

УДК 621.7.01

doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-26-35

Исследование особенностей создания одномерных объектов методом импульсного селективного лазерного плавления

М.А. Мельникова, М.В. Таксанц, А.А. Холопов,
А.А. Тарева, А.А. Волкова

МГТУ им. Н.Э. Баумана

A Study of Creating One-Dimensional Objects with Pulse Selective Laser Melting

M.A. Melnikova, M.V. Taksants, A.A. Kholopov,
A.A. Tareva, A.A. Volkova

Bauman Moscow State Technical University

Широкое распространение технологии селективного лазерного плавления обуславливает активные разработки в этой области, особенно для деталей со сложными внутренними контурами, применяемыми в авиастроении. В качестве источника излучения, как правило, используют непрерывный лазерный источник. Однако такая технология наряду с достоинствами имеет недостатки, которые можно устранить, применив импульсный лазер. Исследована возможность создания валиков методом импульсного селективного лазерного плавления с выявлением параметров, вносящих наибольший вклад в процесс формирования объектов. В качестве порошкового материала выбрана сталь AISI 316L. Анализ результатов экспериментов, проведенных таким методом, показал, что основными параметрами, влияющими на размеры валиков, являются длительность импульса и мгновенная энергия излучения. Рассчитанная математическая модель позволила установить основные закономерности предлагаемого метода. Определен оптимальный диапазон параметров для достижения прогнозируемого результата обработки.

Ключевые слова: импульсная лазерная обработка, селективное лазерное плавление, аддитивные технологии, импульсный лазер, стальной порошок

The widespread use and implementation of selective laser melting (SLM) technology entails active development in this area, especially for parts with complex internal circuits used in aircraft manufacturing. In this technology, a continuous laser source is usually used as a radiation source. Along with all the advantages, this technology has a number of detrimental features and disadvantages that can be avoided by using a pulsed laser. In this study, the AISI 316L steel was selected as the powder. The possibility of creating tracks by pulsed selective laser melting was examined with a focus on determining the parameters that had the highest impact on the process of object formation. The analysis of the experimental studies carried out by this method showed that the main parameters affecting the track size were the pulse duration and instantaneous radiation energy. The calculated mathematical model made it possible to establish the basic dependences and present the optimal range of parameters to achieve the predicted processing result.

Keywords: pulsed laser treatment, selective laser melting, additive technology, pulsed laser, steel powder

Селективное лазерное плавление (СЛП), являющееся одной из перспективных аддитивных технологий, заключается в последовательном послойном расплавлении порошкового материала посредством лазерного излучения, перемещающегося по заданной траектории и создающего сложную внутреннюю геометрию поверхности.

В настоящее время технология СЛП нашла широкое распространение в аэрокосмической, авиационной и атомной промышленности, а также в приборостроении и медицине. Это связано с тем, что СЛП позволяет создавать металлические изделия высокой точности и плотности, применять разнородные материалы (в том числе ограниченно растворимые), оптимизировать конструкцию и снизить массу производимых деталей и существенно повысить коэффициент использования материала по сравнению с таковым при традиционных методах его обработки.

В последние годы наблюдается активное развитие технологии СЛП с использованием новых материалов и совершенствованием оборудования. Однако наряду с достоинствами СЛП (получение высокоточных изделий, универсальность оборудования, экономия материала) [1–3], ей присущи такие недостатки, как несплошности, структурные деформации, эффект сфероидизации, трещины и поры.

Как правило, в СЛП применяют непрерывный источник излучения. Но некоторые проблемы (например, смачиваемость расплавом предыдущего слоя, эффект сфероидизации, управление процессом) можно решить, используя альтернативный метод выращивания — импульсное СЛП [4, 5].

Импульсные лазеры позволяют повышать прочностные связи между слоями, уменьшать зону термического воздействия благодаря меньшей продолжительности импульса и большой пиковой мощности [6]. Так, применение импульсного СЛП снижает склонность металла к каплеобразованию (сфероидизации) [7].

Также режим импульсного лазерного излучения позволяет осуществлять более дозированную подачу тепла, а варьирование длительности импульса и скважности дает возможность управлять эффективной глубиной проникновения тепла и снизить избыточный перегрев материала. Фокусировка в малое пятно с ограниченной длительностью импульса обеспечивает локальность воздействия,

что позволяет создавать более прецизионные объекты.

В работе [8] показано, что использование импульсного лазера помогает решить проблему образования трещин после лазерной обработки. Наносекундные лазеры позволяют с высокой точностью изготавливать изделия сложной формы и дополнительно сжимать порошок благодаря давлению паров при такой обработке [9].

К тому же импульсные лазерные системы могут выполнять и обратную задачу: выращивать объемные изделия с низкой внутренней изотропной и анизотропной структурными плотностями и со сплошной прочной наружной поверхностью, что является актуальным, а также перспективным направлением развития машино- и особенно авиастроения.

