

## Оценка параметров текстуры прецизионных поверхностей с применением квазиоптимальных корреляционных алгоритмов

© 2021

*Носов Николай Васильевич*<sup>1</sup>, доктор технических наук*Костин Никита Александрович*<sup>2</sup>, магистр*Ладыгин Роман Владимирович*<sup>3</sup>, магистр

Самарский государственный технический университет, Самара (Россия)

\*E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7714-8896><sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5557-2098><sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0262-8032>

**Аннотация:** Рассмотрен новый метод текстурного анализа прецизионных механически обработанных поверхностей, основанный на применении компьютерной оптики и автокорреляционного метода обработки полученных изображений текстур исследуемых микрорельефов. Метод основан на вероятностной сравнительной оценке неизвестной текстуры исследуемого микрорельефа с известными текстурами эталонных микрорельефов, для которых определены параметры микрорельефов. В статье предложен подход к идентификации шероховатости поверхности профиля пера лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) после виброконтактного полирования по параметрам текстуры корреляционной поверхности. Микрогеометрия поверхности спинки и корыта лопаток исследовалась на оптико-электронном комплексе на основе вычисления средней амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции, полученной в результате компьютерной обработки видеоизображения поверхности. Применение оптико-электронного метода оценки текстуры поверхности компрессорных и турбинных лопаток позволяет строить поля шероховатости поверхности и более глубоко анализировать технологию окончательной обработки профиля пера лопаток ГТД. Актуальность и новизна работы заключается в перспективном способе оценки параметров качества поверхности с помощью оптико-электронного метода, особенностью которого является измерение шероховатости площади поверхности, тогда как щуповые методы измеряют шероховатость профиля поверхности. Важным преимуществом предлагаемого метода является применение его для измерения параметров шероховатости криволинейной поверхности бесконтактным способом, что технологично, так как существуют поверхности деталей, не предполагающие их царапание алмазной иглой.

**Ключевые слова:** текстура; микрорельеф; прецизионная поверхность; бинарное изображение; цифровая обработка; оптико-электронный метод; идентификация микрорельефа; корреляционная поверхность; лопатки ГТД.

**Для цитирования:** Носов Н.В., Костин Н.А., Ладыгин Р.В. Оценка параметров текстуры прецизионных поверхностей с применением квазиоптимальных корреляционных алгоритмов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 24–31. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-24-31.

### ВВЕДЕНИЕ

Шероховатость поверхности – важнейший показатель качества деталей в машиностроении, влияющий на их работоспособность [1]. Поэтому точное определение параметров микрогеометрии поверхности является приоритетной задачей при контроле обработанных поверхностей.

Существует множество методов измерения шероховатости, которые делятся на профильные (щуповые) и бесконтактные. Оба метода имеют свойственные им особенности и недостатки. У профильных методов имеются следующие недостатки: измерять шероховатость можно у деталей только простых геометрических форм; отсутствует возможность комплексно оценивать распределение микронеровностей в продольном и поперечном направлениях [2]; вероятны погрешности вследствие огибания микронеровностей щупом и преобразования механических колебаний в электрические; методы не применимы для поверхностей, не допускающих контакт с алмазной иглой; возможности для крупногабаритных деталей ограничены. К недостаткам бесконтактных методов относятся: наличие специальных микроскопов [3], что исключает их применение

в производственных условиях; повышенные требования к световому потоку, падающему на измеряемую поверхность; большое время на обработку видеоданных.

Вышеперечисленные методы – параметрические, с помощью которых измеряются высотные и шаговые параметры микрорельефа. В работах [4–6] авторы предлагают перейти к непараметрическому методу оценки, учитывающему эксплуатационные характеристики. Шероховатость оценивается графическим методом по плотности распределения ординат и тангенсов угла наклона профиля, график исследуемой поверхности сравнивается с эталонным графиком. В случае получения эталонного графика с применением профильного метода, картина распределения микронеровностей получается неполной, так как измерение проходит, как правило, в плоскости, перпендикулярной распределению микронеровностей. А в случае, если график получен измерением шероховатости поверхности бесконтактными методами, отсутствует возможность такого измерения в производственных условиях, к тому же высокая стоимость измерительной аппаратуры и необходимость ее обслуживания является ограничивающим фактором для ее широкого распространения.

В последнее десятилетие получили распространение методы определения параметров микрорельефа поверхности с помощью компьютерной обработки изображений исследуемой поверхности [7–9].

