
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.762

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ШЕРОХОВАТОСТИ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОБРАЗЦОВ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ СЛС
ИЗ ПОРОШКА AlSi10Mg****© 2025 г. К. С. Коробов^{1, *}, А. В. Рипецкий¹,
И. А. Николаев¹, Л. Н. Лесневский¹***¹Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет) МАИ, Москва, Россия
e-mail: korobovks@mai.ru

Поступила в редакцию 31.07.2024 г.

После доработки 16.12.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

Технология селективного лазерного сплавления получила широкое распространение в различных отраслях промышленности, однако заметной проблемой селективного лазерного сплавления, которая сохраняется до настоящего времени, является высокая шероховатость поверхностей, создаваемых деталей, что препятствует их последующему применению. Проведен анализ работ, посвященных исследованию и минимизации шероховатости, как на горизонтальных, вертикальных, так и на поверхностях, выращенных под различными углами к платформе построения. В настоящем исследовании сделан упор на статистическую обработку с использованием матрицы корреляции результатов влияния мощности, скорости и линейного энерговклада (linear energy density — LED) на шероховатость вертикально растущих поверхностей. Для определения влияния величины LED на шероховатость вертикальных поверхностей использовались четыре параметра: Ra , Rz , Sa , Sz . Полученные результаты показали, что при использовании определенной величины линейного энерговклада вертикальную шероховатость Ra поверхности образцов можно уменьшить с 15 до 2.5 мкм.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, AlSi10Mg, шероховатость поверхности, линейный энерговклад, матрица корреляции

DOI: 10.31857/S0235711925020049, **EDN:** DНIНОМ

В последние годы такой процесс аддитивного производства, как селективное лазерное сплавление (СЛС) металлов, получил достаточно широкое распространение. Среди металлов алюминий и его сплавы заняли особое место [1, 2] благодаря своим исключительным свойствам таким, как малый вес получаемых деталей, высокая удельная прочность, отличные электро- и теплопроводность, коррозионная стойкость и относительно низкий коэффициент теплового расширения [3]. Технология СЛС позволяет формировать детали с высокой скоростью изготовления, и при этом она особенно эффективна в производстве сложных деталей и структур. Однако помимо основных достоинств в процессе освоения этой технологии выяснился ряд проблем, связанных с необходимостью устранения целого ряда дефектов [4],

среди которых одним из основных является высокая шероховатость получаемых поверхностей.

Технология СЛС алюминиевых сплавов сопряжена с определенными трудностями: 1) сложная природа взаимодействия материала и процесса сплавления; 2) нежелательные явления, такие как разбрызгивание и комкование (баллинг), которые приводят к образованию пор внутри и на поверхности деталей, оказывая определенное влияние и на качество поверхности [5, 6]. Непреднамеренное наличие пор, трещин и неполностью расплавленных частиц порошка может негативно влиять на механические и усталостные характеристики деталей, изготовленные методом аддитивного производства. Большое влияние на качество поверхности оказывают также процессы затвердевания ванны расплава, зависящей от плотности приложенной энергии, и присутствия кислорода в среде сплавления и оксидов в используемом порошке [7, 8].

Шероховатость поверхности — важнейший параметр для оценки качества деталей, оказывающий непосредственное влияние на их механические свойства и срок службы. Относительно низкое качество поверхности, ее шероховатость, является одним из основных препятствий на пути широкого промышленного применения технологии СЛС. Поэтому параметру шероховатости при реализации процесса СЛС различных металлов и сплавов посвящается значительно число как отечественных, так и зарубежных исследований.

Известен целый ряд работ [9–13], посвященных исследованию шероховатости различных материалов, полученных с использованием технологии СЛС: от хромоникелевых типа 12X18H10T [9] и жаропрочных типа ЖС6К-ВИ и ЭП648-ВИ [10, 11, 24] сплавов до титанового сплава ВТ6 [12] и медного порошка [13], при этом определенное внимание уделено вопросам формирования шероховатости на наклонных поверхностях [9, 12]. Исследования показали, что качество поверхности, в том числе и шероховатость, определяется многими технологическими параметрами процесса СЛС, такими как свойства порошка и его материала, мощность и диаметр луча лазера, толщина получаемого слоя, скорость, шаг и стратегия сканирования и т.п.

