

**В.И. Свирщёв, С.В. Тарасов, В.В. Мережников**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НОРМАТИВНОГО СОЧЕТАНИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ  
ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ПОПЕРЕЧНОГО СТРОЧНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ  
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ,  
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ТРЕБУЕМУЮ ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ**

Отсутствие нормативной базы данных по назначению управляемых параметров режима обработки сложнопрофильных поверхностей, которыми являются профили проточной части компрессорных лопаток газотурбинного двигателя, не позволяет обоснованно назначать сочетание параметров режима поперечного строчного фрезерования при формообразовании профиля в процессе изготовления на многокоординатных станках с ЧПУ, которое бы обеспечивало требуемую точность профиля пера лопатки. На основании анализа геометрических связей в зоне контакта фрезы со сферической рабочей поверхностью и криволинейным профилем проточной части лопатки установлены функциональные зависимости для расчета нормальной составляющей силы фрезерования и ее проекции на ось  $Y$ , а также плеча приложения этой силы относительно оси вращения лопатки, необходимые для расчета суммарной деформации лопатки от прогиба и скручивания, для каждой точки профиля поперечного сечения лопатки. Анализ полученных функциональных значений показал, что координаты плеч, соответствующие точкам геометрической модели поперечного сечения лопатки, и координаты плеч, соответствующие точкам прикосновения проекции нормальной составляющей силы фрезерования, различны и зависят от двух факторов: направления обхода контура строчки по сравнению с направлением вращения лопатки относительно оси  $Z$ ; расположения фрезеруемой точки профиля (знак координаты  $X$ ) на спинке или корыте лопатки. Описана методология, и получены аналитические выражения для расчета и назначения нормативного сочетания управляемых параметров режима метода формообразования, обеспечивающего требуемую точность профиля пера лопатки, при разработке управляющей программы автоматизированного формообразования профиля пера лопатки на станке с ЧПУ.

**Ключевые слова:** профиль пера лопатки, точность профиля проточной части, многокоординатное формообразование профиля лопатки, параметры режима поперечного строчного фрезерования.

**V.I. Svirshchev, S.V. Tarasov, V.V. Merezchnikov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**PREDICTION OF THE NORMATIVE COMBINATION OF CONTROLLED  
PARAMETERS OF THE MODE OF CROSS-LINE MILLING OF THE FLOW  
SECTION OF THE VANES OF A GAS TURBINE ENGINE, ENSURING  
THE REQUIRED MACHINING ACCURACY**

The absence of a regulatory database on the designation of controlled parameters for the treatment of complex profile surfaces, which are the profiles of the flowing part of the compressor vanes of a gas turbine engine, does not allow reasonably assigning a combination of the parameters of the mode of transverse line milling when shaping the profile in the manufacturing process on multi-axis CNC machines that would provide the required accuracy the profile of the vane. Based on the analysis of geometric connections in the zone of contact of the cutter with a spherical working surface and curvilinear profile of the flow-through part of the vane, functional dependencies were established to calculate the normal component of the milling force and its projection on the  $Y$  axis, as well as the shoulder of this force relative to the axis of rotation of the vane, necessary to calculate the total deformation of the vane from deflection and twisting, for each point of the cross-sectional profile of the vane. Analysis of the obtained functional values showed that the coordinates of the shoulders corresponding to the points of the geometric model of the vane cross section and the coordinates of the shoulders corresponding to the touch points of the projection of the normal component of the milling force are different and depend on two factors: the direction of the bypass of the line contour compared with the direction of rotation of the vane relative to the  $Z$  axis; location of the milled profile point (sign for the  $X$  coordinate) on the back or trough of the vane. The methodology is described and analytical expressions are obtained for calculating and assigning

a normative combination of controlled parameters of the shaping method, which ensure the required accuracy of the profile of the vane, when developing a control program for the automated shaping of the vane profile on a CNC machine.

**Keywords:** profile of vane feather, accuracy of the flow section profile, multi-coordinate shaping of the vane profile, parameters of the mode of transverse line milling.

