

Корреляционный метод на основе обработки поверхностных изображений деталей машин

А. Д. Абрамов, А. И. Никонов, С. П. Орлов
Самарский государственный технический университет
esib@samgtu.ru

Аннотация. Метод обработки изображений поверхностей деталей машин оптоэлектронными и компьютерными средствами рассматривается как составная часть технологического процесса изготовления деталей машин с прецизионными поверхностями. Метод основан на корреляционной обработке изображений исследуемых поверхностей и позволяет оценить параметры микрорельефа в условиях производства в реальном времени. Приводятся результаты определения параметров поверхностного микрорельефа для лопаток газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: технология; метод обработки; измерение; микрорельеф; изображение; автокорреляция; квазиоптимальный; алгоритм

I. ВВЕДЕНИЕ

Научно-технологические направления XXI века сочетают в себе различные научно-технологические направления в области машиностроения, в том числе, разработку современной контрольно-измерительной аппаратуры для оценки как параметров самого процесса, так и качества выпускаемой продукции.. Многочисленными исследованиями установлено существенное влияние микрорельефа (шероховатости) поверхностей различных деталей машин и механизмов на их надёжность и долговечность [1–3]. Соответственно, разработка и внедрение эффективных средств контроля параметров шероховатости непосредственно в производственных условиях может значительно повысить надёжности и долговечности выпускаемой продукции. В настоящее время широкое применение в машиностроении находят оптические средства для оценки параметров микрорельефа [4–5]. Однако эти средства, как правило, могут использоваться только в лабораторных условиях и для выборочного контроля.

В работе [5] рассмотрен оптико-электронный метод определения параметров микрорельефа, основанный на компьютерной обработке изображения исследуемой поверхности. При этом был установлен мультипликативный характер дополнительной погрешности измерения, возникающей под воздействием функции влияния $f_{в.л}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$, где $\Delta\Phi$ и $\Delta\alpha$ – отклонения мощности светового потока и угла его падения на исследуемый микрорельеф от номинальных значений. Метод основан на сравнительной корреляционной обработке полутонового изображения исследуемого

микрорельефа и специального набора полутоновых изображений эталонных микрорельефов с известными параметрами шероховатости. Обработка изображений осуществлялась с использованием известного для вычисления двумерной корреляционной функции выражения [6]

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

где через $u = u(n_1, n_2)$ обозначен фрагмент изображения (эталон), который расположен внутри зоны поиска $x(n_1, n_2)$, то есть изображения исследуемого микрорельефа формата $K_1 \times K_2$ пикселей, а 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. Параметр микрорельефа – среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии Ra , определялся с заданной вероятностью из экспериментальной зависимости $Ra = f(U_{CP})$, где U_{CP} – случайное среднее значение переменной составляющей автокорреляционной функции.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применение выражения (1) требует значительного объёма вычислительных операций, что существенно снижает возможности метода для оперативного контроля параметров микрорельефа. Например, время обработки изображения исследуемого микрорельефа размером 320×240 пикселей составляет 447484 мс для ПЭВМ с процессором Intel(R) Core(TM)2CPU 4300 @ 1.80GHz.

Необходимо создать метод исследования микрорельефа сложных поверхностей деталей машин в производственных условиях на основе оптимальных алгоритмов, которые позволят существенно повысить быстродействие оптико-электронного метода оценки параметров микрорельефа.

III. ИЗЛОЖЕНИЕ СУЩЕСТВА РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Для решения поставленной задачи были рассмотрены квазиоптимальные корреляционные алгоритмы, которые нашли широкое применение в корреляционных экстремальных системах навигации беспилотных летательных аппаратов [7–10].

Был исследован алгоритм с парной критериальной функцией, использующий бинарные изображения

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

где $F_{ii}(\Delta)$ – парная критериальная функция приобретает единичное значение при совпадении i -того пикселя в эталонном изображении – ЭИ и фрагменте бинарного текущего изображения – ТИ микрорельефа, N – количество сравниваемых элементов в ЭИ и фрагменте ТИ микрорельефа, $r_{x,y}(k_1, k_2)$ – коэффициент корреляции, представляющий нормализованную сумму совпавших пикселей в ТИ и ЭИ. Схема формирования и перемещения выделенного ЭИ микрорельефа приведена на рис. 1.