Применение компьютерных методов [4–9] для анализа микронеровностей поверхностей позволяет по-новому подойти к оценке качества изделий в машиностроении. К основным задачам описания микронеровностей относятся: выбор параметров, описывающих текстурные поверхности; классификация текстур по назначению; корреляция текстур с другими параметрами микронеровностей.

В работе авторы предлагают оптический метод анализа микрорельефа поверхности, при котором текстурный анализ является доминирующим. Он основан на описании поверхности с помощью автокорреляционной функции [10–12]. Данный метод применим к оценке шероховатости прецизионных поверхностей сложной формы и при стохастическом распределении микронеровностей, где не могут использоваться традиционные методы, так как они определяют только поперечную шероховатость профиля.

Разработка нового оптического метода контроля качества поверхности с использованием текстурного анализа позволит определять параметры микрорельефа поверхности в местах, недоступных в производственных и лабораторных условиях.

Цель исследования – разработка методики определения параметров микрогеометрии на площади поверхности и алгоритма перехода, связывающего параметры профиля и параметры площади поверхности.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для разработки методики определения параметров микрогеометрии на площади поверхности был создан оптический прибор. Измерительная система включала микроскоп с видеокамерой, персональный компьютер и специальную программу, на которую получен патент [13]. Образец или деталь устанавливалась на инструментальный столик, затем камера фокусировалась на участок поверхности, делался цифровой снимок в черно-белом изображении, который передавался на компьютер.

Для работы программы необходимо внести в нее исходные данные, полученные при обработке специальных образцов (эталонов), у которых параметры микрогеометрии определены другими методами, в частности щуповыми измерительными системами. Специальные образцы обрабатывались шлифованием, а затем полировались при различных режимах. Это позволило получать поверхности в широком диапазоне шероховатости.

Известно, что на величину шероховатости большое влияние оказывает марка обрабатываемого материала, поэтому были подготовлены образцы из закаленной стали ШХ 15 HRC 62-65, титанового сплава ВТ8, жаропрочной стали ЭИ961Ш и никелевого сплава ЖС6ФУ. Исследование шероховатости поверхности образцов проводилось щуповым методом, в ходе которого определялись параметры шероховатости с использованием профилографа модели SJ-201P. Величина  $R_a$  образцов изменялась от 0,25 до 0,025 мкм. Параметры шерохова-

тости вычислялись по 10 образцам в каждой серии. Измеренные параметры шероховатости определялись по профилограммам профиля поверхности. Оптико-электронная система позволяет исследовать участок поверхности образцов площадью 7,5 мм<sup>2</sup> (3×2,5 мм). При этом плотность пикселей видеокадра, который передается в программу компьютера, зависела от кривизны поверхности и составляла от 240 до 600 dpi.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

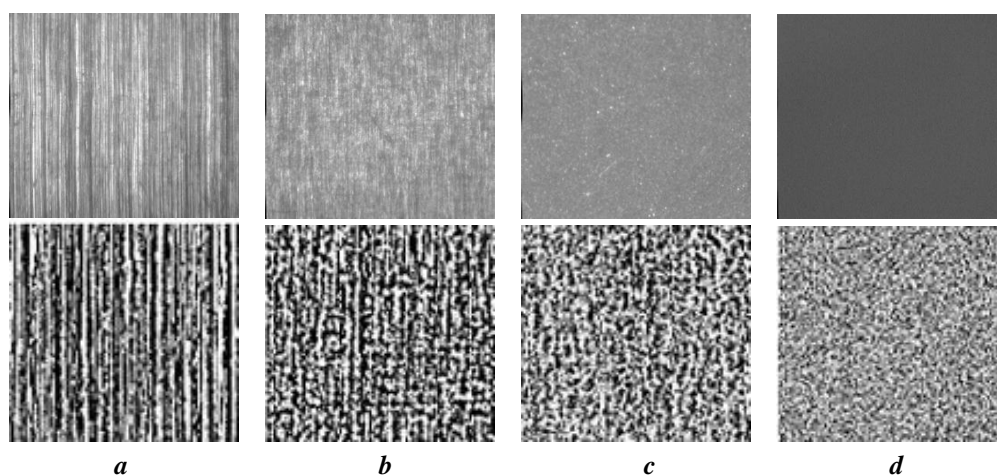
Для идентификации поверхностей были выбраны 4 образца из закаленной стали ШХ 15 с разной шероховатостью поверхностей. Диапазон шероховатости подбирался таким образом, чтобы микрогеометрия поверхностей имела явно выраженную структуру, шероховатость поверхности в различных направлениях расходилась не более чем на 20 %, что невозможно получить при однонаправленной обработке, т. е. шероховатость  $R_a \geq 0,15$  мкм. Первичная обработка видеоизображений начинается с корректировки формы поверхности образца: криволинейная поверхность преобразуется в плоскую. Для этого была создана подпрограмма разложения видеоизображения на плоскости [13]. Кроме того, с помощью программы определяется положение средней плоскости, соответствующее положению средней линии на профилограмме профиля (сечения) поверхности.

