

Измерения параметров микрорельефа поверхностей промышленных изделий корреляционно- спектральной обработкой их изображений

А.Д. Абрамов¹ , Д.С. Ключев² 

¹ Самарский государственный технический университет

443100, Россия, г. Самара,

ул. Молодогвардейская, 244

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

443010, Россия, г. Самара,

ул. Л. Толстого, 23

Аннотация – Обоснование. По результатам эксплуатации различных изделий машиностроения установлено, что индивидуальные особенности микрорельефов их рабочих поверхностей во многом определяют их надежность и долговечность. В связи с этим разработка современных новых методов измерения параметров шероховатости микрорельефа с целью их дальнейшего использования в машиностроении является актуальной задачей в настоящее время. **Цель.** Целью работы стало исследование и разработка оптико-электронного метода, новых алгоритмов и программного обеспечения для цифровой обработки изображений исследуемых микрорельефов механически обработанных поверхностей, в результате которой измеряются параметры шероховатости микрорельефов непосредственно в ходе выполнения технологического процесса. **Методы.** Метод основан на компьютерной обработке изображений исследуемых микрорельефов. Сущность метода состоит в том, что строки видеосигналов изображения микрорельефа рассматриваются как реализации случайного стационарного процесса. При этом все изображение состоит из m таких реализаций – количества строк изображения. Количество пикселей в строке n соответствует ширине анализируемого изображения. В результате такой обработки изображения получается строчная матрица коэффициентов корреляции – функция корреляции, к которой затем применяются известные математические методы обработки стационарного случайного процесса для нахождения его нормированной автокорреляционной функции. Для повышения разрешающей способности корреляционного метода оценки параметров микрорельефа использован спектральный анализ полученных автокорреляционных функций. По результатам спектрального анализа определяется с заданной вероятностью шероховатость исследуемого микрорельефа. **Результаты.** Разработан корреляционно-спектральный метод измерения параметров микрорельефа, в основе которого лежит представление полутонового изображения исследуемой поверхности в виде совокупности реализаций стационарного случайного процесса. Для этого представления были рассчитаны корреляционные функции исследуемых микрорельефов и определены их спектральные плотности. Установлено, что микрорельефы с разной шероховатостью существенно различаются по спектральным плотностям. Представлены результаты применения данного метода для оценки параметров микрорельефа внутреннего кольца подшипника. **Заключение.** Показана перспективность применения оптико-электронного метода и цифровой обработки изображений микрорельефов механически обработанных поверхностей с целью оперативного измерения их параметров шероховатости. Разработан алгоритм вычисления автокорреляционной функции, характеризующей исследуемый микрорельеф, как совокупность реализаций случайного стационарного процесса, где каждая реализация является строкой видеосигнала. Затем для повышения разрешающей способности метода к полученным автокорреляционным функциям применяется преобразование Фурье и вычисляются спектральные плотности автокорреляционных функций. Методом наименьших квадратов строится зависимость, с использованием которой осуществляется измерение шероховатости исследуемого микрорельефа.

Ключевые слова – измерение; поверхность; микрорельеф; изображение; корреляция; алгоритм.

Введение

Многочисленными исследованиями установлено, что геометрические параметры микрорельефа рабочих поверхностей промышленных изделий во многом определяют усталостную прочность, герметичность соединений, коррозионную стойкость, сопротивление износу трущихся поверхностей и многие другие статические и эксплуатационные характеристики изделий [1; 2]. Описание этих параметров и способы их определения изложены в ГОСТ 2789-731, ГОСТ 25142-822, ГОСТ Р

ИСО 4287-20143. Однако все возрастающие требования к качеству выпускаемой машиностроительной продукции обусловили разработку и внедрение дополнительного ГОСТ Р ИСО 25178-2-20144. В этом ГОСТе введено новое понятие «структура поверхности», для полного описания которого необходим комплекс характеристик, состоящий из отдельных групп: геометрических параметров; геометрических признаков; топографических параметров; параметров поля. При этом для определения структурных параметров исследуемой

поверхности требуется трехмерное распределение высотных параметров микрорельефа – его 3D-изображение. В этом состоит принципиальное отличие указанного в ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 подхода к оценке микрорельефа рабочих поверхностей изделий машиностроения от остальных перечисленных выше стандартах, в которых рекомендовано получать информацию о параметрах микрорельефа профильными методами с помощью профилометров и профилографов.

Традиционные методы с использованием оптических лабораторных микроскопов для создания на их основе систем стереозрения для построения 3D-изображений имеют определенные ограничения, так как разрешающая способность σ оптических систем зависит от длины волны λ света, падающего на исследуемую поверхность [3]:

$$\sigma = \lambda / (2A),$$

где A – апертура микроскопа, которая для иммерсионных объективов большого увеличения достигает 1,5.

