

УДК 621.923

В.Ф. МАКАРОВ¹, Е.Н. БЫЧИНА^{1,2}, А.О. ЧУЯН¹¹Пермский государственный технический университет, Россия²ОАО «Пермский моторный завод», Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛИРОВАНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрены проблемы существующего метода полирования лопаток газотурбинных двигателей кругами на войлочной основе. Предложен новый метод полирования лопаток – полирование бесконечными лентами из шлифовальной шкурки. Новый метод позволяет решить проблему образования глубоких единичных рисок после обработки. Проведены экспериментальные исследования формирования шероховатости в процессе полирования лопаток, подтверждающие теоретические предположения. Приведены результаты исследований. Предложена методика расчета параметров шероховатости. Доказана возможность применения в практических целях математического расчета параметров шероховатости.

Ключевые слова: лопатка газотурбинного двигателя, полирование, бесконечная лента из шлифовальной шкурки, шероховатость, математическое моделирование.

В авиационных и газотурбинных двигателях и энергетических установках насчитывается несколько тысяч лопаток. Трудоемкость изготовления этих деталей, в связи с высокими требованиями к качеству поверхности (среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии в пределах 0,25 мм, $Ra \leq 0,32 \dots 0,16$ мкм.) и точности геометрических форм (до 0,04 мм) очень высока.

При отклонении геометрических форм, размеров и параметров шероховатости профиля пера лопаток от расчетных, ухудшается газодинамическая устойчивость двигателя, возрастают аэродинамические потери, приводящие к уменьшению КПД, т.е. к потере мощности, росту удельных расходов и, как следствие, к снижению экономичности двигателя.

Качество обработки поверхности детали существенным образом влияет на прочность лопаток. Повышение частоты обработки при прочих равных условиях несколько повышает статическую прочность, особенно хрупкую, и значительно более – предел выносливости. А также известно, что неровности, образующиеся при обработке поверхностей, являются эффективными концентраторами напряжений и могут в несколько раз снижать усталостную прочность деталей. В связи с этим на ОАО «Пермский моторный завод» при изготовлении газотурбинных двигателей (ГТД) особое внимание уделяют окончательной обработке профиля пера лопаток – полированию.

В настоящее время на ОАО «Пермском моторном заводе» окончательную обработку профиля пера лопаток выполняют на полировальной бабке по-

лировальными кругами на войлочной основе, накатанными абразивным микрошлифпорошком с применением полировальных паст. Этот метод обработки имеет ряд существенных недостатков, таких как:

- нестабильное качество инструмента;
- низкая производительность обработки;
- окончательная обработка полировальными

кругами приводит к большой вероятности появления глубоких единичных рисок (концентраторов напряжения), прижогов и трещин;

что побуждает к поиску нового, более прогрессивного метода полирования.

После анализа существующих методов окончательной обработки сложнопрофильных высокоточных деталей наиболее эффективно полирование бесконечной лентой из абразивной шкурки.

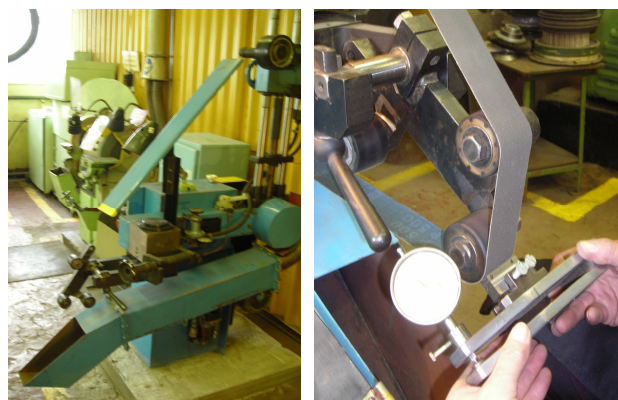
Выбор абразивной ленты связан с ее явными преимуществами по сравнению с полировальным кругом. При полировании абразивной лентой в съеме металла участвуют большое количество абразивных зерен, эластично и равномерно закрепленных на полотне в вертикальном положении (за счет нанесения зерна на инструмент в электростатическом поле), улучшает качество и чистоту обработки, а также исключает возможность появления единичных рисок. Кроме того, температура в зоне резания значительно ниже, чем при обработке кругом, т. к. прилагаются значительно меньшие усилия для снятия металла. А также тепло, возникающее в процессе работы, интенсивно рассеивается, так как поверхность охлаждения большая, что снижает риск возникновения прижогов и трещин.

