

УДК 621.517

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

© 2025 А.Д. Абрамов¹, Д.С. Ключев², Н.В. Носов¹, Н.С. Носов¹

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики. г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 09.09.2025

Рассматривается метод определения параметров микрорельефа поверхности деталей машин после механической обработки и помощью цифровых технологий. Метод основан на обработке цифровых изображений микрорельефа с помощью корреляционно – спектральной функции. Цифровое изображение исследуемой поверхности получали на оптико-электронном комплексе и обработке изображения программными средствами. Приведены результаты определения параметров микрорельефа поверхностей дорожек качения внутренних колец приборных подшипников.

Ключевые слова: измерение; поверхность; микрорельеф; изображение; алгоритм; автокорреляция; спектр; плотность.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-314-318

EDN: TGYTED

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 23-19-00166, <https://rscf.ru/project/23-19-00166/>.*

ВВЕДЕНИЕ

Повышение технического уровня и качества машиностроительной продукции является основным компонентом выпуска изделий, надёжных и долговечных изделий. Известно также, что качество рабочих поверхностей промышленных изделий, определяемое параметрами микрорельефа оказывает большое влияние на износостойкость, усталостную прочность, герметичность соединений, коррозионную стойкость и многие другие статические и эксплуатационные характеристики изделий [1]. Кроме того, выход нового стандарта качества поверхности (структура поверхности) ГОСТ Р ИСО 25178-2— 2014, который утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2014 г. № 2059-ст 4 требует разработки комплекса характеристик по оценки параметров поверхности. Понятие структура поверхности расширяет области исследования поверхности от 5 до 11 самостоятельных признаков по следующим направлениям:

- геометрические параметры и признаки;
- топографические параметры в 3D измерениях;
- параметры информационного поля.

Важно также отметить, что определение структурных параметров и признаков исследуемой поверхности по новому ГОСТу необходимо осуществлять с помощью трёхмерного распределения высотных параметров микрорельефа, то есть его 3D – изображение. В этом состоит принципиальное отличие нового подхода к оценке микрорельефа рабочих поверхностей изделий машиностроения. Предшествующие же ГОСТы ориентированы на обработку информации о профилем распределении высотных параметрах микрорельефа, С помощью оптико-электронного комплекса можно преобразовать профилограмму профиля поверхности в 3-х мерную модель поверхности с учетом случайной компоненты [2], что несколько отличается от 3D – изображения поверхности.

Традиционные методы с использованием оптических, лабораторных микроскопов для построения на их основе систем стереозрения для построения 3D – изображений также имеют определённые ограничения, так как разрешающая способность σ оптических систем зависит от длины волны света λ , падающего на исследуемую поверхность и определяется выражением [3]. При использовании ультрафиолетовых лучей $\lambda = 0.2$ мкм и разрешающая способность специальной оптики может

Абрамов Алексей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные системы и информационная безопасность». E-mail: abrleks@bk.ru

Ключев Дмитрий Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор. E-mail: klyuevd@yandex.ru

Носов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».

Носов Н.С., студент.

быть увеличена до 0,1 мкм, что считается достаточным для оценки шероховатости при различных методах механической обработки.

В настоящее время для получения трёхмерной информации о состоянии исследуемого микрорельефа поверхности нашли применение интерференционный метод и метод конфокальной микроскопии [2], которые позволяют получить 3D – изображений с высокой разрешающей способностью.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка нового подхода к созданию средств исследования структуры поверхностей после механической обработки на основе корреляционного и спектрального анализа изображений, полученных обычными портативными видеокамерами в ходе выполнения технологического процесса.

КОРРЕЛЯЦИОННО- СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЛЬЕФА

Для решения поставленной проблемы был предложен подход к оценке параметров микрорельефа на основе применения квазиоптимального корреляционного алгоритма при обработке исследуемого изображения, что соответствует корреляционными характеристиками геометрических параметров структуры поверхности согласно новому ГОСТу.

Для исследования микрорельефа поверхности по цифровым изображениям применялась корреляционная и спектральная обработка изображений. Полутоновое изображение рассматривалось как совокупность случайного процесса $X(t)$, а всё изображение включает n реализаций. При этом m определяет ширину изображения, n – количество строк в изображении. Характерный вид видеосигналов для различных строк одного и того же изображения микрорельефа поверхности см. рис. 1.

