



УДК 67.017

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2026-2-96-106>

Научная статья
Research article



Многопараметрическая модель шероховатости поверхности сплава AlSi10Mg при селективном лазерном сплавлении на основе методов поверхности отклика

К. С. Коробов

Сколковский институт науки и технологий
Россия, 121205, г. Москва, Большой бульвар, 30, стр. 1
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4

barlosh@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты экспериментального и математического исследований влияния технологических параметров процесса селективного лазерного сплавления (СЛС) на формирование шероховатости поверхности изделий из алюминиевого сплава AlSi10Mg. Проведен полный факторный эксперимент, включающий 60 комбинаций основных факторов: мощность лазера, скорость сканирования и шаг штриховки. На основе полученных данных по шероховатости поверхности построена многопараметрическая модель поверхности отклика 3-го порядка, отражающая нелинейные зависимости и взаимодействия факторов. Полученная модель объясняет ~86 % вариаций экспериментальных данных и имеет среднюю погрешность прогнозирования порядка $\pm 0,9$ мкм по параметру S_a и $\pm 0,2$ мкм по параметру R_a . Определены параметры процесса, обеспечивающие минимальное значение средней арифметической шероховатости $S_a \approx 5$ мкм ($R_a \approx 2$ мкм): мощность лазера 400 Вт, скорость сканирования 938 мм/с, шаг между треками 80 мкм. Установлено, что наибольшее влияние на формирование шероховатости поверхности оказывают мощность лазера, шаг штриховки и их суперпозиция. Разработанная многопараметрическая модель может быть использована для прогнозирования качества поверхности и выбора оптимальных технологических режимов при СЛС-производстве изделий из алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: селективное лазерное сплавление, AlSi10Mg, поверхность отклика, шероховатость, S_a , планирование эксперимента, регрессионное моделирование, оптимизация параметров

Для цитирования: Коробов К.С. Многопараметрическая модель шероховатости поверхности сплава AlSi10Mg при селективном лазерном сплавлении на основе методов поверхности отклика. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2026;20(2):96–106. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2026-2-96-106>

Multivariable model of the surface roughness of LPBF-manufactured AlSi10Mg alloy based on response surface methodology

K. S. Korobov

Skolkovo Institute of Science and Technology
1 Bld., 30 Bolshoy Boulevard, Moscow 121205, Russia
Moscow Aviation Institute (National Research University)
4 Volokolamskoe Highway, Moscow 125993, Russia

barlosh@yandex.ru

Abstract. This study presents an experimental and mathematical investigations of the effects of Laser Powder Bed Fusion (LPBF) process parameters on the surface roughness of AlSi10Mg alloy parts. A full-factorial experiment comprising 60 combinations

of the main process parameters – laser power, scanning speed, and hatch spacing – was conducted. A third-order multivariable response surface model was developed from the measured roughness data to describe nonlinear relationships and interactions among the process parameters. The model accounted for approximately 86 % of the total variance in the experimental data and yielded mean prediction errors of approximately 0.9 μm for S_a and $\pm 0.2 \mu\text{m}$ for R_a . The minimum roughness values, $S_a \approx 5 \mu\text{m}$ and $R_a \approx 2 \mu\text{m}$, were obtained at a laser power of 400 W, a scanning speed of 938 mm/s, and a hatch spacing of 80 μm . Laser power, hatch spacing, and their interaction had the greatest effect on the resulting surface roughness. The developed model can be used to predict surface quality and select optimal process parameters for the LPBF manufacturing of aluminum alloy components.

Keywords: laser powder bed fusion, AlSi10Mg, response surface, roughness, S_a , design of experiments, regression modeling, process parameter optimization

For citation: Korobov K.S. Multivariable model of the surface roughness of LPBF-manufactured AlSi10Mg alloy based on response surface methodology. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2026;20(2):96–106.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2026-2-96-106>

Введение

Селективное лазерное сплавление (СЛС, *Laser Powder Bed Fusion* – LPBF) – одна из ведущих технологий аддитивного производства, обеспечивающая получение металлических изделий сложной геометрии по цифровой модели за счет послойного сплавления порошка лазером. Технология активно применяется в аэрокосмической, энергетической и медицинской отраслях промышленности благодаря высокой точности и возможности создания конструкций, недостижимых традиционными методами [1; 2]. Однако одним из ключевых ограничений СЛС остается высокая шероховатость поверхностей, особенно горизонтальных (далее – исследуемые *upskin*-поверхности), существенно влияющая на усталостную прочность и коррозионную стойкость [3–5]. Согласно ГОСТ 2789-73 [6], обеспечение нормативных параметров шероховатости является необходимым условием надежности изделий аддитивного производства.

Шероховатость формируется под действием взаимосвязанных технологических факторов – мощности лазера, скорости сканирования, шага штриховки, толщины слоя и свойств порошка [7; 8]. На практике влияние этих факторов нелинейно. Для обобщения данных широко применяется параметр ОЭВ – объемного энергетического вклада (плотности) [5], однако он не отражает сложных нелинейных взаимодействий и не позволяет предсказать локальные экстремумы шероховатости [9; 10].

Анализ литературы [7; 8; 11; 12] показывает, что зависимости шероховатости от факторов процесса носят сложный характер, при этом диапазоны факторов в различных исследованиях существенно различаются. Это подчеркивает необходимость создания универсальной математической модели, способной описывать взаимодействие факторов в широком интервале технологических условий.

Цель работы – разработка и верификация многопараметрической модели шероховатости *upskin*-поверхностей из сплава AlSi10Mg, полученных мето-

дом СЛС, на основе совмещения методов построения поверхности отклика (RSM) [4] и регуляризованной полиномиальной регрессии (Ridge) [13]. Модель направлена на количественную оценку вклада основных факторов, выявление их взаимодействий и определение области оптимальных технологических факторов, обеспечивающих минимальные значения показателя шероховатости S_a .

1. Материалы и методы

1.1. Оборудование и материалы

В качестве исходного материала использовался порошок AlSi10Mg (композиция PC-300) следующего химического состава, мас. %:

Si	9,0–11,0	Mg	0,20–0,45
Fe	$\leq 0,35$	Ti	$\leq 0,15$
Cu	$\leq 0,05$	Mn	$\leq 0,45$
O	$\leq 0,08$	Al	ост.

