависимости от режима КЛП форма наплавленных валиков претерпевает существенные изменения. У большинства авторов основные закономерности связи размеров получаемого валика совпадают с параметрами режима. Они сохраняются практически для порошков всех составов, но абсолютные значения установленных размеров различаются.

В работе [3] получены соотношения между размерами и параметрами режима для порошка на основе железа Metco 42С. При постоянных значениях расхода порошка и мощности излучения с повышением скорости наплавки высота и ширина валика снижаются, а глубина подплавления основы возрастает. Увеличение мощности излучения вызывает возрастание размеров валика, а повышение расхода порошка приводит к закономерному, почти линейному росту высоты и снижению глубины подплавления при неизменной ширине.

Аналогичные соотношения получены в работе [8] для сплавов на никелевой основе. Это также совпадает с результатами работы [13] для наплавленных дорожек из порошка на основе кобальта Стеллит-6. Подобные результаты получены и для стали 316L [14].

Следует отметить, что степень влияния параметров КЛП на размеры валика у разных авторов несколько различается. Некоторые авторы отмечают, что при определенном сочетании параметров режима может происходить резкое (почти скачкообразное) изменение размеров валиков.

В некоторых случаях существует противоречие в полученных данных. Так, в работе [15] для порошка нержавеющей стали 316L отмечено, что ширина валика зависит только от диа-

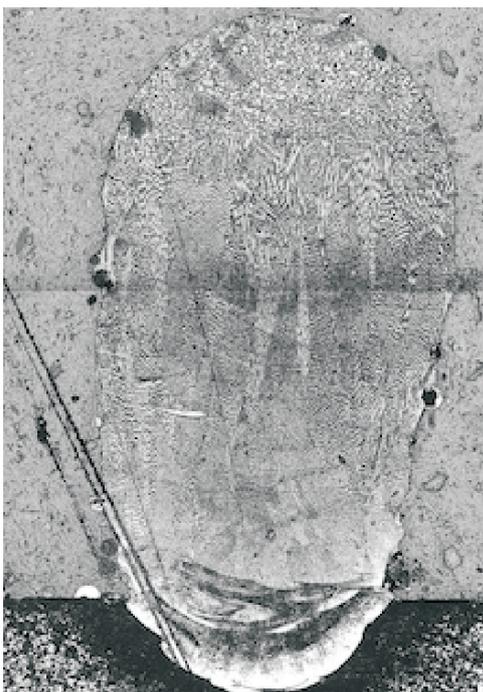


Рис. 1. Микрофотография, подтверждающая увеличение размеров валика в процессе выращивания тонкой стенки

метра пятна и расхода порошка, а глубина подплавления основы не зависит от скорости наплавки.

В статье [16] установлено, что с изменением скорости выращивания ширина валика остается постоянной, она зависит только от диаметра пятна и расхода порошка. В работе [14], напротив, показано что ширина и глубина подплавления основы увеличиваются с ростом

мощности лазера, причем ширина более чувствительна к ней.

Существует разница во взглядах авторов публикаций [15] и [13] на зависимость глубины подплавления от скорости наплавки. Первые в отличие от вторых полагают, что увеличение скорости наплавки приводит к значительному уменьшению глубины проникновения. Таким образом, существующие противоречия затрудняют выбор и назначение режимов КЛП.

Кроме того, большинство авторов исследовали формирование единичного валика на подложке, что не соответствует тепловой обстановке при построении тонкой стенки. Действительно, как видно из рис. 1, по мере роста стенки до некоторого предела увеличиваются размеры формообразующего валика. То же наблюдали и авторы работы [17].

Цель работы — установление связи основных параметров режима КЛП с геометрическими характеристиками единичных валиков для тонкостенных конструкций из стали 316L.

Материалы и оборудование. *Материалы.* Исследования проводили на порошковом материале состава AISI 316L, представляющего собой коррозионно-стойкую аустенитную сталь. Это распространенный конструкционный материал, широко используемый в промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости в сочетании с достаточными прочностными и пластическими свойствами [18].

