

УДК 621.002:658.011:681.3

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ

© 2023 Д.В. Люшня, Н.В. Носов

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 10.08.2023

В статье показано, что для определения параметров структуры поверхности необходимо применение оптических методов исследования. Разработан оптико-электронный комплекс, который позволяет определять амплитуду и средний шаг корреляционной поверхности в зависимости от режимов и условий дробеструйной обработки. Предложена методика измерения и программный комплекс по определению параметров структуры поверхности. Проведена идентификация структурных параметров с параметрами шероховатости сложных поверхностей.

Ключевые слова: структура, микрорельеф, сложная поверхность, цифровое изображение, корреляционная обработка, идентификация, шероховатости сложных поверхностей.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-278-286

EDN: ORUCBG

Структурный анализ поверхности занимает важное место в оценке качества поверхности деталей машин. Основой в оценке структуры лежит компьютерная обработка изображений различной природы. Широкое применение компьютерных методов структурного анализа нашли в материаловедении, медицине, криминалистике, при обработке изображений земной поверхности, полученных из космоса и аэрофотосъёмкой, а также в ряде других областей человеческой деятельности. К основным задачам структурного анализа относятся: выбор и формирование признаков, описывающих структурные различия; выделение и сегментация структур; классификация структур; идентификация структур. Установлено, что в настоящее время не существует чёткого математического определения понятия структуры. В связи с этим методы описания структур и их различия, как правило, разрабатываются эвристически отдельно для каждого конкретного случая. В работах [1-3] и ряде зарубежных отечественных авторов представлены различные подходы к математическому описанию структур и методам их идентификации.

Для аналитического описания структур применяется ряд математических моделей. Среди них известны Time-series модель, ячеистая модель, синтаксические структурные модели, двумерная модель случайного марковского поля. Эти модели обычно применяются для воспроизводства внешнего вида структуры.

Для описания структуры изображения и её количественной оценки достаточно часто применяется метод, основанный на измерении пространственной частоты.

Системный анализ показал, что с точки зрения минимизации временных затрат при их реализации наиболее перспективным является использование метода измерения пространственных частот микрорельефа поверхностей. К группе частотных методов относится и метод цифровых преобразований, при котором в качестве характеристики структуры используется количество перепадов яркости на единицу площади изображения.

В нашей работе применен метод описания структуры с помощью автокорреляционной функции. Развитие данного метода связано с решением задач распознавания микрорельефов механически обработанных сложных поверхностей непосредственно в производственных условиях.

Многочисленными исследованиями установлено существенное, а в некоторых случаях и определяющее воздействие структуры рабочих поверхностей деталей взлетно-посадочных устройств на их надёжность и долговечность при эксплуатации [4-6].

В работе был применен оптико-электронный метод исследования, основанный на разработке теоретических основ реализации нового метода идентификации микронеровностей поверхности деталей. Сущность разработанного метода заключается в сравнении изображения структуры анализируемой поверхности с изображениями структур эталонных поверхностей, для которых заранее определены параметры шероховатости по стандартным методикам, например с помощью профилографа. В результате сравнения определяется (с заданной вероятностью) соответствие изображения структуры образцовой поверхности изображению структуры исследуемой поверхности. На основе этого ана-

Люшня Д.В., аспирант.

Носов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: nosov.nv@samgtu.ru

лиза было установлено, что поставленная задача может быть решена с использованием метода согласованной фильтрации. В работе было принято предположение, что входное изображение исследуемой поверхности $x(n_1, n_2)$ обрабатывается линейной дискретной системой. В этом случае задача идентификации двумерного сигнала определённой формы решается с помощью согласованного с сигналом двумерного пространственного фильтра, отклик которого описывается выражением

$$y(n_1, n_2) = \sum_{k_1=-\infty}^{\infty} \sum_{k_2=-\infty}^{\infty} u(k_1, k_2) x[k_1 - (n_1 - n_{01}), k_2 - (n_2 - n_{02})], \quad (1)$$

которое представляет собой двумерную свёртку 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 импульсная характеристика фильтра получается из ожидаемого двумерного сигнала путём его зеркального отражения относительно координатных осей n_1 и n_2 , и смещения отражённого сигнала в сторону исходного на n_{01}, n_{02} отсчётов. Выходной сигнал $y(n_1, n_2)$ будет пропорционален автокорреляционной функции двумерного входного сигнала и будет достигнуто максимальное отношение сигнала к помехе на выходе фильтра. Разработан метод обработки изображения анализируемой поверхности для получения автокорреляционной функции, представленный на рисунке 1.

