

ОЦЕНКА МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПРОФИЛЯ ПЕРА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

©2017

Н. В. Носов доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»; Самарский государственный технический университет; nosov@samgtu.ru

А. Д. Абрамов кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные системы и информационная безопасность»; Самарский государственный технический университет; esib@samgtu.ru

С. И. Косулин аспирант кафедры «Технология машиностроения»; Самарский государственный технический университет; nosov@samgtu.ru

В статье предложен подход к оценке шероховатости поверхности профиля пера лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) после виброконтрастного полирования. Микрогеометрия поверхности спинки и корыта лопаток исследовалась на оптико-электронном комплексе на основе вычисления средней амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции, полученной в результате компьютерной обработки видеоизображения поверхности. Применение оптико-электронного метода оценки микрогеометрии поверхности компрессорных и турбинных лопаток позволяет строить поля шероховатости поверхности и коэффициента концентрации напряжений и более глубоко анализировать технологию окончательной обработки.

Газотурбинный двигатель; лопатки; шероховатость поверхности; микрогеометрия; оптико-электронный комплекс; автокорреляционная функция; квазиоптимальный алгоритм.

Цитирование: Носов Н.В., Абрамов А.Д., Косулин С.И. Оценка микроструктуры поверхности профиля пера лопаток газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16, № 2. С. 90-100. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-90-100

Введение

Разработка современных методов и средств технического контроля микрогеометрии поверхности деталей сложной формы в труднодоступных местах является актуальной задачей современного двигателестроения. Создание современных систем технического контроля качества и методологических основ исследования микрогеометрических отклонений сложных поверхностей лопаток ГТД в производственных условиях через построение оптико-электронной информационно-измерительной системы (ИИС) является актуальной проблемой.

Данная проблема выдвигает ряд требований, которым должны удовлетворять современные мобильные средства получения измерительной информации о микрорельефе исследуемой поверхности [1;2]. Эти измерительные средства должны быть малогабаритными, реализовывать бесконтактный способ получения измерительной информации непосредственно в производственных условиях и в реальном масштабе времени, обеспечивать цифровую обработку получаемой информации и иметь возможность оценивать микрогеометрию поверхностей спинки и корыта лопаток, радиусы перехода и другие поверхности сложной формы [3;4]. Кроме того, эти измерительные средства должны иметь метрологические характеристики, инвариантные к изменяющимся производственным условиям, и обеспечивать энергосберегающий режим применения этих средств.

Теоретические основы

Теоретические основы построения ИИС оценки микрорельефа исследуемой поверхности, заключающегося в сравнении изображения этой поверхности с изображениями образцовых поверхностей, для которых заранее определены параметры шероховатости известными стандартными методами [5]. В результате определяется – какой образцовой поверхности с заданной вероятностью распознавания соответствует исследуемая поверхность. Задача в такой постановке решается оптимально с помощью согласованного с сигналом двухмерного пространственного фильтра, отклик которого описывается выражением

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

Выражение (1) представляет собой двухмерную 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 двухмерного сигнала путём его зеркального отражения относительно координатных осей n_1 и n_2 , а также смещения отражённого сигнала в сторону исходного на n_{01}, n_{02} отсчётов. Выходной сигнал $y(n_1, n_2)$ будет пропорционален корреляционной функции двухмерного входного сигнала, и будет достигнуто максимальное отношение сигнала к помехе на выходе фильтра.

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 изображения размером $N_1 \times N_2$ пикселей. Затем эталон, начиная с крайней левой позиции, перемещается по выделенной полосе с шагом в один 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

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

где (n_1, n_2) – индексы элементов в окне эталона; (k_1, k_2) – координаты эталона внутри зоны поиска $K_1 \times K_2$; 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 . После вычисления коэффициентов корреляции в первой полосе исследуется следующая полоса того же формата, но смещённая вниз на один пиксель. В этой полосе по центру задаётся новый эталон с теми же размерами, выполняются аналогичные действия и т.д. После обработки всего изображения будет сформирована матрица $M_1 \times M_2$ коэффициентов корреляции – двухмерная корреляционная функция.

Анализируя выражение (2), можно отметить, что сигналы $x(n_1, n_2)$ и $u(n_1, n_2)$ будут подвержены мультипликативному воздействию функции влияния $f_{\text{вн}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$:

$$r_{x1}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) f_{av}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x) f_{av}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)}{\sigma_1 f_{av}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \sigma_2 f_{av}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)}. \quad (3)$$

Как видно из выражения (3), его структура соответствует структуре выражения (1) и функции влияния сокращаются.