Особый интерес для настоящего исследования представляют работы, в которых рассматриваются вопросы влияния технологических параметров процесса СЛС из сплава AlSi10Mg на шероховатость формируемых поверхностей [14–18]. В работе [14] приведена оценка влияния на шероховатость вертикальной поверхности линейной плотности или линейного энерговклада $LED = P/V$, представляющего собой отношение мощности лазерного пятна в Вт к скорости его движения по траектории сканирования в мм/с для конкретного порошка. Были изготовлены наплавленные дорожки и объемные образцы и показано, что шероховатость вертикальных поверхностей можно снизить при подобранной линейной плотности энергии. Наибольшее влияние на плотность детали и качество поверхности (шероховатости), как показано в работе [15], оказывает процесс производства порошка из сплава AlSi10Mg и его морфология (форма поверхности), чему в большинстве исследований не уделяется должного внимания. Большой объем проведенных исследований, получение и изучение шероховатости боковой поверхности образцов и деталей позволили по результатам работы [16] определить влияние основных параметров процесса СЛС на шероховатость и снизить ее среднюю по площади величину Sa с 40 до 10 мкм. В этой же работе отмечено, что ключевыми параметрами, влияющими на шероховатости боковых поверхностей, являются компенсации и настройки послойных контуров, рекомендуемых к использованию для уменьшения шероховатости. Существенное влияние на шероховатость боковых поверхностей, представленных в работе [17] как «нависающие», может оказать вместе со скоростью и мощностью контурного сканирования и угол построения.

Большинство рассмотренных исследований шероховатости поверхности в основном было сосредоточено на исследовании горизонтальных поверхностей деталей, перпендикулярных направлению их роста. С другой стороны, исследования, посвященные анализу шероховатости на вертикальных поверхностях деталей, руководствовались при анализе только двумя линейными параметрами, такими как Ra , Rz [17], пренебрегая при этом особенностями процесса печати и его совокупного влияния на шероховатость вертикальных поверхностей. Авторы [7] рассмотрели влияние LED на шероховатость поверхности и формирование ванны расплава отдельных треков пользуясь параметрами Ra , Rz , т.е. линейными. При низких значениях LED (ниже 0.4 Дж/мм) наблюдалось неполное распространение ванны расплава и, как следствие, налипание нерасплавленных частичек порошка. При линейном энергокладе (0.4–1.2 Дж/мм) была получена минимальная шероховатость поверхности, приблизительно 6 мкм. После превышения порога в 1.2 Дж/мм шероховатость снова начинала расти, но уже меньшими темпами.

Большинство попыток улучшить параметры шероховатости поверхностей после СЛС, которая может достигать значений $Ra = 15–20$ мкм [18], опирается до сих пор, в основном, на методы последующей обработки, так называемой постобработки в виде полирования, абразивной и пескоструйной обработки и др. Настоящее исследование направлено на улучшение параметров шероховатости вертикальных поверхностей в ходе реализации процесса СЛС путем лазерного сплавления контуров слоев, выращенных и выбранных в качестве образцов многослойных кубиков, изучения влияния величины LED на уменьшение шероховатости вертикальных поверхностей и разработке рекомендаций по выращиванию деталей из алюминиевого сплава AlSi10Mg, разработанных с учетом используемых инструментов математической статистики.