При использовании ультрафиолетовых лучей и специальной оптики разрешающая способность микроскопа может быть увеличена до 0,1 мкм, однако этого недостаточно для оценки стереоскопическими методами прецизионных поверхностей с высотными параметрами в диапазоне 0,01–0,10 мкм. Поверхности с такой шероховатостью формируются, например, технологическими операциями – шлифованием и полированием. Для получения трехмерной информации о состоянии исследуемого микрорельефа поверхности применяют интерференционный метод и метод конфокальной микроскопии [4–6], которые позволяют сформировать 3D-изображения с высокой разрешающей способностью порядка 3–10 нм. Тем не менее для оперативной оценки качества микрорельефа исследуемой поверхности машиностроительных изделий, согласно ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, непосредственно в производственных условиях описанную выше оптическую аппаратуру не используют из-за следующих ограничений: аппаратура имеет большие габаритные размеры и стоимость; ее применение возможно только в лабораторных условиях и только для оценки поверхностей, имеющих простые формы (невозможно исследовать структуры микрорельефов поверхностей внутренних объемов промышленных изделий – пресс-форм, труб, колец и т. п.).

Как было отмечено выше, в настоящее время на производстве достаточно широко используется

профильный метод, реализуемый с помощью профилометров и профилографов, при котором щуп с алмазной иглой перемещается по исследуемой поверхности. Колебания этого щупа в виде профилограммы и служат источником информации для определения параметров шероховатости по ГОСТ Р ИСО 4287-2014 Геометрические характеристики изделий (GPS). Однако таким образом можно получать первичную информацию только в 2D-формате в легко доступных местах изделий и для поверхностей, имеющих простые плоские контуры.

В связи с рассмотренными выше обстоятельствами требуется новый метод контроля структуры прецизионных поверхностей промышленных изделий после механической обработки. Данный метод основан на корреляционном и спектральном анализе изображений, полученных обычными портативными видеокамерами непосредственно в производственных условиях в ходе выполнения технологического процесса. Цель настоящей работы – разработка корреляционно-спектрального метода измерения параметров микрорельефа прецизионных поверхностей промышленных изделий.

1. Корреляционно-спектральный метод измерения параметров микрорельефа

В работе [7] предложено использовать корреляционный алгоритм при обработке полутонового изображения исследуемого микрорельефа и оценивать параметры микрорельефа на основе вычисления переменной составляющей двухмерной автокорреляционной функции (АКФ). Отметим, что, согласно ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, корреляционная характеристика является составной частью геометрических параметров структуры поверхности. Измерение шероховатости исследуемого микрорельефа в [7] выполнялось на основе вычисления двумерных корреляционных функций согласно известному выражению

$$r_{x,y}(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) \times \\ \times (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x) / (\sigma_1 \sigma_2)$$

для отдельных фрагментов изображения микрорельефа, на которые оно разбивалось. В этом выражении через $u(n_1, n_2)$ обозначен фрагмент изображения (эталон), который расположен внутри зоны поиска $x(n_1, n_2)$, то есть изображения иссле-

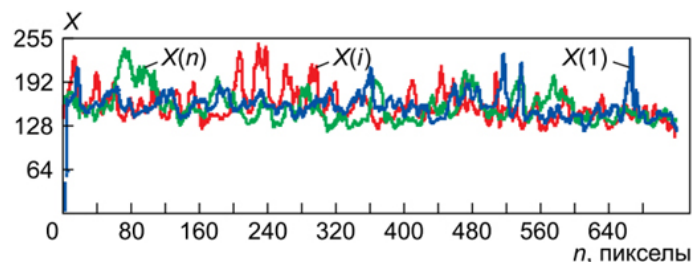


Рис. 1. Представление изображения в виде совокупности реализаций видеосигналов для различных строк изображения
Fig. 1. Representation of the image in the form of a set of implementations of video signals for different lines of the image

дуемого микрорельефа формата $K1 \times K2$ пикселей; σ_1 и σ_2 – средние квадратичные отклонения величин $u(n_1, n_2)$ и $x(n_1, n_2)$ от их математических ожиданий m_u и m_x соответственно. В результате такой цифровой обработки изображения формировалась матрица коэффициентов корреляции – двумерная корреляционная функция для всего изображения.

С целью расширения возможностей измерения параметров шероховатости оптико-электронным методом в дополнение к алгоритму, рассмотренному в [7], в настоящей работе разработан корреляционно-спектральный метод обработки полутоновых изображений, снятых обычными видеокамерами непосредственно в производственных условиях. Суть метода заключается в представлении полутонового изображения анализируемого микрорельефа как совокупности реализаций стационарного случайного процесса $X(t)$, т. е. каждая строка изображения рассматривается как конкретная реализация $X(1), X(2), \dots, X(m)$ случайного стационарного процесса $X(t)$, все изображение состоит из m таких реализаций – количества строк изображения. Количество n пикселей в строке соответствует ширине анализируемого изображения. В результате такой обработки изображения получим строчную матрицу коэффициентов корреляции – функцию корреляции $r = f(n)$.

