

Корреляционный метод обработки изображения микрорельефа поверхности для определения ее шероховатости

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. Анализ результатов использования различных машин и механизмов в народном хозяйстве показал, что шероховатость микрорельефа их рабочих поверхностей во многом определяет надежность и долговечность при их эксплуатации. В связи с этим исследование и разработка современных новых методов измерения шероховатости микрорельефа являются актуальной задачей в настоящее время. **Цель.** Целью работы стали исследование и разработка оптико-электронного метода, алгоритмов и программного обеспечения для цифровой обработки изображений исследуемых поверхностей для измерения шероховатости их микрорельефов непосредственно в ходе выполнения технологического процесса. **Методы.** Метод основан на компьютерной обработке изображений исследуемых микрорельефов, в результате которой определяются параметры шероховатости этих микрорельефов. С этой целью для полутоновых изображений микрорельефов эталонных образцов с измеренными гостовскими методами параметрами шероховатости вычисляются двумерные корреляционные функции. Для этих функций рассчитываются средние амплитуды U_{cp} переменных составляющих корреляции и строится аналитическая зависимость гостовского параметра шероховатости Ra от U_{cp} . Для изображения исследуемого микрорельефа с неизвестными параметрами шероховатости также определяется переменная составляющая двумерной корреляционной функции U_{cp} и по полученной зависимости $Ra = f(U_{cp})$ находится среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии Ra для исследуемого микрорельефа. **Результаты.** Установлен мультипликативный характер функции влияния, искажающей результаты измерения шероховатости микрорельефов непосредственно по амплитуде видеосигнала. Предложен новый оптико-электронный метод измерения параметров шероховатости микрорельефов механически обработанных поверхностей, который базируется на цифровой обработке их полутоновых изображений. В результате такой обработки вычисляется двумерная корреляционная функция, параметры которой и служат для идентификации исследуемого микрорельефа и тем самым для измерения его шероховатости. Приведены результаты применения этого метода для измерения параметров шероховатости поверхности лопатки компрессора газотурбинного двигателя. **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 двумерной корреляционной функции, которая характеризует исследуемый микрорельеф и по характеристикам которой возможно его идентифицировать, то есть измерить его шероховатость. При этом также устраняется негативное влияние побочных неинформативных факторов на результаты измерения параметров микрорельефа, в частности колебаний мощности светового потока и угла его падения на исследуемую поверхность. Приведены результаты применения разработанного оптико-электронного метода для измерения параметров шероховатости участков поверхности лопатки компрессора газотурбинного двигателя, которые идентичны результатам измерения их шероховатости гостовскими профильными методами.

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

Введение

Необходимость дальнейшего повышения технического уровня машиностроительной продукции, надежности и долговечности выпускаемых изделий, улучшения эффективности систем контроля качества этих изделий предусмотрена в основных направлениях социально-экономического развития Российской Федерации [1; 2]. При этом многочисленными исследованиями установлено существенное, а в некоторых случаях и определяющее воздействие микрорельефа (микрорельефа, шероховатости) рабочих поверхностей различных деталей машин и механизмов на надежность и дол-

говечность при эксплуатации [3; 4], то есть на их качество. В частности, от микрогеометрических характеристик микрорельефа зависят усталостная прочность деталей, контактная жесткость, сопротивление износу трущихся поверхностей, коррозионная стойкость и ряд других характеристик. В связи с этим получение достоверной информации современными измерительными средствами о состоянии микрогеометрии поверхностного слоя промышленных изделий в реальном масштабе времени является необходимым условием для определения мер по повышению качества выпускаемой машиностроительной продукции.

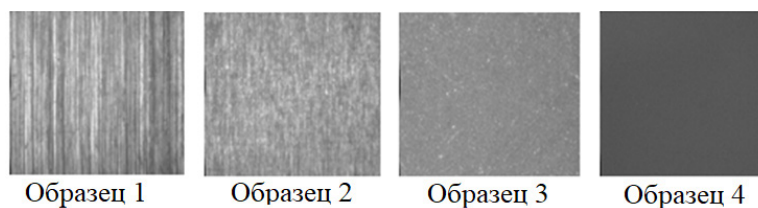


Рис. 1. Изображения эталонных образцов с заданным микрорельефом
Fig. 1. Images of reference samples with a given microrelief