Образцы изготавливались методом СЛС на установке M450-S (АО «Лазерные системы», г. Санкт-Петербург), оснащенной двумя волоконными лазерами и системой сканирования «Han's Scanner» (Шэньчжэнь, Китай). Рабочая камера имела размеры 350×350×390 мм. Процесс выполнялся в атмосфере аргона ($O_2 < 0,1 \%$) при температуре платформы 80 °C и стратегии «*stripe pattern*» (ширина полосы 8 мм, поворот слоев 67°).

Все образцы имели форму параллелепипеда (12×12×7 мм) и размещались на платформе с интервалом 3–4 ширины для исключения теплового взаимодействия. После построения выполнялась термообработка по режиму T6 [14; 15]. Сводные характеристики использованного оборудования и материалов представлены в табл. 1. Положение образцов на платформе и их ориентация показаны на рис. 1. Все параллелепипеды размещались без поддержек, с поворотом 10° относительно оси выращивания.

Таблица 1. Основные сведения об оборудовании и материалах

Table 1. Main characteristics of the equipment and materials

Параметр	Характеристика
Установка	M450-S (АО «Лазерные системы», г. Санкт-Петербург)
Источник лазерного излучения	Два иттербиево-волоконных лазера
Система сканирования	Han's Scanner (Шэньчжэнь, Китай)
Размер рабочей платформы, мм	350×350×390
Стратегия сканирования	<i>Stripe pattern</i> , ширина полосы 8 мм, поворот 67° между слоями
Атмосфера	Аргон ($O_2 < 0,1\%$)
Температура платформы, °С	80
Порошковый материал	AlSi10Mg (коммерческая композиция PC-300)
Размер частиц, мкм	20–60 (воздушная дисперсия)
Химический состав	Согласно паспорту производителя (см. выше)
Форма образцов	Прямоугольный параллелепипед

Измерения шероховатости осуществлялись с помощью конфокального микроскопа LEXT OLS5000 (Olympus Corp., Япония). Для каждого образца выполнялось по 4 съемки с последующей сшивкой изображений (после сшивки 2560×2560 мкм). Определялись параметры S_a , S_z , S_{dr} , R_a и R_z в соответствии с ISO 4287-1:1987 [16].

Измерения шероховатости проводились на верхней горизонтальной поверхности каждого образца – поверхности, параллельной платформе построения и формируемой как *upskin*-слой. Измеряемая область совпадала с центральной зоной *upskin*-поверхности каждого образца (приблизительно 4×4 мм). Газовый обдув был направлен противоположно оси X, указанной на рис. 1.

1.2. Планирование эксперимента

Была реализована схема полного факторного эксперимента (ПФЭ) с тремя варьируемыми факторами: мощность лазера ($P = 100\div 400$ Вт), скорость

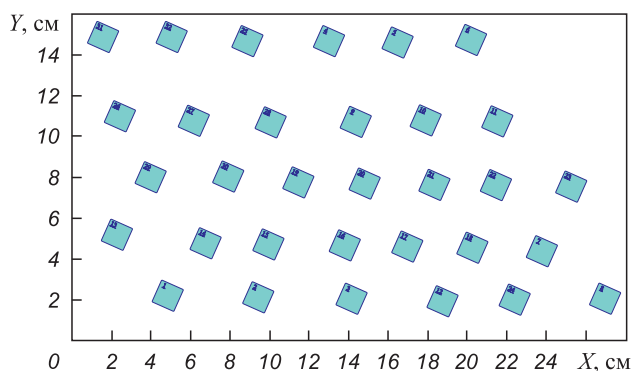


Рис. 1. Размещение и ориентация образцов на платформе построения при проведении эксперимента

Fig. 1. Placement and orientation of the samples on the build platform during the experiment

сканирования ($v = 400\div 1000$ мм/с) и шаг штриховки ($h = 80\div 190$ мкм). Толщина слоя была зафиксирована на уровне $t = 30$ мкм. Такой выбор сделан намеренно, поскольку цель данной работы – изолированный анализ влияния энергетических параметров (P , v и h) на шероховатость именно *upskin*-поверхностей. Варьирование толщины слоя привело бы к смешению эффектов и ухудшению интерпретируемости модели, тогда как влияние t подробно рассмотрено авторами в отдельном исследовании. Поэтому в настоящей работе толщина слоя рассматривается как контролируемый постоянный параметр. Всего изготовлено 60 образцов с уникальными комбинациями факторов. Объемный энергетический вклад (плотность) определялся по выражению

$$\text{ОЭВ} = P/(vht) \quad (1)$$

и варьировался в диапазоне 30–400 Дж/мм³ (рис. 2 и 3).

Для проверки равномерности покрытия диапазона энергий была построена гистограмма его распределения (рис. 3, а).

Значения ОЭВ равномерно распределены по всему диапазону без выраженных смещений и скоплений. Распределение значений ОЭВ близко к нормальному по всем комбинациям параметров, что крайне важно для применения методов регрессии и формирования поверхности отклика.

Таким образом, предварительный анализ плана эксперимента подтвердил правомерность выбранного диапазона режимов и равномерность заполнения факторного пространства.

1.3. Математическая обработка данных

Для построения поверхности отклика применялась полиномиальная регрессия 3-го порядка с регуляризацией Ridge [17]. Модель имеет следующий вид:

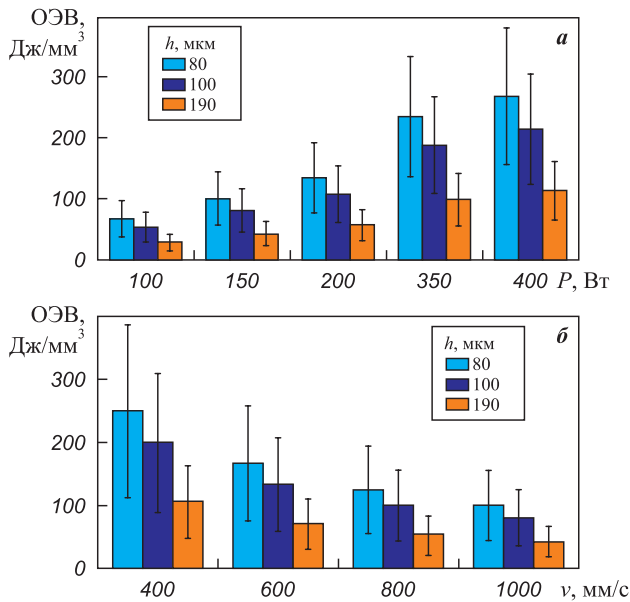


Рис. 2. Зависимость объемной энергетической плотности от мощности лазера (а) и скорости сканирования (б) при различных шагах штриховки

Fig. 2. Volumetric energy density as a function of laser power (a) and scanning speed (б) at different hatch spacings

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon, \quad (2)$$

где x_i – кодированные факторы, β_i – коэффициенты регрессии. Функционал Ridge-регрессии минимизируется по выражению

$$\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 + \alpha \sum \beta_j^2, \quad (3)$$

где α – коэффициент регуляризации. Оптимальное значение α определялось методом GridSearchCV в диапазоне 10^{-3} – 10^3 при 5-кратной перекрестной проверке [18].

