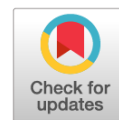


Оригинальное исследование

УДК 621.373.826

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_355

EDN: KVUPAF



Влияние газового потока на образцы, изготовленные методом селективного лазерного сплавления

З. Мианджи^{1,2}, А.Ю. Кобицкий¹, В.В. Черноволов¹, Р.М. Жуков¹, Д.Н. Тужилин¹, Е.В. Раевский¹¹ НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», Москва, Россия;² Национальный исследовательский университет Московский институт электронной техники, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Селективное лазерное сплавление (СЛС) — это технология изготовления металлических деталей путем сплавления частиц металлических порошковых композиций с помощью лазерного излучения. СЛС обеспечивает отличные механические свойства изготовленных деталей и высокую свободу в процессе их проектирования. В данной статье авторы изучают влияние мощности лазерного излучения на процесс разбрызгивания расплавленного порошкового материала. В ходе исследования были проанализированы причины возникновения, внешний вид и состав разбрызгивания, а также методы борьбы с ним.

Поскольку процесс СЛС осуществляется в защитной атмосфере инертного газа, было показано, что поток газа является решающим фактором, так как он удаляет конденсат и предотвращает окисление материала во время плавления. Затвердевшие разбрызгиваемые частицы имеют средний размер приблизительно 162 мкм, что значительно превышает исходный размер порошка, равный 32 мкм.

Цель работы состоит в анализе выбросов материалов из порошка нержавеющей стали во время обработки и влияния потока газа на качество образца, особенно с точки зрения пористости.

Результаты. Показали, что расход газа значительно влияет на однородность свойств изготавливаемых изделий. Свойства изготавливаемых деталей изменялись в зависимости от расположения образцов на платформе. Характеристики изготовленных деталей были более высокими при размещении образцов в зонах с высокой скоростью потока газа, при размещении в зонах с низкой скоростью потока газа их качество снижалось.

Заключение. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования и диагностики качества деталей, изготовленных в процессе СЛС.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление; пористость; скорость потока; разбрызгивание; ламинаризатор.

Как цитировать

Мианджи З., Кобицкий А.Ю., Черноволов В.В., Жуков Р.М., Тужилин Д.Н., Раевский Е.В. Влияние газового потока на образцы, изготовленные методом селективного лазерного сплавления // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 355–364. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_355 EDN: KVUPAF

Original Study Article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_355

EDN: KVUPAF

Effect of Gas Flow on Samples Produced by Selective Laser Melting

Zahra Mianji^{1,2}, Alexey Yu. Kobitsky¹, Vladimir V. Chernovolov¹, Roman M. Zhukov¹, Dmitry N. Tuzhilin¹, Evgeny V. Rayevsky¹

¹ NPTS Lasers and Equipment TM, Moscow, Russia;

² National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Selective laser melting (SLM) is a technology for manufacturing metal parts by melting particles of metal powder compositions using laser radiation. SLM provides excellent mechanical properties of manufactured parts and large discretion of design. The paper studies the effect of laser power on the spattering of molten powder. The study analyzed the causes, appearance, and composition of spatter and methods to prevent it.

The SLM is performed in shielding inert gas; thus, it has been shown that the gas flow is a decisive factor as it removes condensate and prevents oxidation of the material during melting. The solidified spatter has an average size of approximately 162 μm , which is significantly larger than the initial powder size of 32 μm .

AIM: To analyze the spatter of stainless steel powder during processing and the effect of gas flow on sample quality, especially its porosity.

RESULTS: The study showed that gas flow rate significantly affects the uniformity of the properties of manufactured products. The properties of the manufactured parts varied based on the location of the samples on the platform. The quality of the manufactured parts was higher when placed in areas with high gas flow rate and lower when placed in areas with low gas flow rate.

CONCLUSION: The study may be used to predict and test the quality of parts manufactured using the SLM.

Keywords: selective laser melting; porosity; flow rate; spatter; laminarizer.

To cite this article

Mianji Z, Kobitsky AY, Chernovolov VV, Zhukov RM, Tuzhilin DN, Rayevsky EV. Effect of Gas Flow on Samples Produced by Selective Laser Melting. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):355–364. DOI: 10.52899/24141437_2025_03_355 EDN: KVUPAF

ВВЕДЕНИЕ

В процессе селективного лазерного сплавления (СЛС) поверхность материала расплавляется, и иногда материал превращается в плазму, что способствует дополнительно поглощению лазерного излучения [1].

Во время процесса изготовления детали через рабочую камеру постоянно циркулирует защитный газ, удаляя образующиеся при плавлении продукты горения и выброшенные из ванны расплава металлические частицы.

Явление разбрызгивания обычно наблюдается при лазерной обработке в различных производственных процессах, таких как лазерное сверление, резка, сварка, а также в селективном лазерном сплавлении.

В указанных процессах происходит выброс расплавленного материала из ванны расплава с последующим затвердеванием и возможным осаждением на близлежащие участки или удалением с помощью потока газа. Было установлено, что эффекты Марангони в ванне расплава в сочетании с давлением отдачи, возникающим при расширении паров металла, являются основными факторами, ответственными за выброс расплавленного материала [2].

Сила отдачи преодолевает поверхностное натяжение, которое противодействует сжимающему эффекту этой силы, что приводит к образованию углублений и разбрызгиванию материала. При охлаждении ниже температуры кипения поверхностное натяжение начинает преобладать, что приводит к образованию пор в результате разрушения стенок углубления. Эффекты поверхностного натяжения доминируют в переходной области, где наблюдается интенсивное течение расплавленного материала (эффект Марангони). Этот поток способствует охлаждению впадины, образованию зоны денудации, втягиванию соседних частиц и формированию боковых пор вблизи частично расплавленных частиц. В конце концов переходная зона утончается из-за распада потока расплава и образования хвостовой части. Течение в переходной зоне является нерегулярным и длится недолго из-за снижения температуры и последующего затвердевания [3].

