

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 3. С. 111–122
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 3, pp. 111–122

Научная статья

УДК 621.762

URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185057>

EDN: <https://www.elibrary.ru/YOKRCK>

Анализ шероховатости сплава AlSi10Mg, полученного методом СЛС для использования в теплообменных элементах космических аппаратов

А.А. Басов¹, К.С. Коробов^{2✉}, Л.Н. Лесневский³, И.А. Николаев⁴, А.В. Рипецкий⁵

^{2,3,4,5}Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

¹ПАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, госкорпорация «Роскосмос», Королев, Российская Федерация

²barlosh@yandex.ru✉

Аннотация. В работе рассмотрена возможность влияния режимов селективного лазерного сплавления (СЛС) на конечную шероховатость рабочих поверхностей теплообменных агрегатов космических аппаратов (КА), изготовленных методами аддитивных технологий из сплава AlSi10Mg в части уменьшения объема или полного исключения постобработки теплообменных поверхностей полученного изделия. Показано, что использование стратегий лазерного оконтуривания (чистовой обработки) и исследование ее влияния на шероховатость формируемых поверхностей теплообменников позволяет исключить постобработку таких поверхностей, связанную с необходимостью их очистки от частиц порошка. Построены расчетно-экспериментальные зависимости между ключевыми технологическими параметрами процесса СЛС: мощностью, скоростью сканирования, при чистовой обработке, а также углом наклона поверхностей и толщиной синтезируемого слоя. Разделение процесса СЛС на черновую и чистовую обработки, нахождение и применение режимов чистового режима сплавления позволило снизить шероховатость вплоть до $Sa = 5,45$ мкм. Проведенные исследования показали, что возможно не только исключить неизбежную и трудоемкую очистку внутренних поверхностей теплообменников, изготавливаемых методом СЛС, но и обеспечить требуемую шероховатость теплообменных поверхностей, оказывающих влияние на их коэффициент теплоотдачи и интенсификацию теплообмена в разрабатываемых компактных и эффективных теплообменных элементах КА.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное сплавление, теплообменные аппараты, управляемая шероховатость, объемный энерговклад

Финансирование: Работа выполнена в рамках Соглашения о предоставлении из федерального бюджета гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития Минобрнауки России № 075-15-2024-552

Для цитирования. Басов А.А., Коробов К.С., Лесневский Л.Н., Николаев И.А., Рипецкий А.В. Анализ шероховатости сплава AlSi10Mg, полученного методом СЛС для использования в теплообменных элементах космических аппаратов // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 3. С. 111–122. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185057>

Original article

Controlled surface roughness of AlSi10Mg alloy produced by LPBF for aerospace heat exchange elements

A.A. Basov¹, K.S. Korobov^{2✉}, L.N. Lesnevsky³, I.A. Nikolaev⁴, A.V. Ripetsky⁵

^{2,3,4,5}*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation*

¹*PAO S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Roscosmos State Corporation, Korolev, Russian Federation*

²*barlosh@yandex.ru✉*

Abstract. This study investigates the controlled surface roughness of heat exchange components fabricated from AlSi10Mg alloy using Laser Powder Bed Fusion (LPBF) technology specifically for aerospace applications. One significant challenge in additive manufacturing for aerospace systems is achieving precision surface roughness without extensive post-processing, particularly for internal channels where cleaning powder residues is complex and costly. The present research addresses this issue by exploring laser contouring strategies to realize targeted roughness levels directly through the manufacturing process. A comprehensive experimental program was undertaken, systematically varying critical LPBF parameters including laser power (P), scanning speed (V), and layer thickness (LT). Detailed statistical analysis revealed that layer thickness (LT) exerted the most significant influence on final roughness outcomes, followed by laser power (P) and scanning speed (V). The LPBF process was segmented into coarse and fine treatment stages to optimize roughness characteristics effectively. Through precise fine-treatment parameter adjustments, an optimal linear energy density (LED) of approximately 1,309 J/mm was identified, dramatically reducing surface roughness values. Minimum roughness values achieved were $Sa = 5,45 \mu\text{m}$ for upskin surfaces and $Sa = 7,232 \mu\text{m}$ for downskin surfaces at a 20 μm layer thickness. Median roughness measurements, serving as more representative indicators of typical performance, were recorded at $Sa = 9,781 \mu\text{m}$ for upskin and $Sa = 12,859 \mu\text{m}$ for downskin surfaces at 40 μm layer thickness. Maximum roughness levels reached $Sa = 68,217 \mu\text{m}$ for downskin surfaces at an 80 μm thickness. The research further identified specific critical surface inclination angles ranging between 28° and 40°, at which roughness increased sharply, by approximately 6–10 times. These critical angles are crucial considerations in aerospace component design, impacting heat transfer and fluid flow efficiency. The study conclusively demonstrated that it is feasible to tailor surface roughness to specific functional requirements, offering significant advantages for the thermal management systems of spacecraft. The critical role of volumetric energy density (VED), in combination with pre-optimized linear energy density, was underscored as essential for achieving reproducible, precisely controlled surface textures. Future work aims to expand on these findings by evaluating variations in laser beam diameters and employing advanced scanning strategies.

Keywords: additive manufacturing, Laser Powder Bed Fusion, heat exchangers, controlled roughness, volumetric energy density

Funding: This study was carried out under the Agreement for the provision of grant funding from the federal budget for large scientific projects in priority areas of scientific and technological development of the Russian Ministry of Science and Higher Education no. 075-15-2024-552

For citation. Basov A.A., Korobov K.S., Lesnevsky L.N., Nikolaev I.A., Ripetsky A.V. Controlled surface roughness of AlSi10Mg alloy produced by LPBF for aerospace heat exchange elements. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 3, pp. 111–122. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=185057>

1. Введение

Практика разработки многомодульных долгоживущих космических объектов, в том числе обитаемых, выявила тенденцию к существенному росту тепловыделений бортовых систем. Соответственно возрастают требования массово-энергетической эффективности системы обеспечения теплового режима и ее составных частей. Наиболее остро проблема повышения массово-энергетической эффективности стоит для активных систем обеспечения теплового режима (СОТР) на базе гидравлических контуров. Для этого типа СОТР характерно наличие большого количества массивных теплообменных агрегатов с развитой внутренней поверхностью, доступ к которой крайне ограничен [1–3].