Для внедрения нового прогрессивного процесса обработки лопаток в серийное производство необходимо провести развернутое исследование физических процессов происходящих во время обработки, т.к. лопатки - являются наиболее ответственными и тяжело нагруженными деталями газотурбинных двигателей.

Вопросами исследования методов окончательной абразивной обработки (полирование абразивной лентой) различных деталей занимались многие видные отечественные и зарубежные ученые, но вопрос окончательной обработки – полирования лопаток ГТД из титановых сплавов рассмотрен не достаточно, проблемы возникновения глубоких единичных рисков и прижогов не решены до конца.

В целях определения технологической возможности замены способа полирования кругом на разработанный метод ленточного полирования профиля пера лопатки из титанового сплава с точки зрения обеспечения требуемой шероховатости экспериментально исследовались ключевые параметры оценки шероховатости: Ra и Rz (высота неровностей профиля определяемое по среднему расстоянию между пятью высшими и пятью низшими точками профиля в пределах длины 0,25 мм.).

Шероховатость профиля пера лопаток была измерена при помощи профилометра-профилографа Perthometer M1. Замеры проводили после обработки пера лопаток из титанового сплава ВТ8М на станке ЛПС-1 изготовленном на ОАО «Пермском моторном заводе» (рис.1) ($v_{л} = 15$ м/с) бесконечными лентами из шлифовальной шкурки по новому разработанному технологическому процессу операции полирования (три перехода). По результатам измерений построены профилограммы (табл. 1).



а б
Рис. 1. а – общий вид станка ЛПС-1;
б – обработка образца лопатки ГТД на ЛПС-1

Таблица 1

Результаты замеров шероховатости после обработки лопаток бесконечными лентами из шлифовальной шкурки на станке ЛПС-1

Переход	Инструмент	Место обработки Значения параметров Ra и Rz	Профилограмма / условное обозначение масштаба профилограммы (по прибору Perthometer M1)
пригонка	ЛБ1 3500×40 RB 315X P100	Спинка Ra=1,133мкм Rz=7,69мкм	 Масштаб 5
		Корыто Ra=0,0964мкм Rz=7,37мкм	
полирование	ЛБ1 3500×40 C-W P240 SAIT	Спинка Ra=0,639мкм Rz=4,72мкм	 Масштаб 2,5
		Корыто Ra=0,610мкм Rz=4,82мкм	
глянцевание	ЛБ1 3500×40 C-W P400 SAIT	Спинка Ra=0,09мкм Rz=0,73мкм Корыто Ra=0,049мкм Rz=0,55мкм	 Масштаб 0,5

В результате анализа полученных профилограмм и результатов измерений в значениях Ra и Rz установлено, что шероховатость при полировании бесконечными лентами удовлетворяет техническим требованиям для изготовления лопаток ГТД из титановых сплавов. Общий фон шероховатости после полирования лентой равномерный отсутствуют глубокие единичные риски.

В связи большой номенклатурой лопаток изготавливаемых для современных газотурбинных двигателей проведение экспериментальных исследований для каждого типа детали - весьма трудоемкий и дорогостоящий процесс.

Однако в настоящее время в профильной литературе не приведен однозначный алгоритм нахождения параметров шероховатости при полировании бесконечной лентой. В связи с чем, определение математического расчета параметров шероховатости полированной поверхности в зависимости от режимов шлифования и состояния режущей поверхности бесконечной ленты позволит, исключить эксперименты, а также прогнозировать количественные характеристики шероховатости поверхности.