В настоящее время для измерения параметров шероховатости микрорельефов рабочих поверхностей промышленных изделий широкое применение в машиностроении находят контактные и бесконтактные методы. Контактные профильные методы предполагают использование профилографов-профилометров, в которых щуп с алмазной иглой перемещается по исследуемой поверхности. Колебания этого щупа в виде профилограммы в результате его перемещения по исследуемой поверхности служат первичной информацией, на основе которой подсчитываются параметры шероховатости микрорельефа согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014 [5]. Однако такими методами можно измерить параметры только профиля микрорельефа для отдельных его участков и только в легко доступных местах изделий, имеющих простые плоские поверхности. Кроме того, процесс снятия профилограммы занимает значительное время (несколько минут) и не позволяет оперативно измерять параметры шероховатости в ходе выполнения технологического процесса.

В дополнение к профильным методам в машиностроении широкое применение находят и оптические средства для оценки параметров шероховатости микрорельефа [5–7]. Однако давно известные оптико-электронные методы, такие как методы светового сечения, теневой проекции, растровый, интерференционный и рефлектометрические, требуют применения специализированных микроскопов и повышенных требований к стабильности светового потока, падающего на исследуемую поверхность. Отмеченная особенность относится и к методам конфокальной микроскопии, используемой для получения 3D-изображений исследуемых микрорельефов. По этой причине эти методы и соответствующая аппаратура используются, как правило, только в лабораториях и для выборочного контроля промышленных изделий. Таким образом, возникает важная научная проблема, заключающаяся в разработке нового подхода к созданию средств оперативного бесконтактного контроля микрорельефа поверх-

ностей промышленных изделий портативными мобильными видеокамерами. При этом важным требованием к таким средствам контроля должна быть обязательная их применимость непосредственно в производственных условиях в ходе технологического процесса.

1. Инструментальные и программные средства

Для устранения отмеченных выше недостатков существующих средств измерения параметров шероховатости микрорельефов был разработан оптико-электронный измерительный комплекс (ОЭИК), который включал в себя инструментальный микроскоп Crystallite ST-60 (80X) (Россия), оборудованный цифровой видеокамерой Computar ZC-F11CH3 (Computar, Япония), и персональную ЭВМ. Для изучения влияния геометрических характеристик микрорельефа на параметры его изображения были изготовлены эталонные стальные образцы с различной шероховатостью поверхности. Ввод изображений исследуемых микрорельефов эталонных образцов с видеокамеры в компьютер, их дальнейший анализ были осуществлены с помощью специально разработанного программного обеспечения средствами языка Python. Измерение шероховатости микрорельефов выполнялось с помощью профилометра SJ-201P (Mitutoyo, Япония). Измерение освещенности исследуемой поверхности производилось люксметром марки 1016M. Мощность светового потока Φ (в люменах) определялась с помощью известного соотношения $\Phi = E \times S$, где E – освещенность, измеряемая в люксах. Оптико-электронная система комплекса была настроена таким образом, что анализируемая поверхность эталонных образцов имела размер $3 \times 2,5$ мм. Световой поток мощностью $600 \cdot 10^{-3}$ лм падал на исследуемую поверхность под углом 45° . Оптико-электронная система измерительного комплекса была настроена таким образом, что анализируемая поверхность эталонных образцов имела размер $3 \times 2,5$ мм, а формат