Применение технологии селективного лазерного сплавления [4, 5], подтвержденные проведенными исследованиями [6–9], доказали возможность и эффективность создания теплообменных агрегатов гидравлических контуров активных СОТР, обеспечивающих ожидаемое сокращение массы агрегатов составляет 20...25 % от начального значения при сохранении теплофизических и гидравлических показателей. Это означает существенный рост массовой эффективности СОТР при, по крайней мере, не увеличении основной энергетической характеристики – мощности электронасосных агрегатов.

Существенным фактором, сдерживающим внедрение СЛС-технологии в изготовление высокоэффективных теплообменных устройств космического назначения, является значительный объем необходимой постобработки, из которого «львиную долю» составляют затраты на очистку труднодоступной развитой внутренней теплообменной структуры от остатков исходного материала (порошка) и от частиц порошка с низкой адгезией к основному массиву созданного элемента теплообменной структуры. Для небольших ($250 \times 200 \times 40$ мм) теплообменных агрегатов эффективное решение реализовано методом ультразвуковой очистки в слабощелочной среде [10, 11]. Для агрегатов с размерами, превосходящими указанные из-за особенностей распространения ультразвуковых волн, ожидаются неопределенности. Наилучшим способом решения проблемы очистки и освобождения внутренних полостей теплообменных агрегатов от частиц порошка с недостаточной адгезией

к основной структуре создаваемой детали условно служил бы подход, обеспечивающий за счет варьирования технологических режимов селективного лазерного сплавления исключить наличие на поверхности создаваемой теплообменной структуры частиц с недостаточной адгезией и созданию поверхности с программируемой шероховатостью.

В последние годы ряд исследований был посвящен изучению шероховатости поверхности в технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) и ее влиянию на функциональные свойства изделий. Например, исследование, проведенное в работе [12], продемонстрировало значительное влияние стратегий оконтуривания и линейного энергоуклада (ЛЭВ) на шероховатость верхних слоев (называемых далее *cr-skin* – US) наклонных образцов. Полученные ими экспериментальные данные показали, что стратегия предварительного оконтуривания при высоком ЛЭВ (≥ 4 Дж/см) позволила достичь минимальной шероховатости ($Sa = 7,43$ мкм), тогда как низкий ЛЭВ ($\leq 0,5$ Дж/см) привел к максимальному значению $Sa = 33,74$ мкм. Наблюдалось также низкое количество налипших на поверхности несплавленных частиц с минимальной шероховатостью $Sa = 8,24$ мкм при повторном сплавлении (чистовой обработки) контуров с высокими значениями ЛЭВ на внутренней траектории контура. Эта работа подчеркивает необходимость оптимизации стратегий сканирования и параметров ЛЭВ по параметру шероховатости (Sa , мкм) и повышения эксплуатационных характеристик деталей.

Множество работ отмечают подбор значений объемного энергоуклада (ОЭВ) как одновременно очень трудоемкий, сложный и важный процесс для достижения требуемых параметров качества изделий (шероховатость, пористость и точность размеров деталей). В работе [13] показано, что изменение ОЭВ оказывает значительное влияние на пористость и качество поверхности Ti6Al4V. Увеличение ОЭВ приводит к уменьшению размеров мартенситных α' -фаз и росту столбчатых β -зерен, что способствует повышению плотности деталей за счет снижения пористости и дефектов. Минимальная шероховатость поверхности, достигнутая при изготовлении Ti6Al4V методом СЛС, составляет 4,91 мкм, а оптимальный диапазон ОЭВ для

получения наилучшего сочетания морфологии и механических свойств лежит в пределах 55–65 Дж/мм³. Авторы отмечают, что, несмотря на эффективность ОЭВ в качестве параметра оптимизации, он не является единственным фактором, определяющим свойства конечных изделий. Различные сочетания мощности лазера, скорости сканирования, шага штрихов и толщины слоя могут приводить к одинаковым значениям ОЭВ, но при этом формировать различную микроструктуру и шероховатость поверхности. Это подчеркивает необходимость детального изучения взаимосвязей между параметрами технологического процесса СЛС. Кроме того, в будущем авторы планируют учитывать изменение диаметра лазерного пятна, а также стандартизировать свойства порошков, используемых в разных системах СЛС, чтобы повысить воспроизводимость результатов.

Вопросам влияния шероховатости на теплообмен и гидравлическое сопротивление элементов авиационной и ракетно-космической техники давно уделяется достаточно внимания [14]. Установлено, что шероховатость внутренних поверхностей каналов теплообменных устройств оказывает влияние на коэффициент теплоотдачи, особенно улучшается теплообмен при турбулизации потока теплоносителя при заданной шероховатости.

Согласно [15] режим полного проявления эффекта шероховатости при турбулентном течении наступает при обеспечении условий

$$hV\tau/\nu > 70, \quad (1)$$

где h – геометрический параметр (высота неровностей), $V\tau$ – динамическая скорость потока, ν – кинематическая вязкость рабочего тела, при этом высота выступов шероховатости выходит за пределы ламинарного подслоя [16].

Таким образом, шероховатость теплообменных поверхностей способствует интенсификации теплообмена в основном за счет перехода от ламинарного течения к турбулентному, а повышение шероховатости внутренних поверхностей каналов теплообменников, сформированных с применением аддитивных технологий, и в частности, технологии селективного лазерного сплавления позволяет разрабатывать контактные и эффективные теплообменные аппараты [17]. Особого внимания заслуживает различная теп-

ловыделяющая аппаратура КА, располагаемая в негерметичных отсеках, когда требуется передача большого количества тепла от этой аппаратуры к внешним радиационным поверхностям. С этой целью такая аппаратура устанавливается на термостатируемые платы, через которые циркулирует жидкий теплоноситель обеспечивая требуемый внутренний тепловой режим КА [18]. В работе [6] детально рассмотрены результаты комплексных испытаний такого теплообменника космического назначения, изготовленного методом СЛС.