Модель оценивалась согласно среднеквадратичной ошибке (MSE) и коэффициенту детерминации (R^2):

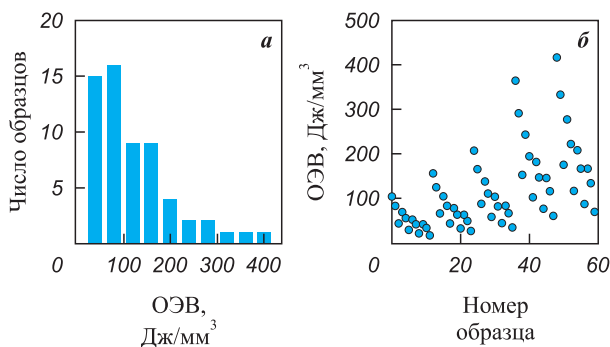


Рис. 3. Гистограмма распределения значений ОЭВ по диапазону 30–400 Дж/мм³ (а) и диаграмма рассеяния (б)

Fig. 3. Histogram of volumetric energy density values in the range 30–400 J/mm³ (a) and scatter plot (б)

$$MSE = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}, \quad R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y^i - \bar{y})^2}. \quad (4)$$

При $MSE = 0,78$ и $R^2 = 0,87$ модель объясняет 87 % дисперсии S_a , что подтверждает ее применимость для параметрической оптимизации режимов СЛС.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Общая структура экспериментальных данных

Распределение параметра шероховатости S_a для всех 60 комбинаций факторов показано на диаграммах рассеяния (рис. 4), отражающих зависимость S_a от объемной энергетической плотности. С ростом

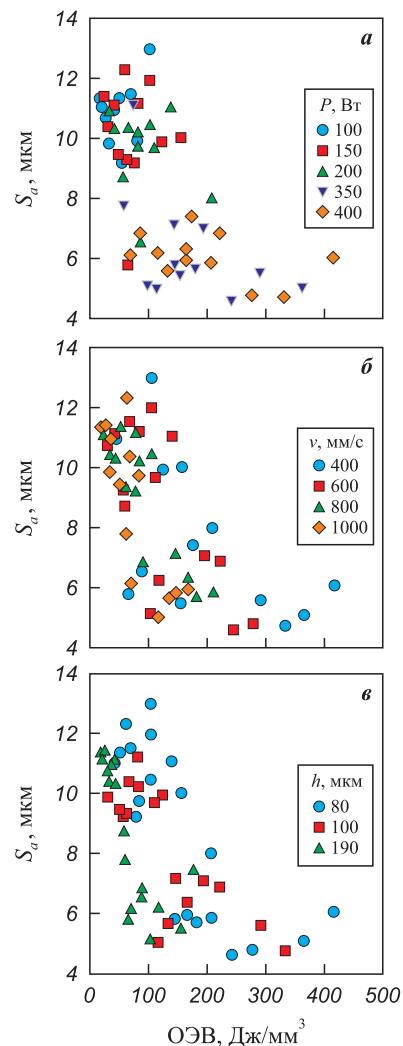


Рис. 4. Диаграммы рассеяния шероховатости в зависимости от энерговклада при различных значениях мощности (а), скорости сканирования (б) и шага штриховки (в)

Fig. 4. Scatter plots of surface roughness versus volumetric energy density at different levels of laser power (a), scanning speed (б), and hatch spacing (в)

энерговклада наблюдается устойчивая тенденция к снижению S_a : при ОЭВ < 60 Дж/мм³ разброс достигает $\pm(2\div3)$ мкм, тогда как при ОЭВ > 250 Дж/мм³ дисперсия значительно уменьшается. В целом значения S_a варьировались в пределах 5–12 мкм, что соответствует низкому уровню шероховатости для горизонтальных поверхностей из сплава AlSi10Mg, полученных методом СЛС.

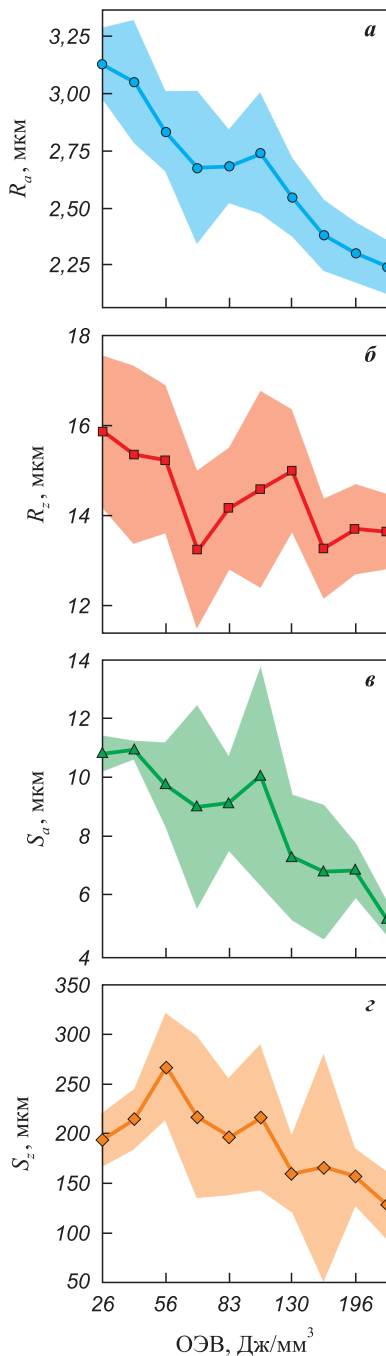


Рис. 5. Зависимость параметров R_a (а), R_z (б), S_a (в) и S_z (г) от объемной энергетической плотности с 95 %-ными доверительными интервалами

Fig. 5. R_a (a), R_z (б), S_a (в), and S_z (г) as a function of volumetric energy density, with 95 % confidence intervals

2.2. Анализ распределения и статистических характеристик шероховатости

Для выявления закономерностей изменения шероховатости в зависимости от энергетического режима проведено статистическое усреднение экспериментальных данных по диапазону объемной энергетической плотности. Все наблюдения были разделены на 10 равновероятных квантилей в пределах 30–400 Дж/мм³, для каждого из которых вычислялись средние значения параметров шероховатости R_a , R_z , S_a , S_z и 95 %-ные доверительные интервалы.