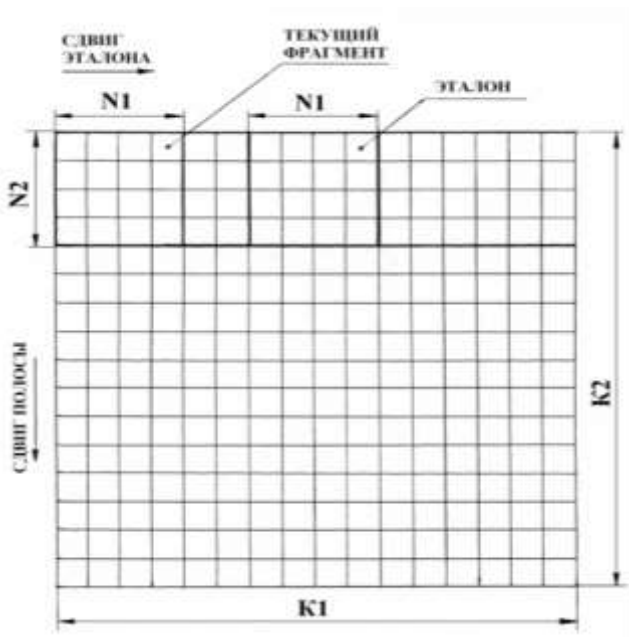


Рис. 1. Схема формирования и перемещения эталона

В изображении с первой строки выделяется полоса шириной N_2 пикселей и по центру этой полосы задаётся эталон размером $N_1 \times N_2$ пикселя. Затем эталон, начиная с крайней левой позиции, перемещается по выделенной полосе с шагом в 1 пиксель. При каждом совмещении эталона и фрагмента ТИ подсчитывается $r_{x,y}(k_1, k_2)$ по формуле (2).

Закончив вычисление $r_{x,y}(k_1, k_2)$ в первой полосе, задаётся следующая полоса того же формата, но смещённая вниз на один пиксель. В этой полосе по центру

задаётся новый эталон с теми же размерами и выполняются те же самые вычисления $r_{x,y}(k_1, k_2)$ и т.д. Так как эталон формируется в самом изображении микрорельефа, коэффициенты $r_{x,y}(k_1, k_2)$ являются коэффициентами автокорреляции. Обработав всё изображение, получим двумерную автокорреляционную функцию. При этом компенсируется и негативное воздействие функции влияния на оценку параметров микрорельефа

$$\Delta B = B_T f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) - B_{\text{Э}} f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) = f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \cdot 0$$

при $B_T = B_{\text{Э}}$.

Кроме того, только в этой точке и наращивается сумма совпавших по значению пикселей эталона $B_{\text{Э}}$ и фрагмента ТИ – B_T , согласно (2).

IV. КОМПЛЕКС АППАРАТУРЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследований о состоянии микрорельефа поверхности (шероховатости) механических изделий был использован цифровой измерительный микроскоп серии Smart Visionc. Микроскоп комплектовался персональным компьютером и видеокамерой DIGITAL CAMERA Computar ZC-F11CH3. Методом шлифования и полирования были изготовлены образцы эталонных поверхностей с различной шероховатостью. Профилографом модели SJ – 201P были определены параметры шероховатости согласно [11]: образец № 1 имел $Ra = 0,13$ мкм, образец № 2 – $Ra = 0,084$ мкм, образец № 3 – $Ra = 0,048$ мкм и образец № 4 – $Ra = 0,025$ мкм. Формат исследуемого изображения микрорельефа поверхности составлял $K_1 \times K_2 = 320 \times 240$ пикселей, который соответствовал анализируемому микрорельефу размером $3 \times 2,5$ мм. Для обработки полутоновых изображений исследуемых микрорельефов были разработаны соответствующие алгоритмы и программы. Диапазон изменения видеосигнала по яркости в полученном изображении составлял 0 – 255 относительных единиц. Бинаризация полутонового изображения проводилась по адаптивному методу [5]. Изображение поверхности разбивалось на квадратные фрагменты (окна 16×16 пикселей) и в каждом окне подсчитывался средний уровень яркости видеосигнала $B_T(x, y)$. В результате сравнения каждого пикселя окна $B_i(x, y)$ с пороговым значением $B_T(x, y)$ ему придавалось новое значение по правилу: $B_i(x, y) = 0\text{FFH}$, если $B_i(x, y) \geq B_T(x, y)$ и $B_i(x, y) = 00\text{H}$, если $B_i(x, y) < B_T(x, y)$. Бинарные изображения исследуемых поверхностей приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что микрорельеф меняется с изменением Ra . Ориентированная текстура для образца с $Ra = 0,13$ мкм трансформируется в текстуру, имеющую случайный характер чередования мелких светлых и тёмных пятен для образца с $Ra = 0,025$ мкм, что связано с изменением соотношений между регулярной и случайной компонент в механической обработки поверхности.