Кроме того, сообщалось, что под действием давления газового потока расплавленный металл, изначально имеющий удлиненную форму, распадается на более мелкие капли, что способствует минимизации поверхностной энергии. В качестве альтернативы был разработан гидродинамический анализ в сочетании с моделью однофазного потока, чтобы продемонстрировать, как увлечение микрочастиц потоком окружающего газа на самом деле влияет на выброс брызг по сравнению с давлением отдачи согласно теории паров металла [2, 4].

Воздействие брызг может быть как полезным, так и вредным для свойств детали, что потенциально может привести к ее поломке. Градиенты температуры, возникающие при попадании брызг на более холодную область металла сварного шва, действуют как локализованные источники напряжений, что может способствовать

образованию трещин. Поэтому были предприняты попытки минимизировать или полностью устранить брызги [2].

Толщина порошкового слоя обратно пропорциональна плотности энергии ψ , т.е.

$$\psi = P/(v \cdot h \cdot t),$$

где P — мощность лазера, v — скорость сканирования, h — пространство для штриховки, а t — толщина слоя [5]. Разбрызганные частицы были проанализированы с помощью сканирующей электронной микроскопии, и оказалось, что они значительно крупнее исходного порошка. Таким образом, осаждение брызг во время процесса СЛС, безусловно, нарушает равномерность толщины слоя порошкового материала [6].

Также было показано, что увеличение скорости перемещения пучка сфокусированного лазерного излучения по поверхности слоя порошкового материала или уменьшение его мощности снижает количество образующихся брызг. Количество и размеры брызг, выбрасываемых из ванны расплава, были количественно определены и представлены в отчетах после обработки изображений, полученных с помощью высокоскоростных камер. Было также замечено, что брызги оседают на затвердевших слоях расплава. В ходе количественного анализа основное внимание уделялось брызгам, вновь выбрасываемым из расплава и оседающим над слоем порошка, а также анализу порошка до и после процесса СЛС. При этом роль потока инертного газа в переносе брызг и его влияние на их распределение по слою порошка не рассматривались. Детальное распределение брызг порошка может иметь решающее значение, особенно когда на подложку размещается несколько слоев деталей перед началом сборки [2].

С помощью высокоскоростной камеры было зафиксировано и проанализировано взаимодействие лазерного излучения и брызг. Показано, что при сканировании в направлении потока газа брызги с большей вероятностью попадают на траекторию лазерного луча. В результате тепловая энергия лазерного излучения тратится впустую на сжигание этих брызг, что приводит к неполному расплавлению материала и, как следствие, к повышению пористости напечатанных деталей, что неизбежно снижает их прочность [2].

Поскольку для изготовления деталей методом СЛС используется порошок, механизм образования порошковых брызг является более сложным, чем в других лазерных процессах. Это связано с тем, что может образовываться множество брызг, которые могут смешиваться с чистыми порошками, что, в свою очередь, влияет на последующее формирование структуры. Описанная выше исследовательская работа была сосредоточена на процессе образования брызг и их характеристиках. В этой статье рассматриваются методы борьбы с брызгами, образующимися в процессе СЛС с использованием порошка нержавеющей стали, а также анализируется влияние брызг на поверхность и включения в изготовленных деталях.

Выводы, полученные в результате проведенных исследований, могут быть использованы для производства высококачественных деталей методом СЛС за счет контроля интенсивности рассеяния.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Исследования проводились с использованием порошка нержавеющей стали. Этот материал широко применяется в промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости и хорошим прочностным и пластическим свойствам. Выбранный порошок имеет частицы диаметром 10–63 мкм и следующий химический состав, %: Fe — основа; Cr — 12,73; Co — 8,62; Ni — 5,16; Mo — 3,75; Si — 0,12; Mn — 0,09; C — 0,01.

Для проведения исследований использовался комплекс селективного лазерного сплавления МЛ6-3, разработанный в ООО «НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ». Платформа построения комплекса имеет размеры 300×300 мм. Комплекс МЛ6-3 предназначен для опытно-промышленной отработки процесса получения сложнопрофильных металлических деталей (технология СЛС) по заданной модели САД. Лазерное излучение транспортируется с помощью оптической системы. Источником лазерного излучения в комплексе МЛ6-3 является иттербиевый волоконный лазер YLR-500-SM с длиной волны излучения 1070±5 нм производства компании IPG Photonics («ИПЭ-Полюс») в количестве четырех штук (рис. 1).

Управление работой комплекса осуществляется с помощью специализированного технологического программного обеспечения (СПО), которое состоит из нескольких

программных модулей. СПО принимает на вход от программного модуля Slicer подготовленный файл задания, который затем исполняется программой ML69, управляющей комплексом МЛ6-3.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ ОБРАЗЦОВ

Измерение пористости образцов проводилось с использованием системы анализа изображений «ВидеоТест-Металл 1.2» на фотографиях нетравленной поверхности микрошлифов, полученных на инвертированном оптическом микроскопе CarlZeiss AxioObserver.A1m с использованием системы анализа изображений «ВидеоТест-Структура 5.2». Методика измерения пористости в «ВидеоТест-Металл 1.2» основана на ГОСТ 9391-80. «ВидеоТест-Металл 1.2» позволяет определять пористость материала при увеличениях от ×12,5 до ×1000 в автоматическом режиме. Во встроенной методике определения пористости в «ВидеоТест-Металл 1.2» проведена корректировка выделения пор для более точного определения размеров, площади и объемной доли пор относительно исследованной поверхности.