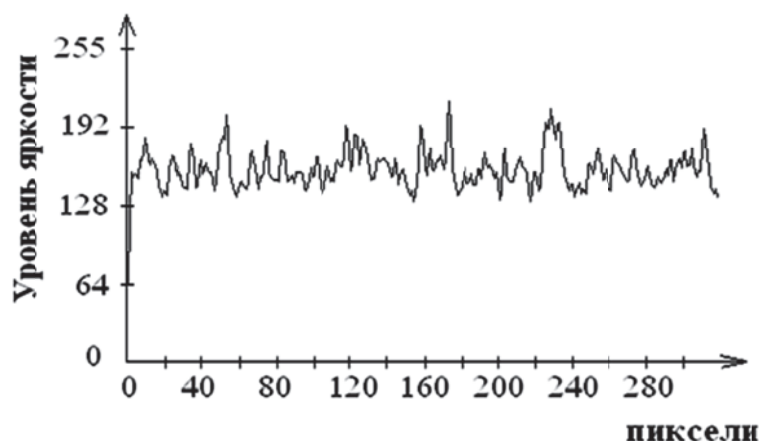


Рис. 1. Видеосигнал уровня яркости случайного процесса $X(t)$

Стационарность случайного процесса $X(t)$ обеспечивается стабильностью технологического процесса формирования микрорельефа. В этом случае автокорреляционная функция АКФ будет зависеть от интервала между пикселями в строке изображения и количеством строк.

Таким образом, для нахождения АКФ случайной функции $X(t)$ можно воспользоваться известными математическими соотношениями, приведенными в [3] для вычисления параметров случайной функции (математических ожиданий, дисперсий, средних квадратических отклонений, корреляционных моментов между столбцами матрицы и др.).

АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследований был использован современный цифровой измерительный микроскоп серии Smart Vision. Классические информационно измерительные системы (ИИС), использующие цифровые измерительные микроскопы серии Smart Vision. Компьютерная обработка цифровой информации осуществлялась персональным компьютером встроенного в микроскоп в режиме 2D и использованием специальных алгоритмов и программ. В качестве видеокамеры использовалась камера DIGITAL CAMERA Computar ZC-F11CH3, на выходе которой формировались полутоновые изображения исследуемых поверхностей заданного формата.

Для проведения исследований были изготовлены образцы эталонных поверхностей с различной микрогеометрией из ШХ15. Для этих же образцов на профилографе модели «Абрис» были записаны профилограммы и определены стандартные параметры шероховатости: образец № 1 имел Ra

= 0,13мкм, образец № 2 – $Ra = 0,084\text{мкм}$, образец № 3 – $Ra = 0,048\text{мкм}$ и образец №4 – $Ra = 0,025\text{мкм}$. Найденные значения среднеарифметического отклонения профиля представляют собой средние значения, вычисленные по 10 измерениям для каждого образца, согласно [2].

Оптико-электронная система была настроена таким образом, что анализируемая цифровое изображение эталонных образцов имела размер $3 \times 2\text{ мм}$, а формат исследуемого видеоизображения микрорельефа поверхности составлял $K_1 \times K_2 = 600 \times 400$ пикселей на каждый пиксель отводилось 3 байта. Световой поток мощностью $600 \cdot 10^{-3}\text{лм}$ падал на исследуемую поверхность под углом 45° . Так как, при использовании черно-белой видеокамеры Computar ZC-F11CH3 было выполнено преобразование исходного полутонового изображения поверхности в формат 1 пиксель – 1 байт. Таким образом, диапазон изменения видеосигнала по яркости в полученном изображении составил 0 – 255 относительных единиц.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для разработки программ цифровой обработки полутоновых изображений микрорельефов эталонных образцов (рис. 1) была использована система компьютерного зрения *OpenCV* [5] и язык *C++*. Для эталонных образцов были определены корреляционные функции $K_{\text{кор}} = f(n)$, характерные корреляционные графики приведены на рис. 2.