Для расчета искомых параметров Ra и Rz определим:

1. Н (мкм) – толщину слоя материала, в котором распределена шероховатость поверхности, характеризующую максимально возможную глубину образования риски во время обработки бесконечной лентой из шлифовальной шкурки. Для этого воспользуемся следующими выражениями [1]:

$$H = t_m - \frac{t_m^2}{1,478 \cdot t_m + \frac{13,66 \cdot V_d}{k_c \cdot V_l \cdot n \sqrt{D_d \cdot \rho_3}}}, \quad (1)$$

где

$$t_m = 0,789 \cdot \Delta r + \sqrt{0,546(\Delta r)^2 + \frac{13,66 \cdot V_d \cdot \Delta r}{k_c \cdot V_l \cdot n \sqrt{D_d \cdot \rho_3}}}, \quad (2)$$

t_m – максимальная глубина микрорезания, мкм; k_c – коэффициент стружкообразования; ρ_3 – радиус закругления вершин абразивных зерен, мм; Δr – съем металла в единицу времени (величина определена экспериментальным путем), мм; t_m – максимальная глубина микрорезания, мм; V_d – скорость врезания детали, м/с; V_l – скорость абразивного резания, м/с; D_d – диаметр детали, мм; n – число абразивных зе-

$$Rz = \left[\frac{k \cdot \eta_1 \cdot P_Y^{1/3} \cdot E_d \cdot (1 \pm R_{рол} / R_{дет})^{2/3} \cdot H}{\frac{\eta}{100} \cdot D_{л}^{1/3} \left[4 \cdot V_{л}^2 \cdot H \cdot D_{л}^{1/3} + (k \cdot \eta_1 \cdot P_Y^{2/3} \cdot E_d^{2/3})^2 \cdot (1 \pm R_{рол} / R_{дет})^{5/3} \right]} \right]^{-1/2} - 0,41 \cdot \rho_3, \text{ мкм}; \quad (5)$$

где E_d - динамический модуль упругости контактного ролика, Н/см²; η – количество работающих зерен во время обработки (65-80% [4]), %; η_1 – коэффициент

учитывающий факторы влияющие на обработку (жесткость и стойкость абразивного инструмента, дисбаланс контактного ролика, упругое восста-

рен на единице площади рабочей поверхности инструмента, $n = 0,26 \cdot 10^4 \cdot N^{-2}$ (N – зернистость инструмента), шт/мм².
2. Силу резания, возникающую при полировании лопатки абразивными лентами. Для нахождения, которых разобьем ее на составляющие P_z (сила, направленная по касательной к окружности шлифовального круга) и P_Y (сила, представляющая собой силу давления контактного ролика на деталь; эта сила действует в направлении радиуса контактного ролика, находящегося в точке его касания с деталью, поэтому ее называют радиальной силой) и отобразим расположение на рис. 2 [2]:

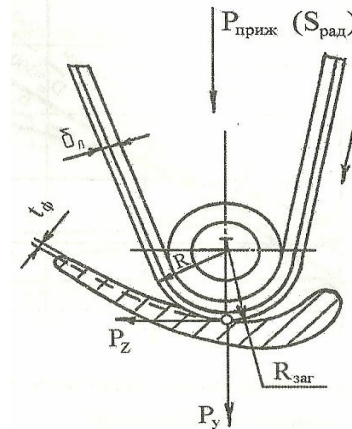


Рис. 2. Схема расположения сил резания при полировании лопатки бесконечной лентой из шлифовальной шкурки

Для данной схемы полирования силы определяются следующим образом:

$$P_z = \sigma_b \cdot t_m^{1,5} \left(\frac{R_{дет} \cdot R_{рол}}{R_{дет} - R_{рол}} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{24 \cdot V_d}{V_l N} \right), \text{ Н}; \quad (3)$$

$$P_Y = \sigma_b \cdot t_m^{1,5} \left(\frac{R_{дет} \cdot R_{рол}}{R_{дет} - R_{рол}} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{29 \cdot V_d}{V_l N} \right), \text{ Н}; \quad (4)$$

где σ_b – временное сопротивление разрыву, МПа; V – ширина ленты, мм; $R_{заг}$ – радиус профиля пера лопатки, мм; R – радиус контактного ролика, мм.

