

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Носов Н.В., Милохова А.С., Носов Н.С., Штопина Ю.А., Якубович Е.А.

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Ключевые слова: виброконтактное полирование, лопатки турбины, абразивные ленты, ложементы, фигуры Лиссажу, частота колебаний, оптико-электронный метод, коэффициент корреляции, поля шероховатости, качество поверхности.

Аннотация. Исследованы геометрические отклонения профиля пера лопаток турбины газотурбинного двигателя после операции виброконтактного полирования абразивными лентами. Предложено проводить определение микрогеометрии с помощью оптико-электронного метода и компьютерных технологий. Получены поля шероховатости поверхностей спинки и корыта лопаток 1-ой ступени турбины для последующего анализа технологической операции виброконтактного полирования.

INVESTIGATION OF SURFACE ROUGHNESS OF GAS TURBINE ENGINE BLADES

Nosov N.V., Milokhova A.S., Nosov N.S., Shtopina Yu.A., Yakubovich E.A.

Samara State Technical University, Samara, Russia

Keywords: vibration contact polishing, turbine blades, abrasive belts, lodgments, Lissajous figures, oscillation frequency, optoelectronic method, correlation coefficient, roughness fields, surface quality.

Abstract. Geometric deviations of the profile of the feather of the blades of a gas turbine engine after the operation of vibro-contact polishing with abrasive belts are investigated. It is proposed to carry out the determination of microgeometry using the optoelectronic method and computer technology. The roughness fields of the surfaces of the backrest and the trough of the blades of the 1st stage of the turbine turbine are obtained for the subsequent analysis of the technological operation of vibration contact polishing.

При разработке технологического процесса изготовления деталей с высоким качеством поверхности (геометрическая точность, точность формы и расположения, шероховатость, остаточные напряжения и т.д.) на завершающем этапе прибегают к операциям окончательной обработки. Выбор того или иного метода финишной обработки зависит от конкретных задач, которые решаются технологом для достижения требований конструкторской документации, назначенных исходя из эксплуатационных свойств деталей и изделия в целом.

На данных операциях применяются различные инструменты: бруски, шкурки, пасты, лепестковые круги и т.д. Отличительной особенностью этих процессов является низкие скорости резания, невысокая скорость съёма припуска, а также сравнительно малая теплонапряженность процесса, что позволяет применять при изготовлении инструментов низкотемпературные связующие компоненты: вулканитовые и бакелитовые связки, а также

различные клеевые композиции. Для определения области применения данных инструментов исследовался ряд операций окончательной обработки: хонингование абразивными брусками, виброконтактное полирование абразивными лентами и доводка абразивными пастами [1].

Надёжность, ресурс работы, экономичность газотурбинного двигателя (ГТД) во многом определяются характеристиками поверхностного слоя рабочих лопаток, которые формируются в процессе производства. Даже незначительные неровности на поверхности лопаток, составляющие шероховатость, могут существенно влиять на их эксплуатационные свойства. Следы механической обработки создают зоны концентрации напряжений и способствуют усталости металла под воздействием циклических и знакопеременных нагрузок. В углублениях неровностей возрастают напряжения, что может привести к появлению усталостных трещин.

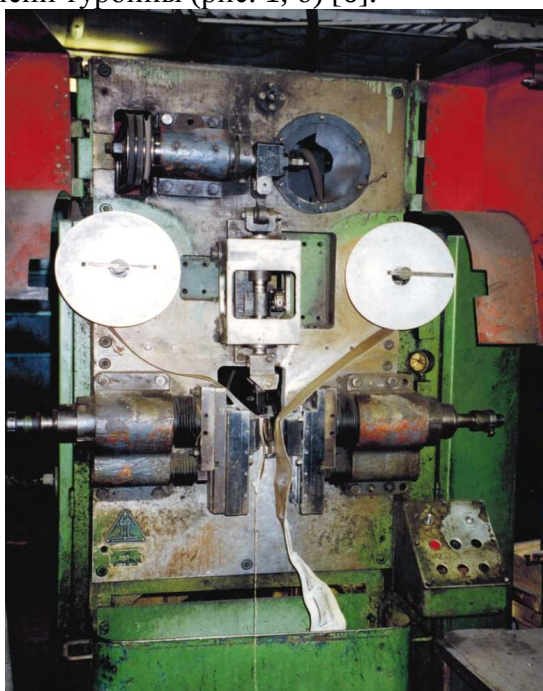
Для определения шероховатости обработанной поверхности лопаток ГТД применялась комплексная методика [2]. В соответствии с ГОСТ 2789-73 (СТ СЭВ 637-77) оценивались следующие параметры: среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм, высота неровностей Rz , мкм и максимальная высота неровностей $R_{\max}$, мкм. Эти характеристики описывают размеры неровностей по перпендикуляру к базовой линии.