При формообразовании профиля проточной части компрессорных лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) на многокоординатных станках с ЧПУ широко используется технологическая схема поперечного строчного формообразования, согласно которой лопатке сообщают вращение вокруг собственной оси и обрабатывают инструментом со сферической рабочей поверхностью, совершающим вращение и интерполированное осевое перемещение [1–4]. Требуемые показатели качества поверхности профиля пера лопатки (точность профиля и шероховатость поверхности) [5–7] обеспечиваются обоснованным назначением сочетания управляемых параметров режима метода формообразования при обработке на многокоординатных станках с ЧПУ [8–10]. Однако в настоящее время отсутствует нормативная база данных по расчету и назначению сочетания управляемых параметров режима фрезерования при формообразовании сложнопрофильных поверхностей, одним из представителей которых является профиль проточной части компрессорных лопаток ГТД.

Точность профиля пера лопатки для каждой строчки и угла ее поворота будет определяться величиной суммарных линейных и угловых деформаций лопатки  $\delta_i$ , которая не должна превышать допуска на его изготовление (рис. 1).

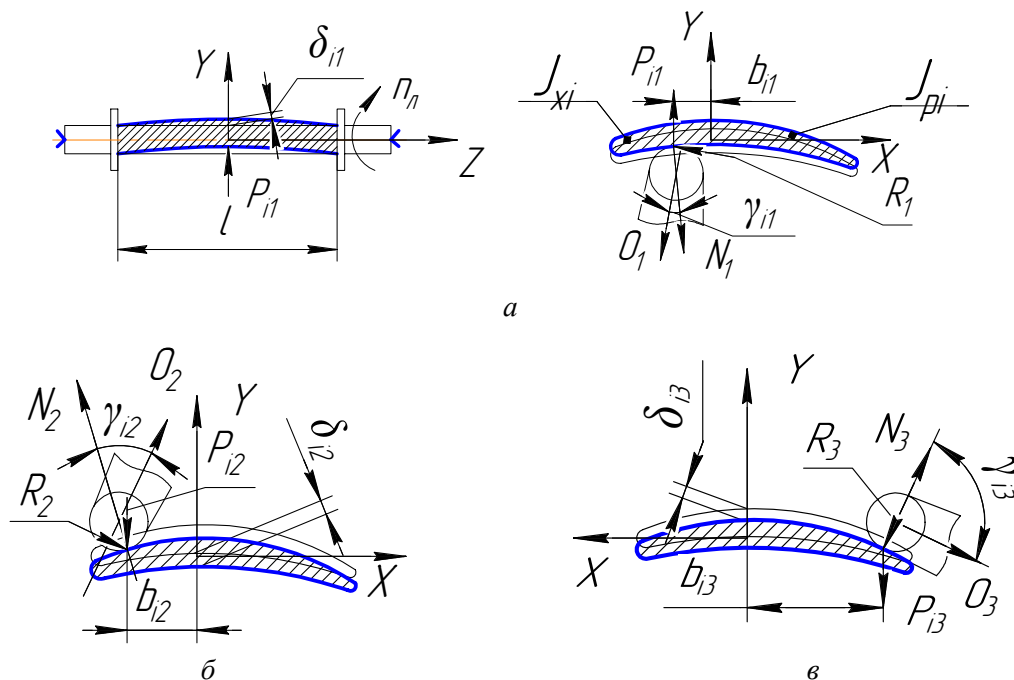


Рис. 1. Схемы к расчету деформации лопатки при поперечном строчном формообразовании:  $l$  – длина пера лопатки;  $a_i$  – координата строчки лопатки;  $P_i$  – составляющая силы фрезерования в направлении координаты  $Y$  для каждой строчки и угла поворота лопатки;  $b_i$  – плечо приложения силы  $P_i$  относительно оси  $Z$ ;  $\delta_i$  – суммарная деформация пера лопатки от изгиба и скручивания под действием силы  $P_i$  для каждой строчки и угла поворота,  $n_n$  – частота вращения лопатки. Положение фрезы при фрезеровании:  $a$  – корыта лопатки;  $b$  – спинки лопатки на входе;  $c$  – спинки лопатки на выходе