Для увеличения быстродействия программы расчёта выполнен анализ известных квазиоптимальных корреляционных алгоритмов и критериальных функций, который показал перспективность использования парных критериальных функций и бинарных изображений

$$\begin{vmatrix} F_{1,1}(\Delta) & F_{0,1}(\Delta) \\ F_{1,0}(\Delta) & F_{0,0}(\Delta) \end{vmatrix},$$

где Δ – относительный сдвиг изображений; $F_{i,j}(\Delta)$, $i, j = 0, 1$ обозначает количество совпавших элементов с заданной интенсивностью.

При этом применялся корреляционно-экстремальный алгоритм в виде

$$R_\gamma(\Delta) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2^n-1} F_{ii}, \quad (4)$$

где N – количество сравниваемых элементов в эталонном и текущем фрагменте изображения, который обеспечивает наибольшее быстродействие.

Результаты экспериментальных исследований

Окончательная обработка профиля пера лопатки формирует требуемые параметры микрогеометрии поверхности лопаток ГТД. В производственных условиях обработка спинки и корыта лопаток осуществлялась на виброконтактном станке ЛВП-4.

В процессе исследования определялась шероховатость профиля пера бесприпусковых лопаток первой ступени турбины (материал ЖС6ФУ) (рис. 1).



Рис. 1. Лопатка первой ступени турбины

Траектория рабочего движения обрабатываемой лопатки при виброконтактном полировании формируется в результате геометрического сложения взаимно-перпендикулярных колебаний от двух кривошипно-шатунных механизмов. Траектория такого движения имеет вид сетки с регулируемыми параметрами, геометрически сложна и практически неповторима. Благодаря такому движению на поверхности спинки и корыта лопатки формируется однородная микрогеометрия поверхности. Режимы вертикальных и горизонтальных колебаний непосредственно влияют на производительность обработки и динамические нагрузки, возникающие в колебательной системе. Обычно значения амплитуды и частоты колебаний принимают равными: частота $20-25 \text{ с}^{-1}$, амплитуда 5-10 мм, что позволяет получать скорость обработки 30-120 м/мин.

Моделирование процесса обработки показало, что максимальная производительность процесса достигается при оптимальном соотношении частот $\omega_0 = \omega_2 / \omega_6$, где ω_2 – частота горизонтальных колебаний, ω_6 – частота вертикальных колебаний. Исследования проводились в диапазоне $1/2 \leq \omega_0 \leq 1$. Приравняв скорости вращения двух рядом стоящих фигур в интервалах: $B_1 = 1/2$, $B_2 = 3/5$, $B_3 = 2/3$, $B_4 = 3/4$, $B_5 = 4/5$, $B_6 = 5/6$, $B_6 = 1$, получим следующую зависимость

$$\text{tg } \omega_0 = \frac{(\cos B_i + \cos B_i + 1)\omega_0 - (B_i \cos B_i + B_i + 1 \cos B_i + 1)}{(B_i \sin B_i + B_i + 1 \sin B_i + 1) - (\sin B_i + \sin B_i + 1)\omega_0}. \quad (5)$$

Правая часть уравнения (5) – гипербола, левая – тангенциоида. Решая уравнение относительно ω_0 , получим следующий ряд оптимальных соотношений частот: 0,543, 0,617, 0,704, 0,763, 0,833, 0,917.

В рассматриваемом случае обработка лопаток первой ступени турбины осуществлялась с $\omega_0 = 0,833$ абразивными лентами в два перехода: первый переход П8 63С 16П МА и второй переход П8 63С 6Н МА. Режимы обработки: скорость полирования 30 м/мин, вертикальное перемещение 4-6 мм, горизонтальное перемещение 3-5 мм, цикл обработки 12-17 с, давление ложементов в зоне обработки составило 0,4-0,6 МПа.

Для теоретического и практического обоснования применения оптико-электронного комплекса при исследовании поверхности лопаток ГТД предложена информационно-измерительная система [6], состоящая из выделенной площади ВП исследуемой части поверхности, источника опорного светового потока ИСП, видеокамеры ВК и блока цифровой обработки сигналов БЦОС (рис. 2)

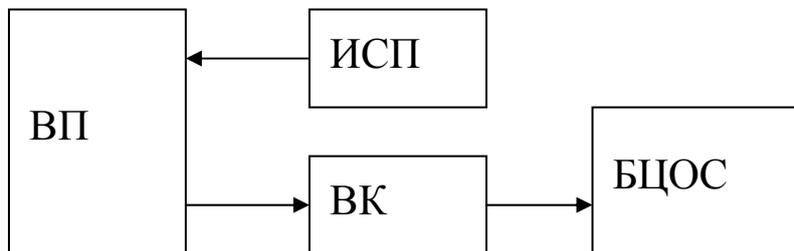


Рис. 2. Структура ИИС оценки параметров микрорельефа

Система, состоящая из ИСП и ВК, может рассматриваться как оптико-электронный измерительный преобразователь (ИП). Он включает в себя устройство для задания координат окна и его размеров для преобразования исходного полутонового изображения поверхности в бинарное изображение, а также для задания размеров эталона в бинарном изображении; запоминающее устройство; цифровое вычислительное