Для определения геометрических отклонений профиля пера лопатки и оценки точности обработанных лопаток использовался показатель комплексной погрешности контура сечения пера. В этот показатель входят отклонения профиля, отклонения от заданного угла и смещение пера относительно координатных осей [3]. При исследовании процесса виброконтактного полирования измерение указанных погрешностей производилось на оптико-механических приборах модели ПОМЛ-4 для лопаток с длиной пера до 150 мм и модели ПОМКЛ-14 для лопаток с длиной пера 150-300 мм.

На этих приборах профиль пера лопатки контролируется в заданных сечениях по точкам с шагом 5 мкм при помощи контактных стержней. Погрешность профиля пера вызывает смещение контактных стержней от номинального положения. Это смещение передается на рычажки с механическим увеличением в 5 раз. Силуэты концов рычажков проецируются на матовый экран прибора. Этим достигается общее увеличение масштаба размера профиля в 50 раз.

Известно, что параметры микрогеометрии поверхности лопатки ГТД должны быть одинаковыми во всех направлениях. Предположим, что при равных параметрах шероховатости поверхность формирует структуру с одинаковыми характеристиками в каждой точке, и не допускается наличие шероховатости, направленной в одном направлении. Поэтому необходимо разработать, во-первых, метод окончательной обработки профиля пера лопатки и, во-вторых, методику исследования микрогеометрии площади поверхности [4, 5].

В качестве такого метода в работе предлагается процесс виброконтakтного полирования абразивными лентами на станках ЛВП 4 (рис. 1, а), которые применяются при обработке профиля пера лопаток 1-ой ступени турбины (рис. 1, б) [6].



А



Б

Рис. 1. Станок ЛВП 4 (а), лопатка 1-ой ступени турбины (б)

Принцип работы станка ЛВП основан на следующих основных элементах и процессах:

1. На станке используется абразивная лента (шкурка), которая движется периодически по роликам и контактирует с поверхностью лопатки в зоне обработки.

2. Контакт абразивной ленты с профилем лопаток осуществляется через профильные резиновые ложементы, которые прижимают ленту к поверхности лопаток с определенным усилием со стороны спинки и корыта.

3. Вибрационные воздействия (колебания) лопатки создает станок, который осуществляет движение лопатки, при котором абразивное зерно описывает в зоне обработки замкнутую кривую Лиссажу, являющуюся суперпозицией двух взаимно перпендикулярных колебаний с определенным отношением частот. Колебания способствуют более равномерной и эффективной обработке поверхности, включая радиусы перехода.

4. После обработки ложементы отводятся, лопатка снимается не сразу, требуется ее охладить, т.к. температура процесса достигает 300-400°C.

5. После обработки необходимо проверить точность лопатки, наличие прижогов и микрогеометрию поверхности.

6. Для достижения требуемой шероховатости поверхности требуется проводить два перехода: первый переход снимает необходимый припуск, второй переход позволяет получить требуемое качество поверхности.

7. На станке предусмотрена регулировка параметров: скорость движения ленточного полотна, амплитуды и частоты колебаний, контактное давление. Работа, как правило, ведется без охлаждения.

Наиболее трудоемким, на наш взгляд, является процесс исследования микрогеометрии поверхности профиля пера лопаток, т.к. современные профилометры измеряют шероховатость только простых поверхностей. В работе предлагается использовать при исследовании микрогеометрии сложных поверхностей оптико-электронный метод и компьютерные технологии [7, 8].

Были выполнены экспериментальные измерения параметров микрорельефа поверхности лопаток первой ступени ГТД после операции виброконтантного полирования спинки, корыта и радиуса перехода спинки и корыта в бандажные полки.