Методика исследований, материалы и оборудование. В настоящем исследовании для выращивания образцов с различной шероховатостью вертикальных поверхностей была принята методика, использованная в работе [14]. В процесс выращивания образцов был использован порошок PC-300 от компании ОК РУСАЛ. Этот порошок алюминиевого сплава AlSi10Mg имел сферическую форму с коэффициентом округлости, измеренным в МИСиС, порядка 0.92. 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 D5, D20, D50, D80 и D95 просеянного порошка составили 29.587, 37.622, 47.964 и 70.305 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 (КНР, 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.

Образцы отделялись от ростового стола при помощи маятниковой пилы. Для анализа морфологии, шероховатости вертикальной поверхности и характеристик кубиков использовался конфокальный микроскоп (Olympus LEXT OLS5000) вместе с профилометром Mitutoyo SJ-210.

Планирование и проведение эксперимента. Для изучения шероховатостей вертикальных поверхностей были изготовлены сорок образцов в виде кубиков с размерами 10 × 10 × 7 мм (рис. 1).

Сначала сканировалось «ядро», затем контур каждого слоя, которые сканировались полосами с поворотом на 90° относительно предыдущего слоя. Такой порядок позволил снизить негативное влияние плохо спеченных полос и нестабильных концов треков, которые находятся на месте сплавляемых контуров, неоптимизированная шероховатость Ra , Rz которых равнялась 15 мкм.

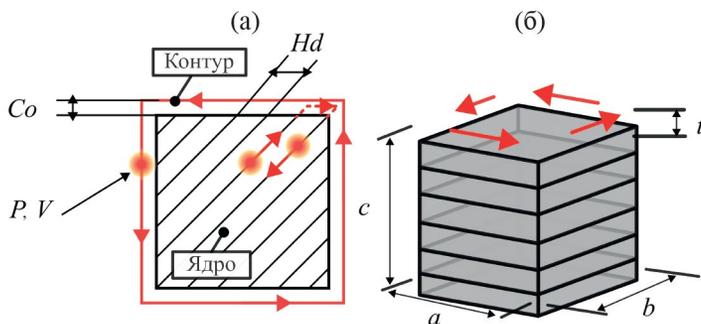


Рис. 1. Схема сплавления (а) «ядра» в поперечном сечении и (б) контуров образца.

В терминах технологической подготовки образцов и анализа полученных результатов была использована полигональная модель, разделенная на внутреннюю часть — «ядро» и внешнюю часть — контур. Поскольку лазерное пятно имеет множество параметров, которые его характеризуют, то для настоящего исследования были выделены следующие основные режимные параметры: диаметр сфокусированного лазерного пятна — d , мкм, его мощность — P , Вт и скорость сканирования — V , мм/с. Таким образом, параметры прожига ядра составляли $P = 370$ Вт, $V = 1500$ мм/с, диаметр пятна — d 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 они только на контурах.

Для изучения взаимосвязи между основными технологическими параметрами сканирования по контуру (P , V) и получаемой шероховатостью вертикальной поверхности образца в эксперименте были изготовлены так, чтобы исследовать влияние мощности лазерного излучения при различных значениях P/V (LED), определяемые расчетом и непосредственно участвовавшие в построении графических зависимостей параметров шероховатости от величин этих значений. Подробная информация о параметрах процесса СЛС, принятых в работе для каждой группы образцов приведена в табл. 1. Примеры морфологии характерных участков вертикальных поверхностей, полученные на конфокальном микроскопе OLS5000, при различных значениях V , P и LED показаны на рис. 2 вместе с порядком измерений и профилями шероховатости.

Таблица 1. Параметры процесса сканирования контуров (при заданной мощности и скорости)

P , Вт	V , мм/с
370	800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 240, 230, 220, 210, 200, 190, 180, 170, 160, 150
240	517, 485, 453, 421, 389, 357
180	388, 364, 340, 316, 292, 268

Измерение шероховатости проводилось на случайно выбираемом участке вертикальной поверхности образцов с соотношением сторон области измерения $4 \div 1$ мм. Параметры шероховатости Ra , Rz определялись как среднее арифметическое измерений по трем линиям, расположенным равномерно по высоте исследуемой

области (рис. 2а), а параметры Sa , Sz рассчитывались по всей высоте. Было установлено, что при сплавлении контуров (даже при наилучших параметрах P и V) за счет капиллярного эффекта в ванну расплава попадали частицы порошка, энергии на сплавление которых было недостаточно, что было отмечено также образование сталогмито-подобных структур. Такие особенности морфологии поверхностей приводят к большой разнице между тремя измерениями линейных параметров шероховатости и значительному количеству выбросов в ее измерениях.