Несмотря на достоинства, такая технология выращивания имеет некоторые ограничения по внедрению вследствие недостаточной изученности этого процесса. Известно [10–12], что существуют факторы, которые вносят изменения в процесс, однако его закономерности не выявлены. Также, несмотря на то, что исследования в данной области проходят достаточно активно, не определены особенности формирования валиков в зависимости от вводимых параметров обработки. Именно эта область легла в основу проводимого исследования с рассмотрением стабильности и особенности формирования структуры в целом.

При импульсной лазерной обработке число параметров, варьирование которых влияет на процесс формирования единичных валиков, превышает число таковых при непрерывной обработке. Основными входными параметрами для лазерного выращивания являются мощность, перекрытие импульсов и их длительность. Лазерный комплекс позволяет регулировать все необходимые параметры, в том числе варьировать положение фокуса.

Одним из важных параметров при импульсном режиме обработки, влияющих на формирование валиков и качество переплавления слоев, является энергия. Для единичных векторов в процессе воздействия импульсным лазерным излучением при постоянной частоте следования импульсов и перекрытии можно варьировать их пиковую мощность и длительность.

Материалы и оборудование. Для экспериментальных исследований использован порошок из

нержавеющей стали аустенитного класса марки AISI 316L размером 20...53 мкм и подложка из стали СтЗпс толщиной 10 мм. Выбор такого порошка обусловлен широкой распространенностью и легкой доступностью, высокой устойчивостью к коррозии и окислению в совокупности с хорошим сплавлением между собой и удобством подготовки шлифов.

Оценены параметры стального порошка: сферичность, распределение по размеру и отсутствие пор внутри порошка. Порошок стали марки AISI 316L имеет следующий химический состав, % масс: Cr — 17...19, Ni — 13...15, Mo — 2,25...3,00, C ≤ 0,03, Mn ≤ 2,00, Cu ≤ 0,05, P ≤ 0,025, S ≤ 0,01, Si ≤ 0,75, N ≤ 0,10.

В качестве источника излучения использована лазерная установка LRS-150 производства компании «ОКБ «Булат», работающая в импульсно-периодическом режиме. Установка оснащена двухкоординатным столом, обеспечивающим перемещение в процессе обработки, гарантируя тем самым полную свободу выращивания по плоскости.

Техническая характеристика лазерной установки LRS-150

Максимальная средняя мощность излучения, Вт	150
Максимальная мощность импульса, кВт	До 10
Максимальная энергия импульса, Дж	60
Частота повторения импульса, Гц	1...200
Длительность импульса, мс	0,2...20,0
Длина волны излучения (YAG:Nd ³⁺), мкм	1,064
Режим работы лазера	Импульсно-периодический
Фокусное расстояние объектива, мм	100
Диаметр пятна, мм	0,25...2,00

При определении влияния параметров лазерного излучения на процесс формирования векторов и их геометрические особенности для нанесения слоя порошка применены однослойные квадратные шаблоны толщиной до 150 мкм. Для увеличения площади обработки излучением использовано пятно с заглублением фокуса относительно подложки.

Выращивание проведено путем нанесения векторов параллельно друг другу на определенном расстоянии (рис. 1). Длина полученных образцов составила 7 мм. Варьируемыми параметрами являлись энергия, длительность импульса и расстояние между соседними точками. Частота следования импульсов оставалась постоянной.

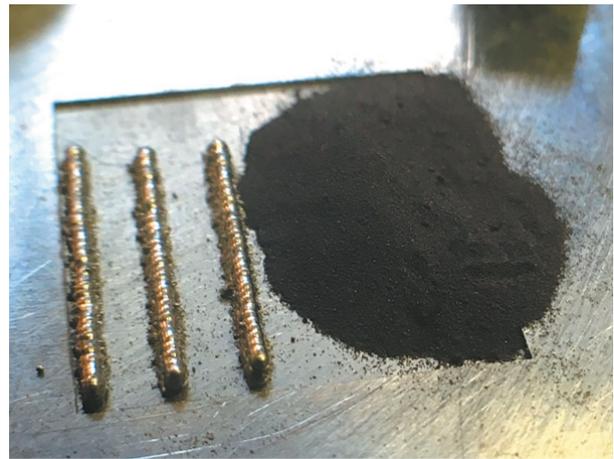


Рис. 1. Общий вид порошка и выращенных валиков

После выращивания образцы разрезали перпендикулярно векторам, прессовали и полировали. Для изучения микроструктурных особенностей шлифы подвергали травлению раствором азотной кислоты и фтористоводородной/плавиковой кислоты в пропорциях 10 % HNO₃ + 2 % HF при комнатной температуре. Микроструктуру изучали с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51.