Результаты (рис. 5) показывают устойчивое снижение шероховатости с ростом ОЭВ: средние значения S_a и R_a уменьшаются с ~11,5 и 3,1–3,2 мкм до ~5 и 2 мкм соответственно. Это отражает переход процесса СЛС из неустойчивого режима неполного сплавления в так называемую стабильную область. Параметры R_z и S_z демонстрируют менее выраженное, но аналогичное уменьшение амплитуды микронеровностей.

Дополнительно было проанализировано распределение шероховатости в зависимости от отдельных факторов – мощности лазера, скорости сканирования и шага штриховки (рис. 6, цветовая шкала над графиком соответствует значениям ОЭВ, Дж/мм³). С повышением мощности медианные значения R_a снижаются, при росте скорости сканирования разброс остается стабильным, а при увеличении шага штриховки вариация возрастает. Эти зависимости подтверждают нелинейный характер влияния факторов на шероховатость и необходимость применения полиномиальной модели поверхности отклика.

2.3. Модель поверхности отклика и ее оценка

Для количественного описания влияния технологических факторов P , v и h на шероховатость поверхности S_a была построена многофакторная модель поверхности отклика (МПО) 3-го порядка. Общее уравнение модели и полученные коэффициенты приведены в формулах (5) и (6):

$$S_a(P, v, h) = b_0 + b_1P + b_2v + b_3h + b_4P^2 + b_5Pv + b_6Ph + b_7v^2 + b_8vh + b_9h^2 + b_{10}P^3 + b_{11}P^2v + b_{12}P^2h + b_{13}Pv^2 + b_{14}Pvh + b_{15}Ph^2 + b_{16}v^3 + b_{17}v^2h + b_{18}vh^2 + b_{19}h^3, \quad (5)$$

где b_i – i -й член полинома (3) данной модели, определяемый в процессе ее обучения. Непосредственно после обучения имеем:

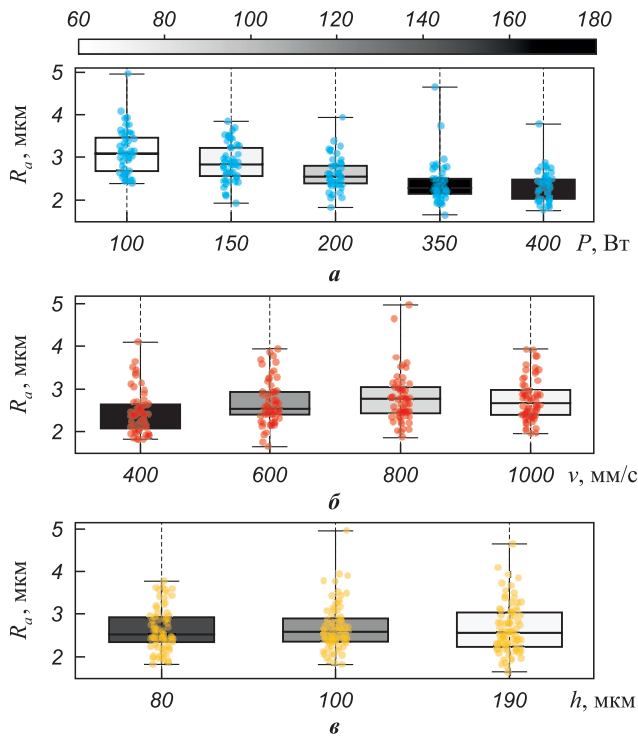


Рис. 6. Распределение параметра R_a в зависимости от мощности лазера (а), скорости сканирования (б) и шага штриховки (в)

Fig. 6. Distribution of R_a as a function of laser power (a), scanning speed (b), and hatch spacing (c)

$$\begin{aligned}
 S(P, v, h) = & 7,70 - 1,51P + 0,36v - 0,13h + \\
 & + 0,49P^2 + 0,86Ph - 0,39v^2 + 0,17vh + \\
 & + 0,46h^2 + 0,30P^3 - 0,78P^2v + 0,14P^2h - \\
 & - 0,24Pvh - 0,97Ph^2 + 0,43v^3 + 0,21vh^2 - 0,20h^3. \quad (6)
 \end{aligned}$$

Поскольку в данной работе используется регуляризованная регрессия Ridge, классические статистические характеристики коэффициентов (стандартные ошибки, t -статистики и p -значения) не приводятся. В присутствии регуляризационного члена $\alpha\|\beta\|^2$ и высокой взаимной коррелированности полиномиальных признаков эти величины теряют корректную интерпретацию и не отражают реального вклада факторов.

Для оценки значимости факторов применены методы, корректные для регуляризованных моделей:

анализ нормированных коэффициентов, диаграмма Парето вкладов факторных терминов, а также результаты перекрестной проверки и независимой тестовой валидации. Такой подход позволяет оценить влияние основных факторов (P, v, h) и их взаимодействий даже при наличии высокой мультиколлинеарности.

Для проверки устойчивости построенной модели выполнена валидация на тестовом наборе данных, не участвовавшем в обучении. Данные были разделены в пропорции 80/20. После повторного обучения модели на тренировочной выборке была проведена оценка шероховатости S_a для тестового набора. Полученные метрики составили: $R^2_{\text{test}} = 0,83$; $RMSE_{\text{test}} = 1,02$ μm ; $MSE_{\text{test}} = 1,04$ μm^2 . Здесь R^2_{test} характеризует долю вариации экспериментальных значений S_a , объясняемую моделью на независимых данных; $RMSE_{\text{test}}$ отражает типичный масштаб ошибки прогноза в тех же единицах, что и шероховатость; MSE_{test} – средняя квадратичная ошибка, используемая как интегральная мера отклонения предсказаний от экспериментальных значений. Полученные значения согласуются с результатами обучения на основном наборе данных и не указывают на признаки переобучения.