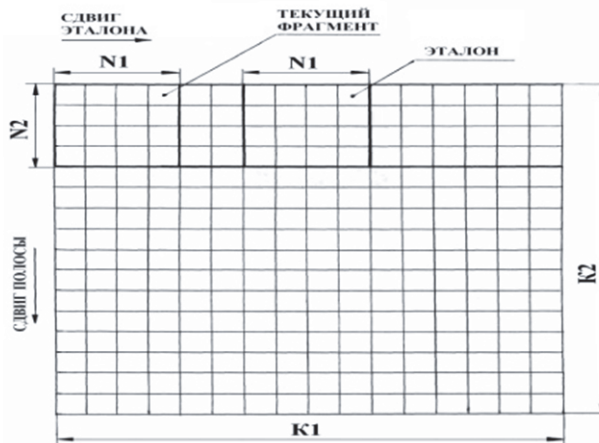


Рис. 1. Схема перемещения эталона

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 задаётся 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 [6].

$$r_{xy}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) \cdot (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}, \quad (2)$$

где (n_1, n_2) – индексы элементов эталонного окна, (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. Закончив вычисление коэффициентов корреляции в первой полосе, задаётся следующая полоса того же формата, что и предыдущая, но смещённая вниз на один пиксель. В этой полосе по центру задаётся 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 (2), можно отметить, что его числитель и знаменатель представляют из себя суммы произведений сигналов $x(n_1, n_2)$ и $u(n_1, n_2)$. Следовательно, эти сигналы будут подвержены мультипликативному воздействию функции влияния $f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$.

$$r_{uv}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) \cdot f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \cdot (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x) \cdot f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)}{\sigma_1 \cdot f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \cdot \sigma_2 \cdot f_{вл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)}. \quad (3)$$

Как видно из приведённого выражения, его структура соответствует структуре выражения (1) и функции влияния сокращаются. Следовательно, функцию (3) можно рассматривать как частный случай отношения (1) и утверждать, что она обладает искомым компенсационным свойством для устранения дополнительной погрешности, возникающей при оценке параметров микрорельефа непосредственно по видеосигналу, не требуя при этом введения дополнительной аппаратуры.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследований поверхности деталей взлетно-посадочных устройств был разработан переносной оптико-электронный комплекс для бесконтактного контроля геометрии, размеров и качества поверхности различных деталей в режиме 2D, представленный на рис.2. Комплекс обеспечен ноутбуком (персональным компьютером), для которого в процес-

се исследования разрабатывались специальные алгоритмы и программы. В качестве видеокамеры использовалась камера DIGITAL CAMERA Computar ZC-F11CH3, на выходе которой формировались чёрно-белые изображения заданного формата.

Мощность светового потока, падающего на исследуемую поверхность, в проведённых исследованиях изменялась варьированием напряжения питания лампы накаливания мощностью $P = 60 \text{ Вт}$ и $U = 36 \text{ В}$. Питание подавалось от стабилизированного источника постоянного напряжения. Измерение освещённости исследуемой поверхности производилось люксметром марки 1016М, который располагался перпендикулярно падающему световому потоку. При этом площадь светового пятна на поверхности люксметра составляла $S = 0,00126 \text{ м}^2$. Мощность светового потока Φ (в люменах) определялась с помощью известного соотношения $\Phi = E \cdot S$, где E – освещённость, измеряемая в люксах.

Исследования структуры поверхности производилось после дробеструйной обработки деталей из титанового сплава ВТ8 на станках с ЧПУ. Деталь может не сниматься со станка или находиться рядом на столике, переносная видеокамера устанавливается на магнитной опоре над измеряемой поверхностью. Видеокамера передает цифровой сигнал в программный комплекс, который обрабатывает полученный сигнал определяя основные параметры структуры поверхности: среднюю амплитуду автокорреляционной функции A_{cp} , средний шаг автокорреляционной функции T_{cp} и их ошибки. Для сравнения результатов измерения структуры оптическим комплексом, изготавливались образцы – свидетели, которые обрабатывались на станке с ЧПУ с различными режимами дробеструйной обработки.

Затем на образцах-свидетелях определялись стандартные параметры шероховатости поверхности на профилографе модели SJ - 201P.. Найденные значения среднеарифметического отклонения профиля представляют собой средние значения, вычисленные по 10 измерениям для каждого образца. Затем определялись структурные параметры с помощью оптико-электронной системы. Анализируемая поверхность эталонных образцов имела размер $3 \times 2,5 \text{ мм}$, что соответствовало от 800 до 1000 профилей. Световой поток мощностью $600 \cdot 10^{-3} \text{ лм}$ падал на исследуемую поверхность под углом 45° . Формат видеокadra, записываемого в память компьютера, составлял 320×240 пикселей.

На рисунке 3 показана последовательность определения структурных параметров поверхности в следующем порядке: на реальной поверхности выделялся анализируемый участок (рис. 3а), затем, применяя разработанную методику, преобразуем реальную поверхность в бинарное изображение (рис. 3б), применяя сканирующую методику движения эталона получаем реальную корреляционную поверхность (рис. 3в) и ее бинарное поле (рис. 3г). Производится статистический анализ полученных результатов, и определяются параметры структуры поверхности.

Программа построена таким образом, что можно построить корреляционный профиль (рис. 4), который чем-то напоминает профилограмму поверхности.