Выбранный порошок с частицами диаметром 53...150 мкм имеет следующий химический

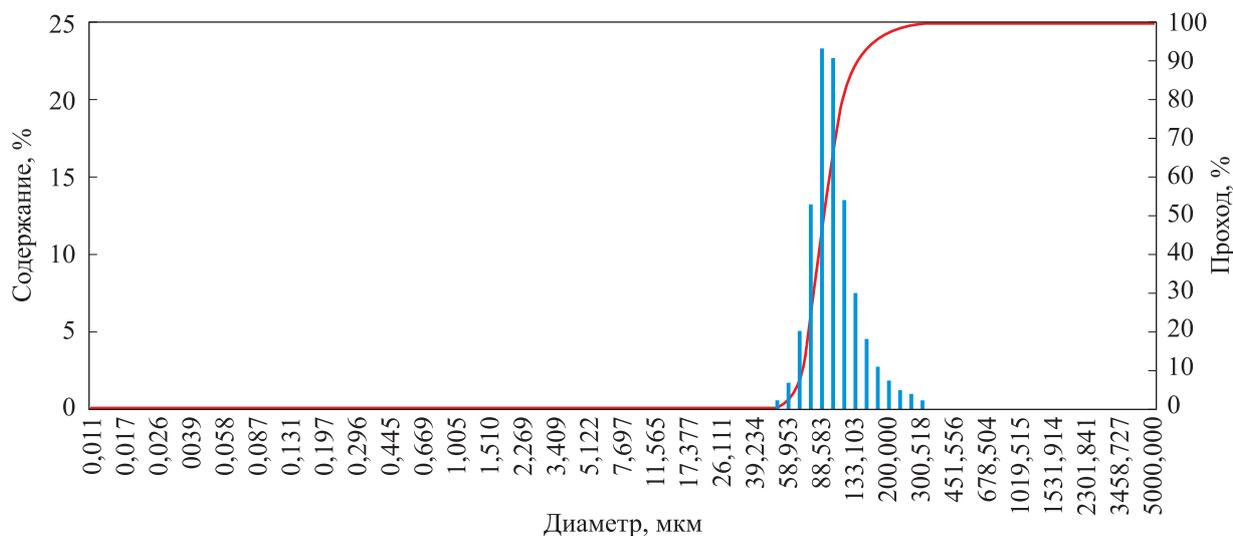


Рис. 2. Гранулометрический состав стального порошка: — содержание; — проход

состав, %: С ≤ 0,03; Si — 0,8; Fe — основа; Cr — 17,0; Ni — 12,0; Mo — 2,5; Mn — 1,5.

На рис. 2 показан гранулометрический состав стального порошка, форма которого приближается к сферической.

Оборудование. Эксперименты по исследованию формообразования наплавленных валиков проводили на установке КЛП-400, оснащенной волоконным лазером ЛС-5 [19]. Подача порошка осуществлялась транспортирующим газом аргоном из питателя в лазерную технологическую голову Precites UC 52 соосно лазерному лучу. В качестве защитного газа также использовали аргон.

Форму и размеры валиков определяли на поперечных шлифах, вырезанных из выращенных образцов, с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX51 при увеличении ×10.

Экспериментальная процедура. Для построения тонкостенных структур параметры режима КЛП варьировали в следующих диапазонах: мощность лазерного излучения $P = 425 \dots 800$ Вт, скорость наплавки $v = 800 \dots 1000$ мм/мин, расход порошка $R = 6,20 \dots 9,93$ г/мин. Сопло наплавочной головы располагали над подложкой на высоте 11,5 мм.

Диапазоны варьирования параметров режима КЛП были выбраны в соответствии с литературными данными и результатами предварительных экспериментов из условия каче-