Для сравнения были взяты эталоны шероховатости, изготовленные согласно ГОСТ 9378-93. Исследование микрорельефа поверхностей проводилось с использованием оптико-электронного метода в следующих режимах: параметры сканирующего эталона – (16×16) пикселей, угол наклона источника света – $(0-90)^\circ$, угол поворота делительного стола – $(45-90)^\circ$, количество обработанных профилей – 2500. Полученные значения параметров микрорельефа сопоставлялись с шероховатостью профиля поверхности эталона, измеренной на профилометре модели SurfTest SJ-201P (MITUTOYO).

Анализировались участки поверхности лопатки после операции полирования. На рисунке 2 приведены полутоновое и бинарное изображения поверхности выбранного участка, корреляционная поверхность и график изменения коэффициента корреляции для этого участка.

Формат изображения участка поверхности, записываемого в память компьютера, составлял в данном случае 600×450 пикселей. Обработка результатов эксперимента показала, что среднее значение переменной составляющей корреляционной функции (в относительных единицах), вычисленное по 30-ти изображениям, составило $U_{cp} = 23,1$.

Для заданной вероятности распознавания микрорельефа (шероховатости) исследуемой поверхности $P = 0,99$ для доверительного интервала I_β в [7] было получено выражение в виде

$$I_\beta = (0,09 U_{cp}^3 - 4,2 U_{cp}^2 + 68,5 U_{cp} - 314,9) 10^{-2}, \quad (1)$$

а для зависимости микрорельефа с шероховатостью $Ra = f(U_{cp})$ выражение

$$Ra = 0,05 U_{cp} - 0,95. \quad (2)$$

Использование оптико-электронного метода позволило установить, что среднее арифметическое отклонение шероховатости поверхности профиля пера лопатки Ra по площади $(3 \times 2) \text{ мм}^2$ находится в пределах $0,219-0,221 \text{ мкм}$. При этом шероховатость на спинке на 15% выше, чем шероховатость на корыте.

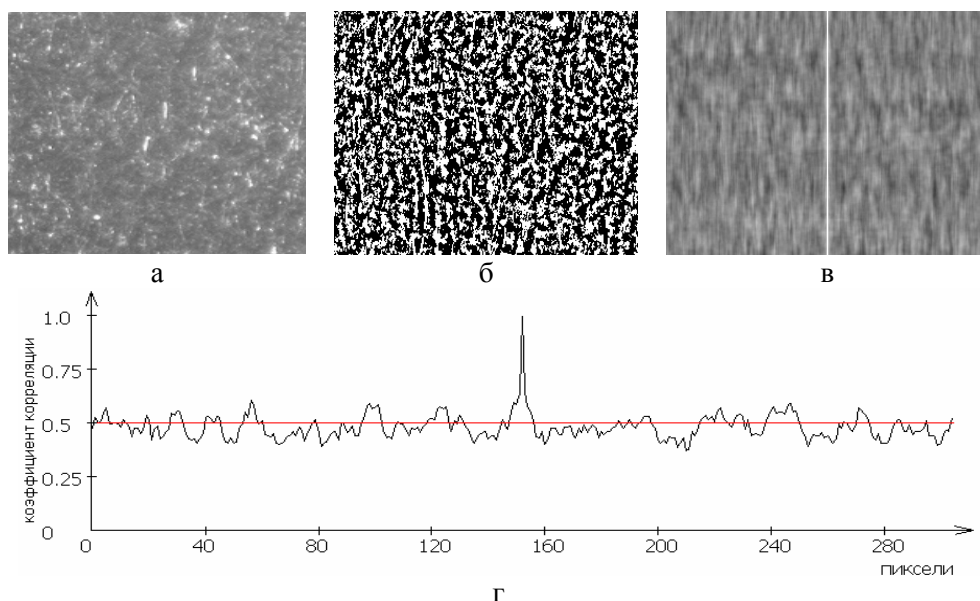


Рис. 2. Полутоновое изображение участка поверхности лопатки:
а – цифровое изображение, б – бинарное изображение, в – корреляционная
поверхность, г – изменение коэффициента корреляции

Для достижения требуемого уровня шероховатости необходимо последовательно осуществить два перехода обработки поверхности абразивным материалом на основе карбида кремния с уменьшающейся зернистостью [9].