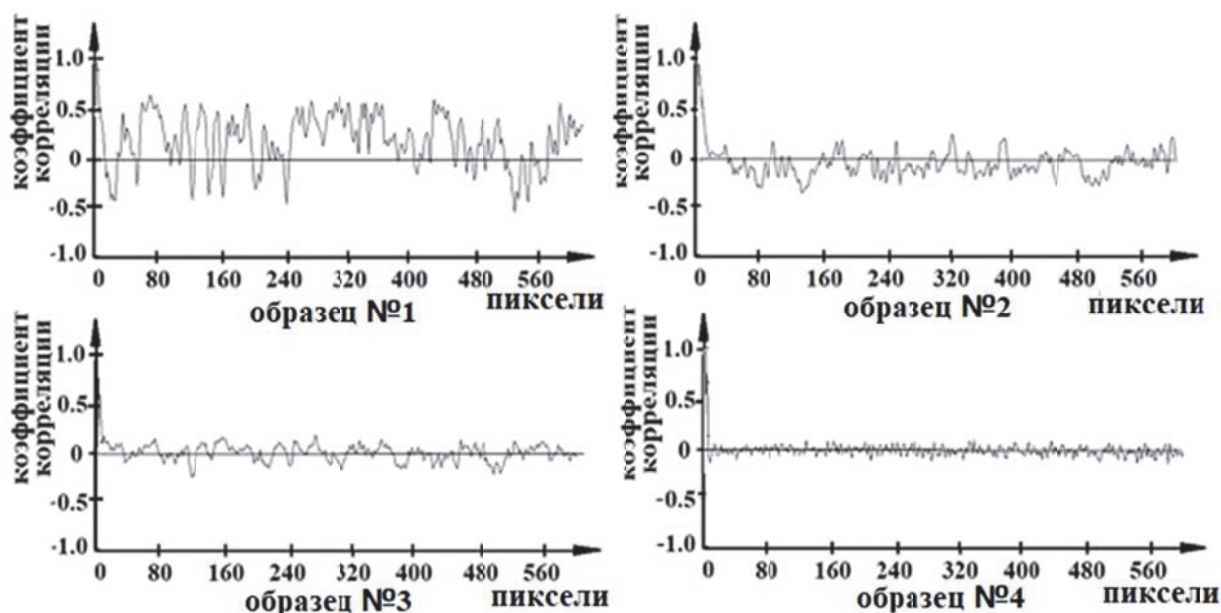


Рис. 2. Графики АКФ для изображений эталонных образцов

Как видно из приведенных графиков, спектр значений коэффициента корреляции существенно меняется при изменении высотных параметров исследованных микрорельефов. Как и в работе [5] для идентификации (распознавания) исследуемых микрорельефов для полученных зависимостей были вычислены средние значения коэффициентов $K_{\text{кор}}$.

В данной программе предусмотрены исследования степени зашумления изображения или наличие случайной компоненты поверхности, которая связана с отклонениями технологии изготовления детали. Результаты программного формирования 3D изображений исследуемой поверхности с зашумлением изображения генератором псевдослучайных чисел (ГПСЧ) приведены на рис. 3,

Таким образом, предложен оптико-электронный метод построения изображений поверхности и получения 3D модели микрогеометрии исследуемой поверхности, не прибегая к использованию сложной и дорогостоящей аппаратуры.

Кроме того, для повышения разрешающей способности корреляционного метода оценки микрорельефа в работе был использован дополнительный спектральный анализ полученных корреляционных функций. Основу программы для вычисления спектра составило известное общее разложение Фурье для дискретной последовательности

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{\frac{-j2\pi kn}{N}}. \quad (1)$$

Для вычисления второй константы в приведенном выражении использовалось известное соотношение Эйлера

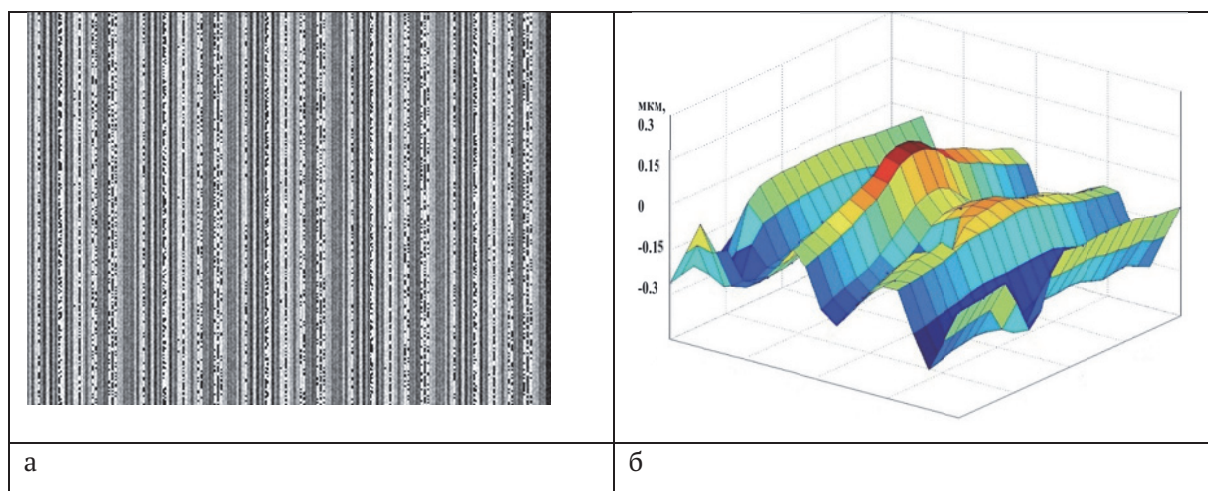


Рис. 3. Программно обработанное бинарное видеоизображение (а) преобразованное в 3D изображение исследуемой поверхности с зашумлением ГПСЧ (б)

$$e^{-j2\pi kn/N} \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right). \quad (2)$$