Для определения положения средней плоскости на видеоизображении находились точки максимальной и минимальной яркости, которая изменялась от 0 до 255 отн. ед. Положение средней плоскости соответствовало 127,5 отн. ед. После нахождения средней плоскости видеоизображение преобразовывается в черно-белое, т. е. все микронеровности ниже средней плоскости становятся абсолютно черными, а выше – абсолютно белыми.

На рис. 1 показаны видеоизображения и их преобразования для образцов с различной величиной  $R_a$ .

По полученным черно-белым изображениям можно определить величину шероховатости в различных направлениях (продольном и поперечном). Образец № 1 обладает типичной однонаправленной шероховатостью поверхности, у которой поперечная шероховатость в несколько раз больше продольной, и это характеризует шероховатость профиля поверхности в поперечном направлении, нашей же целью является определение шероховатости площади поверхности по ее текстуре. В этом случае доминирующее влияние оказывает регулярная (периодическая) компонента, которую определяют в направлении, перпендикулярном направлению скорости резания при шлифовании. Текстура поверхностей образца № 2 имеет смешанный тип, который получается при наложении изображения предварительно обработанной поверхности на изображение поверхности, сформированной на данной операции. На поверхностях образцов № 3 и № 4 строгой ориентации микронеровностей не наблюдается, и описать шероховатость профиля поверхности не представляется возможным, поэтому необходимо перейти от щуповых методов оценки к оптическим, которые оценивают поверхность комплексно по параметрам ее структуры.

Для обработки бинарных изображений была разработана программа определения параметров текстуры



**Рис. 1.** Текстура поверхности в зависимости от шероховатости образцов:  
*a* – № 1,  $R_a=0,13$  мкм; *b* – № 2,  $R_a=0,084$  мкм; *c* – № 3,  $R_a=0,048$  мкм; *d* – № 4,  $R_a=0,025$  мкм  
**Fig. 1.** Surface texture depending on roughness of samples:  
*a* – No. 1,  $R_a=0.13\mu\text{m}$ ; *b* – No. 2,  $R_a=0.084\mu\text{m}$ ; *c* – No. 3,  $R_a=0.048\mu\text{m}$ ; *d* – No. 4,  $R_a=0.025\mu\text{m}$

поверхности с помощью квазиоптимальных корреляционных алгоритмов [14]. В работе [15] предложен подход, связанный с применением корреляционного метода сравнения черно-белого изображения с принятым эталоном:

$$r_{x,y}(k_1, k_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2^{n-1}} F_{ii}(\Delta), \quad (1)$$

где  $r_{x,y}(k_1, k_2)$  – коэффициент корреляции;  
 $N$  – количество сравниваемых элементов микрорельефа;  
 $F_{ii}(\Delta)$  – парная критериальная функция.

С помощью формулы (1) выполнен анализ известных квазиоптимальных корреляционных алгоритмов и критериальных функций [16], который показал перспективность использования парных критериальных функций и бинарных изображений

$$\begin{pmatrix} F_{1,1}(\Delta) & F_{0,1}(\Delta) \\ F_{1,0}(\Delta) & F_{0,0}(\Delta) \end{pmatrix},$$

где  $\Delta$  – относительный сдвиг изображений;  $F_{ij}(\Delta)$ ,  $i, j=0,1$  – количество совпавших элементов с заданной интенсивностью. При этом самое высокое быстродействие обеспечивается путем применения корреляционно-экстремального алгоритма в виде

$$R_r(\Delta) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2^{n-1}} F_{ii},$$

где  $R_r(\Delta)$  – шероховатость рассматриваемого участка поверхности;

$N$  – количество сравниваемых элементов в эталонном и текущем фрагменте изображения.