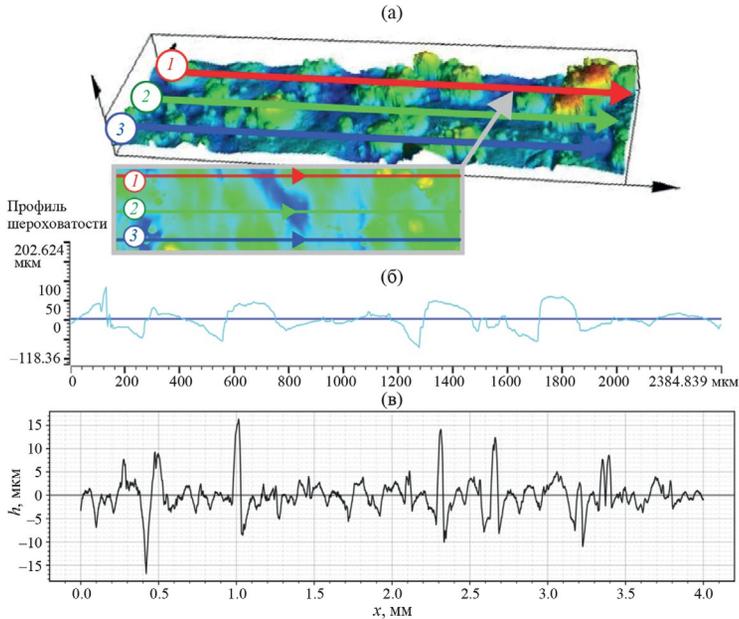


Рис. 2. Результаты измерения шероховатости на конфокальном микроскопе тремя линиями (а), профили шероховатости поверхности по результатам измерений на микроскопе (б) и профилометре (в).

В общем случае, такой механизм независимо от величин используемых параметров — одна из образующих шероховатость причин. При различных режимах размер и количество порошинок варьируется: при малых LED их больше и больше их размеры, при больших значениях LED они меньше.

Разница в количестве и размерах мелких налипших порошинок также вызывает большой разброс между тремя измерениями линейных параметров шероховатости и образует значительное количество выбросов в данных. Для оценки диапазонов измеренных параметров Ra , Rz и Sa , Sz были построены соответствующие диаграммы размаха [19, 20], пример которой для величины Ra представлен на рис. 3.

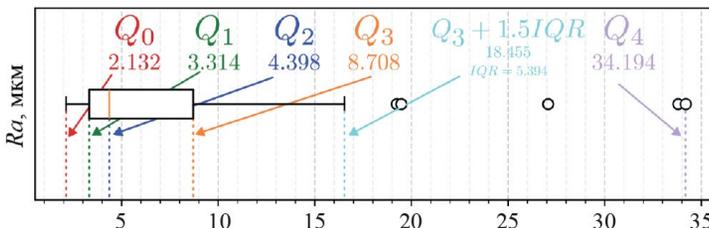


Рис. 3. Диаграмма размаха параметра Ra с аннотациями квартилей (Q_0-Q_4) и внутриквартильного интервала IQR [23].

Как видно из этой диаграммы размаха, рабочими границами этой диаграммы служат первый и третий квартили Q , линия в середине является медианой (50-й процентиль, или Q_2). Концы Q_0 и Q_4 представляют собой края статистически значимой выборки, (без выбросов).

