

УДК 620.179.118

Исследование фотометрического метода контроля шероховатости поверхности

Хромушина Анастасия Александровна^(*)

khromushinaaaa@student.bmstu.ru

SPIN-код: 3405-0314

Крансущкая Анастасия Алексеевна

kransutskaya@bmstu.ru

SPIN-код: 9751-7596

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Работа посвящена разработке алгоритма для косвенной оценки параметра шероховатости R_a поверхности в процессе ее формирования методом селективного лазерного плавления (СЛП). Предложен бесконтактный метод, основанный на анализе полутонового изображения поверхности, полученного в условиях коаксиального бестеневого освещения. Для однородных по материалу поверхностей, каковыми являются изделия СЛП, изменение яркости однозначно связано с наклоном микронеровностей. Теоретической основой алгоритма является модель диффузного отражения Ламберта. Проведенный анализ показывает, что метод применим для оперативного мониторинга и сравнительного анализа шероховатости в условиях серийного производства, однако его абсолютная точность ограничена допущениями модели и требует строгого соблюдения постоянства условий освещения и съемки.

Ключевые слова: контроль шероховатости, бесконтактные измерения, фотометрический метод, анализ изображений, модель Ламберта, селективное лазерное плавление

Study of a photometric method for surface roughness control

Khromushina Anastasia Aleksandrovna^(*)

khromushinaaaa@student.bmstu.ru

SPIN-code: 3405-0314

Kransutskaya Anastasia Alekseevna

kransutskaya@bmstu.ru

SPIN-code: 9751-7596

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This work is devoted to the development of an algorithm for the indirect assessment of the surface roughness parameter R_a during its formation by the selective laser melting (SLM) process. A non-contact method based on the analysis of a grayscale image of the surface obtained under coaxial shadow-free illumination conditions is proposed. For material-homogeneous surfaces, such as SLM products, the change in brightness is unambiguously related to the slope of micro-irregularities. The theoretical basis of the algorithm is the Lambertian diffuse reflection model. The conducted analysis shows that the method is applicable for operational monitoring and comparative analysis of roughness in serial production conditions; however, its absolute accuracy is limited by the model's assumptions and requires strict adherence to constant conditions of illumination and imaging.

Keywords: roughness control, non-contact measurements, photometric method, image analysis, Lambertian model, selective laser melting

Введение. Контроль шероховатости поверхностей аддитивных изделий представляет собой критически важную задачу обеспечения их функциональных характеристик. Традиционные контактные методы неприменимы для оперативного мониторинга в процессе селективного лазерного плавления (СЛП) [1].

Актуальность работы заключается в разработке бесконтактного метода контроля, основанного на анализе изображений. Целью исследования является разработка алгоритма оценки параметра R_a поверхностей СЛП по данным фотометрического анализа. Научная новизна заключается в адаптации фотометрического метода для условий бестеневого освещения. Практическая значимость определяется возможностью интеграции метода в системы мониторинга аддитивных установок.

Материалы и методы. Для проведения исследований использовался образец из металлического порошка RS-300 [2], полученный методом селективного лазерного плавления. Для бесконтактных измерений использовался видеоизмерительная система NORGAU (увеличение $0,7\times$, разрешение 3264×2448 пикселей) [3].

Была разработана специализированная программа на Python для анализа изображений и расчета параметров шероховатости. Программа реализовала алгоритм фотометрического анализа, обеспечивающий оптимизацию процесса измерений и исключение субъективного фактора при обработке данных. При переходе к метрической системе в качестве эталонного образца применялась деталь с подтвержденной шероховатостью $R_{a\text{etalon}} = 12,5$ мкм, измеренной контактным контурографом-профилометром Mitutoyo. Для исследуемого образца выполнялось одно измерение с последующей обработкой данных. Точность полученных данных оценена путем сравнения с действительным значением шероховатости исследуемого образца $R_d = 12$ мкм.

Методика измерений включала следующие этапы: получение изображения поверхности при строго вертикальном освещении, автоматическое выделение области интереса, расчет яркостных характеристик и определение параметра шероховатости на основе калибровочных коэффициентов, полученных для эталонного образца. Условия освещения и геометрия съемки поддерживались постоянными для всех измерений.

Результаты. Модель Ламберта описывает идеально матовую поверхность, которая отражает свет равномерно во все стороны. Яркость такой поверхности не зависит от угла наблюдения, а зависит только от угла падения света. Ключевая формула [4]:

$$I = R * \cos(\theta),$$

где I — интенсивность света, регистрируемая камерой (яркость пикселя); R — коэффициент диффузного отражения (для однородной поверхности это константа); θ — угол между вектором нормали к поверхности (n) и вектором направления на источник света (s).

Поскольку источник света расположен строго над поверхностью ($s = [0, 0, 1]$), а вектор нормали к микросклону имеет вид $n = [-\frac{dh}{dx}, -\frac{dh}{dy}, 1]$

(где $h(x,y)$ — высота), то косинус угла θ вычисляется как скалярное произведение этих векторов [5]. После нормировки получается, что:

$$I = \frac{1}{\sqrt{\frac{dh^2}{dx^2} + \frac{dh^2}{dy^2} + 1}}.$$

Таким образом, чем больше наклон микросклона (чем больше производные $\frac{dh}{dx}$ и $\frac{dh}{dy}$), тем меньше значение косинуса и, следовательно, тем темнее будет этот участок на изображении. И наоборот, участки, перпендикулярные свету, будут самыми светлыми.