Большое значение имеет правильный выбор размера эталона  $N_1 \cdot N_2$  пикселя. Программа позволяет варьировать размер эталона от  $4 \times 4$  до  $32 \times 32$  пикселей. Выбор размера эталона связан с высотой шероховатости исследуемой стохастической поверхности: чем ниже шероховатость, тем меньше размер эталона. Так как об-

разцы подвергались окончательной обработке с низкой шероховатостью поверхности, площадь эталона составляла  $8 \times 8$  пикселей. В программе предусмотрена следующая последовательность движения эталона. Эталон может располагаться или в правом верхнем углу, перемещаясь вдоль изображения, или в центре изображения, двигаясь против часовой стрелки с шагом в 1 пиксель. Коэффициент корреляции подсчитывается в каждой точке по формуле (1). Корреляционная поверхность представляет собой полутоновое изображение, которое необходимо правильно обработать. Для этого осуществляется аналогичная первичная обработка изображения с преобразованием полутонового корреляционного изображения в бинарное – черно-белое, т. е. для получения численных значений необходимо определить нулевое положение автокорреляционной поверхности. Тогда такая поверхность с достаточной степенью точности описывается двумя параметрами текстуры: амплитудой автокорреляционной функции  $U_{cp}$  (высотный параметр) и ее математическим ожиданием  $M_x$  (шаговый параметр). Для определения связи параметров текстуры с параметрами шероховатости проведена идентификация поверхностей полутонового и корреляционного изображений.

В процессе идентификации поверхностей установлено, что у двумерных автокорреляционных функций средняя случайная амплитуда  $U_{cp}$  функции  $r_{x,y}(k_1, k_2)$  существенно зависит от шероховатости поверхности и размеров эталона [17–19]. В данном случае размер эталона определяет радиус алмазной иглы профилографа. Этот параметр у профилографов постоянный, но оптический метод позволяет менять его в широких пределах [17–19]. Обработка экспериментальных данных позволила построить регрессионную зависимость влияния величины  $U_{cp}$  на среднеарифметическое отклонение высоты микронеровностей поверхности  $R_{ar}=f(U_{cp})$ :

$$R_{ar} = A_r \cdot U_{cp} - B,$$

где  $A_r$  и  $B_r$  – коэффициенты, величина которых зависит от материала образцов и площади выбранного эталона.

Величина  $A_r$  изменялась в пределах 0,005–0,01, а величина  $B_r$  – в пределах 0,01–0,03. Для эталона  $8 \times 8$  пикселей  $A_r=0,01$ ,  $B_r=0,03$ .

Большое значение имеет определение ошибок при измерении параметров структуры, характеризующихся доверительным интервалом  $I_\beta$  (отн. ед.) и среднеквадратическим отклонением, которые рассчитываются по формулам [19]:

$$I_\beta = (3,4U_{CP}^2 + 14,4U_{CP} + 1) \times 10^{-3},$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где  $\sigma_t$  – среднее квадратическое отклонение результата измерения;

$\sigma$  – среднее квадратическое отклонение результата наблюдения;

$n$  – число результатов наблюдений.

В процессе исследований определялись параметры структуры и их ошибки по 30 участкам образцов поверхностей с доверительной вероятностью  $P=0,99$  и коэффициентом для случайной величины по распределению Стьюдента  $t_\beta=2,576$  (таблица 1).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В [20; 21] разработана методика оценки микро-структуры поверхности с использованием исследований параметров текстуры. На рис. 2 приведены лопатки 1-й ступени газотурбинного двигателя (ГТД) после виброконтрастного полирования профиля пера.

Обработка результатов исследования поверхности лопаток приведена на рис. 3. Поверхность лопаток имеет сложную пространственную форму, поэтому оптимальным форматом видеоизображения является  $320 \times 240$  пикселей, а размер эталона –  $8 \times 8$  пикселей. Исследования на входной и выходной кромках лопаток не проводились, а при угле закрутки  $10-12^\circ$  и площади участка  $1,6 \times 1,2$  мм кривизна укладывалась в допустимые пределы, которые составляют  $20^\circ$ .

Исследование параметров текстуры проводилось следующим образом. На поверхности лопатки размечалась сетка с шагом  $5 \times 5$  мм, в узлах которой на инструментальном микроскопе снимались видеоизображения, затем производилось определение параметров корреляционной функции. Установлено, что  $U_{CP}$  изменялось в интервале  $U_{CP\_min}=21,89$  отн. ед. и  $U_{CP\_max}=22,32$  отн. ед. и составило 22,1 отн. ед. Идентификация параметров текстуры показала, что шероховатость поверхности составляет  $R_a=0,15$  мкм,  $R_{a\_min}=0,09$  мкм и  $R_{a\_max}=0,21$  мкм. Эти результаты на 15–20 % больше, чем величина  $R_a$ , измеренная контактным методом.