Эксперименты и обсуждения. Импульсное СЛП характеризуется вязкими эффектами и повторным затвердеванием материала из-за наличия перекрытий. Наличие этих двух явлений делает контроль количества расплавленного материала важным этапом обеспечения достаточных для сцепления микроскопических связей и хорошей макроскопической точности детали, выращенной с помощью импульсного излучения [11].

Количество жидкости и время до затвердевания варьируются в зависимости от параметров лазера. Как и в сварочных процессах [12], наибольшее влияние на расплав оказывают мощность (энергия) и длительность импульса. Именно от этих параметров зависит глубина проплавления, сплавление порошинок, ширина валика и т. п.

В процессе формирования ванны расплава лазерный луч воздействует на расплавленный материал и порошок. Поток вводимого тепла определяется длительностью импульса [13], а глубина проплавления — совокупностью двух параметров: длительности импульса и мощности или мгновенной энергии импульса.

Выполнено экспериментальное исследование по выявлению параметров, оказывающих

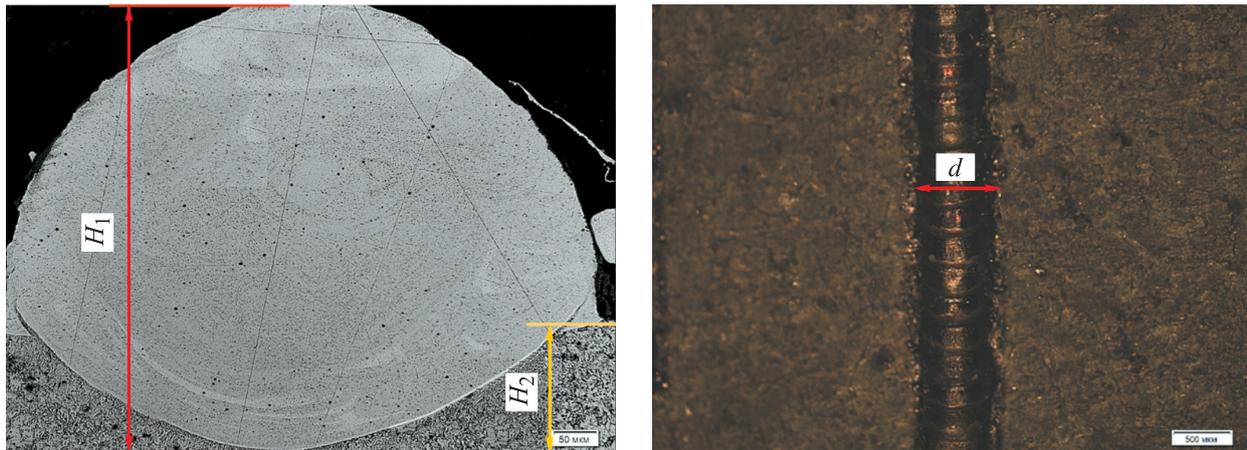


Рис. 2. Основные оцениваемые параметры валиков

наибольшее влияние на процесс обработки материала. При воздействии лазерного излучения с определенными значениями мощности и длительности импульса проведено выращивание валиков. Основные оцениваемые параметры валиков — высота H_1 , ширина d и глубина проплавления H_2 — показаны на рис. 2.

Цель работы — получение математической зависимости высоты и глубины проплавления валика от мгновенной энергии и длительности импульса лазерного излучения методами регрессионного анализа, а также определение оптимального диапазона варьирования этих параметров.

Исходя из параметров лазерной установки и литературных данных для предварительных экспериментов установлены диапазоны варьирования:

для длительности импульса $t_{\text{имп}} = 1,5 \dots 15,0$ мс, для мгновенной энергии импульса $E = 0,3461 \dots 2,0080$ Дж. Коэффициент перекрытия оставался постоянным, составляя 0,75.

По результатам исследования построены зависимости высоты валика от мгновенной энергии и длительности импульса (рис. 3). Анализ полученных графиков показал, что длительность импульса $t_{\text{имп}} = 7$ мс является граничной с точки зрения стабильности выращивания и наличия линейных эффектов при воздействии. При большем значении длительности импульса на формирование валиков начинают влиять различные нелинейные физические процессы, обуславливающие нестабильность получаемых результатов.