На структурные параметры поверхности оказывает большое влияние скорость дробы в факеле дробеструйной обработки. На рис. 5 показана методика определения структурных параметров поверхности при $V_{ш} = 70 \text{ м/с}$

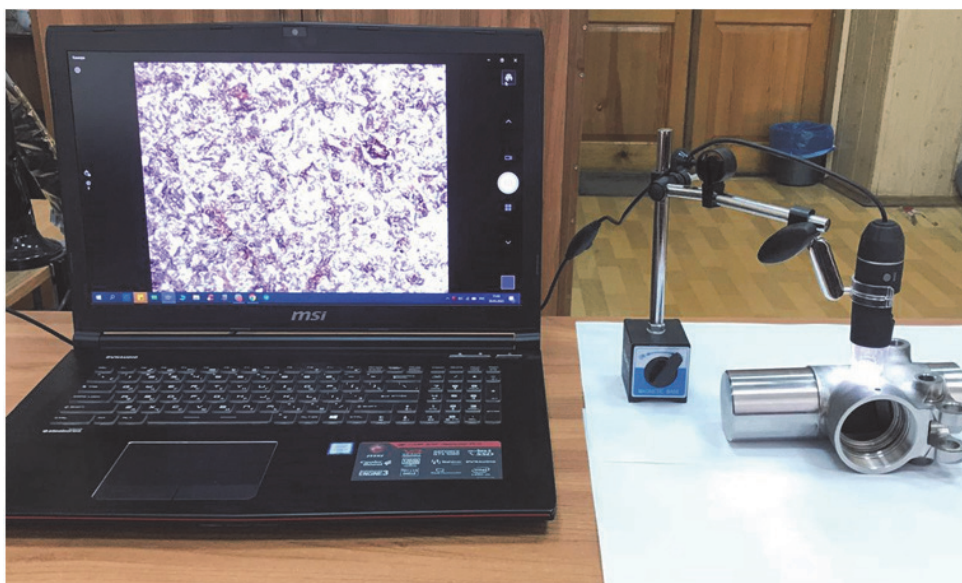


Рис. 2. Оптико-электронный комплекс для измерения параметров структуры сложных поверхностей деталей взлетно-посадочных устройств