Таблица 1. Сравнение параметров шероховатости и текстуры поверхности образцов  
Table 1. The comparison of roughness parameters and surface texture of samples

Параметры	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
$R_a$ , мкм	0,13	0,084	0,048	0,025
$\sigma_m$ , мкм	0,24	0,138	0,084	0,055
$I_\beta$ , отн. ед.	0,92	0,63	0,44	0,37
$U_{CP}$ , отн. ед.	49–51	40–41	33–34	25–26

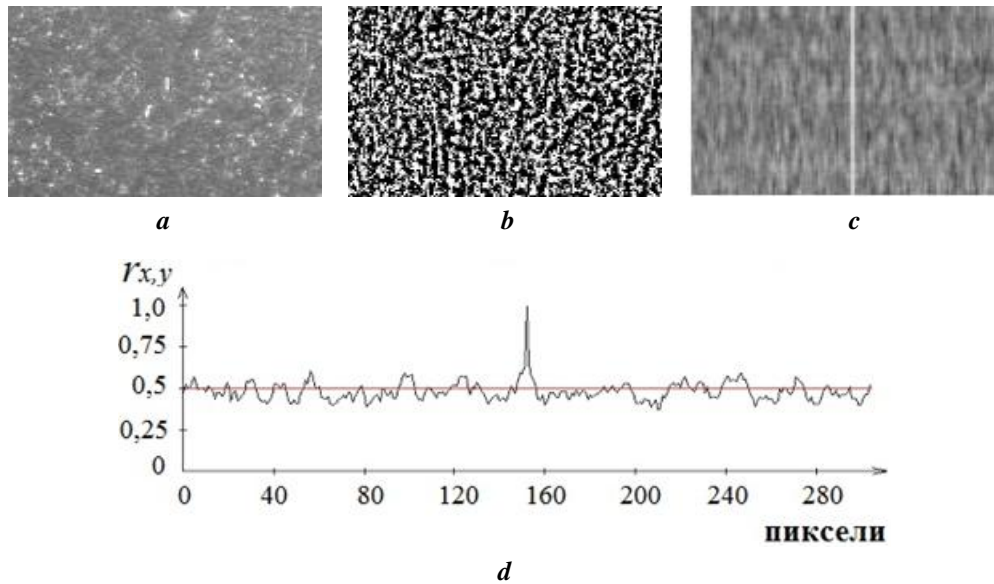


Рис. 2. Спинка и корыто лопатки 1-й ступени турбины  
Fig. 2. Back and pressure side of a blade of the 1<sup>st</sup> turbine stage

При полировании профиля пера лопаток турбин большое значение имеет равномерность распределения значений микронеровностей по всему профилю спинки и корыта. Применение сеточного метода позволило построить поля шероховатости поверхности лопаток (рис. 4, рис. 5).

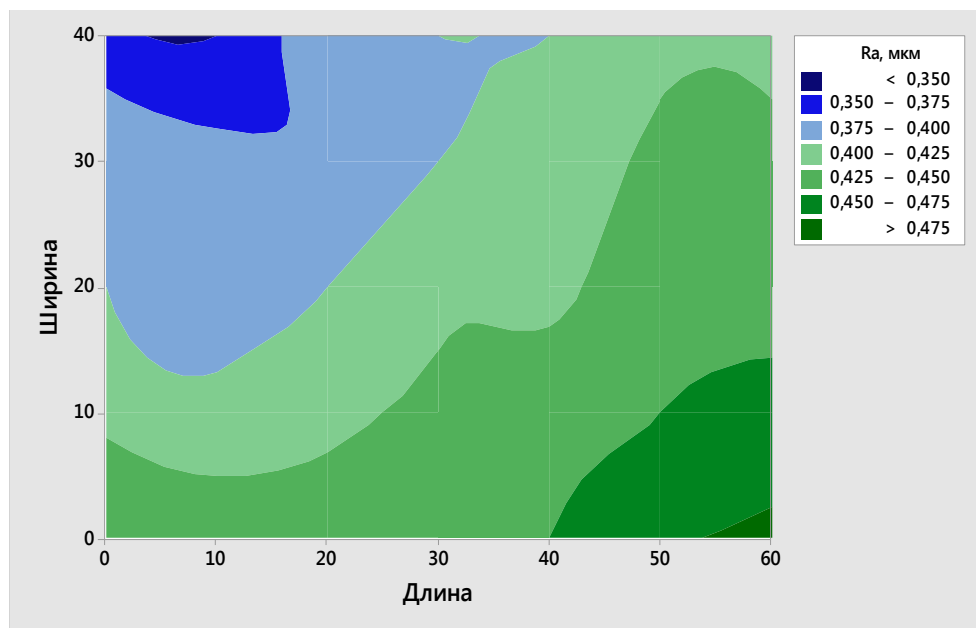
Таким образом, поля шероховатости поверхности позволяют технологам определять идентичность усло-

вий виброконтактного полирования профиля пера лопаток и те места, где параметры качества не соответствуют техническим условиям. В процессе виброконтактного полирования лопатка совершает колебания по некоторой дуге, что приводит к изменению контактного давления инструмента на участках поверхности лопатки.