Микрошлифы исследуемых образцов изготовлены по методике фирмы Struers на шлифовально-полировальном станке Struers LaboPol-5 с использованием оригинальных расходных материалов. Изучение и фотографирование образцов проводилось на оптическом микроскопе AxioObserver.A1m с использованием системы анализа изображений «ВидеоТест-Структура 5.2».

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497-2023 при комнатной температуре на образцах толщиной $a_0 = 2$ мм, шириной $b_0 = 4$ мм, с начальной расчетной длиной $l_0 = 25$ мм (рис. 2).

Испытания проводили на установке INSTRON 5989 со скоростью перемещения траверсы $V_c = 1$ мм/мин при комнатной температуре. Перед испытанием на образцы наносили метки и делали замеры начальной расчетной длины l_0 , а после испытания — конечной расчетной длины l_k . В процессе испытания с помощью тензометра INSTRON 2620-603 записывалась диаграмма деформирования в координатах «напряжение σ — деформация ε ».

РЕЗУЛЬТАТЫ

Порошинки собирались из зоны всасывания (левая часть рис. 3, а). Морфология разбрызгивающихся частиц была изучена с помощью оптического микроскопа. Как показано на рис. 3, б, разбрызгивающиеся частицы имеют крупные размеры и разнообразные формы. Средний размер исходных порошков и разбрызгиваемых частиц

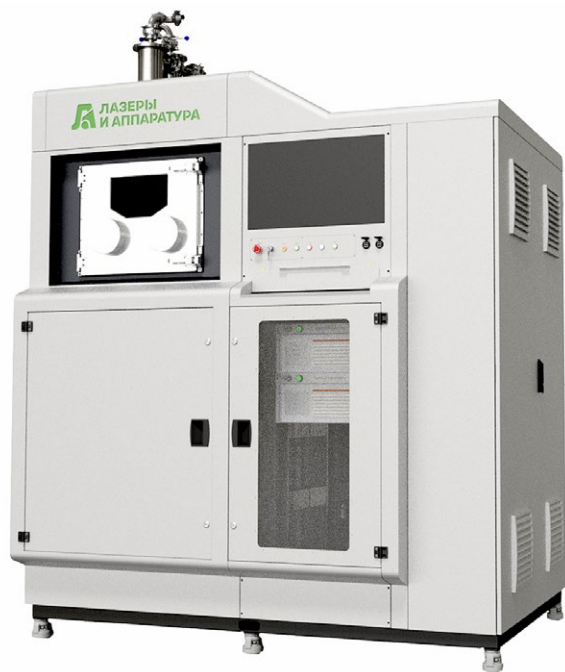


Рис. 1. Внешний вид МЛ6-3.
Fig. 1. View of ML6-3.

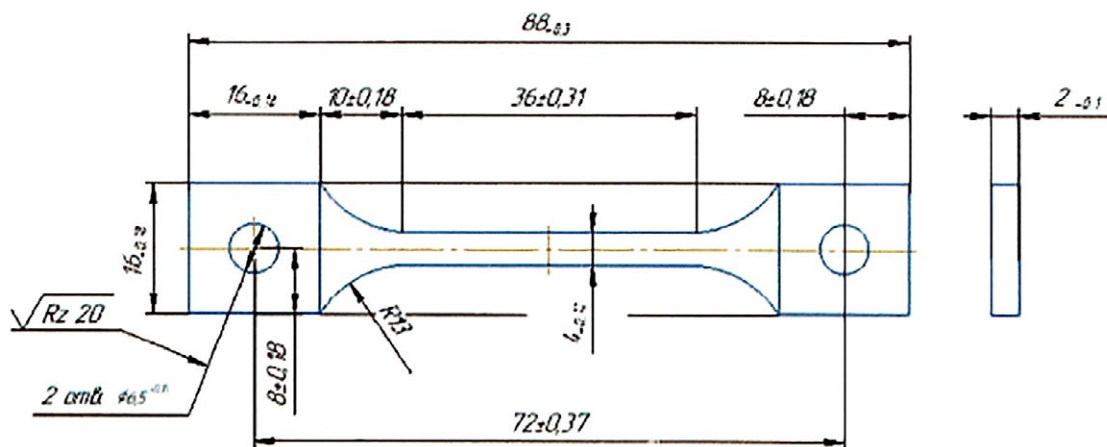


Рис. 2. Образец для испытаний на растяжение.
Fig. 2. Tensile test sample.

составлял 50 мкм и 130 мкм соответственно. Низкая концентрация в распределении по размерам в основном объясняется различными источниками разбрызгиваемых частиц. Кроме того, большинство разбрызгиваемых частиц имело сферическую или почти сферическую морфологию.