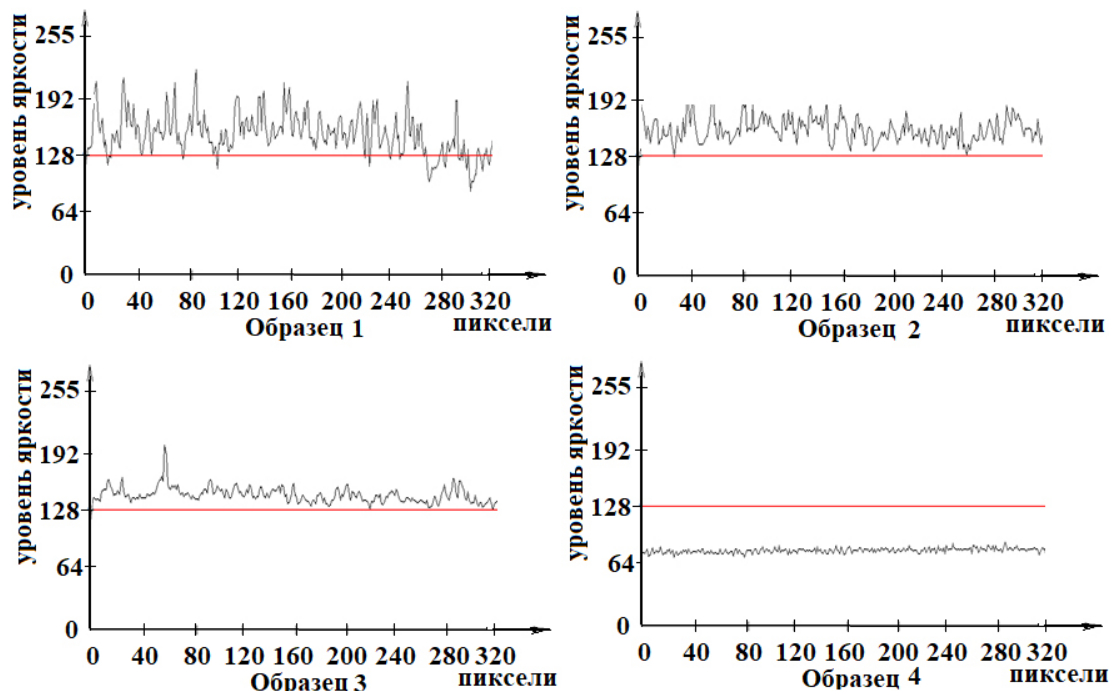


Рис. 2. Видеосигналы, отображающие микрорельефы эталонных образцов
Fig. 2. Video signals displaying microreliefs of reference samples

видеокадра $K_1 \times K_2$, записываемого в память компьютера, составлял 320×240 пикселей.

2. Результаты исследований

Полученные изображения исследуемых микрорельефов поверхностей эталонных образцов с помощью ОЭИК приведены на рис. 1. При этом микрорельеф образцов 1 и 2 был сформирован шлифованием, а микрорельеф образцов 3 и 4 – полированием.

Определенные с помощью профилометра SJ-201P параметры шероховатости Ra микрорельефов поверхностей образцов 1–4 составили 0,13; 0,084; 0,048; 0,025 мкм соответственно [5]. Как видно из приведенного рис. 1, изображения текстур микрорельефов существенно отличаются друг от друга, при этом ориентация текстуры в вертикальном направлении полностью исчезает для более гладких поверхностей, полученных полированием. Отмеченная особенность в изменении характера изображений может свидетельствовать об усилении влияния случайной компоненты по отношению регулярной компоненте при изготовлении микрорельефов с более меньшими высотными параметрами.

Характерные видеосигналы по строке видеокадра изображений исследуемых микрорельефов приведены на рис. 2. Как видно из рис. 2, суще-

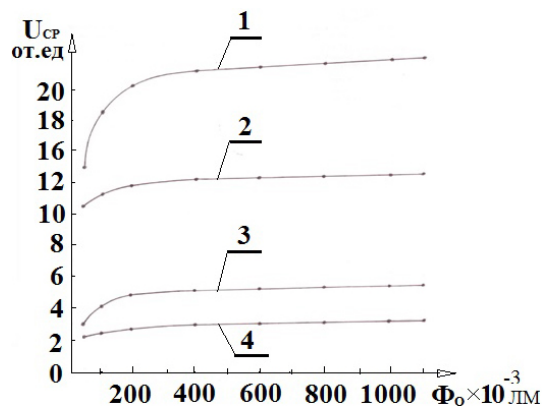


Рис. 3. Зависимость средней амплитуды переменной составляющей видеосигнала от мощности опорного светового потока Φ_0 для поверхностей с различной шероховатостью: 1 – $Ra = 0,13$ мкм; 2 – $Ra = 0,084$ мкм; 3 – $Ra = 0,048$ мкм; 4 – $Ra = 0,025$ мкм
Fig. 3. Dependence of the average amplitude of the variable component of the video signal on the power of the reference luminous flux Φ_0 for surfaces with different roughness: 1 – $Ra = 0,13$ μm ; 2 – $Ra = 0,084$ μm ; 3 – $Ra = 0,048$ μm ; 4 – $Ra = 0,025$ μm

ственное влияние микрорельеф поверхностей оказывает на переменную составляющую видеосигнала U_{cp} , которая уменьшается с уменьшением шероховатости поверхности, то есть наблюдается функциональная зависимость $Ra = f(U_{cp})$. Следовательно, для этой зависимости по экспериментальным данным можно построить аналитическую зависимость и по значению U_{cp} с заданной вероятностью можно идентифицировать (распо-

знавать) различные микрорельефы и тем самым измерять значение Ra .