**Рис. 3.** Исследование единичного участка поверхности лопаток:  
*a* – видеоизображение поверхности; *b* – черно-белое (бинарное) изображение поверхности;  
*c* – корреляционная поверхность; *d* – график изменения коэффициента корреляции

**Fig. 3.** The study of a separate area of blades surface:  
*a* – surface video image; *b* – monochromatic (binary) image of a surface;  
*c* – correlation surface; *d* – diagram of changes in correlation factor



**Рис. 4.** Поля шероховатости поверхности лопаток: корыто  
**Fig. 4.** Roughness fields of blades' surface: pressure side

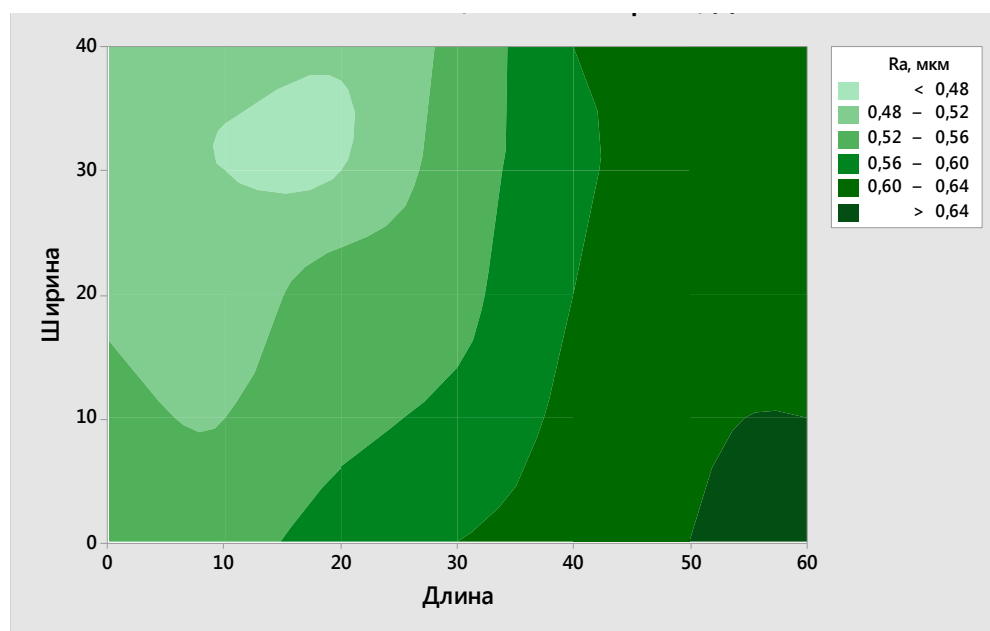


Рис. 5. Поля шероховатости поверхности лопаток: спинка

Fig. 5. Roughness fields of blades' surface: back

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение оптико-электронного метода и квази-оптимального алгоритма позволяет определять параметры текстуры поверхности и рассчитывать величину шероховатости площади поверхности непосредственно в производственных условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутенко В.И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2017. 480 с.
2. Egorov S., Kapitanov A., Loktev D. Turbine Blades Profile and Surface Roughness Measurement // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1476–1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.664>.
3. Han Y., Zuxin W., Yunhai Z., Jia M., Yun X. Surface roughness measurement using laser confocal microscope with boundary area correction // Laser and Optoelectronics Progress. 2020. Vol. 57. № 21. Article number 211203. DOI: <https://doi.org/10.3788/LOP57.211203>.
4. Медунецкий В.М., Васильков С.Д. Методы оценивания микрогеометрии поверхностей деталей изделий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. № 3. С. 231–236.
5. Андреев Ю.С., Демкович Н.А., Исаев Р.М., Целищев А.А., Васильков С.Д. Определение микрогеометрии функциональной поверхности детали, обеспечивающей требуемые показатели авиационного датчика вибрации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 6. С. 1103–1110.
6. Гибадуллин И.Н., Валетов В.А. Изображение профиля поверхности как графический критерий оценки

шероховатости // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 1. С. 86–92.