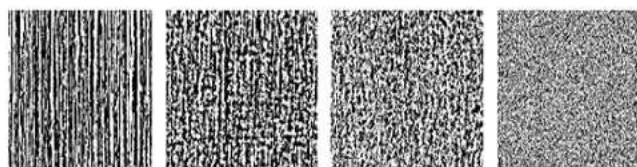
Для бинарных изображений были вычислены автокорреляционной функции по алгоритму (2). Время вычисления при этом составило 480 мс, что на несколько порядков меньше времени (447484 мс), затрачиваемого при использовании (1).

Анализ полученных двумерных автокорреляционных функций показал, что по средней случайной амплитуде U_{CP} переменной составляющей функции $r_{x,y}(k_1, k_2)$ исследуемые микрорельефы существенно отличаются друг от друга. Для зависимости $Ra = f(U_{CP})$ методом наименьших квадратов было определено аналитическое выражение в виде

$$Ra = 0,0065 \times U_{CP} - 0,02 \text{ мкм}, \quad (3)$$

а, для доверительного интервала I_β , отн. ед., куда попадает U_{CP} , выражение

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



$Ra=0,13$ мкм $Ra=0,084$ мкм $Ra=0,043$ мкм $Ra=0,025$ мкм

Рис. 2. Бинарные изображения исследуемых образцов

Среднеквадратическое отклонение оценки (СКО) при определении U_{CP} определялось по формуле [12]

$$\sigma_T = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

На поверхности каждого из вышеуказанных образцов исследовалось 30 изображений. Задавая общеизвестную вероятность распознавания шероховатости исследуемых микрорельефов $P = 0,99$, а также $t_\beta = 2,576$, получим средние квадратичные отклонения, доверительные интервалы и амплитуды переменной составляющей для соответствующей автокорреляционной функции (см. данные в табл. 1).

ТАБЛИЦА I ПАРАМЕТРЫ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

Указание параметров	Значения параметров			
Ra , мкм	0,130	0,084	0,048	0,025
σ_T , мкм	0,240	0,218	0,182	0,055
I_β	0,92	0,63	0,44	0,37
U_{CP}	49,58... ...50,92	40,27... ...41,53	33,46... ...34,34	25,73... ...26,27

Рассмотренный алгоритм и метод определения шероховатости микрорельефа на основе U_{CP} были применены для исследования шероховатости полированных поверхностей пера лопаток 1-й ступени газотурбинного двигателя.

Обработка результатов эксперимента показала, что среднее значение переменной составляющей корреляционной функции, вычисленное по 30 изображениям, составило $U_{CP} = 22,1$ отн.ед.

Использование выражения (4) дало $I_\beta = 0,21$ отн.ед., тогда $U_{CP \min} = 21,89$ отн.ед., и $U_{CP \max} = 22,32$ отн.ед. Выражение (3) для участка поверхности спинки пера лопатки дало следующие результаты: $Ra = 0,21$ мкм, $Ra_{\min} = 0,14$ мкм и $Ra_{\max} = 0,27$ мкм, что вполне согласуются со значениями Ra , измеренными профилографом.