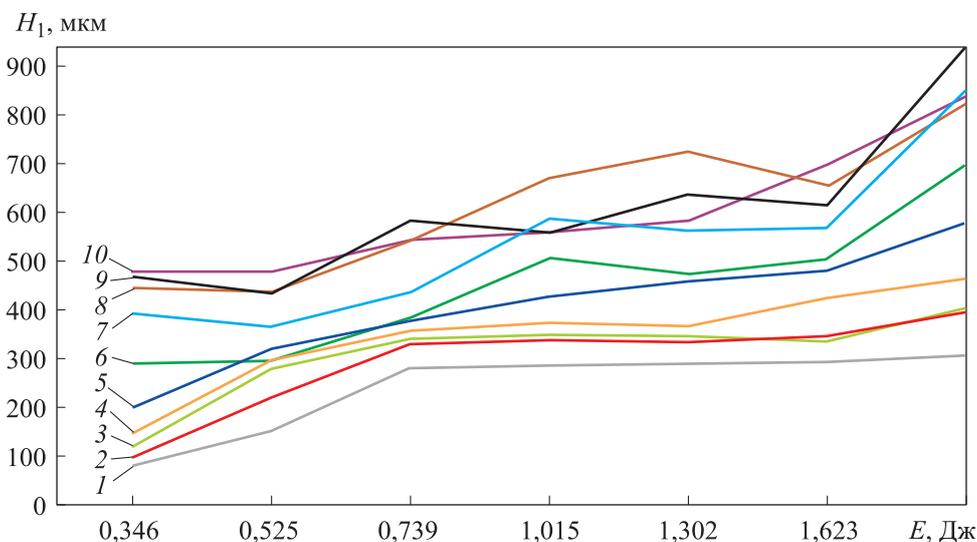


Рис. 3. Зависимость высоты валика H_1 от мгновенной энергии излучения E при длительности импульса $t_{\text{имп}} = 1,5$ (1), 2,0 (2), 2,5 (3), 3,0 (4), 4,0 (5), 5,0 (6), 7,0 (7), 10,0 (8), 12,0 (9) и 15,0 мс (10)

При анализе влияния мгновенной энергии импульса на высоту валика определено ее минимальное значение, которое составило 3 Дж и считается точкой начала сплавления порошка с подложкой. В диапазоне $E = 0,3 \dots 0,7$ Дж происходит установление режима стабильности, а энергию $E = 1,6$ Дж можно считать граничным значением, где происходит изменение характера зависимости на нелинейный.

Анализ полученных данных показал, что в качестве стабильной зоны для выделения оптимальных значений следует использовать мгновенную энергию излучения в диапазоне $E = 0,7388 \dots 1,6231$ Дж и длительность импульса в интервале $t_{\text{имп}} = 1,5 \dots 7,0$ мс. Для этого был проведен полнофакторный эксперимент с целью построения математической регрессионной модели $H_1 = f(E, t_{\text{имп}})$. Длительность импульса варьировали на семи уровнях, а энергию — на четырех. Дублирование эксперимента проводили 3 раза в каждой точке плана.

Обработку данных выполняли по стандартной методике: эксперимент проверяли на воспроизводимость по критерию Кохрена, данные усредняли и определяли дисперсию по параллельным экспериментам [14, 15]. При измерении высоты валика средняя ошибка эксперимента составила 324,563, а при измерении глубины валика — 301,557.

Предполагалось, что зависимости высоты $H_1 = f(E, t_{\text{имп}})$ и глубины проплавления $H_2 = f(E, t_{\text{имп}})$ валиков имеют следующий вид:

$$H_1 = a_0 + a_1 t_{\text{имп}} + a_2 E + a_3 t_{\text{имп}}^2 + a_4 t_{\text{имп}}^2 + a_5 E^2; \quad (1)$$

$$H_2 = b_0 + b_1 t_{\text{имп}} + b_2 E + b_3 t_{\text{имп}}^2 + b_4 t_{\text{имп}}^2 + b_5 E^2, \quad (2)$$

где $a_0, \dots, a_5, b_0, \dots, b_5$ — коэффициенты многочленов.

Для получения коэффициентов уравнений (1) и (2) использован метод наименьших квадратов, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений значений, предсказанных уравнением от исходных данных.

Результатом проведенных расчетов являются следующие зависимости:

$$H_1 = 111,89 + 42,37 t_{\text{имп}} + 178,01 E + 24,70 t_{\text{имп}} E - 3,20 t_{\text{имп}}^2 - 85,07 E^2; \quad (3)$$

$$H_2 = -442,65 - 19,85 t_{\text{имп}} + 836,20 E + 31,06 t_{\text{имп}} E + 2,51 t_{\text{имп}}^2 - 368,38 E^2. \quad (4)$$

Проверка значимости коэффициентов уравнений (3) и (4) по t -критерию Стьюдента показала, что все коэффициенты значимы. Это указывает на то, что ни один из членов уравнения не может быть исключен. Проверка гипотезы об адекватности представления результатов экспериментов полученными уравнениями регрессии проведена с использованием критерия Фишера [14, 15]. Установлено, что регрессионные модели адекватно описывают экспериментальные данные, наблюдается полная корреляция результатов эксперимента и расчета и высокая точность их предсказания.

Зависимость глубины проплавления валика от мгновенной энергии излучения при различных значениях длительности импульса приведена на рис. 4, а. Происходит стабильный рост глубины проплавления до $E = 1,302$ Дж, где высота валика меняет направленность в сторону уменьшения.