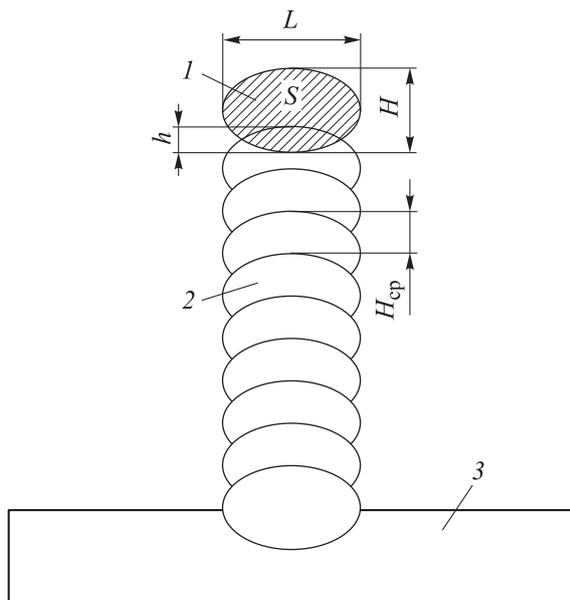


Рис. 3. Схема строения тонкостенных структур:
1 — сечение верхнего единичного валика;
2 — тонкая стенка; 3 — подложка

ственного формирования наплаваемого единичного валика.

При большой мощности лазерного излучения и малых значениях скорости движения луча и подачи порошка наблюдалось кипение жидкой ванны и нарушение стабильности формы валика. При небольшой мощности лазерного излучения и высоких значениях скорости и подачи порошка валик не формировался.

Выращенная стенка содержала десять слоев. Построение осуществляли без перемещения сопла по вертикальной оси Z в процессе выращивания. Процесс проводили в защитной атмосфере аргона. В качестве подложки использовали пластины толщиной 5 мм из стали 3.

После выращивания тонкой стенки на поперечных шлифах измеряли высоту H , ширину L и глубину проплавления h последнего валика. Глубину проплавления получали из разницы между высотой последнего слоя и средней высотой слоя H_{cp} , как показано на рис. 3.

Результаты и анализ. Математическая обработка экспериментальных результатов.

Для построения математических регрессионных моделей проводили полнофакторный эксперимент, в котором мощность лазерного излучения P , расход порошка R и скорость наплавки v варьировали на трех уровнях при определении высоты формируемого валика H , мм, площади его поперечного сечения S , мм², глубины проплавления h , мм, коэффициента использования порошка КИП, %, и на пяти уровнях при нахождении ширины L , мм. Измерения выполняли для последнего валика, при этом в каждой точке плана эксперимент дублировали пять раз.

В зависимости от параметров режима КЛП форма наплавленных валиков претерпевает существенные изменения. Можно получить большое количество наплавленного металла при малом проплавлении основы. Существуют режимы КЛП, на которых глубина проплавления основы резко возрастает. Есть область режима, где не наблюдается качественного формирования наплавленного валика.

Обработку данных выполняли по стандартной методике: экспериментальные данные усредняли и определяли дисперсии по параллельным экспериментам. Также проводили проверку воспроизводимости экспериментов по критерию Кохрена и их средних ошибок.

На первом этапе расчета использовали регрессионную модель

$$Y = b_0 + b_1v + b_2P + b_3R + b_4vP + b_5vR + b_6PR + b_7vPR + b_8v^2 + b_9P^2 + b_{10}R^2, \quad (1)$$

где Y — исследуемый параметр технологического процесса, $Y = \{КИП, H, h, S, L\}$; b_0, b_1, \dots, b_{10} — коэффициенты.

Для получения коэффициентов регрессионной модели применяли метод наименьших квадратов. Вектор-столбец оценок коэффициентов регрессии определяется выражением [20, 21]

$$\mathbf{B} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}, \quad (2)$$

где \mathbf{X} — матрица независимых факторов; \mathbf{Y} — вектор экспериментальных данных.

Проверку значимости коэффициентов проводили с помощью t-критерия Стьюдента. Все члены с незначимыми коэффициентами исключили из уравнений. Проверка модели по критерию Фишера показала адекватность результатов эксперимента полученным уравнениям регрессии [22].