Несмотря на значительный объем исследований, посвященных влиянию параметров процесса СЛС на шероховатость поверхности, в доступной литературе отсутствуют экспериментальные работы, в которых изучалась зависимость шероховатости от объемного энерговклада (ОЭВ) с учетом предварительно оптимизированного линейного энерговклада (ЛЭВ), как это сделано в нашей предыдущей работе [19]. В большинстве случаев параметры СЛС варьируются, однако не учитывается влияние заранее определенного ЛЭВ, что затрудняет системный анализ и воспроизводимость полученных данных. Такой подход создает ограничения в возможности подбора технологических параметров формирования деталей с минимальной шероховатостью и стабильными характеристиками поверхности. Настоящая работа направлена на устранение данного недостатка путем многоэтапного исследования, в котором планируется найти не только интервал рабочих значений объемного энерговклада, но и построить расчетно-экспериментальную зависимость связи параметра Sa шероховатости, определяемого толщиной слоя (layer thickness – LT) сплавления, с величиной объемного энерговклада, определяемого с учетом оптимального значения ЛЭВ [19] с целью обеспечения возможностью управления шероховатостью поверхности изделий СЛС.

Следует отметить, что в работе рассматривается такой вид геометрической структуры поверхностного слоя, который называется случайной шероховатостью, которая традиционно определяется параметрами, представленными в ГОСТ 2789-13, и характеризуется случайным распределением их по поверхности. Так, например, при механической обработке резанием, они определяются вибрацией станка и инструмента,

пластическим разрушением поверхностного слоя обрабатываемого материала, величиной подачи и формой режущей кромки используемого инструмента, и другими режимными параметрами обработки. Случайная шероховатость поверхностей, сформированных методом СЛС, определяется [20] следующими основными факторами.

Шероховатость поверхности, вызванная «лестничным эффектом» [21], обусловлена ступенчатым приближением криволинейной поверхности изделия конечным числом слоев. Одна и та же геометрия может быть представлена или «разбита» на разное число слоев. Чем больше толщина слоя, тем меньше количество слоев требуется синтезировать для изготовления одного и того же изделия. Однако такое сокращение времени приводит к увеличению шероховатости (рисунок 1 а). Среднюю шероховатость Ra , мкм можно оценить, опираясь на выражение (2):

$$Ra(LT, \theta) = 1500 LT \times \sin\left(\frac{90 - \theta}{4}\right) \tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right), \quad (2)$$

где LT – толщина наплавляемого слоя, мкм; θ – угол сборки слоев относительно вертикали, град.

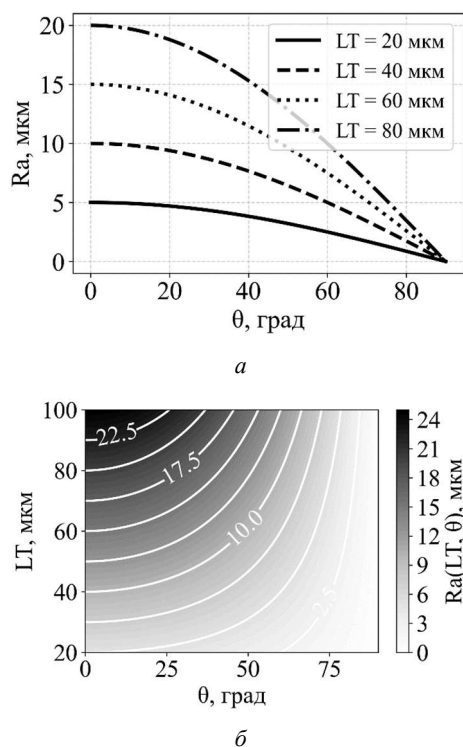


Рис. 1. а – Изменение шероховатости поверхности при разной толщине слоя LT ; б – контурный график функции $Ra(LT, \theta)$ [21]

Рассмотрев $Ra(LT, \theta)$ как функцию двух переменных, построим контурный график (рисунок 1 б). Величина шероховатости Ra , мкм увеличивается с увеличением толщины слоя LT , мкм. Поэтому приходится выбирать между временем изготовления детали, ее сложностью и получаемой шероховатостью. Создание детали с малой толщиной слоя может значительно снизить ее шероховатость поверхности, но потребует больше времени. Однако в этом случае придется, по возможности, избегать острых углов ориентации сборки, что особенно важно в случае деталей со сложной геометрией.

К другому механизму формирования шероховатости поверхности в технологии СЛС следует отнести неполное сплавление частиц порошка на границах ванны расплава. Частицы используемого порошка полностью не переходят в жидкую фазу, кристаллизуясь формируют резкие пики, сильно увеличивающие показатели шероховатости Rz , Sz .

Твердые непроплавленные частицы прилипают к поверхностям деталей, формируя шероховатую структуру, однако одним из наиболее значимых факторов ухудшения качества поверхности является эффект комкования [22]. Этот эффект возникает при низком линейном энергокладе и обусловлен капиллярными силами, действующими на жидкий металл в ванне расплава. В результате металлический расплав фрагментируется на отдельные сферические капли, которые затвердевают, образуя неровности на поверхности. Размеры этих капель сопоставимы с диаметром исходного порошка, что приводит к значительному увеличению параметров шероховатости, таких как Rz и Sz . При высоких скоростях сканирования комкование усиливается за счет недостаточной смачиваемости порошкового слоя [23].

Вопросам влияния режимных параметров процесса СЛС из различных материалов на формируемую шероховатость поверхностей деталей и образцов посвящено достаточно большое количество работ [24–28], однако добиваться требуемой шероховатости приходится с использованием различных методов постобработки [29]. И до сих пор не решенной остается проблема достижения достаточной шероховатостей поверхностей внутренних каналов всевозможных тепло-

обменных устройств, изготавливаемых методом СЛС, используемых в космической отрасли [6].

Таким образом, цель настоящего исследования состоит в определении зависимости величин Sa , как средних отклонений высот по исследуемой площади поверхности образца, сформированного методом СЛС при разных углах наклона и толщинах наплаваемых слоев, и оценка величин объемного энерговклада, в достижении значений Sa формируемых поверхностей при постоянном значении шага сканирования. В отличие от значений Ra , определяемых, как среднее арифметическое абсолютных отклонений профиля в пределах выбранной линии, значения Sa рассматриваются исходя из средней шероховатости всей полученной поверхности образца, поэтому эти значения более информативны.