При поперечном строчном фрезеровании необходимо соблюдать следующие обязательные условия, позволяющие достичь требуемой точности обработки:

– использовать при обработке профиля пера лопаток пятикоординатные фрезерные центры. Наличие в станке пяти одновременно управляемых координат является обязательным условием не только для создания технологических траекторий перемещения инструмента, совпа-

дающих с теоретическим профилем детали в пределах допуска на его изготовление, но и для обеспечения постоянства скорости резания в различных точках профиля;

– осуществление процесса резания на режимах, обеспечивающих значение деформации лопатки  $\delta_i$ , независимо от положения фрезы на обрабатываемой поверхности детали, в пределах допуска на ее изготовление (см. рис. 1). Второе условие вытекает из развития первого и заключается в разработке алгоритма изменения сочетания параметров режима резания.

Согласно схеме, представленной на рис. 2, в процессе формообразования проточной части поперечными строчками угол наклона фрезы должен постоянно меняться.

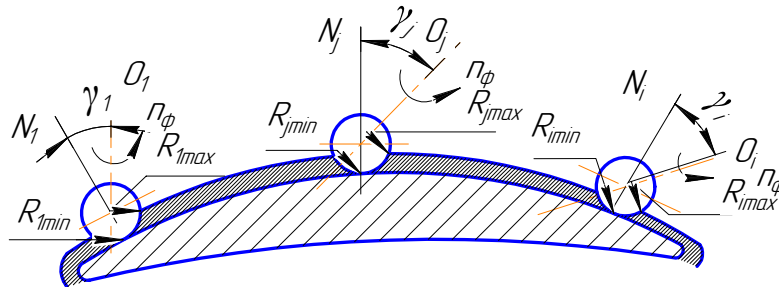


Рис. 2. Схема положений инструмента со сферической режущей поверхностью на поверхности заготовки

Это обусловлено тем, что каждая точка, образующая профиль спинки пера, характеризуется своим положением нормали:  $N_1, N_j, N_i$  и т.д. При этом для обеспечения постоянства значений эффективных радиусов режущей кромки  $R_{\max}$  и  $R_{\min}$  угол наклона  $\gamma$  оси фрезы к нормали обрабатываемой поверхности должен быть отличным от нуля, что возможно, если нормальям  $N_1, N_j, N_i$  отвечают соответственно положения осей фрезы  $O_1, O_j, O_i$  и т.д. В этом случае значения  $R_{\min}$  отличны от нуля, что исключает процессы пластического деформирования, подмятия металла вершиной инструмента. Данное условие удастся выполнить только при пятикоординатной обработке лопаток компрессора.

Перо лопатки формируется в процессе его фрезерования концевой фрезой со сферической рабочей поверхностью радиусом  $R$ . При этом (см. рис. 1, а) лопатка вращается вокруг оси  $Z$ , а фреза перемещается при прохождении каждой строки в направлениях  $Y$  и  $X$  с подачей  $S$ . После одного полного поворота детали вокруг оси  $Z$  фреза смещается в продольном направлении на ширину строки, и процесс резания возобновляется.

Каждое сечение обрабатываемой поверхности пера лопатки, например  $i$ -е, характеризуется размером  $a_i$ . При прохождении фрезой строки в сечении  $a_i$  постоянно изменяется расстояние между ее режущей частью и осью вращения детали, т.е. изменяется размер  $b_i$ , последовательно принимая значения  $b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}$  (см. рис. 1).

В результате изменения этих расстояний непрерывно изменяются углы наклона оси фрезы  $\gamma$  относительно нормалей  $N$ , т.е. каждому новому положению нормали обрабатываемой поверхности  $N_1, N_2, N_3$  отвечает свой угол наклона – соответственно  $\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \gamma_{i3}$ . При этом действительные средние эффективные радиусы режущей поверхности сферической части фрезы радиуса  $R$  соответственно равны  $R_1, R_2, R_3$ .