Модель объясняет около 87 % вариации экспериментальных данных ($R^2 = 0,8722$, $MSE = 0,7760$), что свидетельствует о ее высокой адекватности и предсказательной способности. Для параметра R_a аналогичная модель показала $R^2 = 0,7934$ при $MSE = 0,0283$. Сводные результаты представлены в табл. 2. Корректность аппроксимации и отсутствие систематических ошибок дополнительно подтверждены анализом остатков модели (рис. 7). В настоящей работе остаток для i -го наблюдения определяли как разность между экспериментально измеренным значением шероховатости и соответствующим значением, предсказанным моделью:

$$e_i = S_{a_i}(\text{exp}) - S_{a_i}(\text{pred}). \quad (7)$$

Здесь $S_{a_i}(\text{exp})$ – экспериментальное значение параметра шероховатости для i -го образца, $S_{a_i}(\text{pred})$ – значение, рассчитанное по модели поверхности отклика для той же комбинации технологических параметров P, v и h . Иными словами, остаток представляет собой часть значения S_a , не описанную поверхностью отклика; на

Таблица 2. Ключевые характеристики обученных моделей

Table 2. Performance characteristics of the fitted models

Модель	Среднеквадратичная ошибка, μm	Коэффициент R^2	Средняя погрешность, μm	Диапазон значений, μm	Относительная погрешность, %	Минимальные значения, μm	Основные факторы
S_a	0,7760	0,8722	$\pm 0,9$	5,0–11,5	~ 13	$S_{a_{\min}} = 4,95$	P, h, Ph, P^2
R_a	0,0283	0,7934	$\pm 0,2$	1,8–3,5	~ 12	$R_{a_{\min}} = 2,0$	P, P^2, v^2, Ph

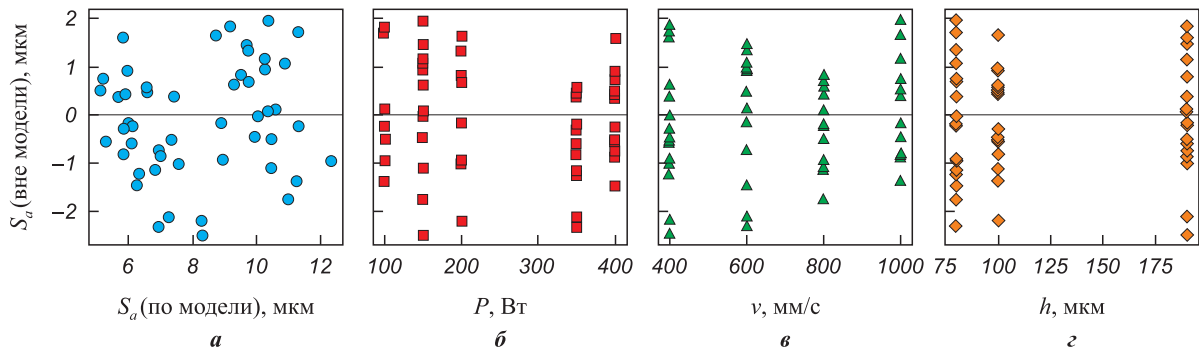


Рис. 7. Анализ остатков модели шероховатости S_a

По оси ординат отложена величина S_a (вне модели), равная разности между экспериментальным и предсказанным моделью значениями шероховатости; по оси абсцисс – S_a , предсказанная моделью (а), мощность лазерного излучения (б), скорость сканирования (в) и шаг штриховки (з)

Fig. 7. Residual analysis of the S_a roughness model

The vertical axis shows the S_a residuals, calculated as the difference between the experimental and model-predicted values; the horizontal axis shows the model-predicted S_a (a), laser power (b), scanning speed (v), and hatch spacing (z)

рис. 7 эта величина обозначена как S_a (вне модели). Распределение значений S_a (вне модели) относительно предсказанных моделью значений шероховатости и технологических факторов (P , v и h) не выявляет выраженных трендов, смещений или группировок. Это свидетельствует об отсутствии систематической ошибки модели и позволяет заключить, что необъясненные 13 % вариации имеют преимущественно случайную природу и связаны главным образом с погрешностью измерений и стохастическими особенностями формирования поверхности, а не с неучтенными систематическими факторами процесса.

Визуализация поверхности отклика (рис. 8) демонстрирует ярко выраженную нелинейность функции $S_a = f(P, v, h)$. Минимальные значения S_a наблюдаются при $P = 400$ Вт, $v \approx 900 \div 1000$ мм/с и $h = 80 \div 100$ мкм, когда достигается оптимальный баланс между глубиной и шириной ванны расплава. Вне этой области при низких скоростях сканирования (< 600 мм/с) и больших шагах штриховки (> 150 мкм) формируются зоны переплавления и непровара, что увеличивает шероховатость.

Для сопоставления полученных результатов с данными литературы проанализированы опубликованные исследования по шероховатости поверхностей сплава AlSi10Mg. Так, в работе [7] для оптимизированных *upskin*-режимов сообщается о снижении S_a до 6–8 мкм, а в работе [8] диапазон S_a составляет 7–12 мкм в зависимости от стратегии сканирования. В работе [11], посвященной зависимостям шероховатости от энергетических параметров, минимальные значения S_a достигают $\approx 5 \div 7$ мкм.

Полученные в настоящем исследовании величины S_a (минимум ≈ 5 мкм) и R_a (минимум ≈ 2 мкм) согласуются с указанными диапазонами и находятся в области оптимальных режимов, характерных для

алюминиевых сплавов. Наблюдаемая зависимость S_a от объемной энергетической плотности также соответствует тенденциям, описанным в работах [7; 8; 11], включая улучшение качества поверхности при переходе из низкоэнергетического режима неполного сплавления в стабильную зону плавления.

Отметим, что выбор регуляризованной полиномиальной модели поверхности отклика обусловлен необходимостью сохранения интерпретируемости результатов. В отличие от нейросетевых и других методов типа «черный ящик», Ridge-регрессия с полиномиальным расширением признаков позволяет количественно оценивать вклад отдельных факторов и их взаимодействия. Поэтому используемая модель выбрана для задач анализа и интерпретации технологических закономерностей формирования шероховатости.

Согласно анализу коэффициентов регрессии и диаграммы Парето (см. рис. 10, где все значения коэффициентов показаны через их абсолютную величину), наибольшее влияние на шероховатость оказывают мощность лазера P (относительный вклад $-1,52$), комбинированный член Ph^2 ($-1,11$), взаимодействие Ph ($0,89$) и член второго порядка P^2v ($-0,89$). Существенный вклад вносят квадратичные члены h^2 ($0,73$), v^2 ($0,61$) и P^2 ($0,55$). Скорость сканирования (v , v^2 , v^3) проявляет умеренное, но статистически значимое влияние (вплоть до $-0,6$), определяя плавность переходов между зонами минимальной и повышенной шероховатости.