Для того, чтобы совокупно учесть шероховатость поверхностей были использованы трехмерные аналоги линейных параметров Ra , Rz , Sa , Sz . Например, параметр Sa находился по выражению

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_S |Z(x, y)| dx dy,$$

где A — постоянная измерения; $Z(x, y)$ — высота в точке с координатами (x, y) в пределах рассматриваемой области Sa .

Кроме того, следует отметить, что анализ распределения данных Ra по диаграмме размаха показал, что качественная оценка значений линейного параметра Ra при помощи профилометра справедлива, а анализ измерений, проведенных с использованием конфокального микроскопа OLS5000 количественно подтвердил это. То же самое было установлено и для других измеренных в работе параметров шероховатости.

Поскольку проведенные измерения величин Ra , Sa , Rz , Sz на вертикальных поверхностях образцов соответствовали определенным значениям P и V , то путем обработки данных табл. 1 были получены расчетные значения линейного энергозклада — LED для этих измеренных величин и были получены зависимости распределения Ra , Rz и Sa , Sz шероховатости в зависимости от значений LED с построением графиков функций аппроксимации [21], как это показано на рис. 4.

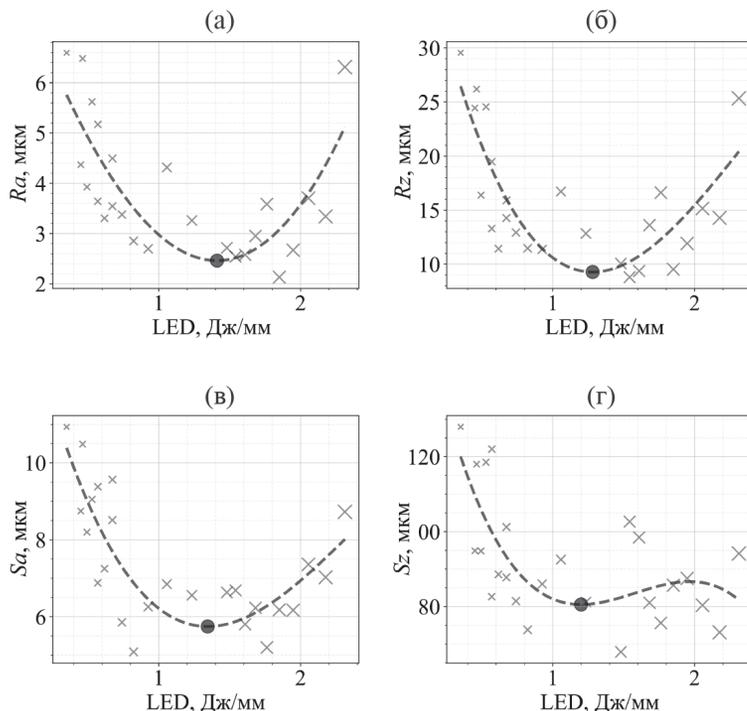


Рис. 4. Распределение параметров шероховатости поверхности Ra (а), Rz (б), Sa (в) и Sz (г) в зависимости от линейного энергозклада LED и расчетные функции аппроксимации.

Эти результаты свидетельствуют о значительном влиянии линейного энерговклада (LED) на шероховатость поверхности. Первоначально, по мере увеличения LED значения Ra , Sa уменьшаются (в интервале 0.5–1.25 Дж/мм). Однако при дальнейшем увеличении LED начинает просматриваться тенденция роста этих параметров. В качестве функций аппроксимации были использованы полиномы третьей степени p_3 [22]

$$p_3 = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0,$$

где a_n — постоянные коэффициенты.