Характерные видеосигналы для различных строк одного изображения микрорельефа шлифованной поверхности, рассматриваемые как реализации случайного стационарного процесса, приведены на рис. 1.

Предположение о стационарности случайного процесса $X(t)$ следует из требования обеспечения необходимой стационарности технологического процесса формирования микрорельефа промышленных изделий финишными операциями шлифования и полирования. В этом случае нормированная корреляционная функция, т. е. АКФ, характеризующая стационарный процесс, будет зависеть лишь от задаваемого интервала между

пикселями в строке изображения и количеству используемых строк (при вычислениях корреляционных моментов учитывают значения пикселей этих строк).

Таким образом, для нахождения нормированной АКФ случайной функции $X(t)$, заданной дискретными отсчетами в виде двумерной матрицы яркостных значений пикселей, можно применять известные математические соотношения [8]. По этим соотношениям можно вычислять математические ожидания, дисперсии, средние квадратические отклонения по столбцам и корреляционные моменты между столбцами матрицы и в конечном счете нормированный коэффициент автокорреляции как функцию, которая зависит только от количества пикселей в строке (ширины) анализируемого изображения. Если значения АКФ, рассчитанные для разных моментов времени данного технологического процесса изготовления одной и той же детали, будут значительно отличаться друг от друга, то это укажет на нарушения технологического процесса.

2. Исследование влияния микрорельефа на характеристики его изображения

Для изучения микрогеометрии поверхности механических изделий использован инструментальный микроскоп Crystallite ST-60 (80X) (Россия), который оборудован цифровой видеокамерой Computar ZC-F11CH3 (Computar, Япония), что вместе образовывало оптико-электронный измерительный комплекс. Для исследований из стали марки ШХ15 методом шлифования и полирования изготовлены четыре образца эталонных поверхностей с различной микрогеометрией. Определенные с помощью профилометра SJ-201P (Mitutoyo, Япония) параметры шероховатости Ra поверхностей указанных образцов 1–4 составили 0,13; 0,084; 0,048; 0,025 мкм соответственно. Оптико-электронная система измерительного

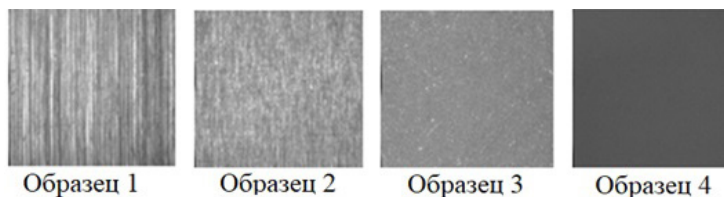


Рис. 2. Полутоновые изображения микрорельефа исследуемых образцов 1–4
Fig. 2. Halftone images of the microrelief of the studied samples 1–4

комплекса настроена таким образом, что размер анализируемого участка поверхности эталонных образцов составил $1,2 \times 1$ мм, а формат исследуемого изображения микрорельефа поверхности $K1 \times K2 = 720 \times 570$ пикселей. Световой поток мощностью 600×10^{-3} лм падал на исследуемую поверхность под углом 45° . На каждый пиксел полученных видеоизображений приходилось 3 байта, для черно-белой видеокамеры Computar ZC-F11CH3 полученная информация является избыточной. В связи с этим исходное полутоновое изображение поверхности преобразовано в формат 1 пиксел – 1 байт. Таким образом, диапазон изменения яркости видеосигнала в полученном изображении составил 0–255 отн. ед. Характерные полутоновые изображения исследуемых эталонных поверхностей с различной шероховатостью приведены на рис. 2.

3. Результаты исследований

При написании программ цифровой обработки полутоновых изображений микрорельефов эталонных образцов (см. рис. 2) согласно математическим соотношениям, приведенным в [8], в настоящей работе использованы библиотека компьютерного зрения OpenCV [9] и язык программирования C++. Для исключения различных краевых эффектов в исходном эталонном изображении из его центральной части выделен фрагмент форматом 400 строк $\times$ 600 пикселей, т. е. матрица размером 400×600 . Для этого фрагмента определены нормированные коэффициенты корреляции [8]:

$$r(n_k, n_j) = \frac{K_x(n_k, n_j)}{\sigma_x(n_k) \sigma_x(n_j)},$$

где $K_x(n_k, n_j)$ – корреляционные моменты между элементами столбцов матрицы; x – номер строки матрицы, для которой подсчитывается $\sigma_x(n_k)$, $\sigma_x(n_j)$ – средние квадратические отклонения значений пикселей по столбцам матрицы с индексами k, j соответственно. Корреляционные моменты выразим как [8]:

$$K_x(n_k, n_j) = \sum_{i=1}^m [X_i(n_k) - m_x(n_k)] \times [X_i(n_j) - m_x(n_j)] (m-1)^{-1},$$

где $m_x(n_k)$, $m_x(n_j)$ – математические ожидания значений пикселей в столбцах n_k , n_j выделенной матрицы.