2.4. Анализ пространственных частот и микрорельефа поверхности

Для уточнения структуры микрорельефа проведен частотный анализ топографии методом двумерного преобразования Фурье (2D FFT) [19; 20]. Процедура

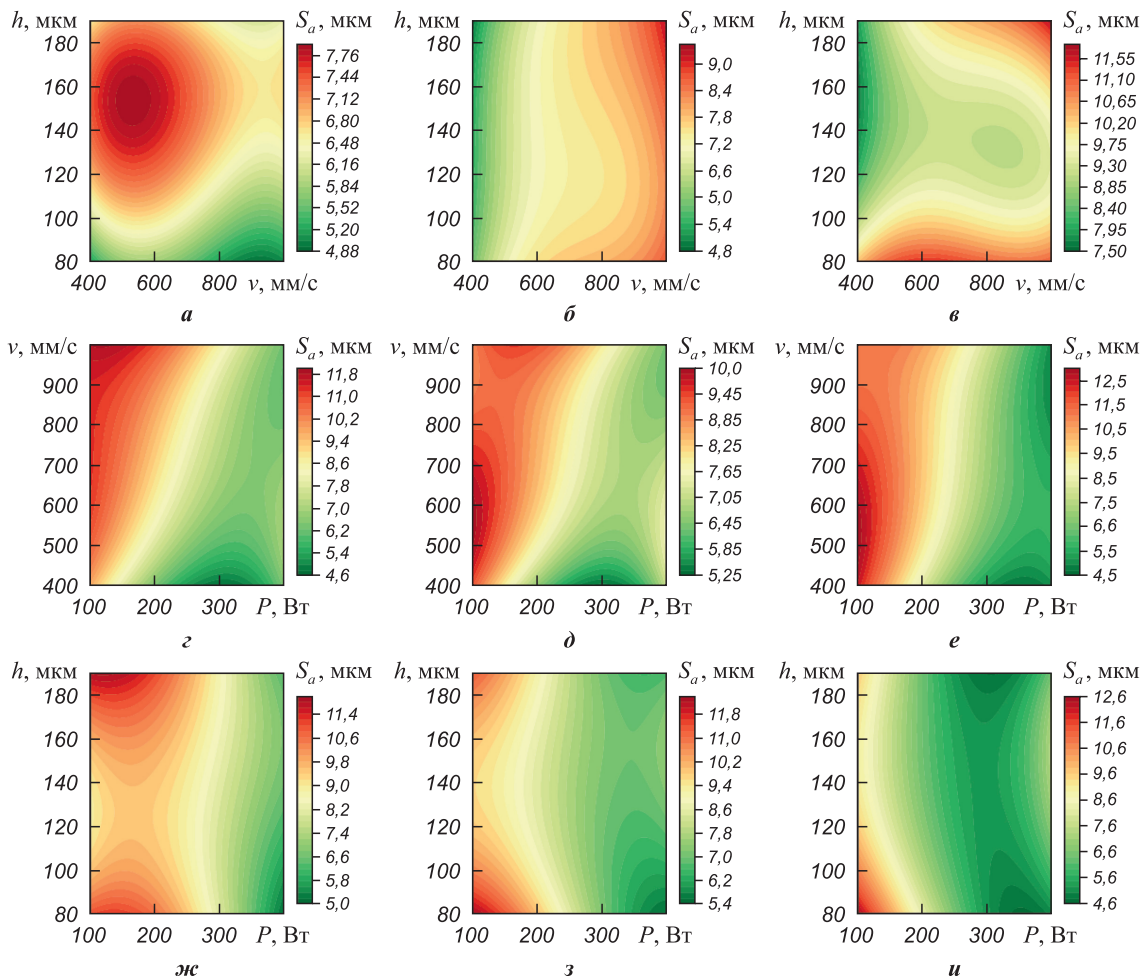


Рис. 8. Поверхности отклика модели для параметра S_a при различных уровнях факторов
 P , Вт – 150 (а), 275 (б), 400 (в)
 h , мкм – 80 (з), 130 (д), 190 (е)
 v , мм/с – 400 (ж), 700 (з), 1000 (и)

Fig. 8. Response surfaces of the S_a model at different factor levels
 P , W – 150 (a), 275 (b), 400 (c)
 h , μm – 80 (z), 130 (d), 190 (e)
 v , mm/s – 400 (zh), 700 (z), 1000 (i)

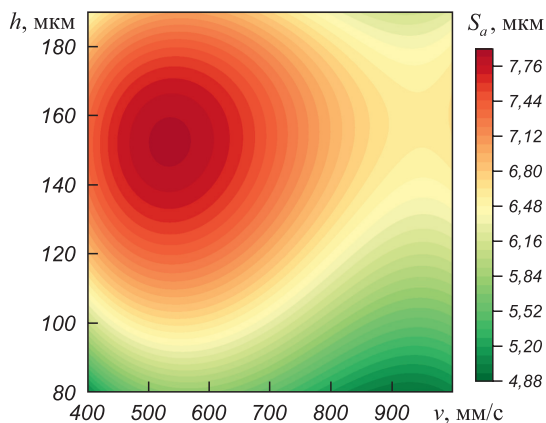


Рис. 9. Поверхность отклика S_a при фиксированной мощности $P = 400$ Вт в координатах $v-h$
 Fig. 9. Response surface for S_a at a fixed power of $P = 400$ W in $v-h$ coordinates

FFT позволила оценить распределение пространственных частот и выявить характерные масштабы неровностей, отражающие морфологию поверхности [21; 22]. На рис. 11 представлены усредненные радиальные спектры мощности для 3 образцов с различным уровнем объемного энерговклада.

При низком ОЭВ (образец 24, ~ 26 Дж/мм³) доминируют низкочастотные компоненты с выраженным пиком радиальной мощности на частоте $f \approx 0,009$ мкм⁻¹, что соответствует крупным неровностям с периодом порядка 110 мкм и выраженной направленной текстурой.

Для среднего диапазона (образец 16, ~ 104 Дж/мм³) спектр смещен к более высоким частотам, пик наблюдается при $f \approx 0,022$ мкм⁻¹, что соответствует периодичности около 45 мкм. Это указывает на стабилизацию и уменьшение амплитуды микрорельефа.