В результате обработки результатов эксперимента были получены следующие зависимости для всех принятых и измеренных в работе параметров шероховатости от LED:

$$Ra(LED) = 0.1738 LED^3 + 2.378 LED^2 + 7.747 LED + 8.171,$$

$$Rz(LED) = -4.758 LED^3 + 33.68 LED^2 - 62.86 LED + 44.54,$$

$$Sa(LED) = -1.159 LED^3 + 8.22 LED^2 - 15.82 LED + 14.97,$$

$$Sz(LED) = -27.42 LED^3 + 130.1 LED^2 + 193.8 LED + 173.1.$$

Минимальные значения получившихся функций — Ra , Rz , Sa , Sz : 2.462, 9.277, 5.744, 80.540 мкм при параметрах LED: 1.411, 1.281, 1.345, 1.200 Дж/мм соответственно нанесены на графики на рис. 4 в виде черных точек. Среднее арифметическое значение минимальных значений LED, которое можно использовать при определении универсального режима настройки параметров P и V процесса СЛС, удовлетворяющих области минимальных значений исследуемых параметров шероховатости, составило 1.309 Дж/мм.

Для совокупной оценки взаимного влияния всех параметров, используемых в эксперименте, через соответствующие коэффициенты Пирсона была построена матрица корреляции [21, 23] параметров эксперимента представленная на рис. 5. В статистике используют линейный коэффициент корреляции, известный также как коэффициент корреляции Пирсона (ККП), для оценки линейной взаимозависимости между двумя наборами данных. Кратко можно определить ККП для произвольных параметров X и Y , как отношение ковариации X , Y к произведению их стандартных отклонений. Коэффициент корреляции r рассчитывается по формуле

$$r_{XY} = \frac{cov_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}},$$

где, $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t$, $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Y_t$; σ_X — стандартное отклонение от X ; σ_Y — стандартное отклонение от Y .

Таким образом ККП — это фактически ковариация двух величин нормированная на величину произведения их квадратных отклонений. Этот коэффициент всегда принимает значения от ± 1 [21].

Из анализа приведенной матрицы следует, что ячейки, значения которых близки к +1 и закрашенные в красные цвета, свидетельствуют о прямой зависимости параметров, значения близкие к -1 окрашены в синие цвета и демонстрируют разную степень обратной зависимости. Таким образом абсолютная величина ККП показывает, насколько сильна связь между параметрами, так для $p \rightarrow 1$ означает, что выбранный параметр значительно влияет на другой, при $p \rightarrow 0$ такое влияние уменьшается и в итоге отсутствует. Например, для параметров P и Ra (среднее ариф-

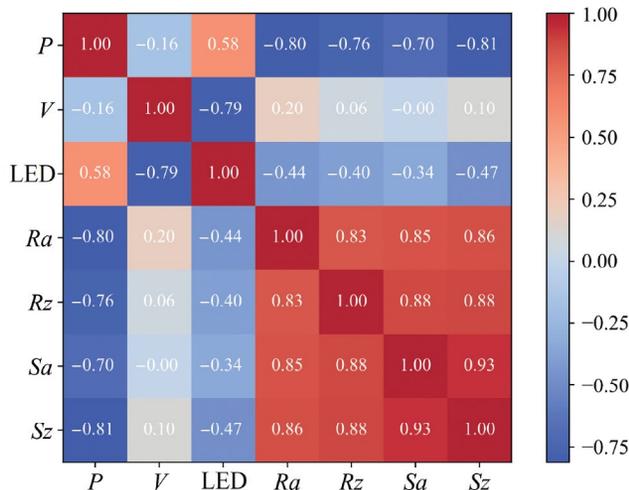


Рис. 5. Матрица корреляции параметров эксперимента.

метическое измерений параметра *Ra* на конфокальном микроскопе по трем линиям) имеет сильную ($P \sim Ra = -0.8$) отрицательную связь, которая означает, что при увеличении *P* параметр *Ra* будет убывать.