Как показано на рис. 4, а, поток газа поступает в камеру по двум трубам. Если используется деталь, изображенная на рис. 4, б, то скорость потока газа на разных участках платформы неодинакова и в некоторых местах поток газа полностью отсутствует. В то же время использование

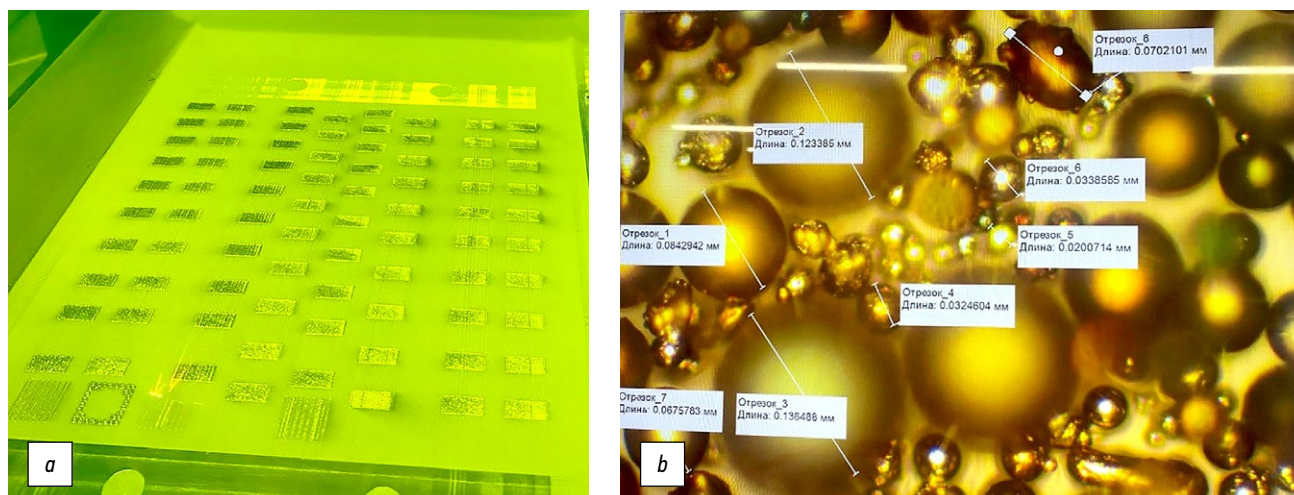


Рис. 3. Внешний вид платформы (а) и порошинки после воздействия лазерного излучения, удаленные из ванны расплава (б).
Fig. 3. View of the platform (а) and powder particles removed from the melt bath after exposure to laser radiation (б).

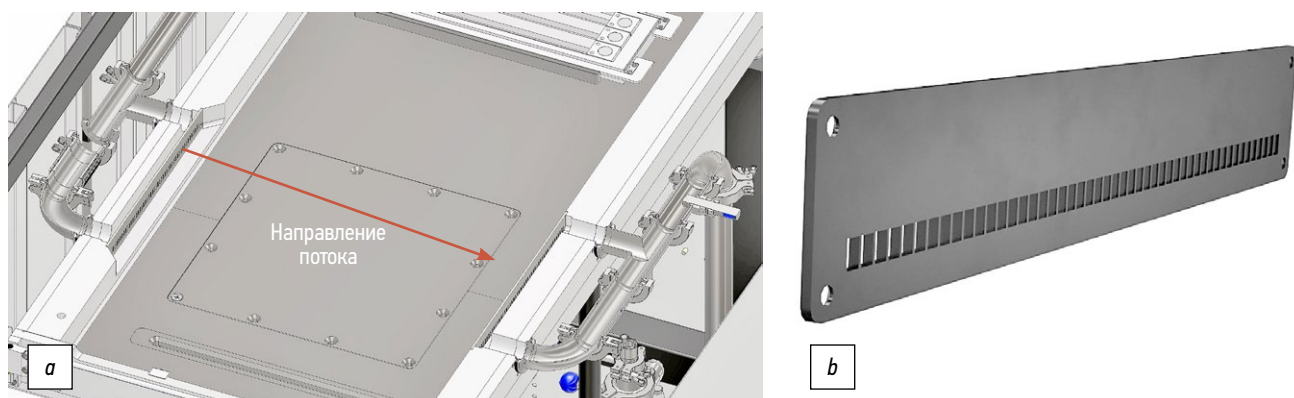


Рис. 4. Общий вид платформы и циркуляция газа (а), деталь (б).
Fig. 4. General view of the platform and gas circulation (а); part (б).

ламинаризатора обеспечивает практически равномерное распределение расхода газа по всей поверхности платформы.

На рис. 5, *a* показано, как изменяются траектории частиц в зависимости от наличия газового потока. Например, при одинаковой массе и размере частиц те из них, которые вылетают с высокой скоростью и под большим углом, обладают большей кинетической энергией и, следовательно, достигают большей высоты траектории в отсутствие газового потока. С другой стороны, частицы, выброшенные под меньшими углами, не отклоняются далеко от места сканирования. В статье [7] наблюдалось, что выброшенные частицы обладали достаточным восходящим моментом, чтобы не подвергаться значительному воздействию поперечного потока на начальном этапе своих траекторий. Однако гравитационные силы в конечном итоге вернули бы их обратно вниз, и частицы были бы унесены поперечным потоком инертного газа. В процессе СЛС наличие газового потока способствовало бы дальнейшему перемещению этих частиц вниз по течению в направлении $-x$, что делает их распределение в значительной степени зависимым от числа Стокса [8].

Рис. 5, *b* показывает процесс сгорания частиц без поперечного потока. Рис. 5, *c* иллюстрирует наличие поперечного потока с использованием ламинаризатора при мощности лазерного излучения 200 Вт. Показанные изображения указывают на необходимость согласования поперечного потока с настройками процесса СЛС, поскольку пламя и частицы должны быть эффективно удалены. Еще одно важное наблюдение заключается в том, что выброшенные частицы обладают достаточным восходящим моментом, чтобы изначально не подвергаться влиянию поперечного потока, но при этом отклоняются в сторону при повторном входе в поток после свободного падения.