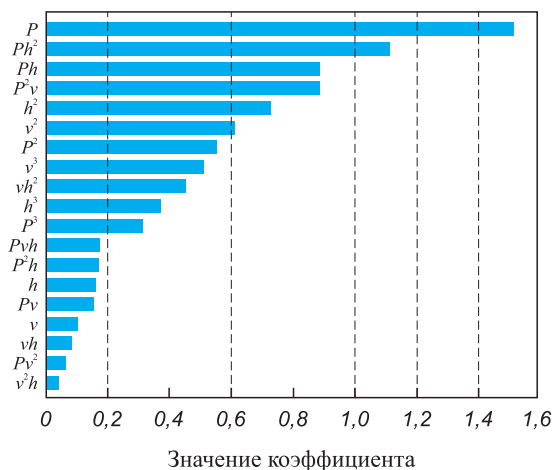


Рис. 10. Диаграмма Парето – вклада основных факторов и их комбинаций в формирование параметра S_a

Fig. 10. Pareto chart showing the effects of the of main factors and their interactions on S_a

При высоком энергокладе (образец 43, ~ 182 Дж/мм³) появляются два выраженных пика в области $f \approx 0,038$ и $0,052$ мкм⁻¹, соответствующие периодам 20–25 мкм, что отражает формирование

мелкомасштабных структур, связанных с разбрызгиванием порошка.

Таким образом, с ростом объемного энергоклада наблюдается сдвиг спектра радиальной мощности в область более высоких частот, что подтверждает переход от грубых направленных структур к однородной мелкозернистой поверхности.

Заклучение

Проведенное исследование позволило установить закономерности влияния технологических режимов процесса селективного лазерного сплавления на формирование микрорельефа поверхности сплава AlSi10Mg. На основе данных полного факторного эксперимента построена статистически устойчивая модель поверхности отклика, описывающая нелинейные зависимости между мощностью лазера, скоростью сканирования и шагом штриховки, найден локальный минимум поверхности отклика шероховатости. Можно сделать следующие выводы:

Создана многопараметрическая модель шероховатости поверхности при селективном лазерном сплавлении сплава AlSi10Mg, основанная на полино-

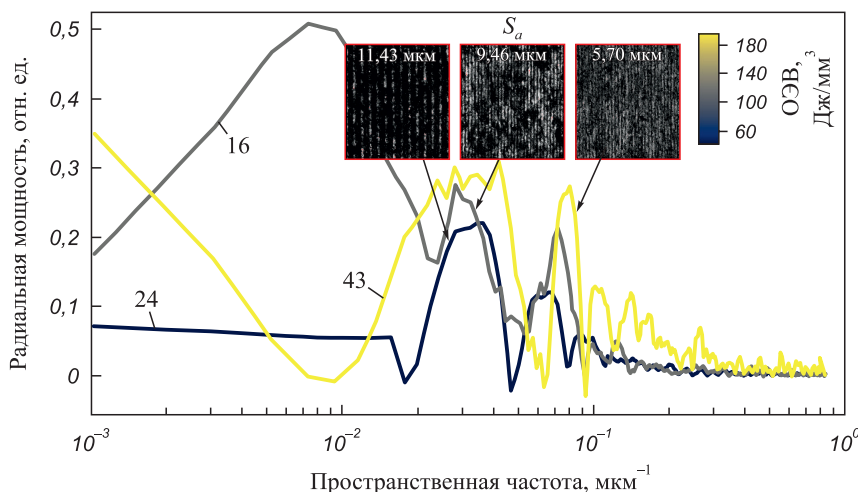


Рис. 11. Радиальные спектры мощности и фрагменты поверхностей при различных уровнях объемного энергоклада

Fig. 11. Radial power spectra and corresponding surface fragments at different volumetric energy density levels

Таблица 3. Результаты частотного анализа поверхностей

Table 3. Results of spatial-frequency analysis of the surface

Образец	ОЭВ, Дж/мм ³	S_a , мкм	Преобладающий диапазон f , мкм ⁻¹	Характер рельефа
24	26,3	11,43	0,005–0,015	Крупномасштабные неровности, направленная текстура
16	104,2	9,46	0,010–0,030	Равномерная текстура, снижение амплитуды
43	182,3	5,70	0,020–0,060	Мелкомасштабный рельеф, частичное сплавление

миальной регрессии 3-го порядка с регуляризацией типа Ridge. Модель продемонстрировала высокую точность аппроксимации экспериментальных данных ($MSE = 0,7760$, $R^2 = 0,8722$).

Первым по влиянию фактором, определяющим шероховатость поверхности, является мощность лазера P , оказывающая выраженное отрицательное влияние на параметр S_a ($-1,52$). Вторым по значимости является комбинированный член Ph^2 ($-1,11$), далее следуют взаимодействие Ph ($0,89$) и член второго порядка $P^2\nu$ ($-0,89$). Существенный вклад вносят квадратичные зависимости по шагу штриховки и скорости сканирования – h^2 ($0,73$) и ν^2 ($0,61$), а также квадратичный член по мощности P^2 ($0,55$). Среди членов 3-го порядка наибольшее влияние на шероховатость оказывают ν^3 ($0,51$), νh^2 ($0,45$) и h^3 ($-0,37$). Остальные взаимодействия и члены более высоких порядков (P^3 , $P\nu h$, P^2h и др.) имеют меньший вклад и отражают уточняющие нелинейные эффекты. В целом структура коэффициентов свидетельствует о выраженной нелинейности процесса и существенной роли взаимодействий между параметрами, особенно с участием мощности лазера и шага штриховки.

Оптимизация модели позволила определить интервалы факторов, при которых достигается минимальная шероховатость: $P = 380\div 420$ Вт, $\nu = 900\div 970$ мм/с и $h = 80\div 100$ мкм, что соответствует $S_a = 4,95$ мкм. Результаты частотного анализа (FFT) подтвердили снижение амплитуды микро-рельефа и смещение спектра в область более высоких пространственных частот, что соответствует переходу к мелкомасштабной равномерной структуре поверхности при оптимальных режимах;

Поверхность отклика вблизи минимума S_a является пологой, позволяя предположить существование локального минимума при меньших шагах штриховки. Для уточнения оптимальных условий процесса СЛС рекомендуется проведение дополнительных экспериментов в расширенном диапазоне факторов (при $h < 80$ мкм и $\nu = 850\div 950$ мм/с), а также использование установок СЛС с иными конструкторскими решениями и оптической системой.