2. Методика исследований, материалы и оборудование

Как и в работе [19], в настоящем исследовании использовался порошок РС-300 от компании ОК РУСАЛ, химический состав которого приведен в таблице 1. Этот порошок алюминиевого сплава AlSi10Mg (рисунок 2 а) имел сферическую форму с коэффициентом округлости порядка 0,92 (рисунок 2 б). Присутствующие в порошке редкие частицы-спутники с размерами < 5 мкм, прилипали к более крупным частицам, но это незначительно сказывалось на их округлости. Распределение частиц по размерам было измерено при помощи воздушного диспергирования, при этом величины D10, D50, D90, D97 просеянного порошка составили 22,67, 40,88, 61,86 и 73,88 мкм, соответственно. Все образцы были изготовлены на установке M350, компании АО «Лазерные системы» (Россия, г. Санкт-Петербург), оснащенной двумя иттербиево-волоконными лазерами и трехосевой сканирующей системой от Han'S Scanner (KHP, г. Шэньчжэнь, Shenzhen Han's Scanner S&T Co., Ltd.). Платформа построения этой установки, реализующей процесс L-PBF (Laser Powder Bed Fusion), имеет размеры 350×350×390 мм.

Таблица 1. Химический состав порошка AlSi10Mg

Хим. элемент	Al	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Mn	O
%	–	9,0–11,0	0,2–0,45	$\leq 0,35$	$\leq 0,15$	$\leq 0,05$	$\leq 0,45$	$\leq 0,08$

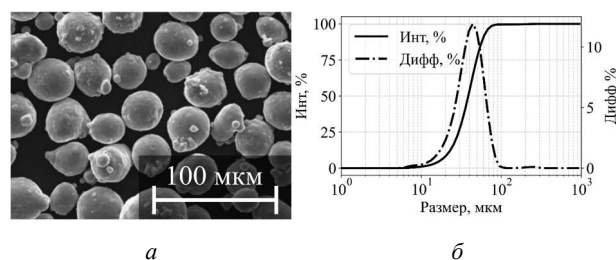


Рис. 2. а – СЭМ-снимок порошка AlSi10Mg и б – его гранулометрический состав

При технологической подготовке образцов и анализа полученных результатов была использована компьютерная модель, разделенная на внутреннюю часть – «ядро» и внешнюю часть – контур, как это было принято в работе [30]. Образцы представляли собой кубики размерами $a; b; c = 10; 10; 7$ мм (рис. 3). Поскольку лазерное пятно имеет множество параметров, которые его характеризуют, то для настоящего исследования были выделены следующие основные режимные параметры: мощность лазерного – P , Вт и скорость сканирования – V , мм/с. Таким образом, параметры прожига ядра составляли $P = 370$ Вт, $V = 1500$ мм/с, диаметр пятна – $d = 80$ мкм, расстояние между полосами сканирования (штрихами) – $Hd = 105$ мкм, смещение относительно полигонального контура модели – $Co = 75$ мкм, толщина слоя $t = 30$ мкм. Эти параметры прожига «ядра» оставались постоянными у всех образцов, варьировались параметры только на контурах.

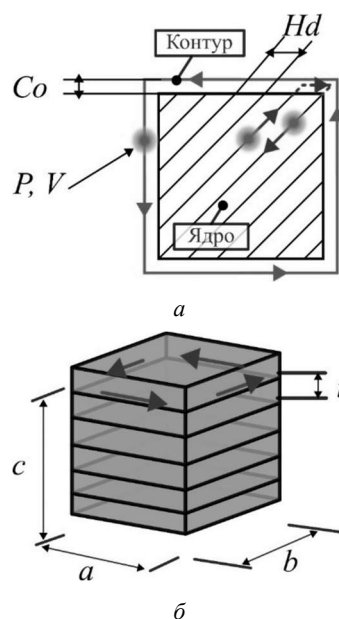


Рис. 3. а – Схема сплавления поперечного сечения образца и б – основные его размеры

2.1 Линейный энерговклад

Линейный энерговклад ЛЭВ представляет собой суммарное влияние мощности лазера и скорости сканирования, рассчитываемые с помощью выражения:

$$\text{ЛЭВ} = P / V, \quad (3)$$

где P – мощность лазерного пятна в Вт, V – скорость сканирования (движения) лазерного пятна по траектории в мм/с.

Каждый образец сканировался посредством, так называемых, полос с поворотом 90° . Сначала сканировалось ядро, и затем контур слоя. Такой порядок, по мнению авторов, позволяет снизить негативное влияние «плохо» спеченных полос и нестабильных концов треков, которые находятся на месте сплавляемого впоследствии контура. Поскольку проведенные измерения величин Ra и Sa на вертикальных поверхностях образцов соответствуют определенным задаваемым значениям P и V , то с использованием статистической обработки полученных данных были построены распределения этих параметров шероховатости в зависимости от величин ЛЭВ. Примеры построения таких зависимостей представлены на рисунке 4.

Таким образом, проведенное в работе [14] исследование показало, что увеличение ЛЭВ сначала способствует снижению шероховатости, однако при превышении определенного порога (1,25–1,4 Дж/мм) его дальнейший рост оказывает минимальное влияние на параметры Ra и Rz , достигая предельных значений 2,462 и 9,277 мкм, соответственно. Наилучшие показатели достигаются при среднем значении ЛЭВ 1,309 Дж/мм.