устройство; устройство для задания координат текущего фрагмента бинарного изображения; коррелятор и программное обеспечение, позволяющее обрабатывать видеоизображения исследуемых поверхностей. Совокупность ИСП и ВП образует канал первичного рельефно-оптического преобразования.

Известно, что параметры микрогеометрии поверхности должны быть одинаковыми во всех направлениях поверхности лопатки. Примем условие, что при равных параметрах шероховатости на поверхности формируется равноосная структура и не допущена однонаправленная шероховатость. Для этого в эксперименте электронное изображение поворачивалось на 90° , 180° и 270° и определялись параметры автокорреляционной поверхности. Если они совпадали по своим значениям в пределах 5%, то имело место появление на поверхности лопатки соответствующей структуры.

Исследования шероховатости профиля пера лопаток первой ступени турбины. Проведены экспериментальные исследования параметров микрогеометрии поверхности лопаток первой ступени ГТД, полученные после операции виброконтактного полирования спинки, корыта и радиуса перехода спинки и корыта в бандажные полки, а также микрогеометрии поверхностей в районе отверстий на входной кромке лопатки. Для анализа были взяты участки поверхности лопатки после операции полирования. На рис. 3 приведены полутоновое и бинарное изображения поверхности выбранного участка, корреляционная поверхность и график изменения коэффициента корреляции для этого участка [7].

Формат изображения участка поверхности, записываемого в память компьютера, составлял 320×240 пикселей. Обработка результатов эксперимента показала, что среднее значение переменной составляющей корреляционной функции, вычисленное по 30 изображениям, составило $U_{cp} = 23,1$ отн. ед.

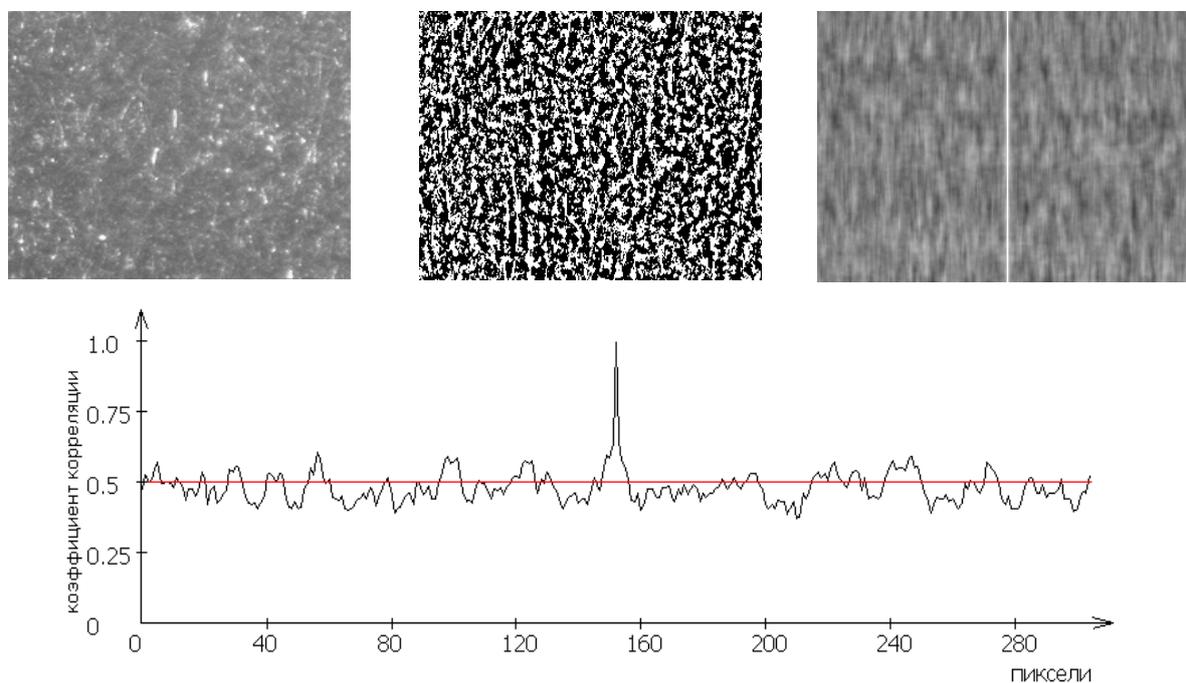


Рис. 3. Полутоновое изображение участка поверхности лопатки; бинарное изображение участка; корреляционная поверхность; изменение коэффициента корреляции