Изменение углов наклона фрезы и соответствующие им изменения радиусов режущей части изменяют окружные скорости резания, которые принимают значения  $V_{j1}, V_{j2}, V_{j3}$  соответственно. В том случае, когда увеличение угла  $\gamma_i$  не приводит к изменению радиуса режущей кромки фрезы, т.е. при  $\gamma_i = \gamma_{\max}$ , изменяют в процессе фрезерования величину подачи фрезы ( $S_{j1}, S_{j2}, S_{j3}$ ).

Угол  $\gamma_{\max}$  отвечает положению фрезы, при котором эффективный радиус режущей кромки принимает максимальное значение  $R_{\max} = R$ . В этом случае возможности регулирования процесса резания с помощью изменения окружной скорости резания фрезы исчерпаны.

Значение угла наклона оси фрезы  $\gamma$ , определяющее окружную скорость резания  $V_p$  и подачу  $S_i$  при  $\gamma_i = \gamma_{\max}$ , в каждый момент времени устанавливаются исходя из условия, что необходимо обеспечить деформации пера лопатки, не превышающие допуск на размеры проточной части. После фрезерования поперечной строки фреза перемещается на ширину строки в направлении  $Z$ , и процесс резания возобновляется. При этом положении фрезы происходит обработка следующего сечения, т.е.  $i + 1$ .

Для данного сечения, имеющего в плоскости  $XOZ$  значения параметров  $a_{i+1}$  и  $b_{i+1}$ , моменты инерции при изгибе и кручении равны  $J_{xi+1}$ ,  $J_{pi+1}$  соответственно. Эти характеристики лопатки отличны от аналогичных значений в  $i$ -м сечении лопатки. Исходя из этого при фрезеровании этой строки значения углов наклона фрезы  $\gamma_{i+1}$  и подачи  $S_{i+1}$  устанавливаются с учетом обеспечения деформаций пера лопатки под действием сил резания не только в данном сечении, т.е. в  $(i + 1)$ -м, но и в предыдущем, т.е.  $i$ -м. При этом исходят из того, что изгиб лопатки образуется в результате проекции нормальной составляющей силы резания  $P_i$ , определяемой в каждый момент времени работы фрезы режимами обработки.

Поскольку сечения профиля пера в направлениях  $X$  и  $Y$  существенно различаются по моментам инерции пера  $J_x$  и  $J_y$ , причем  $J_y \gg J_x$ , деформации в направлении  $Y$  ( $f_y$ ) значительно больше деформаций в направлении  $X$  ( $f_x$ ), т.е.  $f_y \gg f_x$ .

Величина прогиба лопатки  $\delta_i$  определяется из выражения [10, 11]

$$\delta_i = \frac{P_i l^3}{3EJ_x} \left[ \left( 2 \frac{a_i^3}{l^3} - \frac{a_i^4}{l^4} - \frac{a_i^2}{l^2} \right) + \frac{3EJ_x}{GJ_p} \cdot \frac{b_i^2 a_i}{l^3} \right], \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>;  $G$  – модуль сдвига материала, Н/м<sup>2</sup>;  $J_x$  – момент инерции площади поперечного сечения пера лопатки относительно оси  $X$ , м<sup>4</sup>;  $J_p$  – момент инерции площади поперечного сечения пера лопатки при кручении относительно оси  $Z$ , м<sup>4</sup>.

Анализ выражения (1) показывает, что для прогнозирования и технологического обеспечения требуемой точности проточной части профиля пера лопатки необходимо знать значение для каждого сечения зависимостей осевых ( $I_x$ ) и полярных ( $I_p$ ) моментов инерции, плеч  $b_i$ , приложение силы  $P_i$  от угла поворота сечения  $\alpha_i$  и координаты  $a_i$  длины проточной части лопатки. Эти зависимости для  $I_x$ ,  $I_p$  и  $b_i$  получены на основании данных, приведенных на рабочих чертежах конструкций компрессорных лопаток в работе [12].

Установим функциональные зависимости для расчета  $P_i$  и расчетного значения плеча  $b_{ip}$  ее приложения в выражении (1) из геометрических связей в зоне контакта концевой фрезы со сферической режущей частью и спинкой лопатки, приведенных на рис. 3.