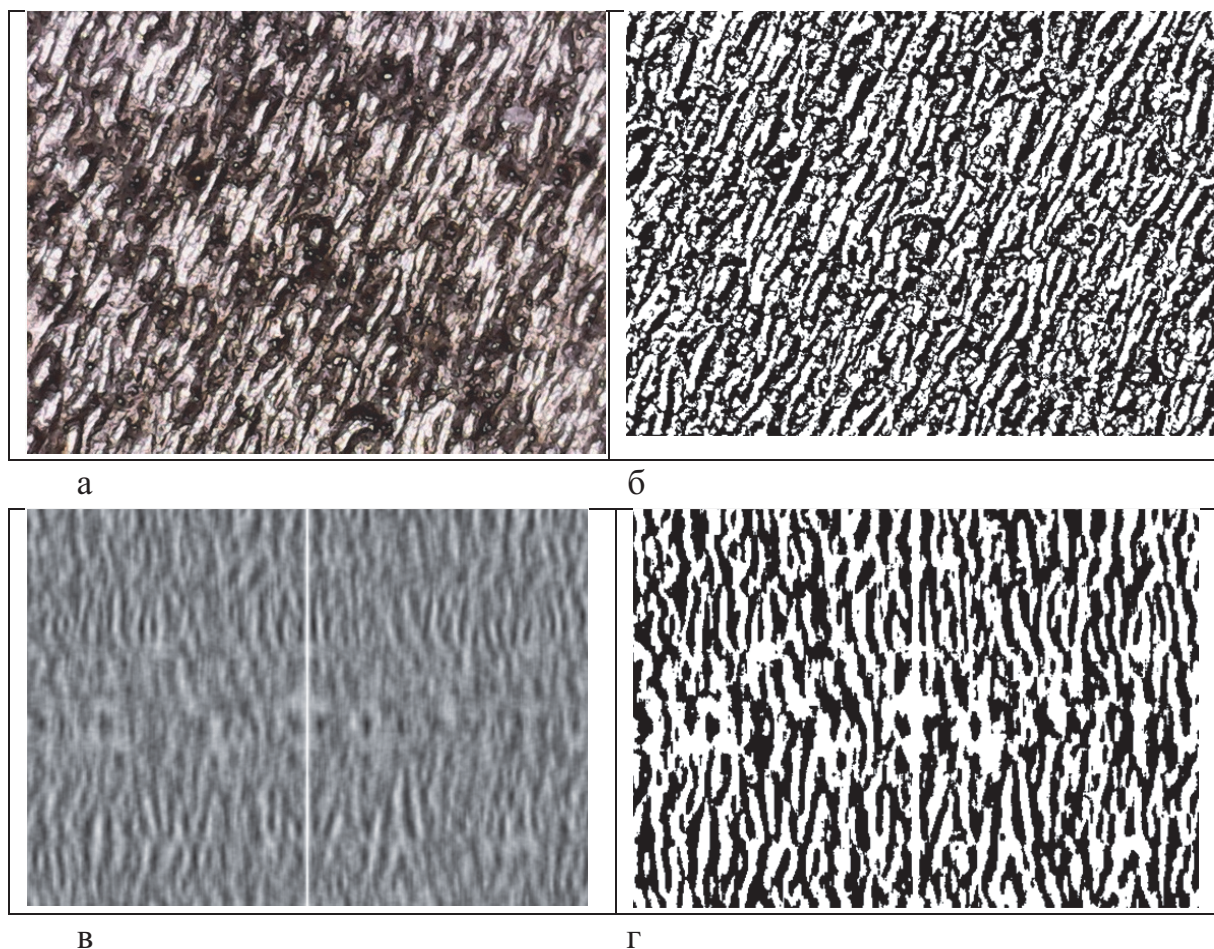


Рис. 3. Параметры структуры поверхности образца – свидетеля обработанного дробью диаметром 0,6 мм с режимами: скорость движения шариков в факеле $V_{ш} = 60$ м/с, время обработки $\tau = 5-20$ мин, а – электронная фотография, б – бинарное изображение, в – корреляционное изображение, г – бинарное корреляционное изображение

На рис. 6 показаны корреляграммы поверхности образцов обработанных дробью.

В этом случае можно предложить следующий общий алгоритм оценки микрогеометрии по параметрам структуры.

1. Для измеряемой шероховатости промышленного изделия изготавливаются по той же самой технологии образцы- свидетели поверхности с различной шероховатостью, определяемой стандартными, ГОСТовскими методами с помощью образцового средства измерения.

2. С помощью оптико-электронного измерительного средства формируются изображения образцовых поверхностей полученных поверхностей, по ним вычисляются корреляционные функции и строится аналитическая зависимость $Ra = f(A_{cp}), Ra = f(T_{cp})$

4. Для заданной вероятности распознавания строится доверительный интервал $I_{\beta} = f(A_{cp}), I_{\beta} = f(T_{cp})$, в который попадает случайная величина A_{cp} и T_{cp} .

5. Для анализируемой поверхности с неизвестной шероховатостью, сформированной по той же самой технологии, с помощью

оптико-электронного измерительного средства формируется изображение поверхности и определяется A_{cp} и T_{cp} корреляционной функции.

6. Используя полученные зависимости $Ra = f(A_{cp})$ и $I_{\beta} = f(A_{cp})$, $Ra = f(T_{cp})$ и $I_{\beta} = f(T_{cp})$ определяются Ra, Ra_{min}, Ra_{max} .

По результатам структурного анализа эталонов шероховатости поверхности после дробеструйной обработки получены зависимости по влиянию параметров структуры A_{cp} и T_{cp} на параметр Ra поверхности. Отмеченное обстоятельство объясняется возрастающим влиянием регулярной компоненты в формировании микрорельефа исследуемых поверхностей.

Полученные зависимости $Ra = f(A_{cp})$ могут быть аналитически представлены выражениями вида $Ra = K \cdot A_{cp} - B$.

В частности, для проведенных исследований по дробеструйной обработке аналитическое выражение будет иметь вид:

$$Ra = 0,12 \cdot A_{cp} - 1,4, \text{ мкм}; \quad (4)$$

$$Rz = T_{cp}^2 / 8 \cdot r_{ш} \text{ мкм}. \quad (5)$$

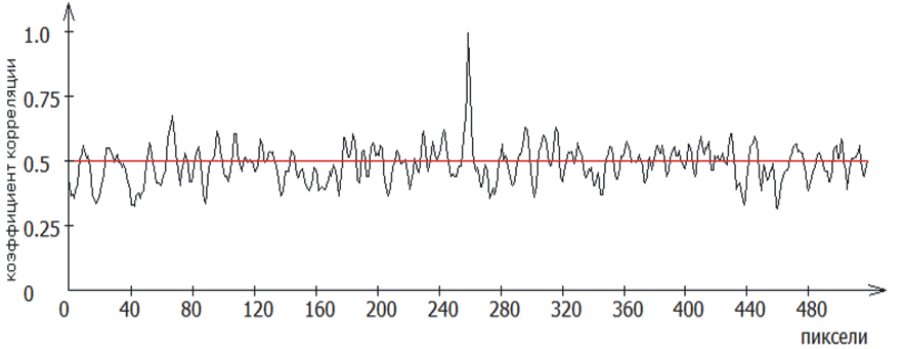
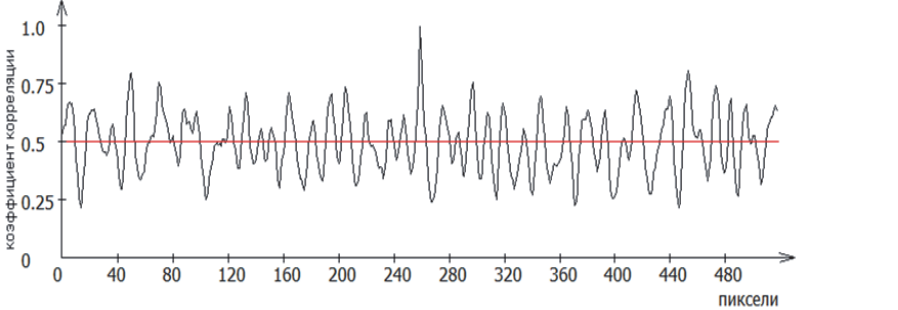
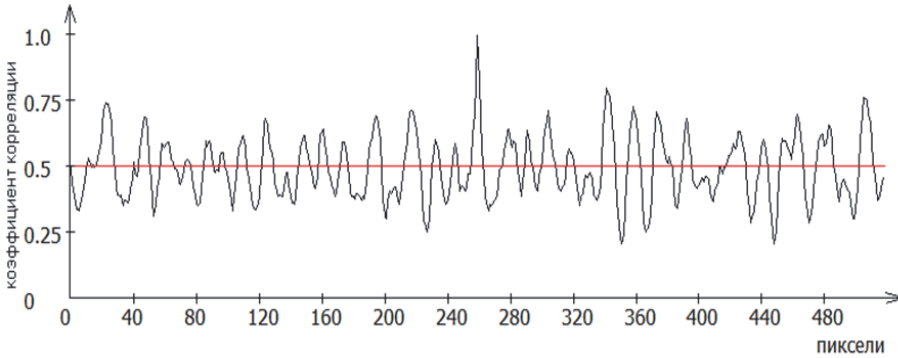
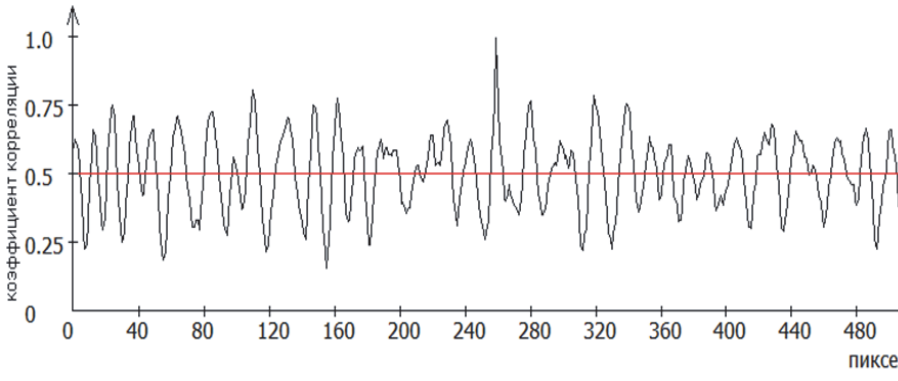
Корреляграммы поверхности	Параметры структуры
	<p>$A_{\text{ср}} = 19,8$ $T_{\text{ср}} = 14,3 \text{ ПК}$ или $T_{\text{ср}} = 71,5 \text{ мкм}$</p>
1	
	<p>$A_{\text{ср}} = 20,5$ $T_{\text{ср}} = 16,7 \text{ ПК}$ или $T_{\text{ср}} = 83,5 \text{ мкм}$</p>
2	
	<p>$A_{\text{ср}} = 22$ $T_{\text{ср}} = 20,8 \text{ ПК}$ или $T_{\text{ср}} = 104 \text{ мкм}$</p>
3	
	<p>$A_{\text{ср}} = 23,2$ $T_{\text{ср}} = 25,0 \text{ ПК}$ или $T_{\text{ср}} = 125 \text{ мкм}$</p>
4	

Рис. 4. Корреляграммы поверхности образцов-свидетелей после дробеструйной обработки шариками $d = 0,6 \text{ мм}$ со скоростью движения шариков в факеле $V_{\text{ш}} = 60 \text{ м/с}$ с режимами $\tau = 20 \text{ мин}$ (1), $\tau = 15 \text{ мин}$ (2), $\tau = 10 \text{ мин}$ (3), $\tau = 5 \text{ мин}$ (4)