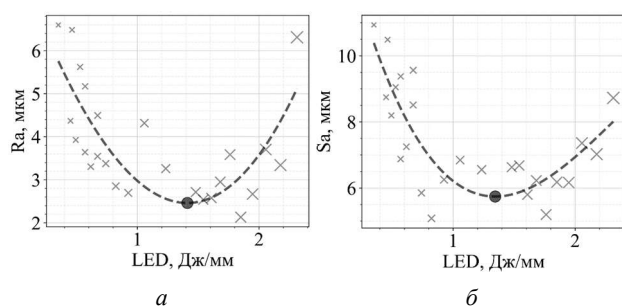


Рис. 4. Распределение шероховатости поверхности в зависимости от примененного ЛЭВ (а) от параметра Ra , мкм и (б) от Sa , мкм [14]

На следующем этапе было рассмотрено изменение шероховатости поверхности при изменении угла наклона поверхности в широком

диапазоне (15° – 165°) и затем сделан переход от линейного энерговклада к изучению влияния объемного энерговклада (ОЭВ) на шероховатость поверхности. При этом ОЭВ варьировался в узком интервале углов, в котором наблюдался резкий рост (в 6–8 раз) шероховатости. Такой поэтапный подход позволил систематически исследовать влияние ОЭВ на морфологию поверхности, опираясь на заранее установленные оптимальные параметры ЛЭВ, обеспечивая при этом воспроизводимость результатов и облегчая определение диапазонов параметров для управления (минимизации) шероховатостью.

2.2 Объемный энерговклад

Кроме технологических свойств порошковых материалов, используемых в технологии СЛС, на качество конечных изделий влияет большое число параметров самого процесса лазерного сплавления. К ним относятся мощность лазера, величина пятна, скорость сканирования, шаг сканирования, толщина слоя, тип защитного газа, а также температура ванны расплава. Многие авторы [13] для сравнения условий лазерной обработки используют единый параметр – объемный энерговклад (Дж/мм³), который учитывает несколько основных характеристик процесса, определяя количество затрачиваемой энергии на единицу объема одного слоя порошка. Объемный энерговклад ОЭВ выражается по формуле:

$$\text{ОЭВ} = P / (V \times LT \times Hd), \quad (4)$$

где P – мощность лазера, Вт; V – скорость сканирования, мм/с; Hd – шаг сканирования, мкм; LT – толщина слоя, мкм.

3. Результаты

Для анализа влияния объемного энерговклада ОЭВ на шероховатость поверхности был выбран набор образцов с медианным относительно полученной шероховатости поверхности Sa параметрами мощности P , Вт и скорости лазерного излучения V , мм/с при этом углы наклона θ , град боковых поверхностей образцов (рисунок 5) изменялись в широком диапазоне 15° – 135° и при выбранном значении ЛЭВ и разных толщинах: 20, 40, 60 и 80 мкм, на которых и определялся параметр Sa , мкм.

Исследования шероховатости, проведенные ранее в работах [12, 31], показали, что мощность лазера P , Вт, скорость сканирования V , мм/с

и особенно толщина слоя LT , мкм в процессе СЛС оказывает значительное влияние (коэффициент корреляции Пирсона более 0,7) на параметр Sa , мкм, тогда как шаг сканирования Hd статистически незначим, при доверительном интервале измерений 95 % [12], и поэтому его влияние на величины Sa , мкм в настоящем исследовании не учитывался. Вид образца с наклонными боковыми поверхностями и обозначениями толщин слоев и типов наклонных поверхностей (upskin и downskin) представлен на рисунке 5.

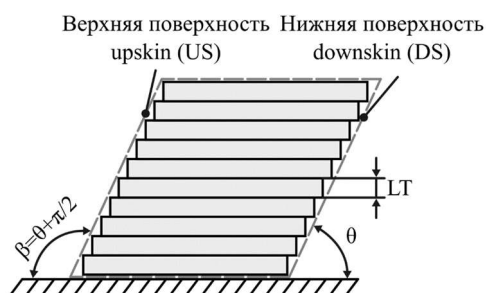


Рис. 5. Вид и параметры геометрии наклонного образца

В качестве примера на рисунке 6 представлены результаты измерений значений Sa (15–25 мкм) для поверхностей DS, выполненных с использованием различных линз конфокального сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS5000 и в областях различных по размеру (квадратов) поверхностей DS. Подобные измерения величин Sa были проведены, как для обеих поверхностей DS и US, так и для выбранных углов θ (32, 40, 48, 65, 73 и 90 градусов).

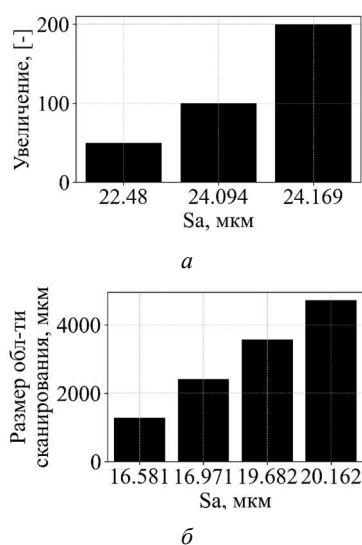


Рис. 6. а – Вариация измеряемого параметра Sa , мкм от увеличения линзы; б – от размера области сканирования

Из анализа графика зависимости шероховатости от угла θ , представленного на рисунке 7, следует считать углы θ в диапазоне 28–40 критическими, то есть углы наклона поверхности в этом диапазоне их величин, при выбранной для этого примера толщине слоя 30 мкм, соответствуют резкому (в 6–10 раз) росту шероховатости

С целью отыскания областей критических углов для различных значений LT , мкм и получения зависимостей «шероховатость поверхности – объемный энерговклад» были выращены дополнительные образцы с различной высотой слоя (20, 40, 60 и 80 мкм) в более узком диапазоне углов: 26, 30, 33, 37, 40 и 44 градуса. Полученные значения шероховатостей Sa , мкм и Sz , мкм этих образцов отражены на рисунке 8 и 9 соответственно.