Обсуждение результатов. Для каждого изготовленного образца (табл. 1) были выбраны три различные положения измерительной линии параметров *Ra*, *Rz*. Затем были рассчитаны средние арифметические значения для каждого из них, и таким образом получены значения *Ra* и *Rz*. Анализ матрицы корреляции (рис. 5) демонстрирует, что LED оказывает существенное влияние на шероховатость поверхности, измеренную как через линейные — *Ra*, *Rz*, так и через поверхностные параметры шероховатости — *Sa*, *Sz*. Влияние составляющих энергоклада — скорости и мощности *P*, *V* сложно рассматривать отдельно. Однако можно выделить общую тенденцию, что с увеличением мощности *P* лазерного излучения шероховатость поверхности падает, в случае со скоростью *V* такого не наблюдается, что подтверждают коэффициенты корреляции близкие к нулю для скорости и параметров шероховатости (рис. 5). Шероховатость поверхности уменьшается с увеличением LED, а по мере того, как LED продолжает увеличиваться, шероховатость поверхности начинает снова расти, но уже меньшими темпами (рис. 4). Когда LED превышает порог в 1.0–1.25 Дж/мм, шероховатость поверхности становится достаточно низкой $Ra; Rz = 3; 12$ мкм (рис. 4а–в) и на нее уже незначительно оказывает влияние значение энергоклада. Так продолжается пока LED не достигает значения в 1.75–2.0 Дж/мм. Так, в работе [17] было обнаружено, что полученные авторами образцы имели минимальную шероховатость при значении LED 0.5–0.6 Дж/мм. Отличие значений (1.309 Дж/мм и 0.5–0.6 Дж/мм) обусловлено различными установками СЛС, а как следствие разными системами позиционирования лазерного пятна (Concept Laser M2). Также следует учесть небольшое отличие во фракционном составе порошка, что приводит к отличию в поглощении энергии лазерного излучения, и наконец, измерения шероховатости были проведены с использованием линейных параметров *Ra*, *Rz*, что увеличивает выбросы в собираемых данных, и как следствие значительно влияет на эти параметры.

Было установлено, что из-за постоянного контакта сплавляемых контуров детали с металлическим порошком параметры *Rz*, *Sz* имеют менее выраженный минимум.

Это происходит, как показывают микроскопические наблюдения, из-за непрерывного налипания неполностью сплавленных частичек порошка к объему и поверхности основной детали.

Выводы. Разработана и опробована методика статистической обработки результатов исследований и снижения шероховатости вертикальных поверхностей образцов и деталей, получаемых по технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) из порошка AlSi10Mg. Показано, что благодаря контурному сплавлению с использованием экспериментально определяемого оптимального значения линейного энергоклада LED для выбранных режимов установки СЛС можно значительно снизить шероховатость вертикальных поверхностей и получить минимальную шероховатость поверхностей по параметрам Ra и Rz — 2.462 и 9.277 мкм соответственно.

По результатам обработки результатов эксперимента были получены в виде полиномов третьей степени и графически отображены зависимости параметров шероховатости Ra , Rz , Sa и Sz от величины LED, а с использованием методов корреляционного анализа построена матрица корреляции параметров эксперимента для проведения совокупной оценки взаимного влияния параметров с использованием коэффициентов Пирсона, что имеет важное практическое значение и может быть рекомендовано для использования при дальнейшем изучении процесса СЛС.

Установлено, что шероховатость вертикальных поверхностей становится наиболее низкой при использовании LED в интервале 1.25–1.4 Дж/мм. Среднее арифметическое значение минимальных значений LED, которое может быть использовано при определении универсального режима настройки параметров P и V процесса СЛС, удовлетворяющих области минимальных значений исследуемых параметров шероховатости, полученных на используемой в работе установке СЛС, составляет 1.309 Дж/мм.