Для подтверждения этого вывода в работе были выполнены исследования влияния мощности опорного светового потока на U_{cp} . Результаты выполненных исследований представлены на рис. 3.

Примем за номинальное значение светового потока величину $\Phi_{0н} = 600 \cdot 10^{-3}$ лм, а для величин Φ_{0min} , Φ_{0max} – значения $200 \cdot 10^{-3}$ лм и $1000 \cdot 10^{-3}$ лм соответственно. Выбранный диапазон значений вполне соответствует рабочим значениям светового потока, встречающимся в производственных условиях. Отмеченные изменения этого потока могут происходить по разным причинам, например вследствие колебаний напряжения питания источников света, изменения прозрачности атмосферы на рабочем месте при выполнении технологического процесса изготовления изделия, неконтролируемых бликов на исследуемой поверхности от посторонних источников света и т. п. Эти непредусмотренные воздействия на освещенность исследуемой поверхности можно охарактеризовать с помощью функции влияния $f_{вл}$. Согласно ГОСТ 8.009 – 72 «Нормируемые метрологические характеристики. Средства измерения», функция влияния – это зависимость изменений метрологической характеристики средств измерений от изменений влияющих величин или неинформативных параметров входного сигнала в пределах рабочих условий эксплуатации.

Для определения доминирующего характера функции влияния были вычислены отношения величин U_{cp} для разных значений Ra при значениях светового потока Φ_{0min} , $\Phi_{0н}$, Φ_{0max} . Обозначив эти отношения как

$$K_{1,2} = U_{cp(Ra=0,13мкм)} / U_{cp(Ra=0,084мкм)},$$

$$K_{1,3} = U_{cp(Ra=0,13мкм)} / U_{cp(Ra=0,048мкм)},$$

$$K_{1,4} = U_{cp(Ra=0,13мкм)} / U_{cp(Ra=0,025мкм)},$$

$$K_{2,3} = U_{cp(Ra=0,084мкм)} / U_{cp(Ra=0,048мкм)},$$

$$K_{2,4} = U_{cp(Ra=0,048мкм)} / U_{cp(Ra=0,025мкм)},$$

$$K_{3,4} = U_{cp(Ra=0,48мкм)} / U_{cp(Ra=0,025мкм)},$$

получим их соответствующие значения: при световом потоке Φ_{0min} $K_{1,2} = 1,54$, $K_{1,3} = 3,81$, $K_{1,4} = 6,65$, $K_{2,3} = 2,44$, $K_{2,4} = 4,32$, $K_{3,4} = 1,72$; при световом потоке $\Phi_{0н}$ $K_{1,2} = 1,59$, $K_{1,3} = 3,82$, $K_{1,4} = 6,59$, $K_{2,3} = 2,41$, $K_{2,4} = 4,1$ и $K_{3,4} = 1,7$; при световом потоке Φ_{0max} $K_{1,2} = 1,61$, $K_{1,3} = 3,85$, $K_{1,4} = 6,24$, $K_{2,3} = 2,38$, $K_{2,4} = 3,95$, и $K_{3,4} = 1,68$. Полученные значения указанных отношений позволяют обоснованно утверждать, что функция влияния неустойчивости опорного

светового потока и, соответственно, дополнительная погрешность, вызываемая действием данного оптического фактора, имеют мультипликативный характер. При этом ошибки в определении высотных параметров исследуемого микрорельефа могут достигать ~10 % при изменении мощности светового потока в рабочих пределах. Далее были выполнены исследования влияния изменений угла падения светового потока в пределах от 10° до 80° на результат измерения U_{cp} , которые также показали мультипликативный характер функции влияния. Ошибки от изменения угла падения светового потока в указанном диапазоне приводят к ошибкам в определении высотных параметров микрорельефа до 30 %. Таким образом, проведенными исследованиями было установлено, что мультипликативная функция влияния носит двумерный характер $f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$.