Таким образом, для определения высоты неровности профиля Rz после полирования лопаток ГТД из титанового сплава воспользуемся исследованиями Ф.С. Юнусова [3] и с учетом вышеприведенных выражений (1) и (4) получим:

учитывающий факторы влияющие на обработку (жесткость и стойкость абразивного инструмента, дисбаланс контактного ролика, упругое восста-

новление металла). Среднее арифметическое отклонение профиля Ra определяем по приближенной зависимости:

$$Ra = Rz/4, \text{ мкм.} \quad (6)$$

На основании приведенной методологии расчета параметров шероховатости выполнен расчет для полировании лопатки газотурбинного двигателя из сплава ВТ8М на станке ЛПС-1 бесконечной шлифовальной лентой ЛБ1 3500×40 С-W P400 SAIT. Сопоставление экспериментально полученных параметров шероховатости поверхности при полировании титанового сплава и рассчитанных теоретически показало, что расхождение расчетных и экспериментальных значений Ra не превышают 10%. Это говорит о возможности использования предложенной методики расчета в практических целях для прогнозирования параметров шероховатости полированного профиля пера лопаток ГТД, а также назначения режимов полирования, обеспечивая заданную высоту неровностей.

Литература

1. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки: в 3 ч. / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во СГУ, 1980. – 1991. Ч. 2 : Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке. – 1989. – 160 с.
2. Калинин Е.П. Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента / Е.П. Калинин. – СПб. : Изд-во Политехнического ун-та, 2009. – 259 с.
3. Юнусов Ф.С. Шлифование крупногабаритных деталей маятниковыми головками / Ф.С. Юнусов, Ю.Я. Фельдман. – М. : Машиностроение, 1981. – 120 с.
4. Иванов Ю.И. Эффективность и качество обработки инструментами на гибкой основе / Ю.И. Иванов, Н.В. Носов. – М. : Машиностроение. 1985. – 48 с.

Поступила в редакцию 31.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» ПГТУ В.А. Иванов, Пермь, Россия.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОЛІРУВАННЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

В.Ф. Макаров, К.М. Бычина, Г.О. Чуян

Розглянуті проблеми існуючого методу полірування лопаток газотурбінних двигунів кругами на повстяній основі. Запропонований новий метод полірування лопаток – полірування нескінченними стрічками з шліфувальної шкірки. Новий метод дозволяє вирішити проблему освіти глибоких одиничних рисок після обробки. Проведені експериментальні дослідження формування шорсткості в процесі полірування лопаток, підтверджуючі теоретичні припущення. Приведені результати досліджень. Запропонована методика розрахунку параметрів шорсткості. Доведена можливість застосування в практичних цілях математичного розрахунку параметрів шорсткості.

Ключові слова: лопатка газотурбінного двигуна, полірування, нескінченна стрічка з шліфувальної шкірки, шорсткість, математичне моделювання.

MATHEMATICAL MODELLING OF PROCESS OF POLISHING BLADES OF GAS-TURBINE ENGINES

V.F. Makarov, E.N. Bychina, A.O. Chuyan

Problems of existing method of a polishing of blades of gas-turbine engines around on the felt basis are considered. The new method of a polishing of blades - polishing of blades by infinite belt from the emery paper is offered. It method to solve a problem of exist technological process of deep unit scratch indexes after machining. Experimental investigations of a surface roughness formation have been made, which confirm an authenticity of the theoretical conjecture. Research results are described. The design procedure is suggested for parameters of a roughness. The capability of a design procedure calculation of parameters of a roughness has been proved.

Key words: gas-turbine engine blade, polishing, infinite belt from the emery paper, roughness, mathematical modelling.

Макаров Владимир Федорович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Пермского государственного технического университета, Пермь, Россия, e-mail: tms3@pstu.ru.

Бычина Екатерина Николаевна – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Пермского государственного технического университета, инженер-технолог ОАО «Пермский моторный завод», Пермь, Россия, e-mail: Katerina.Bychina@yandex.ru.

Чуян Анна Олеговна – студентка 5-го курса кафедры «Технология машиностроения» Пермского государственного технического университета, Пермь, Россия, e-mail: chuyasha@mail.ru.