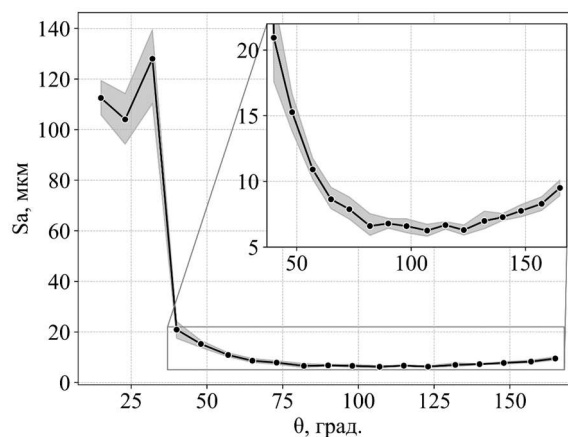


Рис. 7. График зависимости шероховатости поверхности образцов (P , V = 311 Вт, 430 мм/с) от угла наклона θ , град при LT = 30 мкм (вставка демонстрирует область докритических углов $\geq 40^\circ$)

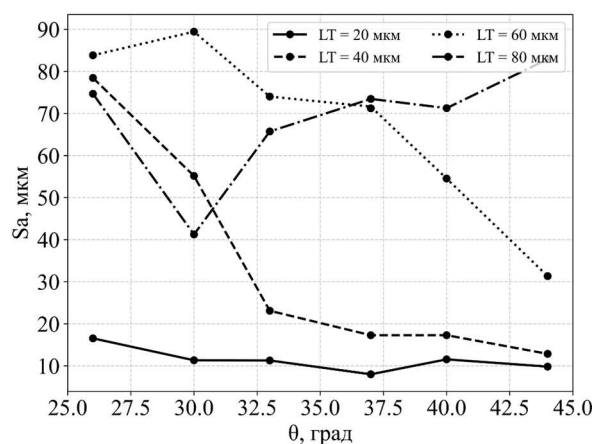


Рис. 8. График зависимости шероховатости Sa , мкм от толщины слоя LT (20, 40, 60 и 80 мкм) в интервале критических углов (26, 30, 33, 37, 40, 44°)

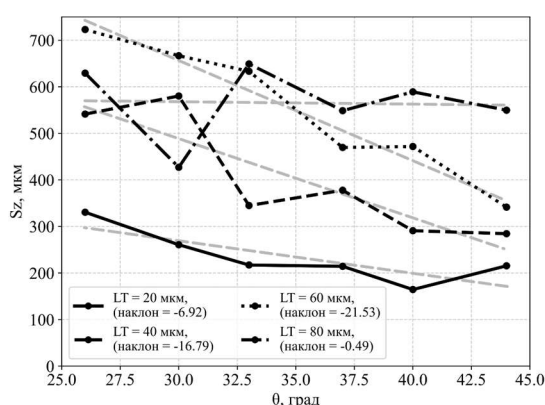


Рис. 9. График зависимости шероховатости S_z , мкм от толщины слоя LT (20, 40, 60 и 80 мкм) в интервале критических углов (26, 30, 33, 37, 40, 44°)

Итогом проведенной обработки всех полученных данных по определению параметра S_a при различных углах θ и толщинах слоя t является сводная диаграмма распределения шероховатости S_a , для верхней US и нижней DS поверхностей исследуемых образцов (рисунок 10).

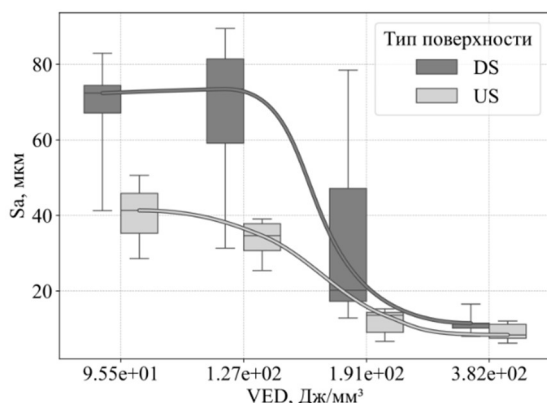


Рис. 10. Сводная диаграмма распределения шероховатости S_a , мкм на образцах выращенных в области критических углов с различным энергоскладом

4. Выводы

1. Поскольку одним из факторов, ограничивающих широкое внедрение аддитивных технологий в производство, является трудно устранимая точность в изготовлении деталей и в частности, шероховатость на поверхностные слои, в настоящей работе предпринята попытка устранить такую неопределенность в достижении управляемой шероховатости при использовании процесса селективного лазерного сплавления (СЛС).

2. Из анализа литературы следует, что существует ряд основных параметров процесса СЛС, изменяя и контролируя можно получить требуе-

мые значения шероховатости, используя для этого, так называемые, черновые и чистовые операции процесса.

3. За основные параметра процесса СЛС, оказывающих наибольшее влияние на качество получаемой шероховатости при использовании порошка AlSi10Mg и оборудования СЛС, используемых в настоящей работе, были приняты: мощность лазерного излучения P , Вт, и скорость сканирования V мм/с и LT , мкм – толщина наносимого слоя. Установлено, что наибольшее влияние на получаемую шероховатость оказывают параметры в следующей последовательности: LT , P и V .

4. Установлены интервалы, в которых можно изменять шероховатость поверхности слоя S_a , мкм из порошка AlSi10Mg, полученных методом СЛС за счет изменения указанных технологических параметров.

5. Было установлено, что минимальная шероховатость поверхности, полученная в рамках исследования, S_a составила 5,45 мкм (поверхностей типа US при $LT = 20$ мкм), $S_a = 7,232$ мкм (поверхностей типа DS при $LT = 20$ мкм); медианная шероховатость всей выборки данных $S_a = 9,781$ мкм (поверхностей типа US при $LT = 40$ мкм), $S_a = 12,859$ мкм (поверхностей типа DS при $LT = 40$ мкм) и, наконец, максимальная $S_a = 40,409$ мкм (поверхностей типа US при $LT = 80$ мкм), $S_a = 68,217$ мкм (поверхностей типа DS при $LT = 80$ мкм).

Кроме основных параметров оптимизации, используемых в данной работе, в будущем планируется изготовление образцов с использованием различного диаметра лазерного луча, модифицированных стратегий сканирования для получения всесторонней оценки и отыскания величины и характера их влияния на целевую функцию (в данном случае шероховатости поверхности S_a и S_z), а также их взаимовлияние.