Для устранения негативного влияния $f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$ на результаты измерения высотных параметров микрорельефов был выполнен анализ структурных методов, используемых для компенсации погрешностей измерения [8]. Анализ показал перспективность использования логометрического метода. Однако логометрирование предусматривает введение в состав измерительной системы (ИС) дополнительного осветительного канала, второй ПЗС-матрицы и эталонного микрорельефа, что существенно усложняет ИС. В работе предложен математический метод коррекции дополнительной погрешности на основе использования отношения двух функционалов

$$G_1(U_{zi}(X_{\mu i})) / G_2(U_{zi}(X_{\mu i})), \quad i = 1, \dots, r, \quad (1)$$

в котором одинаковые мультипликативные компоненты числителя и знаменателя $f_{вл} = f(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$ сокращаются. В этом соотношении U_{zi} означает i -й выход ПЗС-матрицы, а $X_{\mu i}$ – i -й элемент поверхности микрорельефа. Реализация отношения (1) не ведет к увеличению габаритов ИС, так как в функционалах будет использован один и тот же набор величин U_{zi} . Сущность же метода определения параметров исследуемого микрорельефа заключается в сравнении изображения микрорельефа исследуемой поверхности с изображениями микрорельефов эталонных поверхностей, для которых заранее определены параметры шероховатости по стандартным методикам, например, с помощью профилометра. В результате сравнения с заданной вероятностью определяется соответствие изображения микрорельефа эталонной поверхности изображению микрорельефа исследуемой

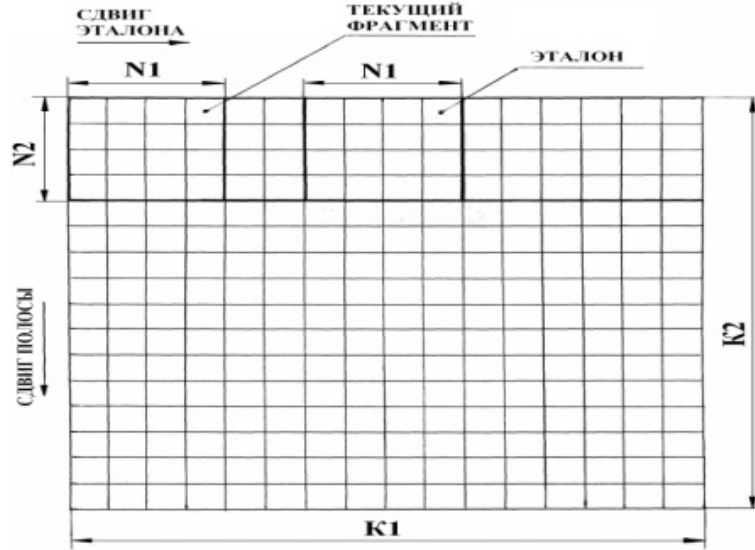


Рис. 4. Схема формирования и перемещения эталона
Fig. 4. Scheme of formation and movement of the standard

дуемой поверхности. Для определения критерия сравнения был выполнен анализ известных цифровых методов обработки изображений [9; 10]. Установлено, что для такого критерия может быть использован отклик согласованного с сигналом двумерного пространственного фильтра

$$y(n_1, n_2) = \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} u(k_1, k_2) \times x[k_1 - (n_1 - n_{01}), k_2 - (n_2 - n_{02})], \quad (2)$$

который представляет собой двумерную свертку сигнала $u(k_1, k_2)$ и импульсной характеристики фильтра $x[k_1 - (n_1 - n_{01}), k_2 - (n_2 - n_{02})]$. При этом выходной сигнал фильтра $y(n_1, n_2)$ будет пропорционален автокорреляционной функции двумерного входного сигнала и будет достигнуто максимальное отношение сигнала к помехе на выходе фильтра. Для вычисления автокорреляционной функции был разработан метод обработки изображения анализируемой поверхности, представленный на рис. 4.