В результате выполненных вычислений получено 600 значений нормированных коэффициентов корреляции r , которые определили АКФ, зависящую только от количества n пикселей в строке изображения. Характерные графики для образцов с различным микрорельефом приведены на рис. 3, при этом для изображений микрорельефов с разными высотными параметрами эти графики существенно разнятся.

Как и в работе [7], для идентификации (распознавания) исследуемых микрорельефов вычислены средние значения коэффициентов r полученных зависимостей. При этом отношение коэффициентов корреляции образцов с более грубой ($Ra = 0,13$ мкм) и более гладкой ($Ra = 0,025$ мкм) поверхностями составило 2,25. Для увеличения этого отношения и, следовательно, повышения разрешающей способности корреляционного метода оценки микрорельефа использован спектральный анализ полученных АКФ.

Корреляционный и спектральный методы анализа широко применяются в различных областях техники, связанных с обработкой радиотехнических сигналов, в том числе видеосигналов [10–13]. В работах [10; 11] исследуемые изображения получены с помощью электронных либо атомно-силовых микроскопов и поэтому существенно отличаются от растровых изображений, снятых обычными видеокамерами, как и отличаются программные методы обработки указанных изображений. Кроме того, данные микроскопы применяют только в лабораторных условиях. В работах [12; 13] корреляционным и спектральным методами обрабатывают профилограммы, полученные контактными методами, недостаток которых рассмотрен выше. В настоящей работе в основу программы для вы-

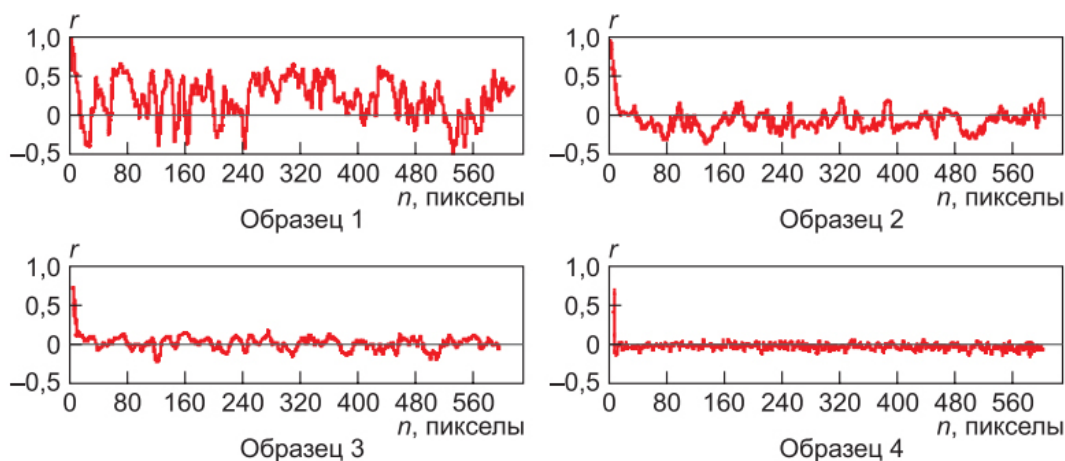


Рис. 3. Характерные графики коэффициентов корреляции изображений эталонных образцов 1–4 (зависимости коэффициентов корреляции r от количества n пикселей в строке изображения)

Fig. 3. Typical graphs of correlation coefficients r for images of reference samples 1–4 (the correlation coefficients depend on the number of n pixels in the image row)

числения спектра положено общее разложение Фурье для дискретной последовательности

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi kn / N),$$

где второй множитель определен с использованием соотношения Эйлера

$$\exp(-j2\pi kn / N) = \cos(2\pi kn / N) - j \sin(2\pi kn / N).$$

Для вычисления действительных X_r и мнимых X_i амплитуд спектра разработана соответствующая программа, в которой $N = 600$ пикселей, переменные – номер k гармонической составляющей спектра и переменная n аргумента АКФ – изменялись в циклах от 0 до 599 в соответствии с количеством пикселей в строке матрицы. Комплексная амплитуда формируемого спектра определена как

$$X(k) = \sqrt{x_r^2 + x_i^2}.$$

Ниже приведен фрагмент программы для вычисления рассмотренных амплитуд, где $KCORL[n]$ – массив коэффициентов АКФ, полученный ранее при обработке изображения исследуемого микрорельефа.

```
for (k=0; k<N; k++)
{
    Xr[k] = 0;
    Xi[k] = 0;
    for (n=0; n<N; n++)
    {
        Xr[k] = (Xr[k] + KCORL[n]*cos(2*3.141592*k*n/N);
        Xi[k] = (Xi[k] + KCORL[n]*sin(2*3.141592*k*n/N);
        X[k] = sqrt(Xr[k]*(Xr[k] + Xi[k]*(Xi[k]));
    }
}
```