Выброшенные частицы, находящиеся в производственной зоне, будут использоваться на следующем этапе производственного процесса. Если частицы достаточно малы, они будут расплавлены лазерным источником и использованы в качестве исходного порошка. Однако, если частицы крупные, мощности лазерного излучения недостаточно, чтобы их расплавить. Это приводит к образованию пористости внутри готовых изделий [9].

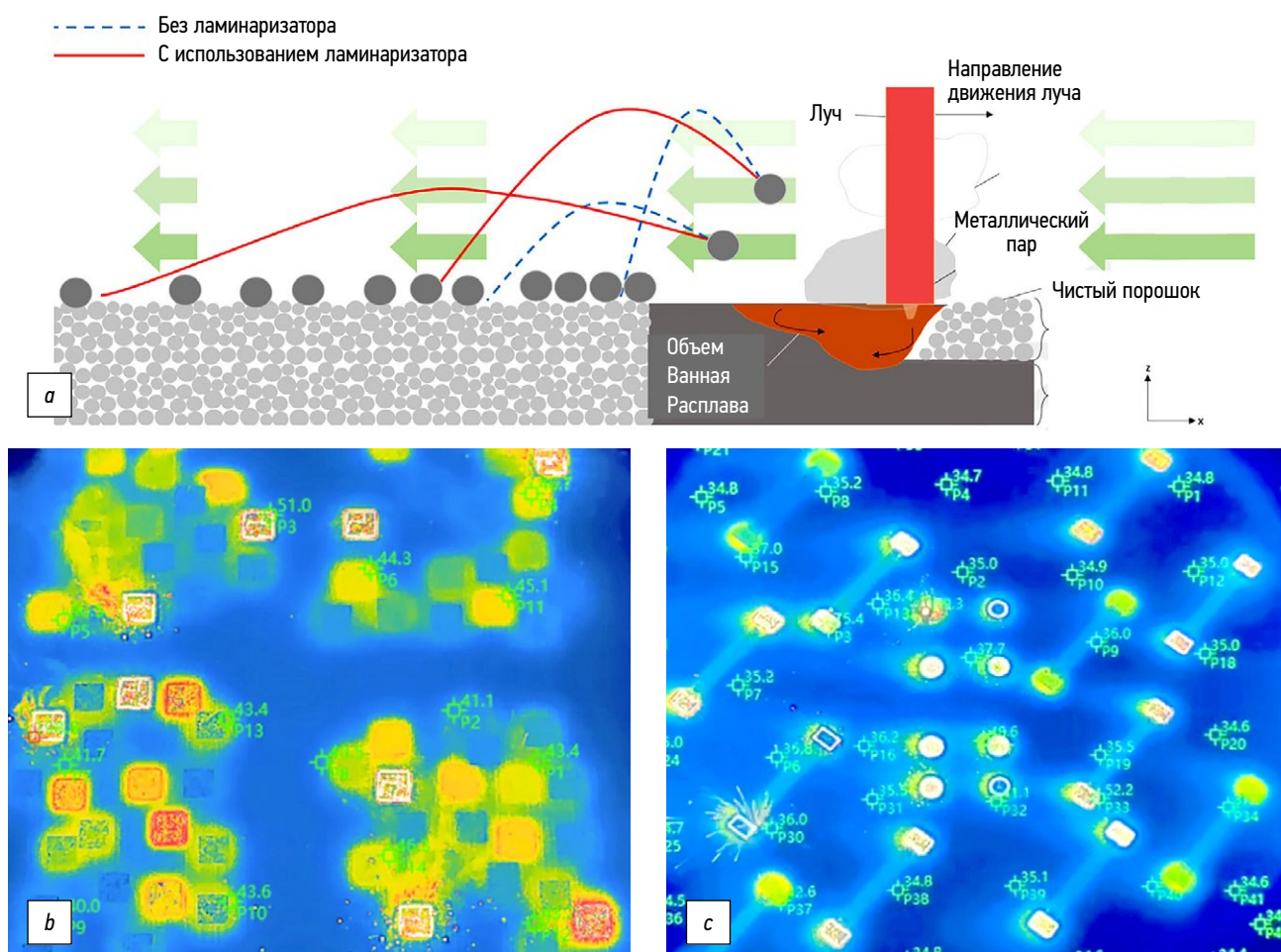


Рис. 5. Схема профилей выброса брызг из ванны расплава и влияние газового потока на траектории (*a*), изображение получено с помощью тепловизора [2]; без ламинаризатора (*b*); с использованием ламинаризатора (*c*).

Fig. 5. Diagram of melt bath spatter profiles and the effect of gas flow on the trajectories (*a*). The image was made by a thermal imaging camera [2] without a laminarizer (*b*) and using a laminarizer (*c*).