Результатами расчетов являются следующие зависимости:

- для ширины последнего валика

$$L = 0,18744 + 0,00133v + 1,90938P + 0,03607R - 0,00041vP - 0,000001v^2 - 0,43449P^2;$$

- для высоты последнего валика

$$H = 0,52742 - 0,00044v - 0,5350P + 0,1174R - 0,00001vR + 0,01035PR + 0,0000002v^2 + 0,31526P^2 + 0,00093R^2;$$

- для глубины проплавления последнего валика

$$h = 0,21558 - 0,00017v + 0,04047P - 0,00851R - 0,000005vP + 0,000003vR + 0,00000008v^2 + 0,01541P^2 + 0,00028R^2;$$

- для площади поперечного сечения последнего валика

$$S = 0,03954 + 0,00047v - 0,7591P - 0,00069vP - 0,00005vR + 0,06302PR + 0,71810P^2 + 0,00216R^2;$$

- для коэффициента использования порошка при формировании последнего валика

$$КИП = -24,74723 + 0,13521v - 37,99644P - 2,70540R - 0,00185vR - 0,00006v^2 + 64,49778P^2 + 0,23534R^2.$$

Анализ полученных данных. Анализ полученных регрессионных зависимостей показывает, что для рассмотренного диапазона режима КЛП параметры последнего валика могут изменяться в следующих интервалах: высота $H = 0,26 \dots 0,44$ мм; ширина $L = 1,30 \dots 1,95$; площадь поперечного сечения $S = 0,18 \dots 0,54$ мм²; глубина проплавления $h = 0,097 \dots 0,114$ мм. При этом коэффициент использования порошка КИП колеблется в пределах 22...42 %.

При назначении режимов лазерной обработки следует стремиться к максимальному увеличению высоты, ширины, площади поперечного сечения и КИП наплавленного валика при наименьшей глубине проплавления.

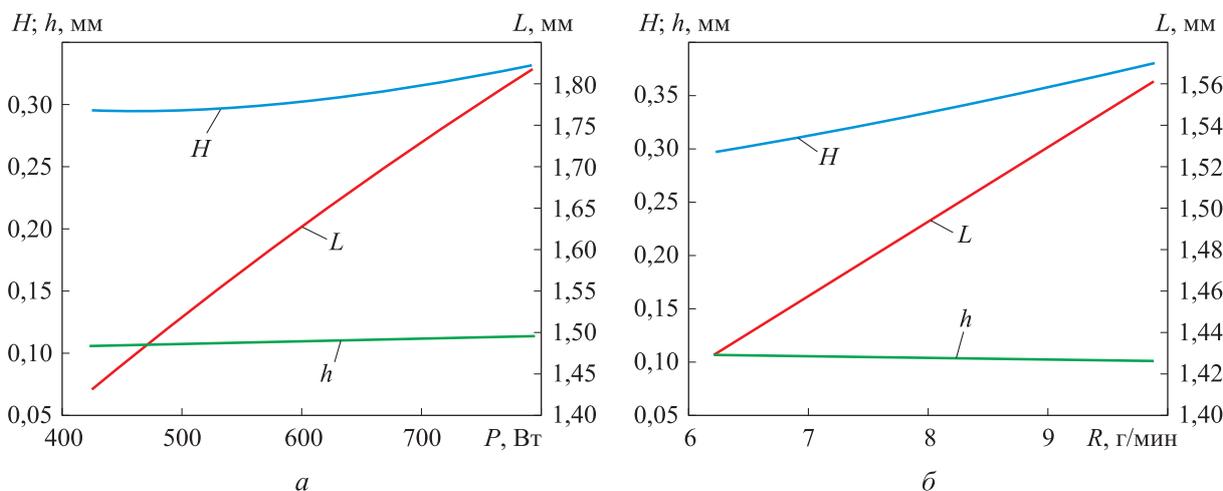


Рис. 4. Зависимости высоты H , ширины L и глубины проплавления h последнего валика от параметров режима КЛП:

a — мощности лазерного излучения P при скорости наплавки $v = 800$ мм/мин, $R = 6,2$ г/мин;