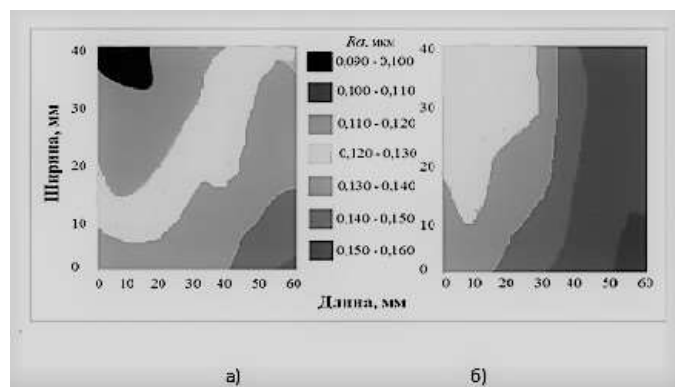


Рис. 3. Поля шероховатости поверхности лопаток 1 ступени турбины после 1 перехода: а- корыто, б- спинка

Далее, было выполнено последовательное оптико-электронное сканирование всей поверхности спинки и корыта лопатки, вычисление Ra для каждого участка и построение полей шероховатости, представленных на рис. 3.

V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ В НАУЧНОМ И ПРИКЛАДНОМ АСПЕКТАХ

Применение квазиоптимального алгоритма позволяет существенно сократить время определения параметров микрорельефа оптико-электронным методом и, следовательно, оперативно их контролировать непосредственно в производственных условиях. Полученные поля шероховатости позволяют определять наиболее опасные участки поверхности, где образуются недопустимые значения концентраторов напряжений, и, следовательно, применить соответствующие меры уменьшения напряжённого состояния поверхностного слоя, что позволит повысить надёжность и долговечность промышленных изделий при их эксплуатации. На рассмотренный метод получен патент Российской Федерации [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Петрешин Д.И., Суслов А.Г., Федонин О.Н. Управление параметрами качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2016. № 4(55). С. 57-61.
- [2] Суслов А.Г. Автоматизированное обеспечение комплексного параметра качества поверхностного слоя S_x при механической обработке // Научные технологии в машиностроении. 2011. № 2. С. 34-39.
- [3] Иванов А.Ю., Леонов Д.Б. Технологические методы обеспечения качества изделий // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. Вып.75. № 5. С. 111-114.
- [4] Макеев А.В. Об оптических методах контроля шероховатости поверхности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Том 5. №1. С. 147-151.
- [5] Абрамов А.Д., Никонов А.И. Анализ и корреляционный метод устранения погрешности оптико-электронного определения микрорельефных параметров // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 1. С. 3-9.
- [6] Pratt W.K., Correlation Techniques of Image Registration, *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 1974, AES-10, 3, pp 353–358.
- [7] Наумов А.И., Кичигин Е.К., Сафонов И.А. Бортовой комплекс высокоточной навигации с корреляционно – экстремальной навигационной системой и цифровой картой рельефа местности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013г. Том.5. №6-1. С. 51-55.
- [8] Микрюков А.Н. Использование изменений графического поля в задачах корреляционно-экстремальной навигации. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. №3. С. 65-69.
- [9] Плужников А.Н., Потапов Н.Н. Корреляционно-экстремальная обработка навигационной информации: Цифровые алгоритмы и аппаратная реализация. // Датчики и системы. 2013. №11(174). С22-27.
- [10] Белов Р.В., Огородников К.О. Реализация модифицированного алгоритма рекуррентно-поискового оценивания корреляционно-экстремальной навигационной системы по рельефу местности. // Управление большими системами. 2017. Т. 68. С. 162-176.
- [11] ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений М.: Стандартинформ, 2006. 27 с.
- [12] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. 11-е изд-е. М.:КНОРУС, 2010. 664 с.
- [13] Пат. 2413179 РФ / Способ контроля шероховатости поверхности изделия/ Абрамов А.Д., Никонов А.И., Носов Н.В. 2010. 11с.