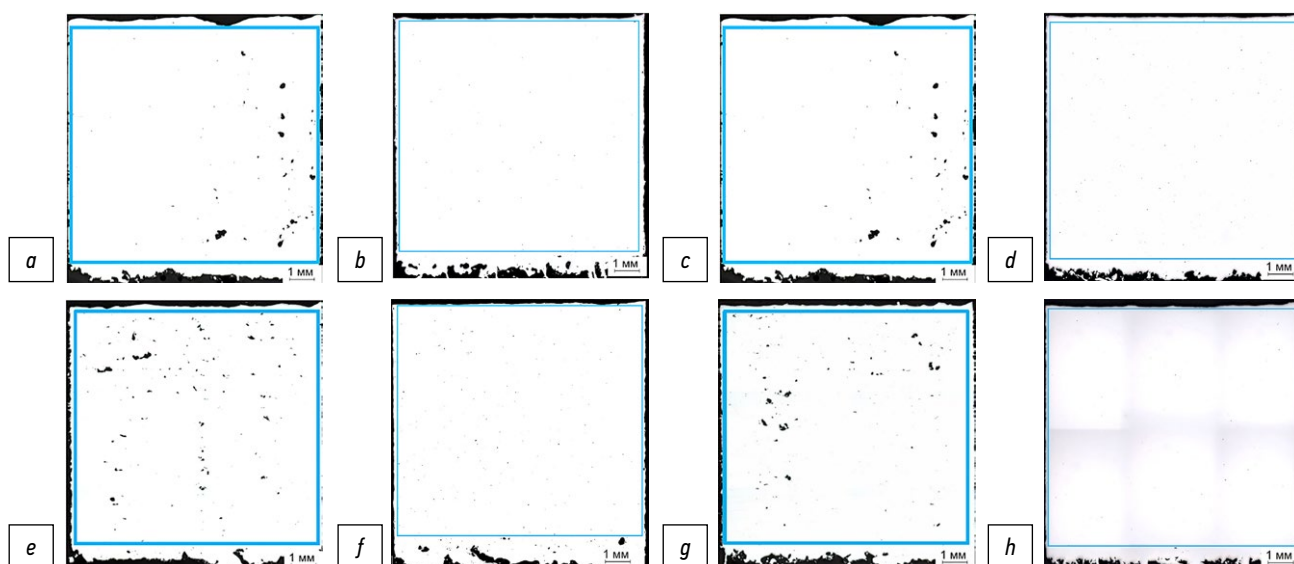


Рис. 6. Определение пористости деталей, лазер № 1: без ламинаризатора (a), с использованием ламинаризатора (b); лазер № 2: без ламинаризатора (c), с использованием ламинаризатора (d); лазер № 3: без ламинаризатора (e), с использованием ламинаризатора (f); лазер № 4: без ламинаризатора (g), с использованием ламинаризатора (h).

Fig. 6. Porosity analysis of parts, laser 1: without a laminarizer (a) and using a laminarizer (b); laser 2: without a laminarizer (c) and using a laminarizer (d); laser 3: without a laminarizer (e) and using a laminarizer (f); laser 4: without a laminarizer (g) and using a laminarizer (h).

Когда новый слой порошкового материала разравнивается на поверхности построения, затвердевшие разбрызгиваемые частицы между слоями не могут быть удалены, поэтому они накапливаются и способствуют образованию внутренних дефектов в деталях. Если брызги прилипают к поверхности изготовленных деталей, предварительное нанесение порошка будет заблокировано при распределении следующего слоя порошка. Мелкие брызги полностью расплавляются при лазерном сканировании и, таким образом, металлургически соединяются с деталями. Если размеры затвердевших брызг превышают указанную толщину слоя, то только часть из них расплавляется при лазерном сканировании. Это предотвращает попадание лазерного излучения в области рядом с крупными брызгами, что затрудняет растекание жидкого металла в ванне расплава [10, 11].

Как видно на рис. 6, a, c, e, g, детали, изготовленные без использования ламинаризатора из-за недостаточного расхода газа, покрываются выброшенными из ванны расплава металлическими частицами, которые падают на поверхность чистого порошка в рабочей зоне детали, еще не подвергнутой сплавлению. Это может привести к образованию пор в объеме детали.

В то же время, как показано на рис. 6 b, d, f, h, при использовании ламинаризатора скорость потока газа равномерна по всей платформе. Металлические частицы летят на поверхности в нерабочую зону или частично сплавляются. В результате пористость практически отсутствует.

В результате испытаний были определены механические характеристики: временное сопротивление σ_s , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение после разрыва ε .

Проведены испытания на растяжение при комнатной температуре плоских образцов толщиной 2 мм из металлопорошковой стали, полученных методом СЛС на установке МЛ6-3 с четырьмя лазерами на платформе размером 300×300 мм.

Полученные средние значения физико-механических свойств: $\sigma_s = 1015 \text{ Н/мм}^2$; $\sigma_{0,2} = 768 \text{ Н/мм}^2$; $\varepsilon = 8,17\%$. Как видно на рис. 7, результаты испытаний на растяжение по всему поверхностному участку платформы одинаковы при использовании ламинаризатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования процесса селективного лазерного сплавления (СЛС) было проанализировано влияние мощности лазерного излучения и потока защитного газа на выброшенные в виде брызг из ванны расплава металлические частицы. Было показано, что если выброшенные частицы возвращаются обратно на поверхность предназначенного для лазерного сплавления слоя порошкового материала, то это ухудшает качество изготавливаемой детали. Повышение однородности детали может быть обеспечено за счет использования ламинаризатора для улучшения потока газа.

Разбрызгиваемые частицы могут прилипать к поверхности готовых деталей или смешиваться с несплавленным порошком. Это может привести к образованию пор или отверстий внутри деталей.

При использовании нового ламинаризатора результаты испытаний на растяжение по всему поверхностному участку платформы одинаковы.