$б$ — расхода порошка R при $v = 800$ мм/мин и $P = 425$ Вт

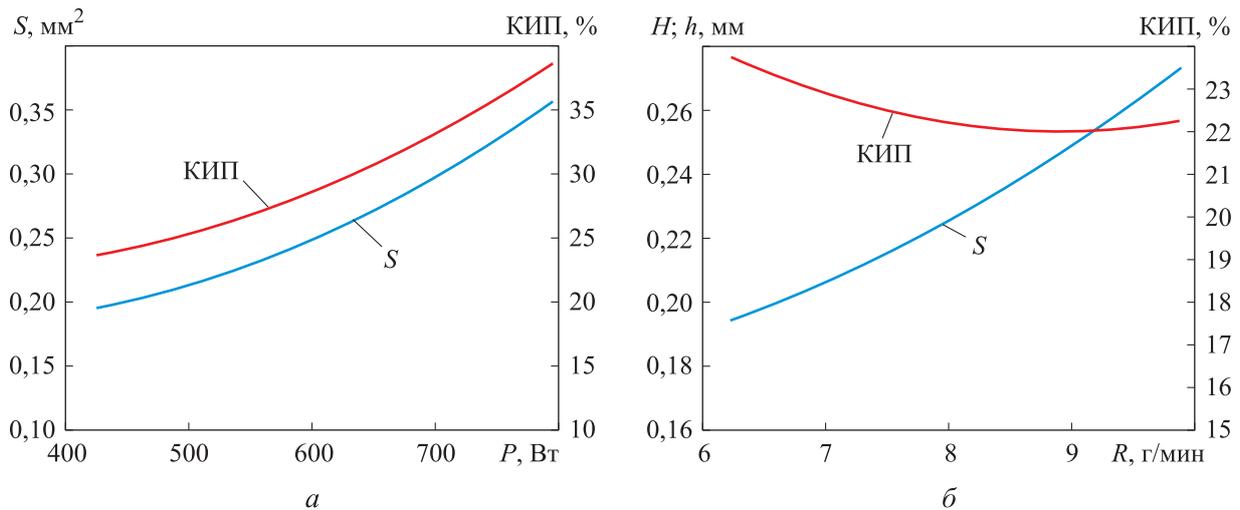


Рис. 5. Зависимости площади поперечного сечения последнего валика S и коэффициента КИП при его выполнении от параметров режима КЛП:
 а — мощности лазерного излучения P при $v = 800$ мм/мин и $R = 6,2$ г/мин;
 б — расхода порошка R при $v = 800$ мм/мин и $P = 425$ Вт

Анализ полученных регрессионных зависимостей показывает, что в рассмотренном диапазоне при любом сочетании параметров режима увеличение мощности лазерного излучения и расхода порошка приводит к росту высоты и ширины валика. Графическая интерпретация полученных зависимостей приведена на рис. 4 и 5.

Глубина проплавления изменяется незначительно: повышение мощности лазерного излучения приводит к ее некоторому росту (примерно 4 %), а увеличение расхода порошка — к ее снижению (около 7 %). Наименьшая глубина проплавления получена при наибольших значениях расхода порошка и скорости наплавки ($R = 9,93$ г/мин, $v = 1000$ мм/мин), а наибольшая — при их наименьших значениях ($R = 6,2$ г/мин, $v = 800$ мм/мин).

Сочетание наибольшей высоты валика и наименьшей глубины его проплавления достигается при максимальных значениях расхода порошка и мощности лазерного излучения.

Возрастание высоты и ширины валика при повышении мощности и расхода порошка обуславливают увеличение площади поперечного сечения. С ростом мощности и расхода порошка до максимальных значений в исследованном диапазоне режима КЛП площадь возрастает на 75 и 41 % соответственно.

Очень важной характеристикой является коэффициент использования порошка КИП. На его значение существенное влияние оказывает

мощность лазерного излучения, повышение которой в исследованных пределах вызывает увеличение КИП до 60 % и более. Расход порошка практически не меняет значения КИП. Повышение расхода до определенного предела приводит к его незначительному снижению (до 7 %), далее он остается постоянным (рис. 5, а).

На основе приведенных данных определен оптимальный режим, позволяющий получить максимальную площадь сечения формообразующего валика при минимальном проплавлении подложки: $v = 900$ мм/мин, $P = 800$ Вт, $R = 9,93$ г/мин.

Выводы

1. Для технологического процесса послойного выращивания изделия из порошка стали 316L методом КЛП получены регрессионные модели, связывающие режимы лазерной обработки с размерами формообразующего валика.