Список источников

1. Гущин В.Н. Основы устройства космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.
2. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.
3. Кудрявцева Н.С. Основы проектирования эффективных терморегулирования КА. М.: Издательство МАИ, 2012. 226 с.
4. Галиновский А.Л., Голубев Е.С., Коберник Н.В. и др. Аддитивные технологии в производстве изделий

- аэрокосмической техники: учебное пособие для вузов. М.: изд-во Юрайт, 2020. 115 с.
5. Крохин А.Д. Аддитивные технологии в алюминиевой промышленности // Алгоритм успеха. 2017. № 1. С. 26–29.
 6. Мальцев И.Е., Басов А.А., Борисов М.А. и др. Анализ результатов комплексных испытаний экспериментального теплообменника космического назначения, изготовленного методом селективного лазерного сплавления // Электрометаллургия. № 6. 2021.
 7. Автушенко А.А., Басов А.А., Мальцев И.Е. и др. Адаптированная к аддитивным технологиям изготовления методика проектирования теплообменных устройств для радиоэлектронной аппаратуры // Цветные металлы. 2019. № 12.
 8. Мальцев И.Е., Басов А.А., Борисов М.А. и др. Исследование свойств фрагмента гидроконтра космического аппарата, полученного методами аддитивных технологий // Справочник. Инженерный журнал. 2020. № 4. С. 11–19.
 9. Поручикова Ю.В., Якупова Н.С., Басов А.А. и др. Оценка коррозионной стойкости типового фрагмента гидравлического контура системы обеспечения теплового режима космического аппарата, синтезированного селективным лазерным сплавлением // Вестник МАИ. 2023. № 4.
 10. Козинер Ю.Д., Мальцев И.Е., Басов А.А. и др. Направленная ультразвуковая очистка малодоступных внутренних поверхностей теплообменных устройств, изготовленных методами аддитивных технологий // Цветные металлы. 2022. № 9. С. 78–83.
 11. Козинер Ю.Д., Басов А.А., Кравцов Д.А. и т.д. Метод двухуровневой ультразвуковой очистки скрытых полостей теплообменных устройств, полученных методами аддитивных технологий // Электрометаллургия. 2024. № 6. С. 21–33.
 12. Nismath V.H., Beytullah A., Jaggars D. et al. On morphology and roughness of upskin surfaces in laser powder-bed fusion additive manufacturing—Contouring strategy effects // Manufacturing Letters. 2024. Vol. 41. pp. 920–930.
 13. Buhairi M.A., Foudzi F.M., jamhari F.L. et al. Review on volumetric energy density: influence on morphology and mechanical properties of Ti6Al4V manufactured via laser powder bed fusion // Progress in Additive Manufacturing. 2023. Vol. 8. №. 2. pp. 265–283.
 14. Авдеевский В.С., Кошкин В.К. (ред.) Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Машиностроение. 1992. 518 с.
 15. Маграквелидзе Т.Ш. Интенсификация теплообмена методом искусственной шероховатости-достижения и нерешенные проблемы // Материалы 6-го Минского международного форума по Тепломассообмену 2008. 16 с.
 16. Коваленко Л.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. М.: Энергоатомиздат, 1986. 240 с.
 17. Смекалкин А.С., Иванов А.В. Влияние шероховатости поверхности на коэффициент теплоотдачи рабочих тел в выполненном по аддитивной технологии агрегате наддува // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21. №. 2. С. 109–114.
 18. Цаплин С.В., Большев С.А., Романов А.Е. Теплообмен в космосе. Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. 92 с.
 19. Коробов К.С., Рипецкий А.В., Николаев И.А. и др. Статистические подходы к анализу шероховатости вертикальных поверхностей образцов, изготовленных по технологии СЛС из порошка AlSi10Mg // Проблемы машиностроения и надежность машин. 2025. Т. 54. № 2. С. 150–158.
 20. DebRoy T. et al. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties // Progress in materials science. 2018. №. 92. pp. 112–224.
 21. Rahmati S., Vahabli E. Evaluation of analytical modeling for improvement of surface roughness of FDM test part using measurement results. Int J Adv Manuf Technol. 2015. Vol. 79. pp. 823–829.
 22. Gu D., Shen Y. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods // Materials & Design. 2009. Vol. 30. №. 8. pp. 2903–2910.
 23. Niu H.J., Chang I.T.H. Instability of scan tracks of selective laser sintering of high speed steel powder // Scripta materialia. 1999. Vol. 41. №. 11. pp. 1229–1234.
 24. Masiagutova E., Cabanettes F., Sova A. et al. Side surface topography generation during laser powder bed fusion of AlSi 10Mg // Additive Manufacturing. 2021. Vol. 47.
 25. Yang T., Liu T., Liao W. et al. Effect of processing parameters on overhanging surface roughness during laser powder bed fusion of AlSi10Mg // Journal of Manufacturing Processes. 2021. Vol. 61. pp. 440–453.
 26. Сапрыкина Н.А. Анализ, моделирование и прогнозирование шероховатости поверхности меди, полученной методом селективного лазерного плавления // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2017. №. 3 (76).
 27. Горбатов И.В., Орлов Ю.А., Антюфеев В.А. и др. Определение геометрической точности и шероховатости поверхности малогабаритных деталей круглого и квадратного сечения, получаемых в зависимости от расположения в рабочем пространстве принтера по технологии селективного лазерного плавления из стали марки 12X18H10T // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. 2019. №. 1 (28). С. 59–67.
 28. Лаптева М.А., Белова Н.А., Раевских А.Н. и др. Исследование зависимости шероховатости, морфологии поверхности и количества дефектов структуры от мощности лазера, скорости сканирования и типа штриховки в жаропрочном сплаве, синтезированном методом СЛС // Труды ВИАМ. 2016. №. 9 (45). С. 70–82.

29. Subramaniyan A.K., Reddy A.S., Mathias S. et al. Influence of post-processing techniques on the microstructure, properties and surface integrity of AlSi10Mg alloy processed by laser powder bed fusion technique // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 425.
30. Yang T., Liu T., Liao W. et al. The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting // *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. T. 266. C. 26–36.
31. Al Islam Sh., Hao L., Javid Z. et al. Surface Roughness of Interior Fine Flow Channels in Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy Components // *Microvachines*. 2024. Vol. 15. pp. 348–371.