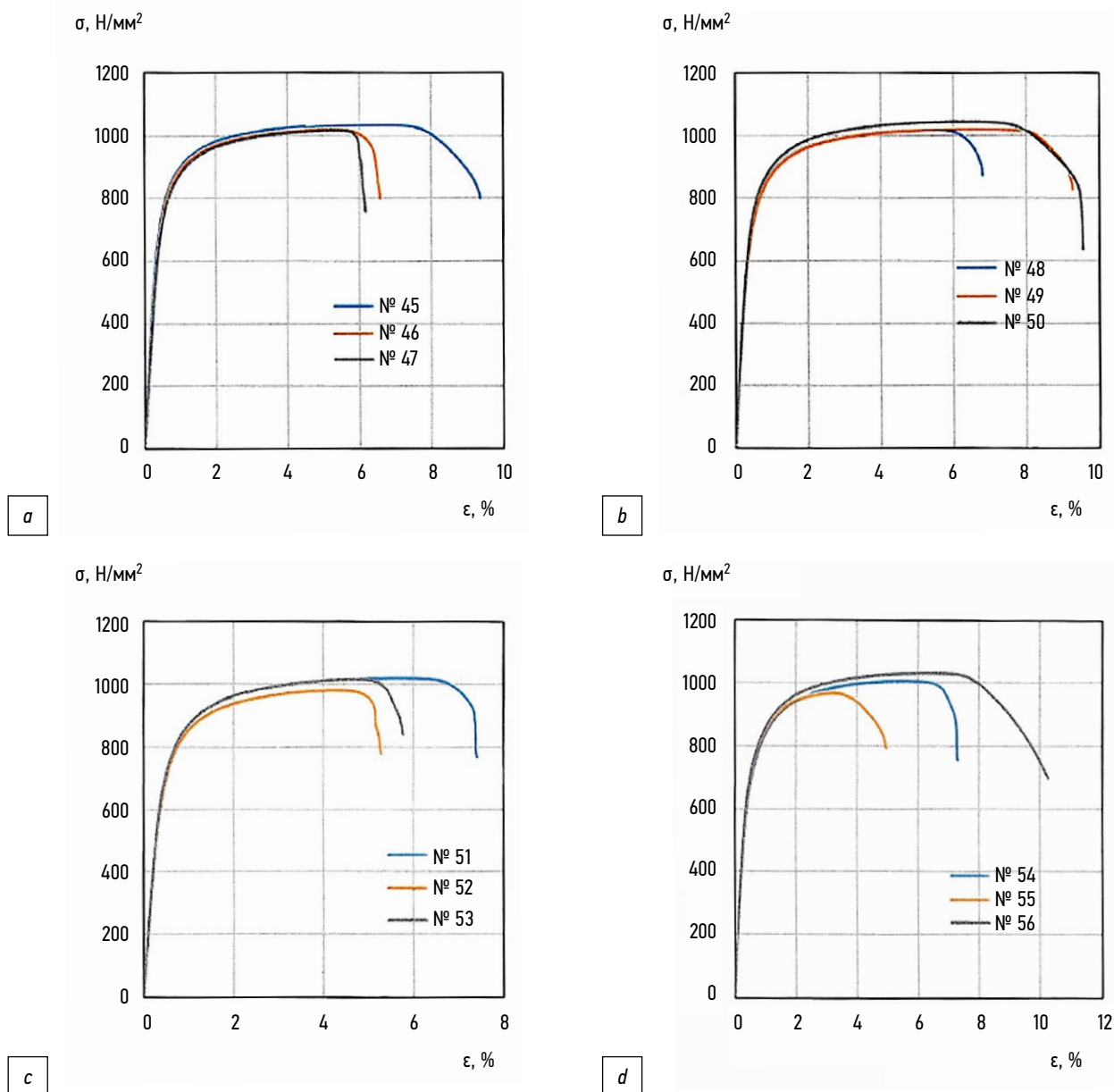


Рис. 7. Диаграммы деформирования при растяжении: лазер № 1 (a); лазер № 2 (b); лазер № 3 (c); лазер № 4 (d).
Fig. 7. Tensile strain diagrams: laser 1 (a); laser 2 (b); laser 3 (c); laser 4 (d).

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Захра Мианджи — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Алексей Ю. Кобицкий — редактирование текста рукописи; Евгений В. Раевский — редактирование текста рукописи, создание изображений; Владимир В. Черноволов, Роман М. Жуков, Димитрий Н. Тужилин — консультирование при написании текста рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Благодарности. Благодарим всех людей, которые помогли в изготовлении МЛ6-3: технологов, разработчиков-конструкторов, электронщиков, программистов, а также сотрудников механического и сборочного производства и всех, кто принимал участие в процессе.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: Zakhra Mianji: investigation, writing—original draft; Alexey Yu. Kobitsky: writing—review & editing; Evgeny V. Raevsky: writing—review & editing, visualization; Vladimir V. Chernovolov, Roman M. Zhukov, Dimitry N. Tuzhilin: writing—advice. All authors approved the version of the manuscript to be published and agree to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Acknowledgments: We thank all the people who helped us to make ML6-3, including manufacturing engineers, designers, electronics engineers, software developers, employees of mechanical and assembly shops, and everyone who took part in the process.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bin A., Halimi I., Pham Q. Spatter transport by inert gas flow in selective laser melting: A simulation study // *Powder Technol.* 2019. Vol. 352. P. 103–116. doi: 10.1016/j.powtec.2019.04.044
2. Bin A.A., Pham Q. Study of the spatter distribution on the powder bed during selective laser melting // *Addit. Manuf.* 2018. Vol. 22. P. 86–97. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.036
3. Khairallah S.A., Anderson A.T., Rubenchik A., King W.E. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 108. P. 36–45. doi: 10.1016/j.actamat.2016.02.014 EDN: WUOJWR
4. Manyalibo J.M. Metal vapor micro-jet controls material redistribution in laser powder bed fusion additive manufacturing // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7, N. 1. P. 1–12. doi: 10.1038/s41598-017-04237-z
5. Read N., Wang W., Essa Kh., Attallah M.M. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development // *Mater. Des.* 2015. Vol. 65. P. 417–424. doi: 10.1016/j.matdes.2014.09.044
6. Wang D., Wu Sh., Fu F., et al. Mechanism and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties // *Mater. Des.* 2016. Vol. 117. P. 121–130. doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.060
7. Low D.K.Y., Li L., Corfe A.G. Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NIMONIC 263 alloy // *Appl. Surf. Sci.* 2000. Vol. 154–155. P. 689–695. doi: 10.1016/S0169-4332(99)00427-4 EDN: JIEYTI
8. Bidare P., Bitharas I., Ward R.M., et al. Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion // *Acta Mater.* 2018. Vol. 142. P. 107–120. doi: 10.1016/j.actamat.2017.09.051
9. Wang T., Dai Sh., Liao H., Zhu H. Pores and the formation mechanisms of SLMed AlSi10Mg // *Rapid Prototyping Journal*. 2020. Vol. 26, N. 9. P. 1657–1664. doi: 10.1108/rpj-02-2020-0036 EDN: GOQBNP
10. Nguyen D.S., Park H.S., Lee C.M. Effect of cleaning gas stream on products in selective laser melting // *Mater. Manuf. Process.* 2018. Vol. 34, № 4. P. 364–370. doi: 10.1080/10426914.2018.1512132
11. Pal S., Drstvenšek I., Brajljeh T. Physical behaviors of materials in selective laser melting process // *Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 64, № 12. P. 695–707. doi: 10.2507/daaam.scibook.2018.21