Полученные огибающие комплексных амплитуд X_k спектров для изображений исследуемых микрорельефов представлены на рис. 4. Основная мощность корреляционного сигнала для микрорельефов с более грубой поверхностью сосредоточена в области нижних и верхних пространственных частот. С уменьшением высотных параметров микрорельефа эта особенность спектров нивелируется и для образца 4 полностью исчезает. Отмеченная особенность рассматриваемых спектров связана с двумя источниками возникновения микронеровностей поверхности – детерминированной периодической основной составляющей и случайным компонентом, который накладывается на эту основу [14].

При этом в зависимости от соотношения технологических факторов в формировании микрорельефа может превалировать тот или иной источник. Микрорельеф поверхности при абразивной обработке образуется в результате многократного царапания поверхности детали абразивными зернами, расположенными в обрабатывающем инструменте друг за другом случайным образом (неупорядоченно). В связи с этим микрорельеф поверхности представляет собой множество случайно расположенных неровностей со случайными размерами. С уменьшением размера абразивных зерен – при переходе от шлифования к полированию – существенно уменьшается доля периодической составляющей и увеличивается доля случайной. Данное обстоятельство объясняет характер спектров комплексных амплитуд, приведенных на рис. 4

Для оценки полученных спектров и идентификации исследуемых микрорельефов вычисле-

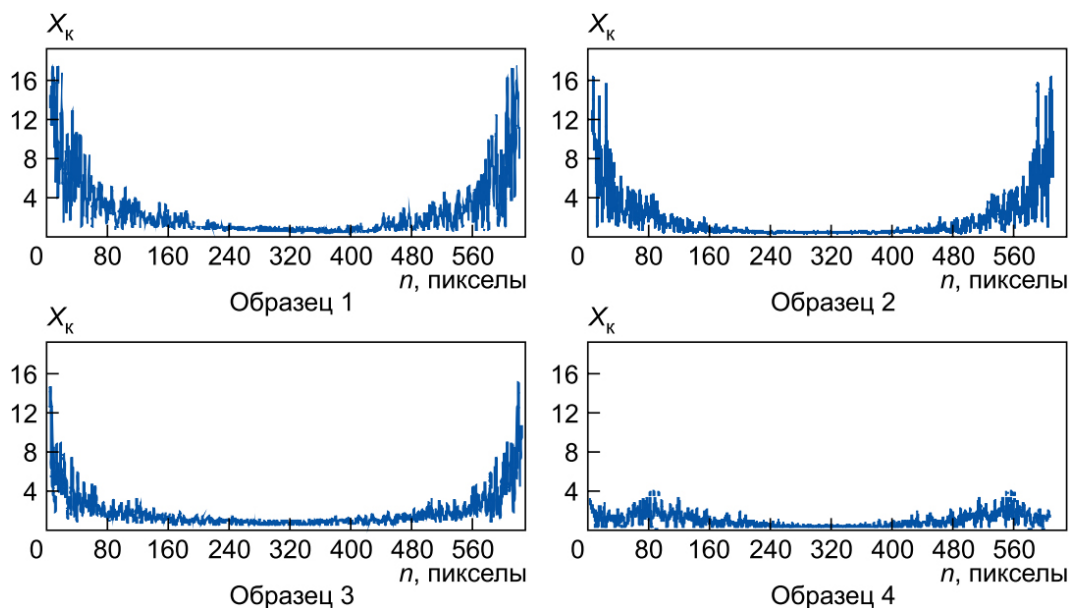


Рис. 4. Графики огибающей комплексных амплитуд X_k спектров АКФ
Fig. 4. Graphs of the envelope of complex amplitudes X_k of ACF spectra

ны спектральные плотности $S(\omega)$ этих спектров. На рис. 5 показана экспериментальная (линейная) зависимость $Ra = f(S(\omega))$; ее аналитическое выражение

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

полученное методом наименьших квадратов [15], вполне адекватно описывает экспериментальные данные.

Отношение спектральных плотностей грубой поверхности к гладкой $64,6 / 11,9 = 5,43$ более чем в два раза превышает отношение амплитуд переменных составляющих АКФ. Таким образом, для идентификации (распознавания) микрорельефов прецизионных поверхностей при комплексном разложении соответствующих АКФ наиболее перспективно использовать спектральную плотность этих функций.