После первого перехода виброконтактного полирования абразивными лентами П8 63С16ПМА поверхностей спинки и корыта лопаток 1-ой ступени турбины были получены поля шероховатости, представленные на рисунке 3.

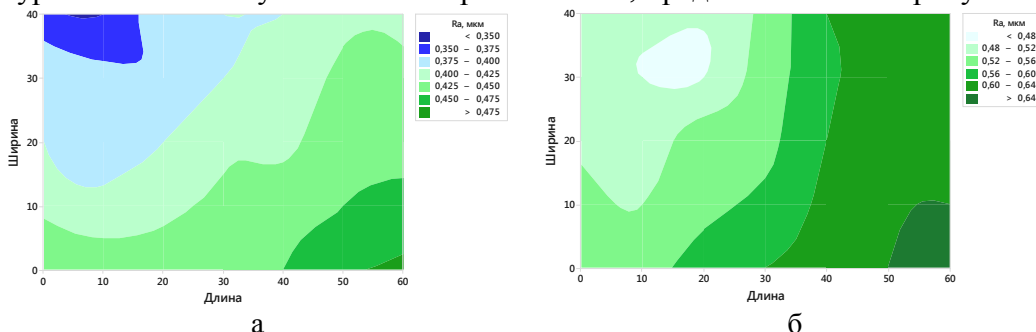


Рис. 3. Поля шероховатости поверхности лопаток 1-ой ступени турбины после
1-го перехода: а – корыто, б – спинка

Из представленных данных можно сделать вывод, что на поверхности спинки уровень шероховатости на 0,15-0,2 мкм выше, чем на корыте. Это объясняется тем, что во время обработки площадь контакта поверхности лопаток с ложементами изменяется, из-за чего давление на спинке увеличивается.

Кроме того, в процессе обработки лопатка колеблется не по плоскости, а по дуге, которая не всегда совпадает с радиусом закрутки лопатки. Поэтому формирование микронеровностей в значительной степени зависит от кинематики процесса виброконтактного полирования.

Для второго перехода полирование осуществляли с использованием абразивных лент П8 63С6НМА. Результаты приведены на рисунке 4.

Из приведенных данных следует, что микрорельеф поверхности лопатки стал более ровным, а шероховатость как на спинке, так и на корыте уменьшилась и достигла нормируемых значений.

Отмеченное подтверждает, что использование оптико-электронного метода для оценки качества поверхности турбинных лопаток даёт возможность детально анализировать технологию виброконтактного полирования, создавать карты шероховатости поверхности и на их основе оценивать коэффициенты концентрации напряжений.

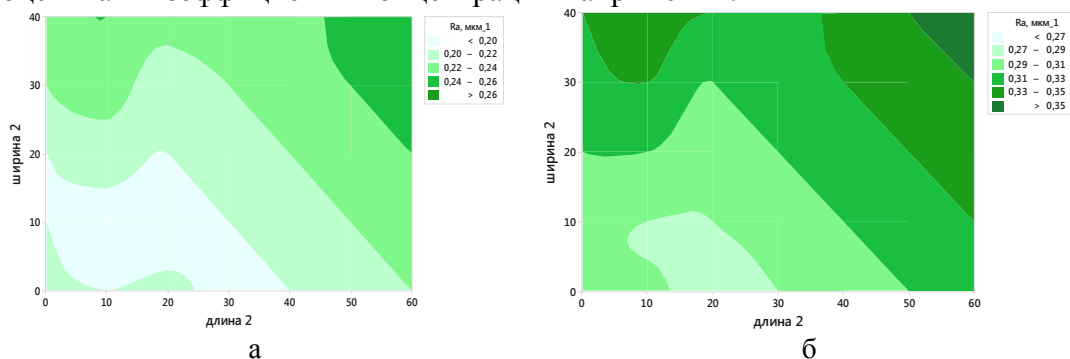


Рис. 4. Поля шероховатости поверхности лопаток 1 степени турбины после 2-го перехода: а – корыто, б – спинка

Проведённые исследования показали, что назначение оптимальных соотношений частот вертикальных и горизонтальных колебаний, при которых траектория движения зёрен является бесконечной, способствует формированию однородной структуры поверхности по всему профилю пера лопаток.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания FMRW-2025-0052.