7. Patel D.R., Kiran M.B. Non-contact surface roughness measurement using laser speckle technique // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 895. № 1. Article number 012007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/895/1/012007>.
8. Pasker V., Grycz O., Hlavica R., Foretník P., Barcáková I. Automatic selection of binarization method from images with serial numbers on industrial products // METAL 2020 – 29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 2020. P. 1357–1361. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2020.3636>.
9. Frischer R., Krejcar O., Selamat A., Kuca K. 3D surface profile diagnosis using digital image processing for laboratory use // Journal of Central South University. 2020. Vol. 27. № 3. P. 811–823. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4333-y>.
10. Баврина А.Е., Ильясова Н.Ю., Куприянов А.В., Храмов А.Г. Исследование фотограмметрических изображений с помощью матриц вероятностного распределения яркости // Компьютерная оптика. 2002. № 23. С. 62–65.
11. Пластинин А.И., Куприянов А.В., Ильясова Н.Ю. Разработка методов формирования цветотекстурных признаков для анализа биомедицинских изображений // Компьютерная оптика. 2007. Т. 31. № 2. С. 82–85.
12. Захаров А.А., Баринев А.Е., Жизняков А.Л., Титов В.С. Поиск объектов на изображениях с использованием структурного дескриптора на основе графов // Компьютерная оптика. 2017. Т. 42. № 2. С. 283–290.
13. Абрамов А.Д., Никонов А.И., Носов Н.В. Способ контроля шероховатости поверхности изделия: патент РФ № 2413179, 2011.

14. Krig S. *Computer vision metrics: Survey, taxonomy, and analysis*. Berkeley: Apress Media, 2014. 498 p.
15. Whitehouse D. *Metrology of Surfaces. Principles, Industrial Methods, and Devices*. Dolgoprudnyi: Dom Intellect, 2009. 472 p.
16. Абрамов А.Д. Применение оптико-электронного комплекса и квазиоптимального корреляционного алгоритма для оценки шероховатости поверхностей деталей машин и механизмов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 2. С. 44–49.
17. Абрамов А.Д., Носов Н.В., Подсекин И.А. Оценка шероховатости поверхности оптико-электронным методом // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Технические науки. 2005. № 33. С. 89–94.
18. Абрамов А.Д. Влияние оптического фактора на оценку шероховатости поверхности оптико-электронным комплексом // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Технические науки. 2012. № 2. С. 45–52.
19. Абрамов А.Д., Никонов А.И. Анализ и корреляционный метод устранения погрешности оптико-электронного определения микрорельефных параметров // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 1. С. 3–9.
20. Абрамов А.Д., Зинковский А.И., Носов Н.В., Никонов А.И., Родионов В.А. Определение шероховатости поверхности дорожек качения приборных подшипников с использованием квазиоптимального корреляционного алгоритма // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-3. С. 645–651.
21. Носов Н.В., Абрамов А.Д., Хаустов В.И. Исследование шероховатости поверхности бомбинированных роликов на основе анализа их автокорреляционных функций // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С.П. Королева. 2009. № 3-2. С. 45–54.
22. microgeometry providing the desired performance of an aircraft vibration sensor. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki*, 2016, vol. 16, no. 6, pp. 1103–1110.
23. Gibadullin I.N., Valetov V.A. Image of the surface profile as a graphic criterion of its roughness. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2019, vol. 62, no. 1, pp. 86–92.
24. Patel D.R., Kiran M.B. Non-contact surface roughness measurement using laser speckle technique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 895, no. 1, article number 012007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/895/1/012007>.
25. Pasker V., Grycz O., Hlavica R., Foretník P., Barcáková I. Automatic selection of binarization method from images with serial numbers on industrial products. *METAL 2020 – 29th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 2020, pp. 1357–1361. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2020.3636>.
26. Frischer R., Krejcar O., Selamat A., Kuca K. 3D surface profile diagnosis using digital image processing for laboratory use. *Journal of Central South University*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 811–823. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-020-4333-y>.
27. Bavrina A.E., Piyasova N.Yu., Kupriyanov A.V., Khramov A.G. Study of photogrammetric images using matrices probability distribution of brightness. *Kompyuternaya optika*, 2002, no. 23, pp. 62–65.
28. Plastinin A.I., Kupriyanov A.V., Piyasova N.Yu. Development of methods for the formation of color-textural features for the analysis of biomedical images. *Kompyuternaya optika*, 2007, vol. 31, no. 2, pp. 82–85.
29. Zakharov A.A., Barinov A.E., Zhiznyakov A.L., Titov V.S. Object detection in images with a structural descriptor based on graphs. *Kompyuternaya optika*, 2017, vol. 42, no. 2, pp. 283–290.
30. Abramov A.D., Nikonov A.I., Nosov N.V. *Sposob kontrolya sherokhovatosti poverkhnosti izdeliya* [Method for controlling the surface roughness of the product], patent RF no. 2413179, 2011.
31. Krig S. *Computer vision metrics: Survey, taxonomy, and analysis*. Berkeley, Apress Media Publ., 2014. 498 p.
32. Whitehouse D. *Metrology of Surfaces. Principles, Industrial Methods, and Devices*. Dolgoprudnyi, Dom Intellect Publ., 2009. 472 p.
33. Abramov A.D. Application of the optiko-electronic complex and quasioptimum correlation algorithm for the estimation of the roughness of surfaces of details of cars and mechanisms. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*, 2012, no. 2, pp. 44–49.
34. Abramov A.D., Nosov N.V., Podsekin I.A. Evaluation of surface roughness by optoelectronic method. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2005, no. 33, pp. 89–94.
35. Abramov A.D. Influences of optical faktor on estimate of surface roughness by optical-electronic complex. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 2, pp. 42–52.
36. Abramov A.D., Nikonov A.I. Analysis and correlation method for eliminating the error of optikal electronic determination of microrelief parameters. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy*, 2016, no. 1, pp. 3–9.