В исходном полутоновом кадре формата $K_1 \times K_2$ пикселей, начиная с первой строки, выделяется полоса шириной в N_2 пикселей. По центру этой полосы задается эталон размером $N_1 \times N_2$ пикселей. Затем эталон, начиная с крайней левой позиции, перемещается по выделенной полосе с шагом в 1 пиксель. При каждом совмещении эталона $u(n_1, n_2)$ и текущего фрагмента полутонового изображения $x(n_1, n_2)$ подсчитывается коэффициент корреляции по известной формуле [9; 10]

$$r_{xy}(k_1, k_2) = \quad (3)$$

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

где (n_1, n_2) – индексы элементов в окне эталона; (k_1, k_2) – координаты эталона внутри зоны поиска $K_1 \times K_2$, а σ_1 и σ_2 – средние квадратические отклонения величин $u(n_1, n_2)$ и $x(n_1, n_2)$ от их математических ожиданий m_u и m_x соответственно. После вычисления коэффициентов корреляции в первой полосе задается следующая полоса того же формата, что и предыдущая, но смещенная вниз на один пиксель. В этой полосе по центру задается новый эталон с теми же размерами, что и предыдущий, и выполняются те же самые действия и т. д. После обработки всего изображения в запоминающем устройстве будет сформирована матрица $M_1 \times M_2$ коэффициентов корреляции или двумерная автокорреляционная функция. Анализируя выражение (3), можно отметить, что его числитель и знаменатель будут подвержены мультипликативному воздействию функции влияния $f_{\text{вл}} = f(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$:

$$r_{x,y}(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \times (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x) f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) / [\sigma_1 f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \sigma_2 f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)]. \quad (4)$$

Как видно из приведенного выражения (4), его структура соответствует структуре выражения (1) и функции влияния сокращаются. Следовательно, функция (3) обладает искомым компенсационным

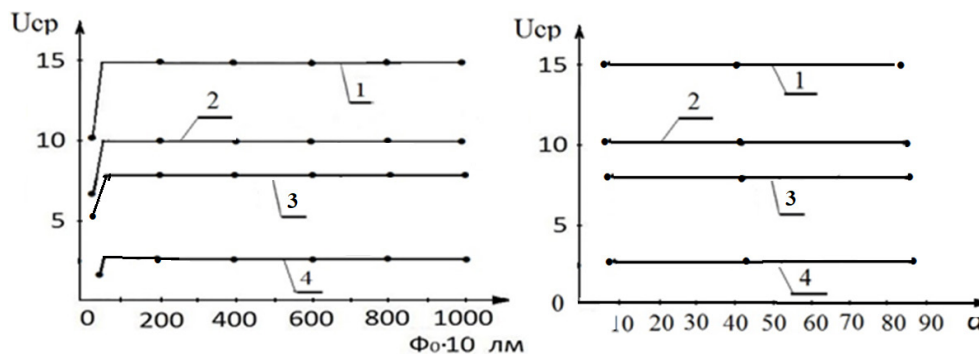


Рис. 5. Зависимость средней амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции от мощности опорного светового потока Φ_0 и угла его падения на исследуемую поверхность: 1 – $Ra = 0,13 \text{ мкм}$; 2 – $Ra = 0,084 \text{ мкм}$; 3 – $Ra = 0,048 \text{ мкм}$; 4 – $Ra = 0,025 \text{ мкм}$

Fig. 5. Dependence of the average amplitude of the variable component of the autocorrelation function on the power of the reference light flux Φ_0 and the angle of its incidence on the surface under study: 1 – $Ra = 0,13 \text{ }\mu\text{m}$; 2 – $Ra = 0,084 \text{ }\mu\text{m}$; 3 – $Ra = 0,048 \text{ }\mu\text{m}$; 4 – $Ra = 0,025 \text{ }\mu\text{m}$

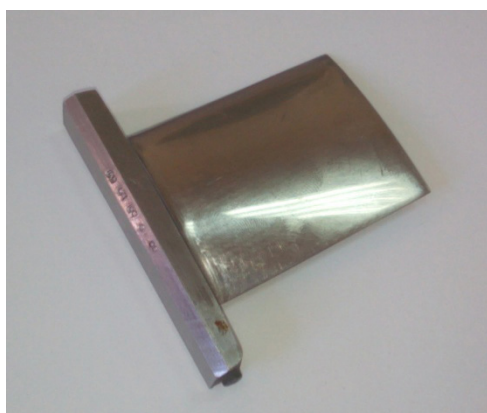


Рис. 6. Лопатка 12-й ступени компрессора: ГТД
Fig. 6. Compressor Stage 12 Blade: GTE

свойством для устранения дополнительной погрешности, возникающей при оценке параметров микрорельефа по видеосигналу. Для подтверждения полученного теоретического положения о компенсации функции влияния математическими методами были выполнены исследования влияния изменений мощности светового потока и угла его падения на переменную составляющую корреляционной функции. Результаты исследований для эталона с форматом 64×64 пикселя приведены на рис. 5.