Процесс фрезерования сферическими фрезами схож с фрезерованием фасонными фрезами с выпуклым профилем. Тангенциальная составляющая  $P_{zi}$  силы резания при фрезеровании определяется из выражения [13, 14]

$$P_{zi} = \frac{10C_p t^x S_z^y B^n z}{D_{\text{эф}}^q \cdot n_{\text{ф}}^w}, \quad (2)$$

где  $C_p$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $n$ ,  $q$ ,  $w$  – табличные значения постоянного коэффициента и показателей степени;  $t$  – глубина фрезерования;  $S_z$  – подача на зуб;  $B$  – ширина фрезерования;  $D_{\text{эф}}$  – средний эффективный диаметр фрезы;  $z$  – число зубьев фрезы;  $n_{\text{ф}}$  – частота вращения фрезы.

Нормальная составляющая  $P_{yi}$  устанавливается из соотношения с тангенциальной составляющей силой  $P_{zi}$  [14]:

$$P_y = (0,4 \dots 0,6) P_z.$$

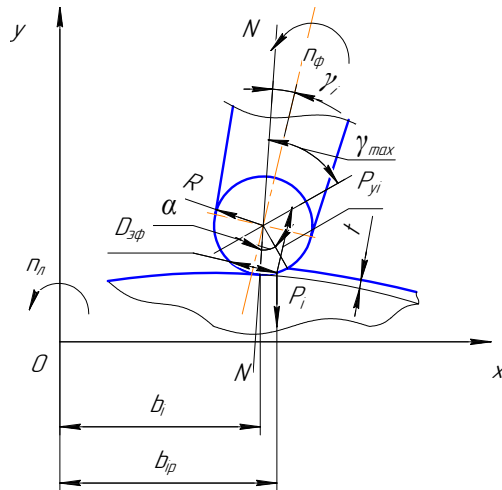


Рис. 3. Геометрические связи в зоне контакта фрезы со сферической режущей частью и спинки лопатки:  $t$  – глубина фрезерования;  $n_n, n_\phi$  – соответственно частоты вращения лопатки и фрезы;  $R$  – радиус сферической режущей части фрезы;  $D_{эф}$  – средний эффективный диаметр режущей кромки;  $\gamma_i, \gamma_{max}$  – соответственно текущий и максимальный углы разворота оси фрезы от нормали  $N-N$  к точке фрезеруемого профиля;  $\alpha$  – угол дуги (ширины  $B$ ) зоны контакта фрезы и лопатки;  $P_{yi}$  – нормальная составляющая силы фрезерования на среднем эффективном диаметре режущей кромки;  $b_i$  – текущее плечо нормали  $N-N$  к точке фрезеруемого профиля;  $b_{ip}$  – текущее плечо приложения силы  $P_i$

Приняв  $P_{yi} = 0,5P_{zi}$  и преобразовав формулу (2) путем домножения числителя и знаменателя на  $z^y$ , получим

$$P_{yi} = \frac{5C_p t^x S_{обi}^y B^n z^{1-y}}{D_{эф}^q n_0^w}, \quad (3)$$

где  $S_{обi}$  – тангенциальная подача за один оборот фрезы в текущей точке профиля лопатки.

Тогда с учетом формулы (3) получим

$$P_i = P_{yi} \cdot \cos \gamma_i = \frac{5C_p t^x S_{обi}^y B^n z^{1-y} \cos \gamma_i}{D_{эф}^q n_{0i}^w}. \quad (4)$$

Ширина фрезерования  $B$  определяется из выражения [15]

$$B = \frac{\pi R \alpha}{180},$$

где

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R-t}{R}\right).$$

Тогда

$$B = \frac{\pi R \alpha}{180} = \frac{\pi R}{180} \cdot \arccos\left(\frac{R-t}{R}\right). \quad (5)$$