## REFERENCES

1. Butenko V.I. *Nauchnye osnovy funktsionalnoy inzhenerii poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [Scientific bases of functional engineering of the surface layer of machine parts]. Rostov-on-Don, DGTU Publ., 2017. 480 p.
2. Egorov S., Kapitanov A., Loktev D. Turbine Blades Profile and Surface Roughness Measurement. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1476–1481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.664>.
3. Han Y., Zuxin W., Yunhai Z., Jia M., Yun X. Surface roughness measurement using laser confocal microscope with boundary area correction. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2020, vol. 57, no. 21, article number 211203. DOI: <https://doi.org/10.3788/LOP57.211203>.
4. Medunetskiy V.M., Vasilkov S.D. Assessment methods for workpiece surface microgeometry. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 231–236.
5. Andreev Yu.S., Demkovich N.A., Isaev R.M., Tselishchev A.A., Vasilkov S.D. Functional surface

20. Abramov A.D., Zinkovskiy A.I., Nosov N.V., Nikonov A.I., Rodionov V.A. The estimation of roughness with determined probability blades on the foundation computer technologies of optico-electronics surface means. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2011, vol. 13, no. 4-3, pp. 645–651.
21. Nosov N.V., Abramov A.D., Khaustov V.I. Research of roughness of surface rollers with modified contact on the basis of analysis of the autocorrelation functions. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. Akademika S.P. Koroleva*, 2009, no. 3-2, pp. 45–54.

## Estimation of texture parameters for the precision surfaces using the quasioptimal correlation algorithms

© 2021

*Nikolay V. Nosov*<sup>\*1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor  
*Nikita A. Kostin*<sup>2</sup>, graduate student  
*Roman V. Ladyagin*<sup>3</sup>, graduate student

*Samara State Technical University, Samara (Russia)*

\*E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7714-8896>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5557-2098>

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0262-8032>

**Abstract:** The authors considered a new method of texture analysis of machined precision surfaces based on using computer optics and the autocorrelation method of processing the images of micro-relief textures under the study. This method is based on a probabilistic comparative evaluation of the unknown texture of the micro-relief under the investigation with the available textures of reference micro-patterns, in which microrelief parameters are determined. The paper proposes an approach to identify the profile surface roughness of a gas turbine engine (GTE) blade after vibro-contact polishing according to the parameters of correlation surface texture. The authors studied the surface micro-geometry of the blade back and pressure side using the optoelectronic complex based on the calculation of the average amplitude of the variable component of an autocorrelation function resulting from computer processing of a surface video image. The application of the electrooptic method for evaluating the surface texture of compressor and turbine blades allows building the surface roughness fields and more deeply analyzing the technology of final processing of the GTE blade feather profile. The relevance and novelty of the study lie in the promising technique to evaluate the surface quality parameters using the electrooptic method. A special feature of this method is the measurement of surface area roughness, while the stylus methods measure the roughness of the surface profile. An important advantage of the proposed method is its application to measure the roughness parameters of a curved surface by a non-contact method, which is advanced since there are surfaces of parts that do not imply being scratched with a diamond needle.

**Keywords:** texture; microrelief; precision surface; binary image; digital processing; electrooptic method; microrelief identification; correlation surface; gas turbine engine (GTE) blades.

**For citation:** Nosov N.V., Kostin N.A., Ladyagin R.V. Estimation of texture parameters for the precision surfaces using the quasioptimal correlation algorithms. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 24–31. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-24-31.