4. Применение корреляционно-спектрального метода для исследования поверхности промышленных изделий

Для апробации предложенного корреляционно-спектрального метода исследован микрорельеф поверхности дорожки качения внутреннего кольца приборного подшипника № 2000083, изготовленного из стали марки ШХ15. Радиус наружной окружности кольца 2,5 мм, ширина дорожки 0,3 мм. Внешний вид кольца, полутоновое и бинарное изображения участка поверхности дорожки качения приведены на рис. 6. Бинарное изображение (см. рис. 6, справа) дано для большей нагляд-

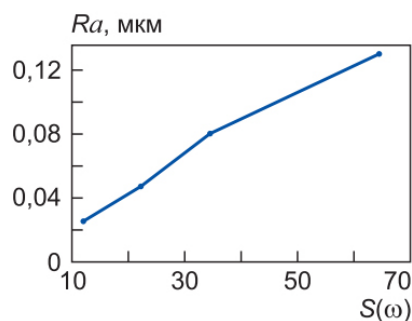


Рис. 5. Зависимость параметра шероховатости Ra от спектральных плотностей $S(\omega)$

Fig 5. Dependence of the roughness parameter Ra on the spectral densities $S(\omega)$

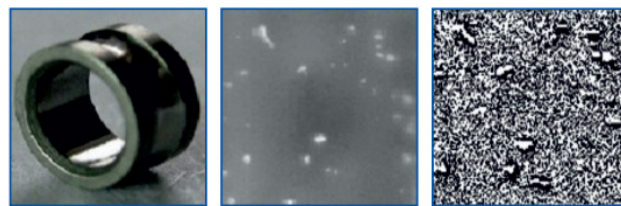


Рис. 6. Внешний вид (слева) кольца приборного подшипника, характерные полутоновое (в центре) и бинарное (справа) изображения выделенного участка микрорельефа дорожки качения

Fig. 6. The appearance (on the left) of the instrument bearing ring, the characteristic halftone (in the center) and binary (on the right) images of the selected section of the microrelief of the raceway

ности выделяющихся включений (дефектов) микрорельефа в виде отдельных замкнутых областей неправильной формы, которые образуются при шлифовании дорожек качения в среде с масляной смазочно-охлаждающей жидкостью.

Вычислены среднее значение коэффициента корреляции 0,32 и спектральная плотность кор-

реляционной функции 50,64, которая при постановке в выражение (1) дает шероховатость $Ra = 0,11 \text{ мкм}$ исследуемой дорожки качения кольца подшипника. В соответствии с отмеченными выше множественными дефектами в виде отдельных замкнутых областей и полученным значением Ra ход технологического процесса признан неудовлетворительным. Для устранения отмеченного недостатка дорожки качения отшлифованы с применением водной смазочно-охлаждающей жидкости, их микрорельеф сформирован без нежелательных включений в виде различных замкнутых областей. Среднее значение коэффициента корреляции в этом случае уменьшилось до 0,25, спектральная плотность корреляционной функции составила 23,71, а шероховатость дорожки качения – 0,052 мкм, что вполне отвечает техническим требованиям, предъявляемым к операции шлифования на данном этапе формирования микрорельефа дорожки.

Заключение

В статье рассмотрен корреляционно-спектральный метод цифровой обработки полутоновых изо-

бражей микрорельефов механически обработанных поверхностей, формируемых операциями шлифования и полирования. Новизна предложенного метода состоит в том, что параметры микрорельефа оцениваются на основе сопоставления спектральных плотностей автокорреляционных функций, полученных для изображения исследуемого микрорельефа и изображений эталонных микрорельефов, для которых параметры шероховатости заранее определены стандартными методами. При этом установлено, что спектральные плотности $S(\omega)$ характеризуют индивидуальные особенности исследуемых микрорельефов и определяют функциональную зависимость параметра Ra от $S(\omega)$. Для этой зависимости методом наименьших квадратов получено аналитическое выражение, которое было использовано при определении параметра Ra для различных участков поверхности внутреннего кольца приборного подшипника № 2000083. Показано, что применение рассматриваемой зависимости для измерения параметра Ra повышает разрешающую способность метода более чем в два раза по сравнению с методом, основанным на использовании зависимости $Ra = f(U_{cp})$ для этих же целей.