2. Установлена связь основных параметров режима КЛП с геометрическими характеристиками единичных валиков для тонкостенных конструкций из стали 316L.

3. С помощью регрессионных зависимостей найден оптимальный режим КЛП, позволяющий получить максимальную площадь поперечного сечения при минимальном проплавлении подложки: скорость наплавки — 900 мм/мин, мощность лазерного излучения — 800 Вт, расход порошка — 9,93 г/мин.

Литература

- [1] Sun G.F., Shena X.T., Wang Z.D., Zhan M.J., Yao S., Zhou R., Ni Z.H. Laser metal deposition as repair technology for 316L stainless steel: influence of feeding powder compositions on microstructure and mechanical properties. *Opt. Laser Technol.*, 2019, vol. 109, pp. 71–83, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.07.051>
- [2] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
- [3] Григорьянц А.Г., ред. *Лазерные аддитивные технологии в машиностроении*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.
- [4] Saboori A., Piscopo G., Lai M., Salmi A., Biamino S. An investigation on the effect of deposition pattern on the microstructure, mechanical properties and residual stress of 316L produced by Directed Energy Deposition. *Mater. Sci. Eng. A*, 2020, vol. 780, art. 139179, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139179>
- [5] Wang Q., Zhang S., Zhang C., Wang J., Babar S., Chen H., Chen J. A high strength low alloy steel fabricated by direct laser deposition. *Vacuum*, 2019, vol. 161, pp. 225–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.12.030>
- [6] Li W., Yan L., Karnati S., Liou F., Newkirk J., Brown Taming K., Seufzer W. Ti-Fe intermetallics analysis and control in joining titanium alloy and stainless steel by Laser Metal Deposition. *J. Mater. Process. Technol.*, 2017, vol. 242, pp. 39–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.11.010>
- [7] Zhang C., Zhang F., Diao H., Gao M., Tang Z., Poplawsky J., Liaw P. Understanding phase stability of Al-Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloys. *Mater. Des.*, 2016, vol. 109, pp. 425–433, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.073>
- [8] Caiazzo F. Laser-aided Directed Metal Deposition of Ni-based superalloy powder. *Opt. Laser Technol.*, 2018, vol. 103, pp. 193–198, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.042>
- [9] Gan Z., Yu G., He X., Li S. Numerical simulation of thermal behavior and multicomponent mass transfer in direct laser deposition of Co-base alloy on steel. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2017, vol. 104, pp. 28–38, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.049>
- [10] Zhang Z., Kong F., Kovacevic R. Laser hot-wire cladding of Co-Cr-W metal cored wire. *Opt. Lasers Eng.*, 2020, vol. 128, art. 105998, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105998>
- [11] Azarniya A., Colera, X.G., Mirzaali M.J., Sovizi S. Additive manufacturing of Ti–6Al–4V parts through laser metal deposition (LMD): process, microstructure, and mechanical properties. *J. Alloys Compd.*, 2019, vol. 804, pp. 163–191, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.255>
- [12] Григорьянц А.Г., Кошлаков В.В., Ризаханов Р.Н., Мисюров А.И., Фунтиков В.А., Шиганов И.Н. Формирование биметаллических структур методом коаксиального лазерного плавления. *Наукоемкие технологии в машиностроении*, 2019, № 3, с. 32–38, doi: https://doi.org/10.30987/article_5c7434f381d6e0.50316394
- [13] Гладуш Г.Г., Смуров И.Ю. *Физические основы лазерной обработки материалов*. Москва, Физматлит, 2017.
- [14] Zheng B., Haley J.C., Yang N., Yee J., Terrassa K.W., Zhou Y., Lavernia E.J., Schoenung J.M. On the evolution of microstructure and defect control in 316L SS components fabricated via directed energy deposition. *Mater. Sci. Eng. A*, 2019, vol. 764, art. 138243, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138243>
- [15] Vadayi P. *Designing, construction and characterization of laboratory additive manufacturing system DMD laser-based powdered to produce three-dimensional metal parts*. Isfahan university of technology, 2018.
- [16] Rahman Rashid R.A., Abaspour S., Palanisamy S., Matthews N., Dargusch M.S. Metallurgical and geometrical characterisation of the 316L stainless steel clad deposited on a mild steel substrate. *Surf. Coatings Technol.*, 2017, vol. 327, pp. 174–184, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.08.013>
- [17] Balit Y., Joly L.R., Szmytka F., Durbecq S., Charkaluk E., Constantinescu A. Self-heating behavior during cyclic loadings of 316L stainless steel specimens manufactured or repaired