Как видно из приведенных данных, значение амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции остается постоянным при изменении мощности светового потока и угла его падения на исследуемую поверхность в исследуемых диапазонах их изменений. Для зависимости $Ra = f(U_{cp})$ методом наименьших квадратов было определено аналитическое выражение в виде

$$Ra = 0,0069U_{cp} + 0,0014 \text{ мкм.} \quad (5)$$

Таким образом, приведенные результаты исследований подтверждают выдвинутые теоре-

тические выводы о компенсации негативного воздействия функции влияния на определение параметров микрорельефа исследуемой поверхности при использовании рассмотренной выше корреляционной обработки его изображения.

3. Применение корреляционного метода к промышленным изделиям

Рассмотренный корреляционный метод оценки структур микрорельефов был применен для измерения шероховатости по параметру Ra полированных поверхностей пера лопаток 12-й ступени компрессора газотурбинного двигателя (ГТД). Внешний вид лопатки приведен на рис. 6.

Обработка результатов эксперимента показала, что значения U_{cp} автокорреляционной функции, вычисленное по 30 изображениям, снятым с разных участков поверхности спинки лопатки, изменялось в пределах $U_{cp} = 10,1 \dots 14,7$ отн. единиц. Подстановка найденных значений U_{cp} в формулу (5) определила, что в этом случае значение параметра Ra исследуемой поверхности лопатки изменяется в пределах $Ra = 0,07 \dots 0,1 \text{ мкм}$, что отвечает техническим требованиям, предъявляемым к качеству данной поверхности.

Заключение

В статье рассмотрен оптико-электронный метод определения параметров шероховатости микрорельефов механически обработанных поверхностей, формируемых операциями шлифования и полирования. Метод основан на цифровой обработке полутоновых изображений исследуемых микрорельефов, полученных обычными портативными видеокамерами. Сама обработка заклю-

чалась в вычислении двумерной корреляционной функции, которая характеризует индивидуальные особенности исследуемого микрорельефа и определяет функциональную зависимость параметра Ra от средней амплитуды переменной составля-

ющей этой функции $U_{\text{ср}}$. Для этой зависимости методом наименьших квадратов получено аналитическое выражение, которое было использовано при определении параметра Ra для различных участков поверхности лопатки компрессора ГТД.

Список литературы

1. Государственная программа Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». 29 марта 2019 г. Москва, 2019.
2. Основные направления экономического и социального развития Российской Федерации на период до 2020 гг. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1662-р. Москва, 2008. URL: <http://government.ru/docs/all/66158/>
3. 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
4. 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 (88). С. 3–13. DOI: https://doi.org/10.30987/article_5bb4b1f9abbc54.46761484
5. ГОСТ Р ИСО4287-2014 [5]. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2015. 18 с.
6. Петрешин Д.И. Применение лазерного оптического датчика для измерения высотных параметров шероховатости поверхности деталей машин в самообучающейся адаптивной технологической системе // Контроль. Диагностика. 2009. № 11. С. 53–57. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13602400>
7. Макеев А.В. Об оптических методах контроля шероховатости поверхности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 5, № 1. С. 147–151. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26211489>
8. Измерение электрических и неэлектрических величин / Н.Н. Евтихеев [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1990. 552 с.
9. Даджон Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. М.: Мир, 1988. 488 с.
10. Pratt W.K. Correlation techniques of image registration // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1974. Vol. AES-10, no. 3. P. 353–358. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307828>
11. Коломиец Л.В., Поникарова Н.Ю. Метод наименьших квадратов. Самара: Самарский университет, 2017. 32 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48223242>

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, оптико-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>

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2025, vol. 28, no. 2, pp. 49–57

DOI [10.18469/1810-3189.2025.28.2.49-57](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.2.49-57)

UDC 621.397

Original Research

Received 5 April 2025

Accepted 5 May 2025

Published 30 June 2025

Correlation method of processing the image of the surface microrelief to determine its roughness

Alexey D. Abramov¹ , Dmitry S. Klyuev² 

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya Street,
443100, Samara, Russia² Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, L. Tolstoy Street,
Samara, 443010, Russia