Такие изменения обусловлены увеличением ширины ванны расплава с повышением энергии. Происходящий в процессе нагрев и переплавление порошка приводят к перегреву

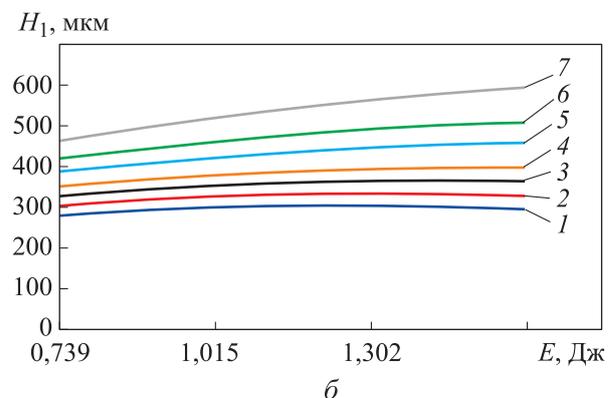
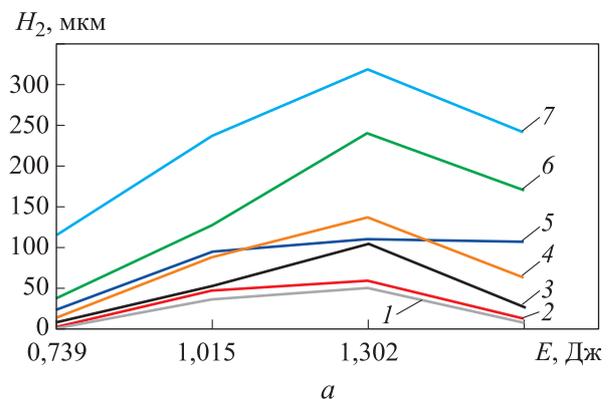


Рис. 4. Зависимости глубины проплавления H_2 (а) и высоты H_1 (б) валика от мгновенной энергии излучения E при длительности импульса $t_{\text{имп}} = 1,5$ (1), 2,0 (2), 2,5 (3), 3,0 (4), 4,0 (5), 5,0 (6) и 7,0 мс (7)

в зоне расплава, тепло распространяется в стороны и значительно влияет на близлежащие зоны, увеличивая ширину валика.

Зависимость высоты валика от мгновенной энергии излучения при различных значениях длительности импульса приведена на рис. 4, б. В рассматриваемом диапазоне данных наблюдается стабильность результатов, что обусловлено отсутствием нелинейных физических эффектов в процессе воздействия и формирования валика.

Следует отметить, что характер кривых не зависит от длительности импульса, оставаясь постоянным. Изменяется только высота валика, которая растет с увеличением мгновенной энергии излучения. Такая тенденция не всегда имеет положительный эффект при формировании слоев, однако в определенной степени повышает производительность процесса [1, 2, 16].

Важной характеристикой при импульсном режиме обработки является мгновенная энергия излучения [17]. Выявлено, что с ее ростом устанавливается стабильный режим для формирования валиков. Показано, что высокие энергии способствуют хорошему переплавлению слоя порошка с подложкой, повышая температуру вокруг ванны расплава и определяя размер единичных объектов — валиков.

Проведено сравнение разных сочетаний энергии и длительности импульса при формировании валиков. При анализе единичных векторов сочетание длительности импульса и мощности определяло характер формирования валика и качества переплавления материала.

Внешний вид валиков, полученных в результате экспериментов, наглядно демонстрирующих полученные зависимости, показан на рис. 5. Наблюдается четкая зависимость мощ-