Список литературы

1. Федоров В.П., Суслов А.Г., Нагоркин М.Н. Инженерные методы технологического обеспечения регламентированных параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в процессе механической обработки // Научные технологии в машиностроении. 2019. № 4 (94). С. 40–48. DOI: https://doi.org/10.30987/article_5c90a59824edf6.80759568
2. Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин / А.Г. Суслов [и др.] // Научные технологии в машиностроении. 2018. № 10. С. 3–13. DOI: https://doi.org/10.30987/article_5bb4b1f9abbc54.46761484
3. Виноградова Г.Н., Захаров В.В. Основы микроскопии. Ч. 2. СПб.: Университет ИТМО, 2020. 248 с.
4. Азарова В.В., Цветкова Т.В. Анализ шероховатости прецизионных оптических поверхностей с использованием метода интерференционной микроскопии // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 6. С. 83–86. URL: <https://elibrary.ru/seep1h>
5. Shear-resistant binding to von willebrand factor allows staphylococcus lugdunensis to adhere to the cardiac valves and initiate endocarditis / L. Liesenborghs [et al.] // Journal of Infectious Diseases. 2016. Vol. 213, no. 7. P. 1148–1156. DOI: <https://doi.org/10.1093/infdis/jiv773>
6. Chi K.R. Ever-increasing resolution // Nature. 2009. Vol. 462, no. 7273. P. 675–678. DOI: <https://doi.org/10.1038/462675a>
7. Абрамов А.Д., Ключев Д.С. Корреляционный метод обработки изображения микрорельефа поверхности для определения ее шероховатости // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2025. Т. 28, № 2. С. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.2.49-57>
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. 10-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2006. С. 339–346.
9. Брадски Г., Келер А. Изучаем OpenCV 3 / пер. с англ. М.: ДМК-Пресс, 2017. 826 с.
10. Шарипов А.А., Баранов Г.В. Сравнительный анализ методик оценки количественных характеристик шероховатости наноразмерных структур // Труды МФТИ. 2018. Т. 10, № 2. С. 72–79. URL: <https://elibrary.ru/uuqbkw>
11. Толстихина А.Л. Атомно-силовая микроскопия кристаллов и пленок со сложной морфологией поверхности: дис. ... д-ра. физ.-мат. наук. М., 2013.
12. Овсянников В.Е., Терещенко В.Ю. Корреляционный анализ профиля поверхности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 10. С. 74–76. URL: <https://elibrary.ru/rvsiyb>
13. Мусалимов В.М., Валетов В.А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 191 с.
14. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход. М.: Наука, 1975. 344 с.
15. Коломиец Л.В., Поникарова Н.Ю. Метод наименьших квадратов. Самара: Самарский университет, 2017. 32 с.

Информация об авторах

Абрамов Алексей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных систем и информационной безопасности Самарского государственного технического университета, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: численные методы обработки изображений, программирование, опико-электронные методы измерения характеристик микрорельефов поверхностей промышленных изделий.

E-mail: abraleks@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2272-1370>

SPIN-код (eLibrary): 2940-9363

AuthorID (eLibrary): 779821

ResearcherID (WoS): LXV-3051-2024

Клюев Дмитрий Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоэлектронных систем Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, Россия.

Область научных интересов: электродинамика, устройства СВЧ, антенны, метаматериалы.

E-mail: klyuevd@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9125-7076>

SPIN-код (eLibrary): 5689-7152

AuthorID (eLibrary): 179789

ResearcherID (WoS): O-6025-2015

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2025, vol. 28, no. 3, pp. 28–36

DOI [10.18469/1810-3189.2025.28.3.28-36](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.3.28-36)
UDC 621.397
Original Research

Received 21 March 2025
Accepted 22 April 2025
Published 30 September 2025

Measurements of microrelief parameters of industrial products by correlation- spectral processing of their images

Alexey D. Abramov¹ , Dmitriy S. Klyuev² 

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya Street,
443100, Samara, Russia

² Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

Abstract – Background. Based on the results of the operation of various engineering products, it has been established that the individual features of the microreliefs of their working surfaces largely determine their reliability and durability. In this regard, the development of modern new methods for measuring the roughness parameters of a microrelay for their further use in mechanical engineering is an urgent task at the present time. **Aim.** The aim of the work is to study and develop an optoelectronic method, new algorithms and software for digital image processing of the studied microreliefs of the mihanic treated surfaces, as a result of which the parameters of the roughness of microreliefs are measured directly during the technological process. **Methods.** The method is based on computer processing of images of the studied microreliefs. The essence of the method is that the lines of video signals of the microrelief image are considered as the realizations of a random stationary process. Herewith the full Image consists of m such realizations – the number of lines of the image. The number of pixels in the row n corresponds to the width of the image being analyzed. As a result of such image processing, a string matrix of correlation coefficients is obtained, a correlation function, to which the well-known mathematical methods of processing a stationary random process are then applied to find its normalized autocorrelation function. Further, to increase the resolution of the correlation method for estimating the microrelief parameters, spectral analysis of the obtained autocorrelation functions was used. Based on the results of the spectral analysis, the roughness of the studied microrelief is determined with a given probability. **Results.** A correlation-spectral method for measuring the parameters of microrelief has been developed, which is based on the representation of a halftone image of the surface under study as a set of implementations of a stationary random process. For this representation, correlation functions for the studied microreliefs were calculated and spectral densities for them were determined. It has been established that microreliefs with different roughness differ significantly in spectral densities. The results of applying this method to estimating the parameters of the microrelief of the inner ring of the bearing are presented. **Conclusion.** The prospects of using the optoelectronic method and digital processing of images of microreliefs of mechanically processed surfaces in order to quickly measure their roughness parameters are shown. An algorithm for calculating the autocorrelation function characterizing the microrelief under study as a set of implementations of a random stationary process, where each implementation is a line of a video signal, has been developed. Then, to increase the resolution of the method, the Fourier transform is applied to the

obtained autocorrelation functions and the spectral densities of the autocorrelation functions are calculated. The method of least squares is used to construct the dependence which is used to measure the roughness of the studied microrelief.