- by Directed Energy Deposition. *Mater. Sci. Eng. A*, 2020, vol. 786, art. 139476, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139476>
- [18] Weng F., Gao S., Jiang J., Wang J., Guo P. A novel strategy to fabricate thin 316L stainless steel rods by continuous directed energy deposition in Z direction. *Addit. Manuf.*, 2019, vol. 27, pp. 474–481, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.024>
- [19] Григорьянц А.Г., Ставертий А.Я., Третьяков Р.С. Пятикоординатный комплекс для выращивания деталей методом коаксиального лазерного плавления порошковых материалов. *Технология машиностроения*, 2015, № 10, с. 22–28.
- [20] Рыков В.В., Иткин В.Ю. *Математическая статистика и планирование эксперимента*. Москва, РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2009. 303 с.
- [21] Сидняев Н.И. *Статистический анализ и теория планирования эксперимента*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017.
- [22] Назаров Н.Г. *Измерения: планирование и обработка результатов*. Москва, Изд-во стандартов, 2000.

References

- [1] Sun G.F., Shena X.T., Wang Z.D., Zhan M.J., Yao S., Zhou R., Ni Z.H. Laser metal deposition as repair technology for 316L stainless steel: influence of feeding powder compositions on microstructure and mechanical properties. *Opt. Laser Technol.*, 2019, vol. 109, pp. 71–83, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.07.051>
- [2] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Technological processes of laser treatment]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006.
- [3] Grigor'yants A.G., ed. *Lazernye additivnyye tekhnologii v mashinostroenii* [Laser additive technologies in machine building]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2018.
- [4] Saboori A., Piscopo G., Lai M., Salmi A., Biamino S. An investigation on the effect of deposition pattern on the microstructure, mechanical properties and residual stress of 316L produced by Directed Energy Deposition. *Mater. Sci. Eng. A*, 2020, vol. 780, art. 139179, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139179>
- [5] Wang Q., Zhang S., Zhang C., Wang J., Babar S., Chen H., Chen J. A high strength low alloy steel fabricated by direct laser deposition. *Vacuum*, 2019, vol. 161, pp. 225–231, doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.12.030>
- [6] Li W., Yan L., Karnati S., Liou F., Newkirk J., Brown Taminger K., Seufzer W. Ti-Fe intermetallics analysis and control in joining titanium alloy and stainless steel by Laser Metal Deposition. *J. Mater. Process. Technol.*, 2017, vol. 242, pp. 39–48, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.11.010>
- [7] Zhang C., Zhang, F., Diao H., Gao M., Tang Z., Poplawsky J., Liaw P. Understanding phase stability of Al-Co-Cr-Fe-Ni high entropy alloys. *Mater. Des.*, 2016, vol. 109, pp. 425–433, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.073>
- [8] Caiazza F. Laser-aided Directed Metal Deposition of Ni-based superalloy powder. *Opt. Laser Technol.*, 2018, vol. 103, pp. 193–198, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.042>
- [9] Gan Z., Yu G., He X., Li S. Numerical simulation of thermal behavior and multicomponent mass transfer in direct laser deposition of Co-base alloy on steel. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2017, vol. 104, pp. 28–38, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.049>
- [10] Zhang Z., Kong F., Kovacevic R. Laser hot-wire cladding of Co-Cr-W metal cored wire. *Opt. Lasers Eng.*, 2020, vol. 128, art. 105998, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105998>
- [11] Azarniya A., Colera X.G., Mirzaali M.J., Sovizi S. Additive manufacturing of Ti–6Al–4V parts through laser metal deposition (LMD): process, microstructure, and mechanical properties. *J. Alloys Compd.*, 2019, vol. 804, pp. 163–191, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.255>
- [12] Grigor'yants A.G., Koshlakov V.V., Rizakhanov R.N., Misurov A.I., Funtikov V.A., Shiganov I.N. Bimetallic structure formation by method of coaxial laser fusion. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical

- Engineering], 2019, no. 3, pp. 32–38, doi: https://doi.org/10.30987/article_5c7434f381d6e0.50316394 (in Russ.).
- [13] Gladush G.G., Smurov I.Yu. *Fizicheskie osnovy lazernoy obrabotki materialov* [Basic physics of laser material treatment]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2017 (in Russ.).
- [14] Zheng B., Haley J.C., Yang N., Yee J., Terrassa K.W., Zhou Y., Lavernia E.J., Schoenung J.M. On the evolution of microstructure and defect control in 316L SS components fabricated via directed energy deposition. *Mater. Sci. Eng. A*, 2019, vol. 764, art. 138243, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138243>
- [15] Vadayi P. *Designing, construction and characterization of laboratory additive manufacturing system DMD laser-based powdered to produce three-dimensional metal parts*. Isfahan university of technology, 2018.
- [16] Rahman Rashid R.A., Abaspour S., Palanisamy S., Matthews N., Dargusch M.S. Metallurgical and geometrical characterisation of the 316L stainless steel clad deposited on a mild steel substrate. *Surf. Coatings Technol.*, 2017, vol. 327, pp. 174–184, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.08.013>
- [17] Balit Y., Joly L.R., Szmytka F., Durbecq S., Charkaluk E., Constantinescu A. Self-heating behavior during cyclic loadings of 316L stainless steel specimens manufactured or repaired by Directed Energy Deposition. *Mater. Sci. Eng. A*, 2020, vol. 786, art. 139476, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139476>
- [18] Weng F., Gao S., Jiang J., Wang J., Guo P. A novel strategy to fabricate thin 316L stainless steel rods by continuous directed energy deposition in Z direction. *Addit. Manuf.*, 2019, vol. 27, pp. 474–481, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.024>
- [19] Grigor'yants A.G., Stavertiy A.Ya., Tretyakov R.S. Five-axis system for the parts growing by coaxial laser melting of powder materials. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2015, no. 10, pp. 22–28 (in Russ.).
- [20] Rykov V.V., Itkin V.Yu. *Matematicheskaya statistika i planirovaniye eksperimenta* [Mathematical statistics and experiment planning]. Moscow, RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina Publ., 2009.
- [21] Sidnyaev N.I. *Statisticheskii analiz i teoriya planirovaniya eksperimenta* [Statistical analysis and theory of experiment design]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017.
- [22] Nazarov N.G. *Izmereniya: planirovanie i obrabotka rezul'tatov* [Measurements: results planning and processing]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2000.

Статья поступила в редакцию 27.01.2021

Информация об авторах

МИАНДЖИ Захра — аспирант кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, e-mail: mianji@bk.ru).

ТАКСАНЦ Марина Вячеславовна — старший преподаватель кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, e-mail: marina270263@yandex.ru).

ХОЛОПОВ Андрей Андреевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, e-mail: holopiy@yandex.ru).

МИСЮРОВ Александр Иванович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, e-mail: misyurov50@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мианджи З., Таксанц М.В., Холопов А.А., Мисюров А.И. Регрессионные модели показателей технологического процесса послойного выращивания изделия из порошка стали 316L методом коаксиального лазерного плавления. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 6, с. 13–22, doi: 10.18698/0536-1044-2021-6-13-22

Please cite this article in English as:

Mianji Z., Taksanc M.V., Kholopov A.A., Misyurov A.I. Regression Models of Technological Process Indicators for Layer-by-Layer Product Growth of a 316L Steel Powder by Coaxial Laser Melting. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 13–22, doi: 10.18698/0536-1044-2021-6-13-22

Information about the authors

MIANJI Zahra — Postgraduate Student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: mianji@bk.ru).

TAKSANC Marina Vyacheslovna — Senior Lecturer, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: marina270263@yandex.ru).

KHOLOPOV Andrey Andreevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: holopiy@yandex.ru).

MISYUROV Alexander Ivanovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: misyurov50@yandex.ru).