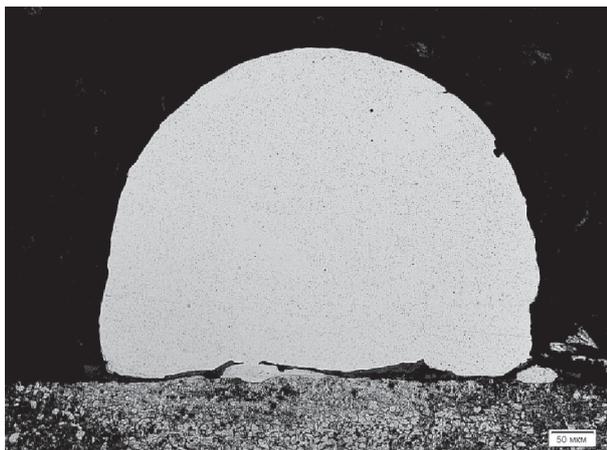
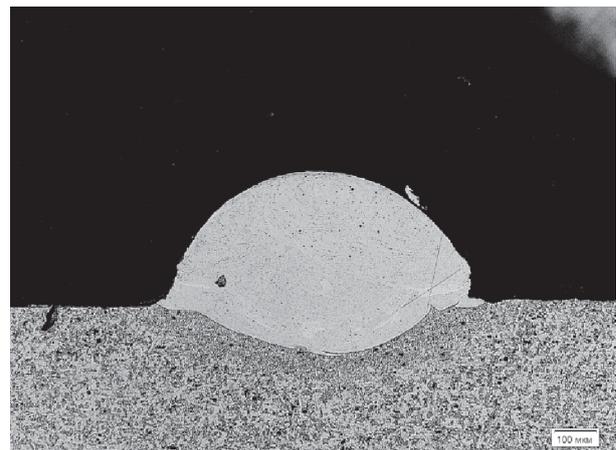
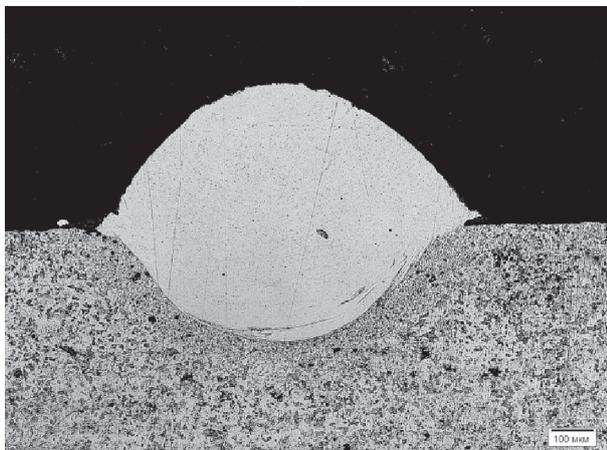
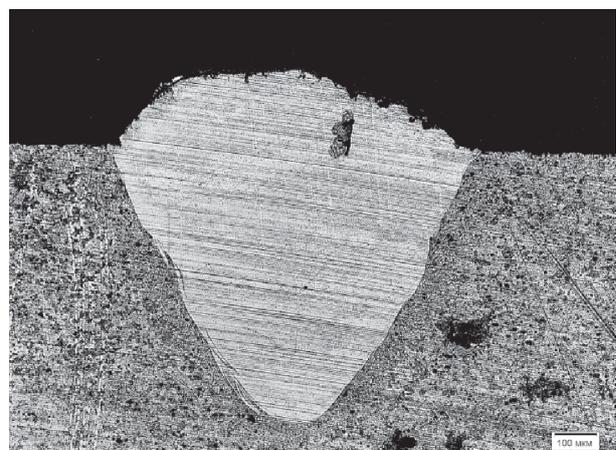
*a**б**в**г*

Рис. 5. Картина влияния мощности P на формирование валиков при длительности импульса $t_{\text{имп}} = 7$ мс:
a — $P = 50$ %; *б* — $P = 60$ %; *в* — $P = 70$ %; *г* — $P = 80$ %



Рис. 6. Микроструктура валика, получаемого методом импульсного СЛП

ности от высоты и глубины валиков при постоянной длительности импульса: с увеличением мощности глубина проплавления растет до некоторого значения, соответствующего переходному режиму отношения размера валика над подложкой и в глубину.

Первоначально происходит переплавление лишь наружной зоны, т. е. порошка, так как энергии недостаточно для сплавления с подложкой (рис. 5, а, мощность $P = 50\%$). С повышением энергии глубина растет, увеличивая глубину проплавления подложки, пока при максимальной энергии глубина проплавления не возрастает в значительной мере (рис. 5, з, $P = 80\%$).

При исследовании микроструктуры установлено, что, несмотря на сложность процесса выращивания методом импульсного СЛП, связанную с недостаточным количеством данных и влиянием множества факторов, валики получаются однородными, без значительной пористости и трещин (рис. 6). Однако встречаются и незначительные несплавления, которые необходимо предупреждать в процессе выращивания.

Выводы

1. Результаты проведенного исследования позволили ограничить диапазоны параметров, определяющих качественное переплавление порошка и подложки. Выявлена зона стабильности и линейной зависимости параметров обработки. С ростом длительности импульса увеличиваются размеры валиков, однако слишком большие значения приводят к негативным нелинейным процессам в ванне расплава, в том числе способствующим налипанию при застывании.

2. Установлено, что существуют две зоны обработки: где энергии недостаточно для образования валика и где возникают нелинейные эффекты, которые достаточно сложно спрогнозировать. Полученная микроструктура валиков показала хорошее качество сплавления с подложкой, а также отсутствие значительных дефектов.