Задавая вероятность распознавания структуры (шероховатости) исследуемой поверхности $P = 0,99$, для доверительного интервала получили выражение в виде

$$I_{\beta} = (0,09U_{cp}^3 - 4,2U_{cp}^2 + 68,5U_{cp} - 314,9)10^{-2} \text{ отн. ед.},$$

а для зависимости структуры с шероховатостью $R_a = f(U_{cp})$ – выражение $R_a = 0,013U_{cp} - 0,078$ мкм.

Подстановка найденного значения U_{cp} в формулу определила, что в этом случае $I_\beta = 0,77$ отн.ед. Следовательно, $U_{cp \min} = 22,33$ отн. ед. и $U_{cp \max} = 23,87$ отн. ед.. Использование выражения для определения среднего арифметического отклонения профиля поверхности пера лопатки дало следующие результаты: $R_a = 0,22$ мкм, $R_{a \min} = 0,219$ мкм и $R_{a \max} = 0,221$ мкм. При этом шероховатость на спинке на 15% выше, чем шероховатость на корыте.

На рис. 4 представлены поля шероховатости поверхности лопаток первой ступени турбины спинки и корыта после виброконтактного полирования абразивными лентами в один переход П8 63С 16П МА.

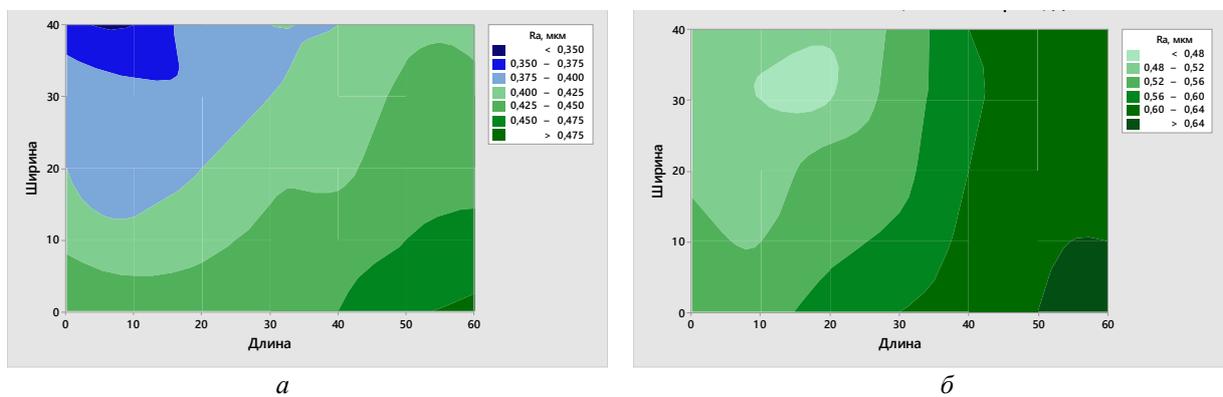


Рис. 4. Поля шероховатости поверхности лопаток первой ступени турбины после первого перехода: а – корыто, б – спинка

Из приведённых данных следует, что шероховатость на поверхности спинки больше на 0,15-0,2 мкм, чем на корыте. Это связано с тем, что при обработке площадь контакта поверхности лопаток с ложементами с течением времени меняется и давление на спинке повышается. Кроме того, лопатка в процессе обработки совершает колебание не в плоскости, а по некоторой дуге, которая не всегда совпадает с радиусом закрутки лопатки. Поэтому формирование микронеровностей в большей степени зависит от кинематики процесса виброконтактного полирования. Аналогичные результаты получены и при полировании абразивными лентами П8 63С 6Н МА (рис. 5).