Частота вращения фрезы  $n_\phi$  будет найдена по значению рекомендуемой скорости фрезерования  $V$  для пары обрабатываемый–инструментальный материалы из выражения

$$V = \pi D_{эф} n_\phi,$$

$$n_{\phi i} = \frac{V}{2\pi R \sin\left[\gamma_i + \arcsin\left(\frac{R-t/2}{R}\right)\right]}. \quad (6)$$

После подстановки формул (5) и (6) в формулу (4) окончательное выражение для  $P_i$  примет вид

$$P_i = \frac{5C_p t^x S_{об}^y \cdot \left[ \frac{\pi R}{180} \cdot \arccos\left(\frac{R-t}{R}\right) \right]^n \cdot z^{1-y} \cdot \cos \gamma_i}{(2R)^q \cdot \left(\frac{V}{2\pi R}\right)^w \cdot \left(\sin\left(\gamma_i + \arccos\left(\frac{R-t/2}{R}\right)\right)\right)^{q-w}} \quad (7)$$

Текущее значение плеча  $b_{ip}$  (см. рис. 3) приложения силы  $P_i$  определяется из выражения

$$b_{ip} = b_i \pm R \cdot \sin(\alpha / 2) = b_i \pm R \cdot \sin\left[\arccos\left(\frac{R-t/2}{R}\right)\right] \quad (8)$$

Знак приращения (или убывания)  $b_{ip}$  в формуле (8) будет определяться двумя факторами: направлением обхода контура строчки по сравнению с направлением вращения лопатки относительно оси  $Z$ ; расположением фрезеруемой точки профиля (знаком координаты  $X$ ) на спинке или корыте лопатки. Этот знак определяется в зависимости от сочетания указанных факторов из таблицы.

Знак приращения (убывания)  $b_{ip}$  в формуле (8)

Направление обхода контура строчки относительно оси $Z$ и знак координаты $X$	По часовой стрелке				Против часовой стрелки			
	Спинка	Корыто	Спинка	Корыто	Спинка	Корыто	Спинка	Корыто
	Знак координаты $X$							
Направление вращения лопатки относительно оси $Z$	+	-	+	-	+	-	+	-
По часовой стрелке	+	+	-	-	-	-	+	+
Против часовой стрелки	+	+	-	-	-	-	+	+

После подстановки формул (7) и (8) в выражение (1) обобщенная зависимость обеспечения требуемой точности профиля проточной части лопатки примет вид

$$\frac{5C_p t^x S_{об}^y \cdot \left[ \frac{\pi R}{180} \cdot \arccos\left(\frac{R-t}{R}\right) \right]^n \cdot z^{1-y} \cos \gamma_i}{3(2R)^q \cdot \left(\frac{V}{2\pi R}\right)^w \cdot \left(\sin\left(\gamma_i + \arccos\left(\frac{R-t/2}{R}\right)\right)\right)^{q-w}} \cdot EJ_x \times l^3 \cdot \left[ 2 \cdot \frac{a_i^3}{l^3} - \frac{a_i^4}{l^4} - \frac{a_i^2}{l^2} + \frac{3EJ_x \left(b_i \pm R \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R-t/2}{R}\right)\right)\right)^2 \cdot a_i}{\sigma J_p l^3} \right] \leq kT, \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент использования поля допуска,  $k = 0,3...0,7$ ;  $T$  – допуск на точность профиля проточной части лопатки.

Из выражения (9) могут быть получены аналитические выражения для расчета сочетания управляемых параметров режима фрезерования проточной части компрессорных лопаток ГТД в виде следующих математических моделей:

При  $\gamma_i < \gamma_{\max} = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{R-t}{R}\right)$

$$\frac{\cos \gamma_i}{\left[ \sin \left( \gamma_i + \arccos \left( \frac{R-t/2}{R} \right) \right) \right]^{q-w}} \leq \frac{3(2R)^q \cdot \left( \frac{V}{2\pi R} \right)^w \cdot EJ_x kT}{5C_p t^x S_{об}^y z^{1-y}} \times$$

$$\times \frac{1}{\left[ \frac{\pi R}{180} \cdot \arccos \left( \frac{R-t}{R} \right) \right]^n \cdot l^3 \cdot \left[ 2 \cdot \frac{a_i^3}{l^3} - \frac{a_i^4}{l^4} - \frac{a_i^2}{l^2} + \frac{3EJ_x \left( b_i \pm R \cdot \sin \left( \arccos \left( \frac{R-t/2}{R} \right) \right) \right)^2 \cdot a_i}{\sigma J_p l^3} \right]} \quad (10)$$