Литература

- [1] Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders. *Processing, microstructure, and properties Progress in Materials Science*, 2015, vol. 74, pp. 401–477, doi: 10.1016/J.PMATSCI.2015.03.002
- [2] Dongdong G., Yifu Sh. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials and Design*, 2009, vol. 30, pp. 2903–2910, doi: 10.1016/j.matdes.2009.01.013
- [3] Jhabvala J., Boillat E., Cédric A., Glardon R. An innovative method to build support structures with a pulsed laser in the selective laser melting process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 59, pp. 137–142, doi: 10.1007/s00170-011-3470-8
- [4] Yadroitsev I., Gusarov A., Yadroitsava I., Smurov I. Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, pp. 1624–1631, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.010>
- [5] Панченко В.Я., Васильцов В.В., Егоров Э.Н., Ильичев И.Н., Соловьев А.В., Богданов А.В., Мисюров А.И., Смирнова Н.А. Аддитивные технологии спекания металлических порошков для получения изделий авиационной и машиностроительной промышленности. *Фотоника*, 2016, т. 60, № 6, с. 36–46, doi: 10.22184/1993-7296.2016.60.6.36.47

- [6] Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О., Симонов А.П. Исследование влияния режимов выращивания методом селективного лазерного плавления на пористость в изделиях из медных сплавов. *Фотоника*, 2019, т. 13, № 2, с. 160–171, doi: 10.22184/FRos.2019.13.2.160.168
- [7] Shiganov I.N., Misurov A.I., Melnikov D.M. Laser shock peening of welded joints. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, p. 012018, doi: 10.1088/1742-6596/1109/1/012018
- [8] Тюльпанова Е.М., Мельников Д.М., Кавешникова Н.А., Голубенко Ю.В., Каленова Е.А. Влияние условий облучения на параметры наночастиц, получаемых методом лазерной абляции в жидкости. *Научные технологии в машиностроении*, 2018, № 6(84), с. 3–6, doi: 10.30987/article_5b0e4111a4af99.94656008
- [9] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мельников Д.М., Мисюров А.И., Снижение растягивающих остаточных напряжений в сварных соединениях алюминиевых сплавов методом лазерной ударной обработки. *Цветные металлы*, 2018, № 10, с. 86–91, doi: 10.17580/tsm.2018.10.11
- [10] Klocke F., Wagner C. Coalescence behaviour of two metallic particles as base mechanism of selective laser sintering. *CIRP annals — manufacturing technology*, 2003, vol. 52(1), pp. 177–180, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60559-9
- [11] Fischer P., Leber H., Romano V., Weber H.P., Karapatis N., André C., Glardon R. Microstructure of near infrared pulsed laser sintered Titanium samples. *Applied Physics A*, 2004, vol. 78, pp. 1219–1227, doi: 10.1007/s00339-003-2205-6
- [12] Shupenev A.E., Korshunov I.S., Iliin A.S., Osipkov A.S. Grigoryants A.G. Bismuth-Telluride-Based Radiation Thermopiles Prepared by Pulsed Laser Deposition. *XVI international conference Thermoelectrics and their applications–2018*, St. Petersburg, 8–12 October, 2018, doi: 10.1134/S1063782619060204
- [13] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
- [14] Горяинов В.Б., Павлов И.В., Крищенко Г.М. *Математическая статистика*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 424 с.
- [15] Мухачев В.А. *Планирование и обработка результатов эксперимента*. Томск, ТУСУР, 2007. 118 с.
- [16] Shuang Bai, Jian Liu, Pei Yang, Meiyu Zhai, Huan Huang. Femtosecond Fiber Laser Additive Manufacturing of Tungsten. *SPIE Photonics West 9738–24*, San Francisco, CA, 13–18 February, 2016, doi: 10.1117/12.2217551
- [17] Fischer P., Romano V., Weber H.P., Karapatis N.P., Boillat E., Glardon R. Sintering of commercially pure Titanium powder with a Nd:YAG laser source. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51(6), pp. 1651–1662, doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00567-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00567-0)

References

- [1] Olakanmi E.O., Cochrane R.F., Dalgarno K.W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders. *Processing, microstructure, and properties Progress in Materials Science*, 2015, vol. 74, pp. 401–477, doi: 10.1016/j.PMATSCI.2015.03.002
- [2] Dongdong G., Yifu Sh. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials and Design*, 2009, vol. 30, pp. 2903–2910, doi: 10.1016/j.matdes.2009.01.013
- [3] Jhabvala J., Boillat E., Cédric A., Glardon R. An innovative method to build support structures with a pulsed laser in the selective laser melting process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 59, pp. 137–142, doi: 10.1007/s00170-011-3470-8
- [4] Yadroitsev I., Gusarov A., Yadroitsava I., Smurov I. Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, pp. 1624–1631, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.010>
- [5] Panchenko V.Ya., Vasil'tsov V.V., Egorov E.N., Il'ichev I.N., Solov'yev A.V., Bogdanov A.V., Misyurov A.I., Smirnova N.A. Metal powder sintering additive technologies for aviation