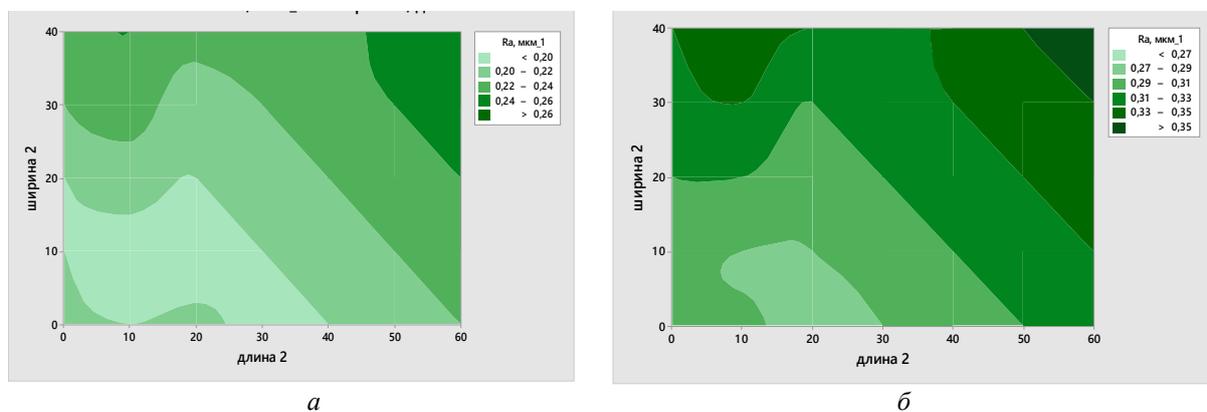


Рис. 5. Поля шероховатости поверхности лопаток первой ступени турбины после второго перехода: а – корыто, б – спинка

Из приведённых данных следует, что структура поверхности лопатки несколько выровнилась и шероховатость как на спинке, так и на корыте уменьшилась и стала соответствовать требуемым значениям.

Особые условия образования структуры поверхности складываются при обработке радиуса закруглённой бандажной полки к спинке и корыту. Для исследования данной поверхности было доработано программное обеспечение, учитывающее кривизну поверхности.

Обработка результатов (рис. 6) показала, что $U_{cp} = 24,5$ отн. ед., $R_a = 0,24$ мкм, что несколько больше, чем на спинке лопатки, а поверхность имеет однонаправленный характер.

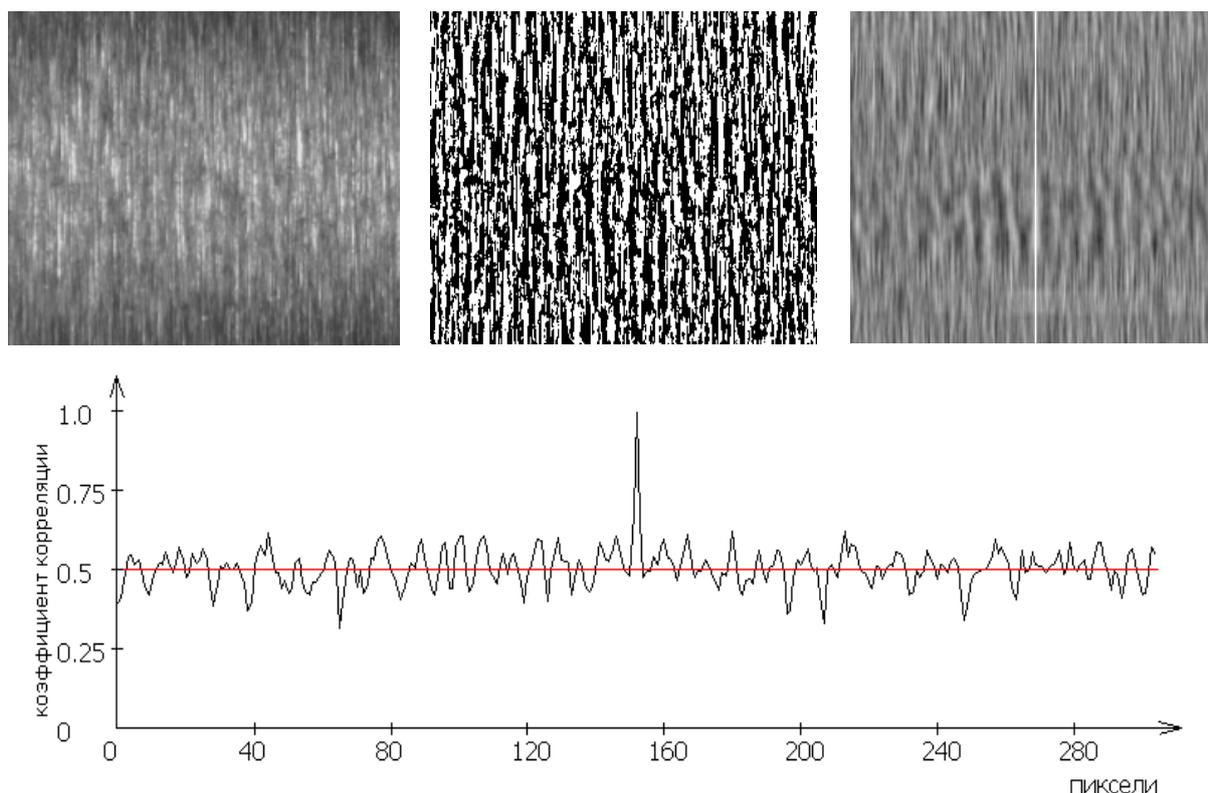


Рис. 6. Полутоновое изображение участка поверхности радиуса закругления лопатки; бинарное изображение участка; корреляционная поверхность; изменение коэффициента корреляции