Keywords – measurement; surface; microrelief; image; correlation; algorithm.

✉ abraleks@bk.ru (Alexey D. Abramov)

 © Alexey D. Abramov, Dmitriy S. Klyuev, 2025

References

1. V. P. Fedorov, A. G. Suslov, and M. N. Nagorkin, "Engineering methods for the technological support of the regulated parameters of the roughness of functional surfaces of machine parts in the process of mechanical processing," *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, no. 4 (94), pp. 40–48, 2019, doi: https://doi.org/10.30987/article_5c90a59824edf6.80759568. (In Russ.)
2. A. G. Suslov et al., "A comprehensive approach to experimental research of metal processing technological systems for ensuring quality parameters and operational properties of the surfaces of machines parts," *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, no. 10, pp. 3–13, 2018, doi: https://doi.org/10.30987/article_5bb4b1f9abbc54.46761484. (In Russ.)
3. G. N. Vinogradova and V. V. Zakharov, *The Basics of Microscopy*. Part 2. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2020. (In Russ.)
4. V. V. Azarova and T. V. Tsvetkova, "Roughness measurement of precision optical surfaces by the interference microscopy method," *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*, vol. 57, no. 6, pp. 83–86, 2014, url: <https://elibrary.ru/seeph>. (In Russ.)
5. L. Liesenborghs et al., "Shear-resistant binding to von willebrand factor allows staphylococcus lugdunensis to adhere to the cardiac valves and initiate endocarditis," *Journal of Infectious Diseases*, vol. 213, no. 7, pp. 1148–1156, 2016, doi: <https://doi.org/10.1093/infdis/jiv773>.
6. K. R. Chi, "Ever-increasing resolution," *Nature*, vol. 462, no. 7273, pp. 675–678, 2009, doi: <https://doi.org/10.1038/462675a>.
7. A. D. Abramov and D. S. Klyuev, "The correlation method for processing the image of the surface microrelief to determine its roughness," *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 49–57, 2025, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.2.49-57>. (In Russ.)
8. E. S. Venttsel', *Probability Theory: Textbook for Universities*. 10th ed. Moscow: KNORUS, 2006. (In Russ.)
9. G. Bradski and A. Keler, *We Study OpenCV 3*, English trans. Moscow: DMK-Press, 2017. (In Russ.)
10. A. A. Sharapov and G. V. Baranov, "Comparative analysis of nanoscale roughness measurement methods," *Trudy MFTI*, vol. 10, no. 2, pp. 72–79, 2018, url: <https://elibrary.ru/uuqbkw>. (In Russ.)
11. A. L. Tolstikhina, "Nuclear-Blue Microscopy of Crystals and Films with Complex Surface Morphology," doct. physical. sciences. dissertation, Moscow, 2013. (In Russ.)
12. V. E. Ovsyannikov and V. Yu. Tereshenko, "Correlation analysis of the profile surface roughnesses," *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, no. 10, pp. 74–76, 2013, url: <https://elibrary.ru/rvsiyb>. (In Russ.)
13. V. M. Musalimov and V. A. Valetov, *The Dynamics of Friction Interaction*. Saint Petersburg: SPbGU ITMO, 2006. (In Russ.)
14. A. P. Khusu, Yu. R. Vitenberg, and V. A. Pal'mov, *Superior Roughness: Theoretical and Enforce Approach*. Moscow: Nauka, 1975. (In Russ.)
15. L. V. Kolomiets and N. Yu. Ponikarova, *The Method of the Smallest Squares*. Samara: Samarskiy universitet, 2017. (In Russ.)

Information about the Authors

Alexey D. Abramov, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Electronic Systems and Information Security, Samara State Technical University, Samara, Russia.

Research interests: numerical methods of image processing, programming, optoelectronic methods for measuring the characteristics of microreliefs of surfaces of industrial products.

E-mail: abraleks@bk.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2272-1370>

SPIN-code (eLibrary): 2940-9363

AuthorID (eLibrary): 779821

ResearcherID (WoS): LXV-3051-2024

Dmitriy S. Klyuev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor, head of the Department of Radioelectronic Systems, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.

Research interests: electrodynamics, microwave devices, antennas, metamaterials.

E-mail: klyuevd@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9125-7076>

SPIN-code (eLibrary): 5689-7152

AuthorID (eLibrary): 179789

ResearcherID (WoS): O-6025-2015