Abstract – Background. The analysis of the results of the use of various machines and mechanisms in the national economy has shown that the roughness of the microrelief of their working surfaces largely determines the reliability and durability of their operation. In this regard, the study and development of modern new methods for measuring the roughness of a microrelief is an urgent task at present. **Aim.** The purpose of the work is to study and develop an optoelectronic method, algorithms and software for digital processing of images of microreliefs of the surfaces under study to measure their roughness directly during the technological process of their manufacture. **Methods.** The method is based on computer processing of images of the studied microreliefs, as a result of which the roughness parameters of these microreliefs are determined. For this purpose, two-dimensional correlation functions are calculated for halftone images of microreliefs of reference samples, with certain GOST methods and roughness parameters. For these functions, the average amplitudes U_{cp} of the variable components of the correlation coefficients are calculated and the analytical dependence of the GOST roughness parameter Ra on U_{cp} is constructed. To depict the studied microrelief with unknown roughness parameters, the variable component of the two-dimensional correlation function is also determined, and the arithmetic mean deviation of the profile from the middle line Ra is found based on the obtained dependence $Ra = f(U_{cp})$. **Results.** A new optoelectronic method for measuring the roughness parameters of microreliefs of machined surfaces is proposed, which is based on digital processing of their halftone images. As a result of such processing, a two-dimensional correlation function is calculated, the parameters of which serve to identify the studied microrelief and, thereby, to measure its roughness. The results of using this method to measure the surface roughness parameters of the compressor blade of a gas turbine engine 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 a two-dimensional correlation function has been developed, which characterizes the microrelief under study and by the characteristics of which it is possible to identify it, that is, to measure its roughness. At the same time, the negative influence of side uninformative factors on the results of measuring the parameters of the microrelief, in particular, fluctuations in the power of the light flux and the angle of its incidence on the surface under study, is also eliminated. The results of the application of the developed optoelectronic method for measuring the roughness parameters of the surface areas of the compressor blade of a gas turbine engine, which are identical to the results of measuring their roughness by GOST profile methods, are presented.

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

✉ abraleks@bk.ru (Alexey D. Abramov)

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

References

1. State Program of the Russian Federation «Scientific and Technological Development of the Russian Federation». March 29, 2019. Moscow, 2019. (In Russ.)
2. The main directions of the economic and social development of the Russian Federation for the period until 2020. Approved by order of the Government of the Russian Federation of November 17, 2008 No. 1662-r. Moscow, 2008, url: <http://government.ru/docs/all/66158/>. (In Russ.)
3. V. P. Fedorov, A. G. Suslov, and M. N. Nagorkin, "Engineering methods for technological support of regulated roughness parameters of machinery operation surfaces during machining," *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, no. 4 (94), pp. 40–48, 2019, doi: https://doi.org/10.30987/article_5c90a59824edf6.80759568. (In Russ.)
4. A. G. Suslov et al., "Complex approach to experimental investigations of metal-working technological systems to ensure parameters of quality and operation properties of machinery surfaces," *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, no. 10 (88), pp. 3–13, 2018, doi: https://doi.org/10.30987/article_5bb4b1f9abb54.46761484. (In Russ.)
5. GOST R ISO4287-2014 [5]. Geometrical Product Specifications (GPS). Surface structure. Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters. Introduction 01.01.2014. Moscow: Standartinform, 2015. (In Russ.)
6. D. I. Petreshin, "Application of a laser optical sensor control for measurement of high-altitude parameters of machines details surface roughness in self-learning adaptive technological system," *Kontrol'. Diagnostika*, no. 11, pp. 53–57, 2009, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13602400>. (In Russ.)
7. A. V. Makeev, "Optical methods for control of surface microgeometry," *Interekspo Geo-Sibir'*, vol. 5, no. 1, pp. 147–151, 2016, url: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26211489>. (In Russ.)
8. N. N. Evtikheev et al., *Measurement of Electrical and Non-Electrical Values*. Moscow: Energoatomizdat, 1990. (In Russ.)
9. D. Dudgeon and R. Mersereau, *Multidimensional Digital Signal Processing*, English translation. Moscow: Mir, 1988. (In Russ.)
10. W. K. Pratt, "Correlation techniques of image registration," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, no. 3, pp. 353–358, 1974, doi: <https://doi.org/10.1109/TAES.1974.307828>.
11. 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

Dmitry 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>