Полученные результаты расчеты по формулам 1 и 2 для огибающей комплексных амплитуд X_k спектров для изображений исследуемых микрорельефов приведены на рис. 3. Анализ приведенных результатов показывает, что основная мощность корреляционного поля поверхности сосредоточена в области нижних и верхних пространственных частот. По мере уменьшения высотных параметров микрорельефа эта особенность спектров нивелируется и для образца с $Ra = 0,025$ мкм (образец №4) полностью исчезает.

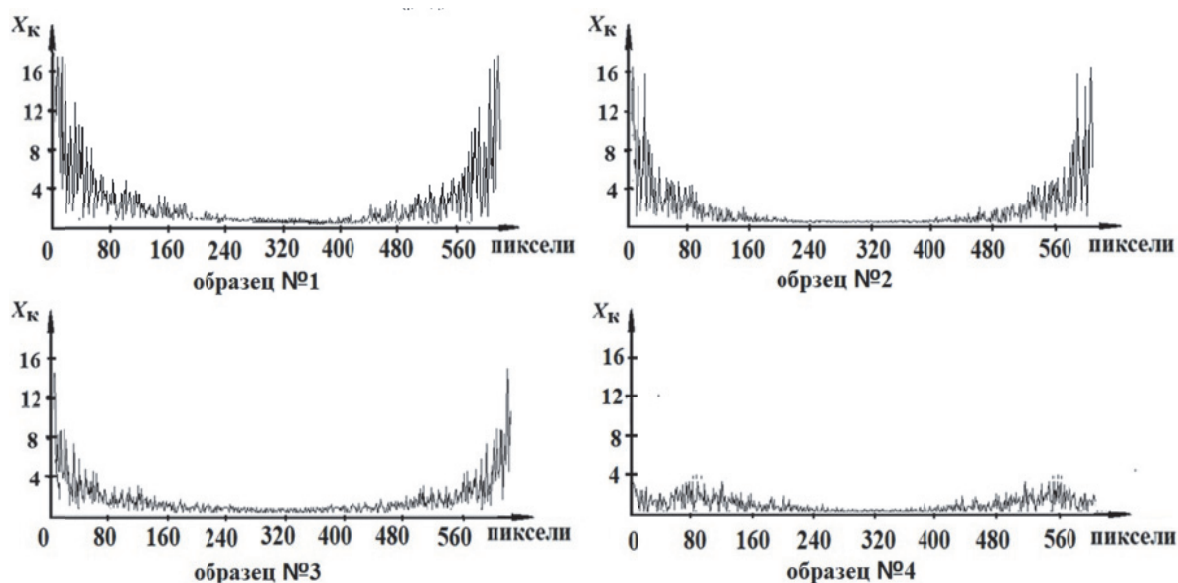


Рис. 4. Графики огибающей комплексных амплитуд спектров АКФ

Для оценки полученных спектров и, следовательно, для идентификации исследуемых микрорельефов были вычислены спектральные плотности $S(\omega)$ для этих спектров. Результаты проведённых исследований обработаны методом наименьших квадратов и получено аналитическое выражение

$$Ra = (0,002 S(\omega) + 0,005) \text{ мкм}, \quad (3)$$

которое вполне адекватно описывает экспериментальные данные. Кроме того, отношение спектральных плотностей составляет величину

$$S(\omega)_{\text{гр.}} / S(\omega)_{\text{гл.}} = 64,6/11,9 = 5,43.$$

Этот показатель больше чем в два раза превышает и показатель оценки АКФ по амплитуде переменных составляющих. Таким образом, для идентификации (распознавания) микрорельефов поверхностей наиболее перспективным, представляется использование значений спектральной плотности для комплексного разложения соответствующих автокорреляционных функций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение корреляционно-спектрального метода цифровой обработки полутоновых изображений микрорельефов деталей машиностроения позволил повысить разрешающую способность оптико-электронного метода оценки микрорельефа поверхностей.