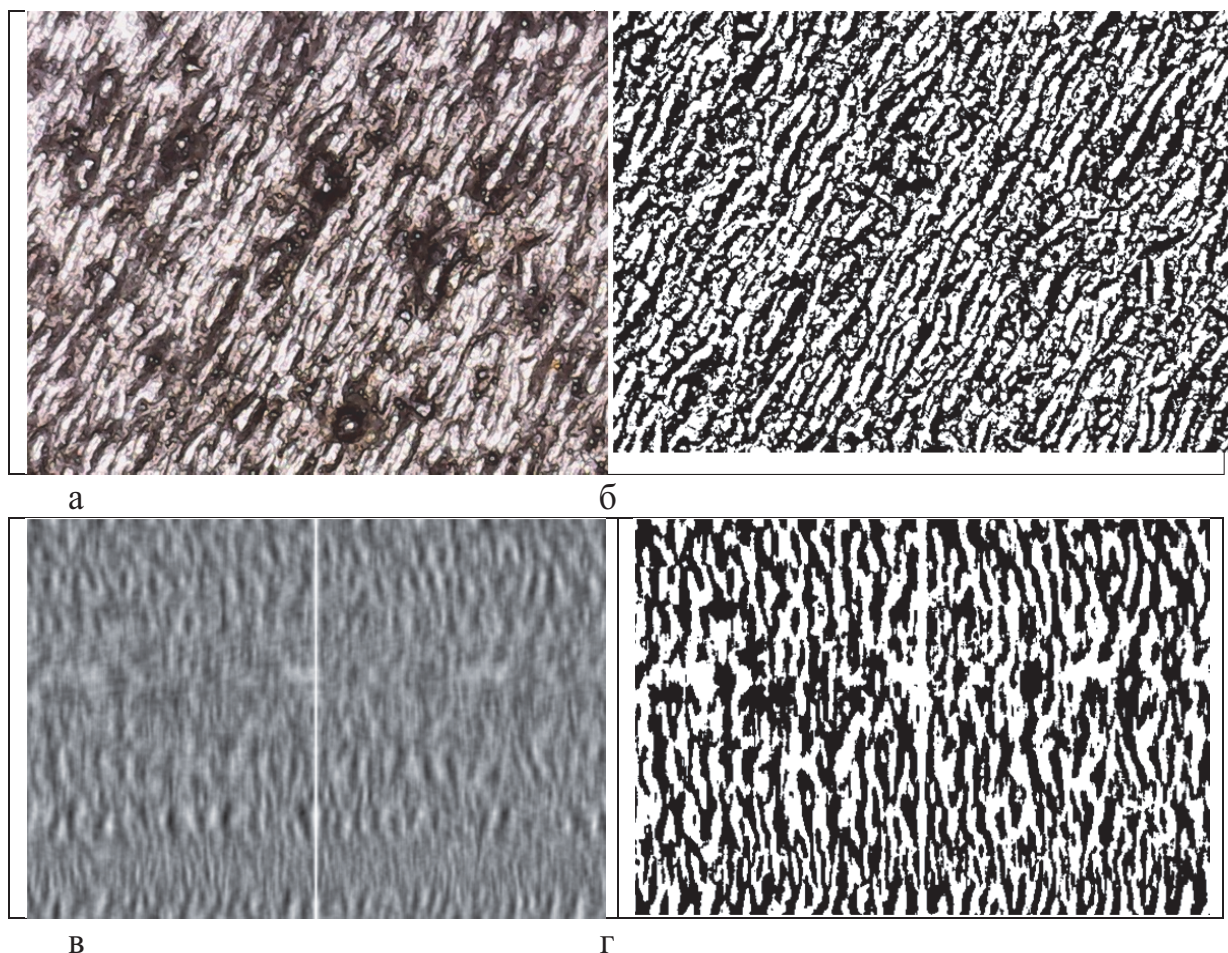


Рис. 5. Параметры структуры поверхности образца – свидетеля обработанного дробью диаметром 0,6 мм с режимами: скорость движения шариков в факеле $V_{ш} = 70$ м/с, время обработки $\tau = 5-20$ мин,
 а – электронная фотография, б – бинарное изображение,
 в – корреляционное изображение, г – бинарное корреляционное изображение

Подставив экспериментальные значения в аналитические зависимости, получим значения R_a , приведенные в табл.1

Для сравнения результатов расчета по формулам 1 и 2. нужно преобразовать параметр R_z

$$в \quad R_a = R_z / 4 \text{ мкм}$$

Анализ полученных зависимостей также показал, что для поверхностей с дробеструйной обработкой наблюдается повышение параметра R_a при увеличении скорости шариков с факеле

Таблица 1. Параметры обработки

Параметры структуры поверхности				
A_{cp}	R_a , мкм	T_{cp} , ПК	T_{cp} , мкм	R_z , мкм
Скорость движения шариков в факеле $V_{ш} = 60$ м/с				
19,8	0,96	14,3	71,5	4,16
22,5	1,3	16,7	83,5	5,68
26,0	1,72	20,8	94,0	7,2
28,2	1,98	22	110,0	9,6
Скорость движения шариков в факеле $V_{ш} = 70$ м/с				
17,8	0,74	11,7	61,4	3,08
19,2	0,91	12,4	68,5	3,84
20,3	1,04	13,5	72,5	4,28
21,4	1,2	16,7	81,5	4,92