При  $\gamma_i = \gamma_{\max}$

$$S_{об} = \left\{ \frac{3(2R)^q \cdot \left( \frac{V}{2\pi R} \right)^w \cdot EJ_x kT \cdot \left[ \sin \left( \gamma_{\max} + \arccos \left( \frac{R-t/2}{R} \right) \right) \right]^{q-w}}{5C_p t^x z^{1-y} \cdot \cos \gamma_{\max}} \times \right.$$

$$\left. \times \frac{1}{\left[ \frac{\pi R}{180} \cdot \arccos \left( \frac{R-t}{R} \right) \right]^n \cdot l^3 \cdot \left[ 2 \cdot \frac{a_i^3}{l^3} - \frac{a_i^4}{l^4} - \frac{a_i^2}{l^2} + \frac{3EJ_x \left( b_i \pm R \cdot \sin \left( \arccos \left( \frac{R-t/2}{R} \right) \right) \right)^2 \cdot a_i}{\sigma J_p l^3} \right]} \right\}^{1/y} \quad (11)$$

Полученные аналитические выражения (10) и (11) являются основой для расчета и назначения нормативных сочетаний управляемых параметров режима фрезерования проточной части лопатки, обеспечивающих требуемую точность обработки, при проектировании технологических операций и разработке управляющей программы многокоординатной обработки станка с ЧПУ.

### Библиографический список

1. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.
2. Полетаев В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
3. Способ строчного фрезерования пера лопатки газотурбинного двигателя: пат. 2354508 Российская Федерация, МКН В23С3/18 / Свирщёв В.И., Башкатов И.Г., Оконешников Д.В., Степанов Ю.Н., Цыпков С.В. – № 2007124229/02; заявл. 27.06.2007; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13. – 5 с.
4. Сулима А.М., Носков А.А., Серебренников Г.З. Основные технологии производства газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1996. – 480 с.

5. Рахмарова М.С., Мирер Я.Г. Влияние технологических факторов на надежность лопаток газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1966. – 223 с.
6. Семенченко И.В., Мирер Я.Г. Повышение надежности лопаток газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1977. – 160 с.
7. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
8. Безъязычный В.Ф., Крыхов В.Н., Поletaев В.А. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей. – М.: Машиностроение, 2005. – 566 с.
9. Елисеев Ю.С. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 2003. – 511 с.
10. Способ строчного фрезерования пера лопатки газотурбинного двигателя на многокоординатных станках с ЧПУ: пат. 2607880 Российская Федерация; МКН В23С3/18 / Свирщев В.И., Тарасов С.В., Тукачев Д.В., Черепанов С.Е. – № 2015124625; заявл. 23.06.2015; опубл. 20.01.2017, Бюл. № 2. – 5 с.
11. Ицкович Г.М., Винокуров А.И., Минин Л.С. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов. – М.: Высшая школа, 1970. – 544 с.
12. Свирщев В.И., Тарасов С.В., Мережников В.В. Нормативные геометрические параметры сечений проточной части компрессорных лопаток газотурбинного двигателя, необходимые для прогнозирования и технологического обеспечения показателей качества // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 49. – С. 103–117.
13. Гуревич Я.Л., Горохов М.В., Захаров В.И. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 240 с.
14. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под. ред. А.М. Дальского, А.Г. Суслова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., исправ. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 944 с.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