Полученные значения среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a на радиусе закругления вполне согласуются с техническими условиями, предъявляемыми к шероховатости поверхностей лопаток первой ступени турбины.

Оптический метод, в силу своей универсальности, имеет возможность оценить микрогеометрию входной кромки лопаток первой ступени турбины, на которой изготовлены отверстия для охлаждения (рис. 7).

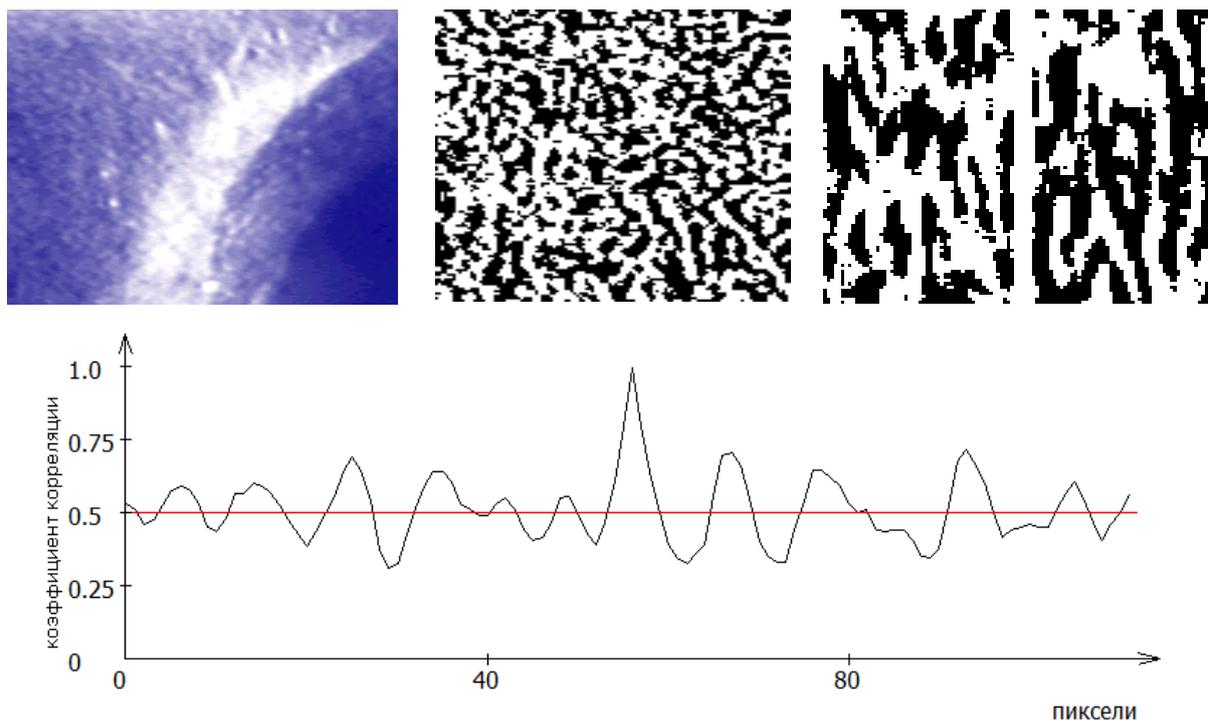


Рис. 7. Полутонное изображение участка поверхности входной кромки лопатки с отверстием; бинарное изображение этого участка; корреляционная поверхность; изменение коэффициента корреляции

Исследованиями установлено, что поверхность между отверстиями имеет ярко выраженную структуру с $U_{cp \min} = 25,12$ отн. ед. и $U_{cp \max} = 25,62$ отн. ед., что соответствует величине $R_a = 0,27 - 0,28$ мкм. Это связано с тем, что после прошивки отверстий электроэрозионным способом следующей операцией является обдувка поверхности микрошариками, которая приводит к появлению однородной структуры на обработанной поверхности. В то же время вокруг отверстия на расстоянии 1-1,5 мм формируется поверхность с большей шероховатостью $R_a = 0,35 - 0,39$ мкм.