REFERENCES

1. Bin A, Halimi I, Pham Q. Spatter transport by inert gas flow in selective laser melting: A simulation study. *Powder Technol.* 2019;352:103–116. doi: 10.1016/j.powtec.2019.04.044
2. Bin AA, Pham Q. Study of the spatter distribution on the powder bed during selective laser melting. *Addit. Manuf.* 2018;22:86–97. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.036
3. Khairallah SA, Anderson AT, Rubenchik A, King WE. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*. 2016;108:36–45. doi: 10.1016/j.actamat.2016.02.014 EDN: WUOJWR
4. Manyalibo JM. Metal vapor micro-jet controls material redistribution in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Sci. Rep.* 2017;7(1):1–12. doi: 10.1038/s41598-017-04237-z
5. Read N, Wang W, Essa Kh, Attallah MM. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Mater. Des.* 2015;65:417–424. doi: 10.1016/j.matdes.2014.09.044
6. Wang D, Wu Sh, Fu F, et al. Mechanism and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties. *Mater. Des.* 2016;117:121–130. doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.060
7. Low DKY, Li L, Corfe AG. Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NIMONIC 263 alloy. *Appl. Surf. Sci.* 2000;154–155:689–695. doi: 10.1016/S0169-4332(99)00427-4 EDN: JIEYTI
8. Bidare P, Bitharas I, Ward RM, et al. Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion. *Acta Mater.* 2018;142:107–120. doi: 10.1016/j.actamat.2017.09.051
9. Wang T, Dai Sh, Liao H, Zhu H. Pores and the formation mechanisms of SLMed AlSi10Mg. *Rapid Prototyping Journal*. 2020;26(9):1657–1664. doi: 10.1108/rpj-02-2020-0036 EDN: GOQBNP
10. Nguyen DS, Park HS, Lee CM. Effect of cleaning gas stream on products in selective laser melting. *Mater. Manuf. Process.* 2018;34(4):364–370. doi: 10.1080/10426914.2018.1512132
11. Pal S, Drstvenšek I, Brajljeh T. Physical behaviors of materials in selective laser melting process. *Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering*. 2018;64(12):695–707. doi: 10.2507/daaam.scibook.2018.21

ОБ АВТОРАХ*** Мианджи Захра,**

канд. техн. наук, ведущий инженер технолог,
ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;
адрес: Россия, 124498, Зеленоград, проезд 4922-й, д. 4, стр. 4,
Технопарк ЭЛМА;
eLibrary SPIN: 3908-8005;
e-mail: mianji@bk.ru

Кобицкий Алексей Юрьевич,

руководитель направления Аддитивные Технологии,
ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;
e-mail: ayuk@laser-app.ru

Черновол Владимир Владимирович,

главный конструктор, ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;
e-mail: chvv@laser-app.ru

Жуков Роман Михайлович,

инженер конструктор, ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;
e-mail: zhrm@laser-app.ru

Тужилин Дмитрий Николаевич,

заместитель по науке, ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;
e-mail: tuzhilin@laser-app.ru

Раевский Евгений Валентинович,

канд. техн. наук, доцент, главный конструктор,
ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;
eLibrary SPIN: 3372-1767;
e-mail: evr@laser-app.ru

AUTHORS' INFO*** Zahra Mianji,**

Cand. Sci. (Engineering), Senior Technical Engineer,
NPTS Lasers and Equipment TM LLC;
address: 4 passage 4922, Zelenograd, Moscow,
124498, Russia;
eLibrary SPIN: 3908-8005;
e-mail: mianji@bk.ru

Alexey Yu. Kobitsky,

Head of Additive Technologies, NPTS Lasers
and Equipment TM LLC;
e-mail: ayuk@laser-app.ru

Vladimir V. Chernovolov,

Chief Designer, NPTS Lasers and Equipment TM LLC;
e-mail: chvv@laser-app.ru

Roman M. Zhukov,

Academic Degree, Academic Title, Designer Engineer,
NPTS Lasers and Equipment TM LLC;
e-mail: zhrm@laser-app.ru

Dmitry N. Tuzhilin,

Deputy General Director, NPTS Lasers and Equipment TM LLC;
e-mail: tuzhilin@laser-app.ru

Evgeny V. Rayevsky,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Chief Designer,
NPTS Lasers and Equipment TM LLC;
eLibrary SPIN: 3372-1767;
e-mail: evr@laser-app.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author