- and engineering industries. *Photonics Russia*, 2016, vol. 60, no. 6, pp. 36–46 (in Russ.), doi: 10.22184/1993-7296.2016.60.6.36.47
- [6] Kolchanov D.S., Drenin A.A., Denezhkin A.O., Simonov A.P. Study of the Effect of Growing Modes by Selective Laser Melting Method on Porosity in Copper Alloy Products. *Photonics Russia*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 160–171 (in Russ.), doi: 10.22184/FRos.2019.13.2.160.168
- [7] Shiganov I.N., Misurov A.I., Melnikov D.M. Laser shock peening of welded joints. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, p. 012018, doi: 10.1088/1742-6596/1109/1/012018
- [8] Tyul'panova E.M., Mel'nikov D.M., Kaveshnikova N.A., Golubenko Yu.V., Kalenova E.A. Irradiation condition impact upon nano-particle parameters obtained through method of laser ablation in liquid. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2018, no. 6(84), pp. 3–6 (in Russ.), doi: 10.30987/article_5b0e4111a4af99.94656008
- [9] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Mel'nikov D.M., Misurov A.I., Reducing residual tensile stresses in welded aluminium alloy joints by laser shock peening. *Tsvetnyye metally*, 2018, no. 10, pp. 86–91 (in Russ.), doi: 10.17580/tsm.2018.10.11
- [10] Klocke F., Wagner C. Coalescence behaviour of two metallic particles as base mechanism of selective laser sintering. *CIRP annals — manufacturing technology*, 2003, vol. 52(1), pp. 177–180, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60559-9
- [11] Fischer P., Leber H., Romano V., Weber H.P., Karapatis N., André C., Glardon R. Microstructure of near infrared pulsed laser sintered Titanium samples. *Applied Physics A*, 2004, vol. 78, pp. 1219–1227, doi: 10.1007/s00339-003-2205-6
- [12] Shupenev A.E., Korshunov I.S., Iliin A.S., Osipkov A.S. Grigoryants A.G. Bismuth-Telluride-Based Radiation Thermopiles Prepared by Pulsed Laser Deposition. *XVI international conference Thermoelectrics and their applications–2018*, St. Petersburg, 8–12 October, 2018, doi: 10.1134/S1063782619060204
- [13] Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misurov A.I. *Tekhnologicheskiye protsessy lazernoy obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, Bauman Press, 2006. 664 p.
- [14] Goryaninov V.B., Pavlov I.V., Krishchenko G.M. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical statistics]. Moscow, Bauman Press, 2001. 424 p.
- [15] Mukhachev V.A. *Planirovaniye i obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [Planning and processing of experiment results]. Tomsk, TUSUR publ., 2007. 118 p.
- [16] Shuang Bai, Jian Liu, Pei Yang, Meiyu Zhai, Huan Huang. Femtosecond Fiber Laser Additive Manufacturing of Tungsten. *SPIE Photonics West 9738–24*, San Francisco, CA, 13–18 February, 2016, doi: 10.1117/12.2217551
- [17] Fischer P., Romano V., Weber H.P., Karapatis N.P., Boillat E., Glardon R. Sintering of commercially pure Titanium powder with a Nd:YAG laser source. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51(6), pp. 1651–1662, doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00567-0](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00567-0)

Статья поступила в редакцию 31.08.2020

Информация об авторах

МЕЛЬНИКОВА Мария Александровна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: maria.melnikova@bmstu.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, стр. 1, e-mail: takmar@bmstu.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, стр. 1, e-mail: xol@bmstu.ru).

ТАРЕВА Александра Александровна — аспирант кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tareva@inbox.ru).

ВОЛКОВА Анастасия Алексеевна — инженер кафедры «Лазерные технологии в машиностроении». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: a.a.wolkova@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Мельникова М.А., Таксанц М.В., Холопов А.А., Тарева А.А., Волкова А.А. Исследование особенностей создания одномерных объектов методом импульсного селективного лазерного плавления. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 11, с. 26–35, doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-26-35

Please cite this article in English as:

Melnikova M.A., Taksants M.V., Kholopov A.A., Tareva A.A., Volkova A.A. A Study of Creating One-Dimensional Objects with Pulse Selective Laser Melting. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 11, pp. 26–35, doi: 10.18698/0536-1044-2020-11-26-35

Information about the authors

MELNIKOVA Maria Aleksandrovna — 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: maria.melnikova@bmstu.ru).

TAKSANTS Marina Vyacheslavovna — 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: takmar@bmstu.ru).

KHOLOPOV Andrei 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: xol@bmstu.ru).

TAREVA Aleksandra Aleksandrovna — Postgraduate, 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: tareva@inbox.ru).

VOLKOVA Anastasia Alekseevna — Engineer, 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: a.a.wolkova@gmail.com).