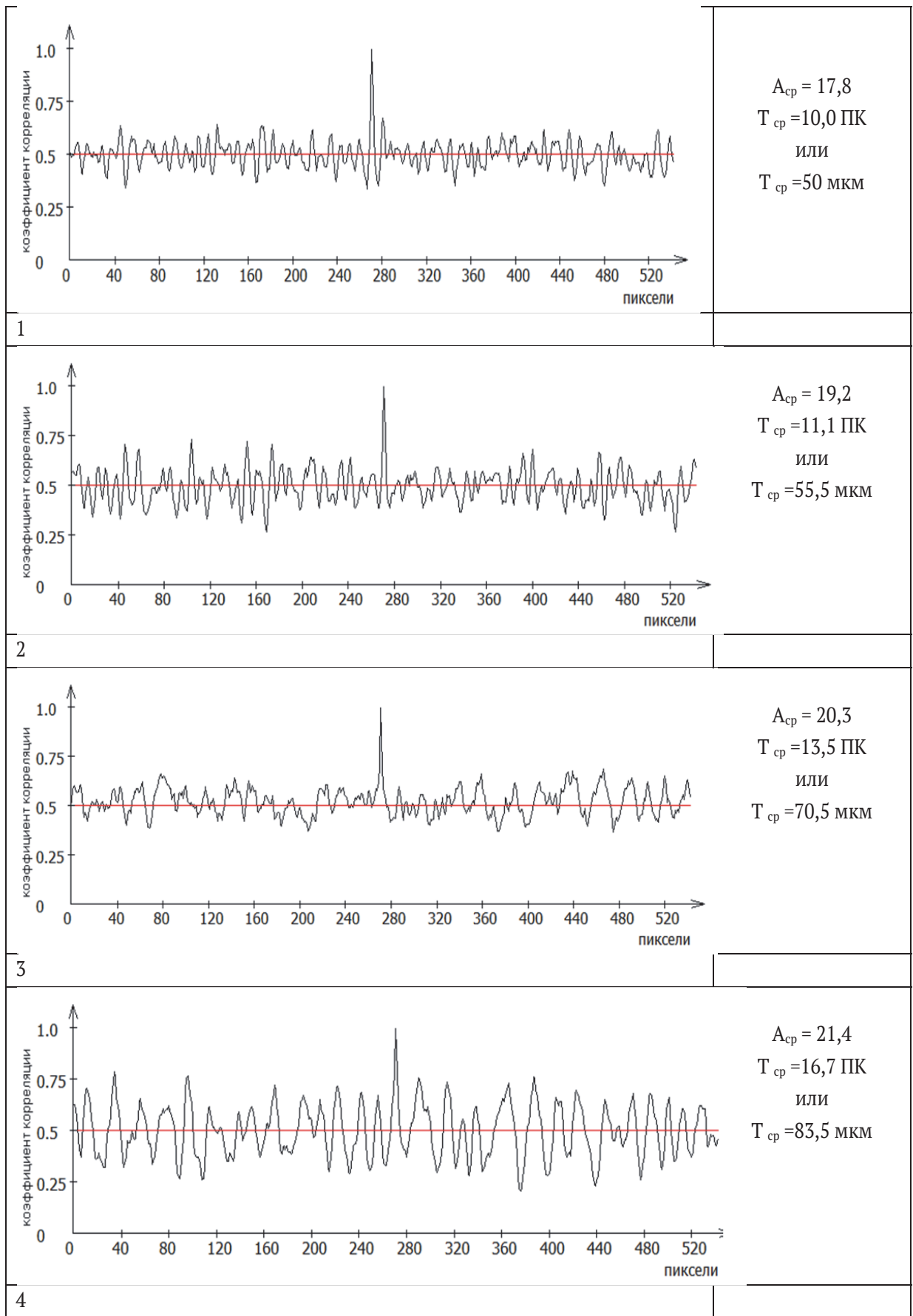


Рис. 6. Коррелялограммы поверхности образцов-свидетелей после дробеструйной обработки шариками $d = 0,6$ мм со скоростью движения шариков в факеле $V_{ш} = 70$ м/с с режимами $\tau = 20$ мин (1), $\tau = 15$ мин (2), $\tau = 10$ мин (3), $\tau = 5$ мин (4)