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.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lehmhus D., Rahn T., Struss A. et al.* High-temperature mechanical properties of stress-relieved AlSi10Mg produced via laser powder bed fusion additive manufacturing // *Materials*, 2022. V. 15 (20). P. 7386.
2. *Kan W. H., Nadot Y., Foley M. et al.* Factors that affect the properties of additively-manufactured AlSi10Mg: Porosity versus microstructure // *Additive Manufacturing*. 2019. V. 29. P. 100805.
3. *Jia YD, Zhang LB, Ma P. et al.* Thermal expansion behavior of Al-x Si alloys fabricated using selective laser melting // *Progress in additive manufacturing*. 2020. V. 5. P. 247.
4. *Galy C., Le Guen E., Lacoste E., Arvieu C.* Main defects observed in aluminium alloy parts produced by SLM: from causes to consequences // *Additive Manufacturing*. 2018. V. 22. P. 165.
5. *Yang T., Liu T., Liao W., MacDonald E. et al.* Laser powder bed fusion of AlSi10Mg: Influence of energy intensities on spatter and porosity evolution, microstructure and mechanical properties // *J. of Alloys and Compounds*. 2020. V. 849. P. 156300.
6. *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. V. 425. P. 127679.
7. *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. T. 74. C. 401.
8. *Дынин Н. В., Иванова А. О., Хасиков Д. В., Оглодков М. С.* Селективное лазерное сплавление алюминиевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2017. № 8 (56). С. 10.

9. *Горбатов И. В., Орлов Ю. А., Антофеев 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.
10. *Лантеа М. А., Белова Н. А., Раевских А. Н., Филонова Е. В.* 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.
11. *Сухов Д. И., Неруш С. В., Беляков С. В., Мазалов П. Б.* Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 9 (690). С. 73.
12. *Балякин А. В., Жученко Е. И., Смирнов Г. В., Проничев Н. Д.* Исследование проблем появления негативной технологической наследственности при изготовлении деталей ГТД методом селективного лазерного сплавления // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2019. Т. 21. № 1. С. 61.
13. *Сапрыкина Н. А.* Анализ, моделирование и прогнозирование шероховатости поверхности меди, полученной методом селективного лазерного плавления // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2017. № 3 (76). С. 6.
14. *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 // J. of Mater. Proces. Technol. 2019. Т. 266. С. 26.
15. *Riener K., Albrecht N., Ziegelmeier S. et al.* Influence of particle size distribution and morphology on the properties of the powder feedstock as well as of AlSi10Mg parts produced by laser powder bed fusion (LPBF) // Additive Manufacturing. 2020. Т. 34. С. 101286.
16. *Masiagutova E., Cabanettes F., Sova A. et al.* Side surface topography generation during laser powder bed fusion of AlSi10Mg // Additive Manufacturing. 2021. Т. 47. С. 102230.
17. *Yang T., Liu T., Liao W. et al.* Effect of processing parameters on overhanging surface roughness during laser powder bed fusion of AlSi10Mg // J. of Manuf. Proces. 2021. Т. 61. С. 440.
18. *Гончаров Е. С., Балякин А. В., Носова Е. А.* Исследование поверхности образцов из титанового сплава, полученных селективным лазерным сплавлением и гидроабразивной полировкой // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докл.: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. 23–25 июня 2021 г., в 2 т., 2021. С. 295.
19. *Hyndman R. J., Fan Y.* Sample quantiles in statistical packages // The American Statistician. 1996. V. 50 (4). P. 361.
20. *Dekking F. M. et al.* A Modern Introduction to Probability and Statistics: Understanding why and how. Springer Science & Business Media, 2006.
21. *Ахиезер Н. И.* Лекции по теории аппроксимации. М.: Наука, 1965. 407 с.
22. *Harris C. R. et al.* Array programming with NumPy // Nature. 2020. Т. 585. № 7825. С. 357.
23. *Фёрстер Э., Рёңц Б.* Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983. 302 с.
24. *Zayatzev A. N., Shoucheng J. I., Alexandrova Y. P.* An Experimental Study of Tribological Properties of Threaded Joints Inconel 718 — Grade 660 with a Solid Lubricant Based on MoS₂ // In Book: Proceedings of the 9th Int. Conf. on Industrial Engineering. ICIE-2023. 28 July 2023. P. 489. https://doi.org/10.1007/978-3-031-38126-3_49