Исследование качества компрессорных лопаток. Долговечность, надёжность и экономичность всего ГТД во многом зависит от состояния и качества поверхностного слоя рабочих лопаток компрессора, полученных в процессе изготовления. Несмотря на малые размеры неровностей поверхности, составляющих шероховатость, они оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства поверхности лопаток. Полученные следы от механической обработки являются концентраторами напряжений и влияют на сопротивление усталости металлов при действии циклических и знакопеременных нагрузок. Во впадинах неровностей происходит увеличение напряжений, что может привести к образованию усталостных трещин.

Параметры микрогеометрии профиля пера лопаток 12-й ступени компрессора (рис. 8) из стали ЭИ961Ш определялись после шлифования и полирования войлочными кругами и последующего виброконтактного полирования. Окончательная обработка лопаток 12 ступени компрессора выполнялась в два перехода при виброконтактном полировании алмазными лентами.



Рис. 8. Лопатка 12-й ступени компрессора

Первый переход связан с обработкой поверхности алмазной лентой АС 2 80/63 Р9 100%. На рис. 9 показаны поля шероховатости поверхности спинки и корыта. Установлено, что минимальное значение шероховатости поверхности на корыте приблизительно к бандажной полке, а на спинке – к середине лопатки. Изменение структуры микронеровностей связано с тем, что крепление лопаток 12-й ступени в приспособлении станка более жёсткое и она не обладает достаточной кинематической свободой при обработке.

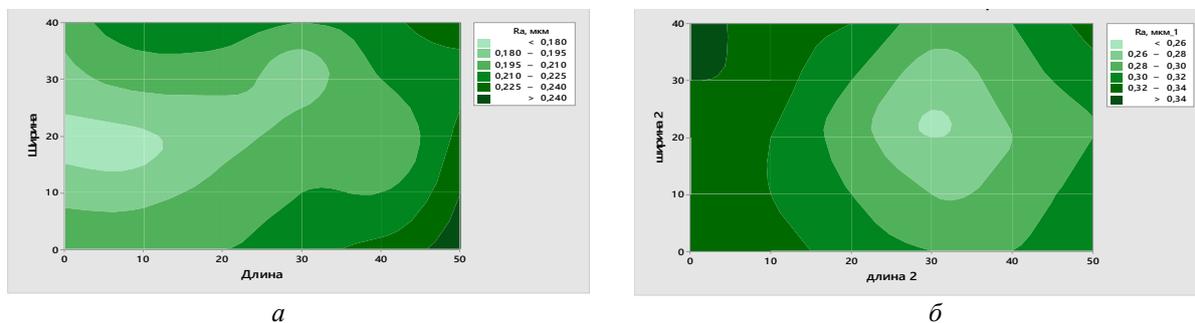


Рис. 9. Поля шероховатости поверхности лопаток 12-й ступени компрессора после первого перехода: а – корыто; б – спинка

На втором переходе обработка осуществлялась алмазной лентой на эластичных связках и АС 2 63/50 Р9 100%. При этом наблюдается аналогичная картина, как и при обработке лопаток первой ступени турбины – на спинке шероховатость выше, чем на корыте. Структура поверхности на корыте свидетельствует о недостаточности времени обработки лопатки, т.к. наблюдается достаточно большой разброс R_a по поверхности: от 0,18 до 0,28 мкм.

При исследовании распределения напряжений на дне обработанных рисок предложена зависимость по определению коэффициента концентрации напряжений α_σ [4]:

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \pi \frac{32(0,013U_{cp} - 0,078)}{1000S_m}, \quad (6)$$

где U_{cp} – максимальная высота неровностей (приведённая амплитуда автокорреляционной функции); S_m – период колебания автокорреляционной функции (период автокорреляционной функции).

Из приведённых на рис. 10 данных следует, что определяющей является величина α_{σ} , полученная на спинке лопатки. Поэтому для выравнивания структуры поверхности спинки и корыта необходимо изменить зернистость алмазной ленты до 40/28.