Список литературы

1. Левко В.А. Абразивно-экструзионная обработка: современный уровень и теоретические основы процесса: монография. – Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2007. – 228 с.
2. Макаров В.Ф., Бычина Е.Н. Оптимизация процесса полирования лопаток газотурбинных двигателей из титановых сплавов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – № 4/3(288). – С. 41-47.

3. Китайкин В.Л. Повышение эффективности изготовления лопаток газотурбинных двигателей с направленной кристаллизацией: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 1998. – 34 с.
4. Тамаркин М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 1995. – 43 с.
5. Зверовщиков В.З., Понукалин А.В., Зверовщиков А.Е. О формировании шероховатости поверхности на труднодоступных участках профиля детали при объемной центробежной обработке гранулированными средами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – №3(15). – С. 114-122.
6. Китайкин В.Л., Носов Н.В., Николаев Ю.А. Виброконтатное полирование жаропрочных сплавов абразивными лентами из СВС-материалов // Тезисы докладов XXV международной научно-технической конференции к 85-летию со дня рождения Н.Д. Кузнецова. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 1996. – С.106-107.
7. Носов Н.В. Исследование структуры поверхности лопаток газотурбинного двигателя с помощью квазиоптимального корреляционного алгоритма // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22, №12(143). – С. 104-114.
8. Абрамов А.Д., Носов Н.В., Якубович Е.А. Моделирование параметров текстуры прецизионных поверхностей с помощью корреляционного алгоритма // Труды XXI Международной конференции «Проблемы моделирования и управления в сложных системах». – Самара: ООО «Офорт», 2019. – Т. 1. – С. 173-176.
9. ГОСТ 3647-80. Материалы шлифовальные. Зернистость и зерновой состав. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 28 с.

References

1. Levko V.A. Abrasive-extrusion processing: current level and theoretical foundations of the process: monograph. – Krasnoyarsk: Siberian State Aerospace University, 2007. – 228 p.
2. Makarov V.F., Bychina E.N. Optimization of the polishing process of gas turbine engine blades made of titanium alloys // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2020, no. 4/3(288), pp. 41-47.
3. Kitaykin V.L. Improving the efficiency of manufacturing gas turbine engine blades with directional solidification: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Samara, 1998. – 34 p.
4. Tamarkin M.A. Theoretical foundations of optimization of processes of processing of parts with free abrasives: Abstract of the diss. ... doct. of tech. sc. – Rostov-on-Don, 1995. – 43 p.
5. Zverovshchikov V.Z., Ponukalin A.V., Zverovshchikov A.E. On the formation of surface roughness on hard-to-reach areas of the part profile during volumetric centrifugal processing with granular media // News of higher educational institutions. Volga region. Engineering sciences. 2010, no. 3(15), pp. 114-122.
6. Kitaykin V. L., Nosov N. V., Nikolaev Yu. A. Vibration contact polishing of heat-resistant alloys with abrasive belts made of SHS materials // Abstracts of the XXV International Scientific and Technical Conference dedicated to the 85th anniversary of N.D. Kuznetsov's birth. – Samara: Samara state aerospace university, 1996. – P.106-107.

7. Nosov N.V. Study of the surface structure of gas turbine engine blades using a quasi-optimal correlation algorithm // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 12 (143), pp.104-114.
8. Abramov A.D., Nosov N.V., Yakubovich E.A. Modeling texture parameters of precision surfaces using a correlation algorithm // Proceedings of the XXI International Conference "Problems of Modeling and Control in Complex Systems". – Samara: LLC "Ofort", 2019. – Vol. 1. – P.173-176.
9. GOST 3647-80. Abrasives. Grain sizing. Graininess and fractions. – M.: IPK Publishing House of Standards, 1997. – 28 p.

Носов Николай Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты»	Nosov Nikolay Vasilevich – doctor of technical science, professor of department «Mechanical engineering technology, machinetools and tools»
Милохова Анна Сергеевна – студент	Milokhova Anna Sergeevna – student
Носов Никита Сергеевич – студент	Nosov Nikita Sergeevich – student
Штопина Юлия Андреевна – студент	Shtopina Yulia Andreevna – student
Якубович Ефим Абрамович – кандидат технических наук, профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»	Yakubovich Efim Abramovich – candidate of technical science, professor of department «Metal science, powder metallurgy, nanomaterials»
eyakubovich@mail.ru	

Received 20.09.2025