Список литературы / References

- Pal S., Drstvenšek I., Brajlilić T. Physical behaviors of materials in selective laser melting process. In: *DAAAM International Scientific Book 2018*. Vienna: DAAAM International Publishing, 2018. P. 239–256.
<https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2018.21>
- Kiass E.M., Zarbane K., Beidouri Z. Optimizing AlSi10Mg part quality aspects in laser powder bed fusion: A literature review. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 2024;11(4):905–930.
<https://doi.org/10.1007/s40516-024-00267-4>
- Subramaniyan A.K., Reddy A.S., Mathias S., Shrivastava A., Raghupatruni P. Influence of post-processing techniques on the microstructure, properties and surface integrity of Al–Si–Mg alloy processed by laser powder bed fusion technique. *Surface and Coatings Technology*. 2021;425: 127679.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127679>
- Majeed A., Ahmed A., Salam A., Sheikh M.Z. Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2019; 1;2(4):288–295.
<https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2019.08.001>
- 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; 17(3):111–122.
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;17(3):111–122. (In Russ.).
- ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. М.: Издательство стандартов, 2018.
- Gao C., Tang H., Zhang S., Ma Z., Bi Y., Rao J.H. Process optimization for up-facing surface finish of AlSi10Mg alloy produced by laser powder bed fusion. *Metals*. 2022;29;12(12):2053.
<https://doi.org/10.3390/met12122053>
- Boschetto A., Bottini L., Pilone D. Metallurgical defects and roughness investigation in the laser powder bed fusion multi-scanning strategy of AlSi10Mg parts. *Metals*. 2024;14(6):711.
<https://doi.org/10.3390/met14060711>
- Vilanova M., Escribano-García R., Guraya T., San Sebastian M. Optimizing laser powder bed fusion parameters for IN-738LC by response surface method. *Materials*. 2020;13(21):4879.
<https://doi.org/10.3390/ma13214879>
- Kyarimov R.R., Statnik E.S., Sadykova I.A., Frantsuzov A.A., Salimon A.I., Korsunsky A.M. Factorial-experimental investigation of LPBF regimes for VZh159 nickel superalloy grain structure and structural strength optimization. *Frontiers in Materials*. 2024;11:1470651.
<https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1470651>
- Yang T., Liu T., Liao W., Wei h., Zhang C., Chen X., Zhang K. Effect of processing parameters on overhanging surface roughness during laser powder bed fusion of AlSi10Mg. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;61:440–453.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.11.030>
- Коробов К.С., Рипецкий А.В., Николаев И.А., Лесневский Л.Н. Статистические подходы к анализу шероховатости вертикальных поверхностей образцов, изготовленных по технологии СЛС из порошка AlSi10Mg. *Проблемы машиностроения и надежности машин*.

- 2025;(2):32–41.
<https://doi.org/10.31857/S0235711925020049>
- Korobov K.S., Ripetsky A.V., Nikolaev I.A., Lesnevsky L.N. Statistical approaches to analysis of the roughness of vertical surfaces of samples manufactured by the SLM technology from AlSi10Mg powder. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2025;54(2):150–158.
<https://doi.org/10.1134/S1052618824701802>
13. Harris C.R., Millman K.J., van der Walt S.J., Gommers R., Virtanen P., Cournapeau D., Wieser E., Taylor J., Berg S., Smith N.J., Kern R., Picus M., Hoyer S., van Kerkwijk M.H., Brett M., Haldane A., del Río J.F., Wiebe M., Peterson P., Gérard-Marchant P., Sheppard K., Reddy T., Weckesser W., Abbasi H., Gohlke C., Oliphant T.E. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020;585:357–362.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
 14. Majeed A., Zhang Y., Lv J., Peng T., Atta Z., Ahmed A. Investigation of T4 and T6 heat treatment influences on relative density and porosity of AlSi10Mg alloy components manufactured by SLM. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;139:106194.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106194>
 15. Shubham P., Sharma A., Vishwakarma P.N., Phanden R.K. Predicting strength of selective laser melting 3D printed AlSi10Mg alloy parts by machine learning models. In: *Proceedings of the 2021 8th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. Noida, India, 2021. P. 745–749.
<https://doi.org/10.1109/SPIN52536.2021.9566142>
 16. ISO 4287-1:1984. Шероховатость поверхности. Терминология. Часть 1: Поверхность и ее параметры.
 17. Hastie T. Ridge regularization: An essential concept in data science. *Technometrics*. 2020;62(4):426–433.
<https://doi.org/10.1080/00401706.2020.1791959>
 18. Tougui I., Jilbab A., El Mhamdi J. Impact of the choice of cross-validation techniques on the results of machine learning-based diagnostic applications. *Healthcare Informatics Research*. 2021;27(3):189–199.
<https://doi.org/10.4258/hir.2021.27.3.189>
 19. Zhao R., Shmatok A., Fischer R., Deng P., Belhadi M.E.A., Hamasha S., Prorok B.C. Employing spatial and amplitude discriminators to partition and analyze LPBF surface features. *Precision Engineering*. 2022;78:90–101.
<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.07.014>
 20. Molinari A., Ancellotti S., Fontanari V., Iacob E., Luchin V., Zappini G., Benedetti M. Effect of process parameters on the surface microgeometry of a Ti6Al4v alloy manufactured by laser powder bed fusion: 3D vs. 2D characterization. *Metals*. 2022;12(1):106.
<https://doi.org/10.3390/met12010106>
 21. Xiao B., Zhou C., Liu B., Cai W., Xue Q., Jin L., Wang Y., Liu C., Zhang Q., Pan h. The effects of hatch spacing and stripe offset on the surface morphology and microstructure of biomedical 316L stainless steel formed by laser powder bed fusion. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025;36:10183–10198.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.05.211>
 22. Zhang H., Vallabh C.K., Zhao X. Influence of spattering on in-process layer surface roughness during laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023;104:289–306.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.058>

Сведения об авторе



Information about the Author

Константин Сергеевич Коробов – сотрудник лаборатории Центра аэрокосмических материалов и технологий Московского авиационного института (национального исследовательского университета), аспирант Сколковского института науки и технологий

 **ORCID:** 0009-0001-5663-2758

 **E-mail:** barlosh@yandex.ru

Konstantin S. Korobov – Employee at the Laboratory of the Center for Aerospace Materials and Technologies, Moscow Aviation Institute (National Research University), Postgraduate Student of the Skolkovo Institute of Science and Technology

 **ORCID:** 0009-0001-5663-2758

 **E-mail:** barlosh@yandex.ru

Статья поступила 29.10.2025 г.
 Доработана 28.11.2025 г.
 Принята к публикации 08.12.2025 г.

Received 29.10.2025
 Revised 28.11.2025
 Accepted 08.12.2025