#### Referentses

1. Krymov V.V., Eliseyev Yu.S., Zudin K.I. Proizvodstvo lopatok gazoturbinykh dvigateley [Production of gas turbine engine blades]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2002, 376 p.
2. Poletayev V.A. Tekhnologiya avtomatizirovannogo proizvodstva lopatok gazoturbinykh dvigateley [Technology-aided manufacturing gas turbine vanes dvigateley]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2006, 256 p.
3. Svirshev V.I., Bashkatov I.G., Okoneshnikov D.V., Stepanov Y.N., Pimples S.V. The process of horizontal milling feather vanes of gas turbine engine. Patent 2354508, MCS V23S3/18 The Russian Federation, № 2007124229/02; publ. 10.05.2009.
4. Sulima A.M., Noskov A.A., Serebrennikov G.Z. Osnovnyye tekhnologii proizvodstva gazoturbinykh dvigateley [Main production technology of gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1996, 480 p.
5. Rakhmarova M.S., Mirer Ya.G. Vliyaniye tekhnologicheskikh faktorov na nadezhnost lopatok gazovykh turbin [The Influence of technological factors on the reliability of gas turbine vanes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1966, 223 p.
6. Semenchenko I.V., Mirer Ya.G. Povysheniye nadezhnosti lopatok gazoturbinykh dvigateley [Increasing the reliability of gas turbine engine vanes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1977, 160 p.
7. Suslov A.G. Tekhnologicheskoye obespecheniye parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detaley [Technological support of the state parameters of the surface layer of parts]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1987, 208 p.
8. Bezyazychnyy V.F., Krykhov V.N., Poletayev V.A. Avtomatizatsiya tekhnologii izgotovleniya gazoturbinykh aviatsionnykh dvigateley [Automation of manufacturing technology of gas turbine aircraft engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2005, 566 p.
9. Eliseyev Yu.S. Tekhnologiya proizvodstva aviatsionnykh gazoturbinykh dvigateley: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Technology of production of aircraft gas turbine engines : a textbook for high schools]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2003, 511 p.
10. Svirschyov V.I., Tarasov S.V., Tukachev D.V., Cherepanov S.E. The method of line milling of the vane of a gas turbine engine vane on multi-axis CNC machines: pat. 2607880 Russian Federation: MKN В23С3/18, № 2015124625; claimed. 06.23.2015; publ. 01.20.2017.



11. Itskovich G.M., Vinokurov A.I., Minin L.S. Rukovodstvo k resheniyu zadach po soprotivleniyu materialov [A guide to solving problems on the resistance of materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970, 544 p.

12. Svirshchev V.I., Tarasov S.V., Merezchnikov V.V. Normativnyye geometricheskiye parametry secheniy protochnoy chasti kompressornykh lopatok gazoturbinnogo dvigatelya, neobkhodimyye dlya prognozirovaniya i tekhnologicheskogo obespecheniya pokazateley kachestva [Normative geometric parameters of the flow section of the compressor vanes of a gas turbine engine, which are necessary for forecasting and technological supply of quality indicators]. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2017, no. 49, pp. 103-117.

13. Gurevich Ya.L., Gorokhov M.V., Zakharov V.I. Rezhimy rezaniya trudnoobrabatyvayemykh materialov: Spravochnik [Cutting hard materials modes: Manual. 2nd ed.]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 240 p.

14. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya [Handbook of the technologist-machine builder. In two vol.]. Ed. by A.M. Dalsky, A.G. Suslova, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakova. 5 th ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003, vol. 2, 944 p.

15. G. Korn, T. Korn, Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers]. Moscow: Nauka, 1984, 831 p.

#### Сведения об авторах

**Свирщёв Валентин Иванович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: svirshchev\_vi@pstu.ru).

**Тарасов Степан Викторович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: tarasovsv100@mail.ru).

**Мережников Владислав Владимирович** (Пермь, Россия) – магистр кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: merejnikov@yandex.ru).

#### About the authors

**Valentin I. Svirshchev** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Innovative Engineering Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: svirshchev\_vi@pstu.ru).

**Stepan V. Tarasov** (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Innovative Engineering Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: tarasovsv100@mail.ru).

**Vladislav V. Merezchnikov** (Perm, Russian Federation) – Master, Department of Innovative Engineering Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: merejnikov@yandex.ru).