References

1. Gushchin VN. *Fundamentals of spacecraft design*. Moscow. Mashinostroenie; 2003. 272 p. (In Russ.).
2. Malozemov VV. *Thermal regime of spacecraft*. Moscow. Mashinostroenie; 1980. 232 p. (In Russ.).
3. Kudryavtseva NS. *Fundamentals of designing effective spacecraft temperature control*. Moscow: MAI; 2012. 226 p. (In Russ.).
4. Galinovskii AL, Golubev ES, Kobernik NV et al. *Additive technologies in the manufacture of aerospace products*. Moscow: Yurait; 2020. 115 p. (In Russ.).
5. Krokhin AD. Additive technologies in the aluminum industry. *Algoritm uspekha*. 2017;(1):26–29. (In Russ.).
6. Mal'tsev IE, Basov AA, Borisov MA et al. Analysis of the results of complex tests of an experimental space-purpose heat exchanger manufactured by selective laser fusion. *Elektrometallurgiya*. 2021;(6). (In Russ.).
7. Avtushenko AA, Basov AA, Mal'tsev IE et al. A method of designing heat exchange devices for electronic equipment adapted to additive manufacturing technologies. *Tsvetnye metally*. 2019;(12). (In Russ.).
8. Mal'tsev IE, Basov AA, Borisov MA et al. Investigation of the properties of a fragment of the hydraulic circuit of a spacecraft obtained by methods of additive technologies. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal*. 2020(4):11–19. (In Russ.).
9. Poruchikova YuV, Yakupova NS, Basov AA et al. Assessment of the corrosion resistance of a typical fragment of the hydraulic circuit of the spacecraft thermal management system synthesized by selective laser fusion. *Vestnik MAI*. 2023;(4). (In Russ.).
10. Koziner YuD, Mal'tsev IE, Basov AA et al. Targeted ultrasonic cleaning of inaccessible internal surfaces of heat exchange devices manufactured using additive technologies. *Tsvetnye metally*. 2022;(9):78–83. (In Russ.).
11. Koziner YuD, Basov AA, Kravtsov DA et al. The method of two-level ultrasonic cleaning of hidden cavities of heat exchange devices obtained by methods of additive technologies. *Elektrometallurgiya*. 2024;(6):21–33. (In Russ.).
12. Nismath VH, Beytullah A, Jagers D et al. On morphology and roughness of upskin surfaces in laser powder-bed fusion additive manufacturing—Contouring strategy effects. *Manufacturing Letters*. 2024;41:920–930.
13. Buhairi MA, Foudzi FM, jamhari FL et al. Review on volumetric energy density: influence on morphology and mechanical properties of Ti6Al4V manufactured via laser powder bed fusion. *Progress in Additive Manufacturing*. 2023;8(2):265–283.
14. Avduevskii VS, Koshkin VK (ed.) *Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket and space technology*. Moscow: Mashinostroenie; 1992. 518 p. (In Russ.).
15. Magrakvelidze TSh. Intensification of heat exchange by artificial roughness—achievements and unresolved problems. *Materialy 6-go Minskogo mezhdunarodnogo foruma po Teplomassoobmenu 2008*. 16 p. (In Russ.).
16. Kovalenko LM, Glushkov AF. *Heat exchangers with heat transfer intensification*. Moscow: Energoatomizdat; 1986. 240 p. (In Russ.).
17. Smekalkin AS, Ivanov AV. The effect of surface roughness on the heat transfer coefficient of working fluids in an additive technology boost unit. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*. 2022;21(2):109–114. (In Russ.).
18. Tsaplin SV, Bolychev SA, Romanov AE. *Heat exchange in space*. Samara: Samara University; 2018. 92 p. (In Russ.).
19. Korobov KS, Ripetskii AV, Nikolaev IA et al. Statistical approaches to the analysis of the roughness of vertical surfaces of samples made using SLS technology from AlSi10Mg powder. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnost' mashin*. 2025;54(2):150–158. (In Russ.).
20. DebRoy T. et al. Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties. *Progress in materials science*. 2018;(92):112–224.
21. Rahmati S, Vahabli E. Evaluation of analytical modeling for improvement of surface roughness of FDM test part using measurement results. *Int J Adv Manuf Technol*. 2015;79:823–829.
22. Gu D, Shen Y. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. *Materials & Design*. 2009;30(8):2903–2910.
23. Niu HJ, Chang ITH. Instability of scan tracks of selective laser sintering of high speed steel powder. *Scripta materialia*. 1999;41(11):1229–1234.
24. Masiagutova E, Cabanettes F, Sova A et al. Side surface topography generation during laser powder bed fusion of AlSi 10Mg. *Additive Manufacturing*. 2021;47.
25. Yang T, Liu T, Liao W et al. Effect of processing parameters on overhanging surface roughness during laser powder bed fusion of AlSi10Mg. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;61:440–453.
26. Saprykina NA. Analysis, modeling, and prediction of surface roughness of copper obtained by selective laser melting. *Obrabotka metallov: tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*. 2017;(3 (76)). (In Russ.).
27. Gorbатов IV, Orlov YuA, Antufeev VA et al. Determination of the geometric accuracy and surface roughness of small round and square cross-section parts obtained

- depending on the location in the printer's workspace using selective laser melting technology made of 12X18H10T grade steel. *Vestnik Kontserna VKO Almaz-Antei*. 2019; (1 (28)):59–67. (In Russ.).
28. Lapteva MA, Belova NA, Raevskikh AN et al. Investigation of the dependence of roughness, surface morphology, and the number of structural defects on laser power, scanning speed, and type of shading in a heat-resistant alloy synthesized by the SLS method. *Trudy VIAM*. 2016;(9 (45)):70–82. (In Russ.).
 29. Subramaniyan AK, Reddy AS, Mathias S et al. Influence of post-processing techniques on the microstructure, properties and surface integrity of AlSi10Mg alloy processed by laser powder bed fusion technique. *Surface and Coatings Technology*. 2021;425.
 30. Yang T, Liu T, Liao W et al. The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019;266:26–36. (In Russ.).
 31. Al Islam Sh, Hao L, Javid Z et al. Surface Roughness of Interior Fine Flow Channels in Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy Components. *Microvachines*. 2024;15: 348–371.