Кроме того, предложенный метод позволяет прогнозировать качество выполнения технологической операции через определение процента зашумления изображения, то есть позволяет оценивать влияние случайной компоненты, полученной в процессе обработки поверхности.

На основании полученных данных формулируются требования по изменению режимов и условий окончательной обработки прецизионных деталей по повышению качества поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров, В.П. Инженерные методы технологического обеспечения регламентированных параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в процессе механической обработки / В. П. Федоров, А. Г. Суслов, М. Н. Нагоркин // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 4 (94). – С. 40-48.
2. Абрамов, А.Д. Построение цифрового изображения структуры поверхности по профиллограмме для определения её характеристик в соответствии с ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014. / А.Д. Абрамов, Н.В. Носов, Т.Н. Андриухина // Известия Самарского научного центра РАН. – 2023. – Т. 25. – № 4(2). – С. 220-224.
3. Виноградова, Г.Н. Основы микроскопии, часть 2. / Г.Н. Виноградова, В.В. Захаров – СПб: Университет ИТМО, 2020. – 248 с.
4. Азарова, В.В. Анализ шероховатости прецизионных оптических поверхностей с использованием метода интерференционной микроскопии / В. В. Азарова, Т. В. Цветкова // Известия вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – № 6. – С. 83-86.
5. Laurens Liesenborghs, Marijke Peetermans, Jorien Claes, Tiago Rafael Veloso, Christophe Vandenbriele. Shear-Resistant Binding to von Willebrand Factor Allows *Staphylococcus lugdunensis* to Adhere to the Cardiac Valves and Initiate Endocarditis (англ.) // Journal of Infectious Diseases. – 2016-04-01. – Vol. 213, iss. 7. – P. 1148-1156. – ISSN 0022-1899. – doi:10.1093/infdis/jiv773.

SPECTRAL ANALYSIS OF THE MICRORELIEF OF THE SURFACE AFTER MECHANICAL TREATMENT

© 2025 A.D. Abramov¹, D.S. Klyuev², N.V. Nosov¹, N.S. Nosov¹

¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

² Volga Region State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia

A method for determining the parameters of the microrelief of the surface of machine parts after mechanical processing and using digital technologies is considered. The method is based on processing digital microrelief images using a correlation spectral function. A digital image of the surface under study was obtained using an optoelectronic complex and image processing software. The results of determining the microrelief parameters of the raceway surfaces of the inner rings of instrument bearings are presented. **Keywords:** measurement; surface; microrelief; image; algorithm; autocorrelation; spectrum; density.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-314-318

EDN: TGYTED

REFERENCES

1. Fedorov, V.P. Inzhenernye metody tekhnologicheskogo obespecheniya reglamentirovannykh parametrov sherokhovatosti funktsional'nykh poverkhnostey detalej mashin v protsesse mekhanicheskoy obrabotki / V. P. Fedorov, A. G. Suslov, M. N. Nagorkin // Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii. – 2019. – № 4 (94). – S. 40-48.
2. Abramov, A.D. Postroenie tsifrovogo izobrazheniya struktury poverkhnosti po profilogramme dlya opredeleniya eyo kharakteristik v sootvetstvii s GOST R ISO 25178-2-2014. / A.D. Abramov, N.V. Nosov, T.N. Andriukhina // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. – 2023. – T. 25. – № 4(2). – S. 220-224.
3. Vinogradova, G.N. Osnovy mikroskopii, chast' 2. / G.N. Vinogradova, V.V. Zakharov – SPb: Universitet ITMO, 2020. – 248 s.
4. Azarova, V.V. Analiz sherokhovatosti pretsizionnykh opticheskikh poverkhnostey s ispol'zovaniem metoda interferentsionnoy mikroskopii / V. V. Azarova, T. V. Tsvetkova // Izvestiya vuzov. Priborostroenie. – 2014. – T. 57. – № 6. – S. 83-86.
5. Laurens Liesenborghs, Marijke Peetermans, Jorien Claes, Tiago Rafael Veloso, Christophe Vandenbriele. Shear-Resistant Binding to von Willebrand Factor Allows *Staphylococcus lugdunensis* to Adhere to the Cardiac Valves and Initiate Endocarditis (англ.) // Journal of Infectious Diseases. – 2016-04-01. – Vol. 213, iss. 7. – P. 1148-1156. – ISSN 0022-1899. – doi:10.1093/infdis/jiv773.

Aleksey Abramov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electronic Systems and Information Security. E-mail: abraleks@bk.ru

Dmitry Klyuev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor. E-mail: klyuevd@yandex.ru

Nikolai Nosov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools, and Tools. N. Nosov, Student.