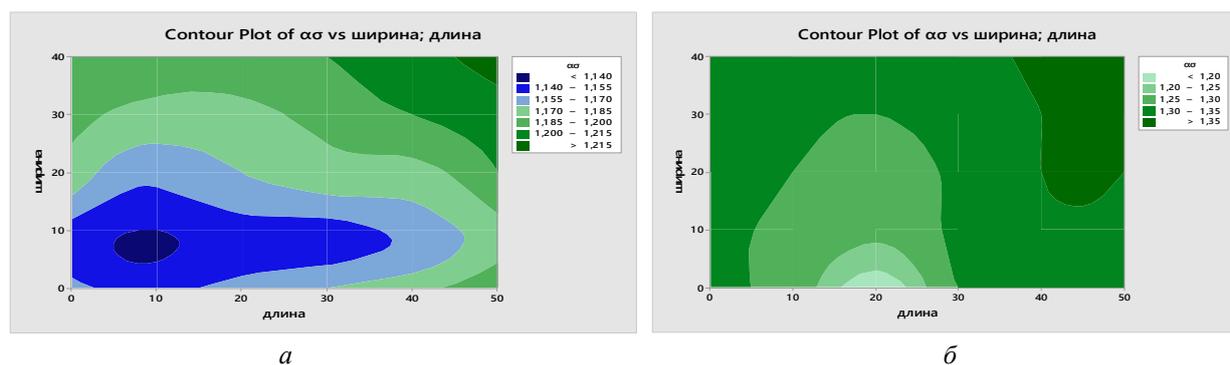


Рис. 10. Поля коэффициента концентрации напряжений поверхности лопаток 12-й ступени компрессора: а – корыто, б – спинка

Заключение

Доказано, что применение оптико-электронного метода оценки качества поверхности компрессорных и турбинных лопаток позволяет более глубоко анализировать технологию виброконтактного полирования, строить поля шероховатости поверхности и коэффициента концентрации напряжений.

Установлено, что применение оптимальных соотношений частот вертикальных и горизонтальных колебаний приводит к образованию однородной структуры поверхности профиля пера лопаток.

Исследованы области поверхности лопаток первой ступени турбины, примыкающей к отверстиям на входной кромке, и показано, что около отверстия величина шероховатости повышается в 1,5 – 1,7 раза.

Библиографический список

1. Абрамов А.Д., Носов Н.В., Подсекин И.А., Воронин В.Н. Оценка шероховатости поверхности оптико-электронным методом // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2005. № 33. С. 89-94.
2. Абрамов А.Д. Оценка микрогеометрии поверхности лопаток ГТД на основе анализа их автокорреляционных функций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2007. № 2 (20). С. 117-123.
3. Абрамов А.Д., Никонов А.И., Носов Н.В. Способ контроля шероховатости поверхности изделия: патент РФ № 2413179; опубл. 27.02.2011; бюл. № 6.
4. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. М.: Наука, 1975. 344 с.

ASSESSMENT OF GAS TURBINE ENGINE AIRFOIL SURFACE MICROSTRUCTURE

©2017

- N. V. Nosov** Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Technology of Machine Building Department;
Samara State Technical University, Samara, Russian Federation;
nosov@samgtu.ru
- A. D. Abramov** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Electronic Systems and Information Security Department;
Samara State Technical University, Samara, Russian Federation;
esib@samgtu.ru
- S. I. Kosulin** Postgraduate student, Technology of Machine Building Department;
Samara State Technical University, Samara, Russian Federation;
nosov@samgtu.ru

We propose a new approach to the assessment of surface roughness of gas turbine engine airfoil after polishing. The micro-geometry of the blade surfaces was investigated with the use of an electrooptical system on the basis of computing the average amplitude of the variable component of the autocorrelation function obtained as a result of computer processing of the surface video images. The use of the electrooptical method of assessing the surface micro-geometry of compressor blades and turbine blades makes it possible to construct the fields of surface roughness and stress concentration factor, as well as to analyze the technology of finishing treatment in more depth.

Gas turbine engine; blades; surface roughness; micro-geometry; electrooptical system; autocorrelation function; quasi-optimal algorithm.

Citation: Nosov N.V., Abramov A.D., Kosulin S.I. Assessment of gas turbine engine airfoil surface microstructure. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2017. V. 16, no. 2. P. 90-100. DOI: 10.18287/2541-7533-2017-16-2-90-100

References

1. Abramov A.D., Nosov N.V., Podsekin I.A., Voronin V.N. Assessment of surface roughness by an electrooptical method. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2005. No. 33. P. 89-94. (In Russ.)
2. Abramov A.D. Assessment of gas turbine engine blades surface micro-geometry on the basis of their autocorrelation functions. *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2007. No. 2 (20). P. 117-123. (In Russ.)
3. Abramov A.D., Nikonov A.I., Nosov N.V. *Sposob kontrolya sherokhovatosti poverkhnosti izdeliya* [Method of monitoring article surface roughness]. Patent RF, no.2413179, 2011. (Publ. 27.02.2011, bull. no. 6).
4. Khusu A.P., Vitenberg Yu.R., Pal'mov V.A. *Sherokhovatost' poverkhnostey. Teoretiko-veroyatnostnyy podkhod* [Surface roughness. Probability-theoretical approach]. Moscow: Nauka Publ., 1975. 344 p.