При постоянном R и вертикальном освещении градиент яркости на изображении прямо связан с градиентом высоты поверхности. Мы не можем точно измерить абсолютную высоту в нанометрах без эталона, но можем рассчитать относительные перепады "высоты", выраженные в условных единицах яркости, которые сильно коррелируют с реальной шероховатостью.

По аналогии со стандартным параметром шероховатости R_a (среднее арифметическое отклонение профиля) [6], рассчитывается его условный аналог в пространстве яркости $R_{a_{\text{pixel}}}$:

$$R_{a_{\text{pixel}}} = \frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in \Omega} |h(x,y) - I_{\text{mean}}| = \frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in \Omega} |I(x,y) - I_{\text{mean}}|, \quad (*)$$

где N — количество пикселей в области Ω ; $I(x,y)$ — интенсивность, регистрируемая камерой в точке (x,y) ; I_{mean} — базовый уровень яркости, который принимается за условный «ноль» высоты.

Это интегральная оценка, характеризующая среднее отклонение яркости от базового уровня и, следовательно, средний наклон микронеровностей.

Для перехода от безразмерных единиц яркости $R_{a_{\text{pixel}}}$ к микрометрам используется линейная калибровка по эталонному образцу с известным значением шероховатости $R_{a_{\text{etalon}}}$:

Для эталонного образца по формуле (*) вычисляется значение $R_{a_{\text{pixel}}}^{\text{etalon}}$.

Определяется калибровочный коэффициент k , имеющий размерность [мкм/ед. яркости]:

$$k = \frac{R_{a_{\text{etalon}}}}{R_{a_{\text{pixel}}}^{\text{etalon}}}.$$

Искомое значение шероховатости R_a для исследуемого образца рассчитывается путем применения коэффициента k к вычисленному для него значению $R_{a_{\text{pixel}}}$:

$$R_a = k \cdot R_{a_{\text{pixel}}}.$$

Согласно приведенному алгоритму проведены испытания образца и получены следующие результаты:

Условная шероховатость $R_{a_{\text{pixel}}} = 32,12$.

Рассчитанная шероховатость $R_a = 12,1$ мкм.

Обсуждение. Сравнив полученные результаты с действительным значением шероховатости, применение разработанного алгоритма для измерения шероховатости бесконтактным способом возможно с относительной погрешностью:

$$\delta = \frac{12,1-12}{12,1} 100\% = 0,8 \, \%.$$

Анализ слабых сторон метода выявил следующие ограничения:

Критическая зависимость точности измерений от однородности оптических свойств материала поверхности. Наличие окисных пленок, изменение цвета или микроструктуры поверхности приводят к систематическим погрешностям.

Чувствительность к условиям освещения. Нестабильность интенсивности или неравномерность освещения поля зрения вносят существенные погрешности в измерения.

Требование строгой перпендикулярности оптической оси к контролируемой поверхности. Отклонения более $2-3^\circ$ приводят к искажению результатов.

Метод требует обязательной калибровки для каждого типа материалов и условий проведения измерений.

Наибольшая эффективность метода характерна для оперативного сравнительного контроля однотипных поверхностей в процессе их изготовления, где обеспечивается постоянство материала и условий освещения.

Заключение. Экспериментально подтверждена возможность оценки шероховатости поверхностей СЛП фотометрическим методом. Основными преимуществами разработанного решения являются: высокая скорость измерений, возможность интеграции в системы автоматизированного контроля.

Для повышения точности измерений необходима разработка алгоритмов компенсации неравномерности освещения и учет угловых отклонений поверхности от перпендикуляра к оптической оси.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой адаптивных алгоритмов калибровки для различных материалов и созданием многоакурсной системы измерения для компенсации угловых отклонений поверхности.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSFN-2025-0009.

Список источников

- [1] Котобан Д.В., Жирнов И.В., Протасов К.Э., Конов С.Г. Влияние стратегии сканирования на температуру в зоне обработки при селективном лазерном плавлении. *Вестник МГТУ «СТАНКИН»*, 2016, № 4 (39), с. 63–66.
- [2] НПО РусРедМет. URL: <https://nporusredmet.ru/product-category/poroshki-metallov/poroshki-kobalta/?yclid=17146064277909798911> (дата обращения 10.08.2025).

- [3] *Инспекционный микроскоп Norgau модификации NVMicro*. Руководство пользователя. 2021, 25 с.
- [4] Гибулин А.С., Яркович Ю.С. *Сравнительный анализ моделей освещения Фонга и Ламберта в 3D рендеринге*. Минск, БГУИР, 2024, 73 с.
- [5] Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений*. Москва, Техносфера, 2012, с. 460–530.
- [6] ГОСТ 2789–73. *Шероховатость поверхностей. Параметры и характеристики*. Москва, Стандартинформ, 2006.

A5

Литейные технологии