дробеструйной установке и снижение параметров структуры A_{cp} и T_{cp} при увеличении времени обработки. Отмеченное обстоятельство объясняется возрастающим влиянием регулярной компоненты в формировании микрорельефа исследуемых поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соффер, В.А.* Анализ и распознавание наномасштабных изображений: Традиционные подходы и новые постановки задач / В.А.Соффер, А.В.Куприянов. – 2011. – Т. 35-2. – С. 136-134.
2. *Баврина, А.Е.* Исследование фотограмметрических изображений с помощью матриц вероятностного распределения яркости / А.Ю. Баврина, Н.Ю. Ильясова, А.В. Куприянов, А.Г. Храмов // Компьютерная оптика. – 2002. – № 23. – С. 62-65.
3. *Пластинин, А.И.* Разработка методов формирования цветотекстурных признаков для анализа биомедицинских изображений / А.И. Пластинин, А.В. Куприянов, Н.Ю. Ильясова // Компьютерная оптика. – 2007.- – Т. 31-2. – С. 82-85.
4. *Yajthaus D.* Metrology of surfaces. Principles of industrial methods and devices, 2009, p 472.
5. *Garlock Bearings, Inc.* (1987), «DU SelfLubricating Bearings», Catalog 781C, Thorofare, New Jersey.
6. *Constantinou M.C., Whittaker, A.S., Kalpakidis, Y. et al.* (2007) "Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading", Report MCEER07, State of California Department of Transportation Project 65A0174
7. *Дунин-Барковский, И. В.* Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
8. *Суслов, А.Г.* Назначение, обозначение и контроль параметров шероховатости поверхностей деталей машин / А.Г. Суслов, И.М. Корсакова. – М.: МГИУ, 2010. – 111с.
9. *Линник В.П.* Прибор для интерференционного исследования микропрофиля поверхности "микропрофилометр" / В.П. Линник // Докл. АН СССР. – 1945. – Т. 49. – № 9. – С. 656-657.
10. *Абрамов, А.Д.* Оценка параметров микрорельефа поверхностей деталей машин на основе квазиоптимальных корреляционных алгоритмов / А.Д. Абрамов, Н.В. Носов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2016. – № 9. – С. 19-25.
11. Патент 413179 РФ, МПК G01B 11/30 (2006/01), G01N 21/93(2006/01). Способ контроля шероховатости поверхности изделий / А.Д. Абрамов, А.И. Никитов, Н.В. Носов - № 2009109452; Заявл.16.03.2009; Опубл. 27.09.2010, бюл. № 6.

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF COMPLEX SURFACES OF PARTS AFTER SHOT BLASTING

© 2023 D.V. Lyushnya, N.V. Nosov

Samara State Technical University, Samara, Russia

The article shows that in order to determine the parameters of the surface structure, it is necessary to use optical research methods. An optoelectronic complex has been developed that allows determining the amplitude and average step of the correlation surface depending on the modes and conditions of shot blasting. A measurement technique and a software package for determining the parameters of the surface structure are proposed. The identification of structural parameters with the roughness parameters of complex surfaces was carried out.

Keywords: structure, microrelief, complex surface, digital image, correlation processing, identification, roughness of complex surfaces.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-4(2)-278-286

EDN: ORUCBG

REFERENCES

1. *Sojfer, V.A.* Analiz i raspoznavanie nanomasshtabnyh izobrazhenij: Tradicionnye podhody i novye postanovki zadach / V.A. Sojfer, A.V. Kupriyanov. – 2011. – Т. 35-2. – С. 136-134.
2. *Bavrina, A.E.* Issledovanie fotogrammetricheskikh izobrazhenij s pomoshch'yu matric veroyatnomtnogo raspredeleniya yarkosti / A.Yu. Bavrina, N.Yu. Il'yasova, A.V. Kupriyanov, A.G. Hramov // Komp'ternaya optika. – 2002. – № 23. – С. 62-65.
3. *Plastinin, A.I.* Razrabotka metodov formirovaniya cvetoteksturnyh priznakov dlya analiza biomeditsinskih izobrazhenij / A.I. Plastinin, A.V. Kupriyanov, N.Yu. Il'yasova // Kom'yuternaya optika. – 2007. – Т. 31-2. – С. 82-85.
4. *Yajthaus D.* Metrology of surfaces. Principles of industrial methods and devices, 2009, p 472.
5. *Garlock Bearings, Inc.* (1987), «DU SelfLubricating Bearings», Catalog 781S, Thorofare, New Jersey.
6. *Constantinou M.C., Whittaker, A.S., Kalpakidis, Y. et al.* (2007) "Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading", Report MCEER07, State of California Department of Transportation Project 65A0174
7. *Dunin-Barkovskij, I.V.* Izmereniya i analiz sherohovatosti, volnistosti i nekruglosti poverhnosti / I. V. Dunin-Barkovskij, A.N. Kartashova. – М.: Mashinostroenie, 1978. – 232 s.
8. *Suslov, A.G.* Naznachenie, oboznachenie i kontrol' – 2010. – 111с.

- parametrov sherohovatosti poverhnostej detalej mashin / A.G. Suslov, I.M. Korsakova. – M.: MGIU, 2010. – 111 s.
9. Linnik V.P. Pribor dlya interferencionnogo issledovaniya mikroprofilya poverhnosti \»mikroprofilometr\» / V.P. Linnik // Dokl. AN SSSR. – 1945. – T. 49. – № 9. – S. 656-657.
10. Abramov, A.D. Ocenka parametrov mikrorel'efa poverhnostej detalej mashin na osnove kvazioptimal'nyh korrelyacionnyh algoritmov / A.D. Abramov, N.V. Nosov // Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij. – 2016. – № 9. – S. 19-25.
11. Patent 413179 RF, MPK G01V 11/30 (2006/01), G01N 21/93(2006/01). Sposob kontrolya sherohovatosti poverhnosti izdelij / A.D. Abramov, A.I. Nikonov, N.V. Nosov - № 2009109452; Zayavl.16.03.2009; Opubl. 27.09.2010, byul. № 6.