

УДК 621.914.7

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.05

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОГИБА КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ СТРОЧНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

При фрезеровании профиля проточной части лопаток газотурбинного двигателя на многоосевых станках 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. Требуемые показатели качества поверхности профиля пера лопатки (точность профиля и шероховатость поверхности) обеспечиваются назначением сочетания управляемых параметров режима фрезерования. Однако в настоящее время нет рекомендаций по расчету и назначению сочетания управляемых параметров режима фрезерования сложнопрофильных поверхностей, которой является профиль проточной части компрессорных лопаток газотурбинного двигателя. Точность профиля пера лопатки для каждой строчки и угла ее поворота будет определяться величиной деформаций лопатки, которая не должна превышать допуска на его изготовление. Из анализа геометрических связей в зоне контакта фрезы со сферической рабочей поверхностью и криволинейным профилем проточной части лопатки установлены зависимости для расчета составляющей силы фрезерования и ее проекции на ось Y, а также эффективный диаметр фрезы, необходимые для расчета суммарной деформации лопатки. Описана методология и получены аналитические выражения для расчета и назначения сочетания управляемых параметров режима фрезерования, обеспечивающие требуемую точность профиля пера лопатки, при разработке управляющей программы и операции фрезерования лопатки на станке с числовым программным управлением.

**Ключевые слова:** проточная часть, фрезерование профиля лопатки, эффективный диаметр фрезы, силы резания, длина дуги контакта, параметры режима поперечного строчного фрезерования.

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

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **ANALYTICAL DESCRIPTION OF TECHNOLOGICAL AND GEOMETRIC INITIAL DATA FOR PREDICTING THE DEFLECTION OF GAS TURBINE ENGINE COMPRESSOR VANES DURING TRANSVERSE LINE MILLING OF THE FLOW PATH ON COMPUTER NUMERICAL CONTROL MACHINES**

When milling the profile of the flow path of the vanes of a gas turbine engine on multi-axis machines, a technological scheme of transverse line shaping is used, according to which the vane is rotated around its own axis and processed with a tool with a spherical working surface that performs rotation and interpolated axial movement. The required indicators of the surface quality of the vane airfoil profile (profile accuracy and surface roughness) are provided by assigning a combination of controlled parameters of the milling mode. However, at present there are no recommendations on the calculation and assignment of a combination of controlled parameters for the milling of complex-profile surfaces, which is the profile of the flow path of the gas turbine engine compressor vanes. The accuracy of the profile of the vane feather for each line and the angle of its rotation will be determined by the value of the vane deformations, which should not exceed the tolerance for its manufacture. From the analysis of geometric relationships in the contact zone of the mill with a spherical working surface and a curved profile of the flow path of the vane, dependencies were established for calculating the component of the milling force and its projection on the Y axis, as well as the effective diameter of the mill necessary to calculate the total deformation of the vane. The methodology is described and analytical expressions are obtained for calculating and assigning a combination of controlled parameters of the milling mode that provide the required accuracy of the vane airfoil profile when developing a control program and milling a vane on a Computer Numerical Control machines.

**Keywords:** flow path, vane profile milling, mill effective diameter, cutting forces, contact arc length, parameters of the transverse line milling mode.

При формообразовании профиля проточной части компрессорных лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) на многокоординатных станках с числовым программным управлением (ЧПУ) широко используется технологическая схема поперечного строчного фрезерования, 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 фрезерования при обработке на многокоординатных станках с ЧПУ [8–10]. Однако в настоящее время отсутствует нормативная база конструкторско-технологических и геометрических данных по расчету прогибов лопаток в различных сечениях при различных углах их поворота.

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).

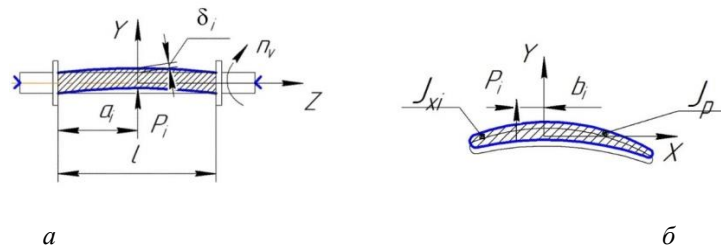


Рис. 1. Схемы к расчету деформации лопатки при поперечном строчном формообразовании (*a* – лопатка компрессорная, *б* – поперечное сечение лопатки): *l* – длина пера лопатки; *a<sub>i</sub>* – координата строчки лопатки; *P<sub>i</sub>* – составляющая силы фрезерования в направлении координаты *Y* для каждой строчки и угла поворота лопатки; *b<sub>i</sub>* – плечо приложения силы *P<sub>i</sub>* относительно оси *Z*;  $\delta_i$  – суммарная деформация пера лопатки от изгиба и скручивания под действием силы *P<sub>i</sub>* для каждой строчки и угла поворота, *n<sub>v</sub>* – частота вращения лопатки

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

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

где *E* – модуль упругости обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>; *G* – модуль сдвига материала, Н/м<sup>2</sup>; *J<sub>x</sub>* – момент инерции площади поперечного сечения пера лопатки относительно оси *X*, м<sup>4</sup>; *J<sub>p</sub>* – 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 значение для каждого сечения зависимостей осевых (*I<sub>x</sub>*) и полярных (*I<sub>p</sub>*) моментов инерции, плеч *b<sub>ip</sub>*, приложение силы *P<sub>i</sub>* от угла поворота сечения  $\alpha_i$  и координаты *a<sub>i</sub>* длины проточной части лопатки. Зависимости для *I<sub>x</sub>*, *I<sub>p</sub>*, и *b<sub>i</sub>* получены на основании данных, приведенных на рабочих чертежах конструкций компрессорных лопаток, в работе [12].

Установим функциональные зависимости для расчета *P<sub>i</sub>* и расчетного значения плеча *b<sub>ip</sub>* ее приложения в выражении (1), из геометрических связей в зоне контакта концевой фрезы со сферической режущей частью и спинкой лопатки, приведенных на рис. 2.

При поперечном строчном фрезеровании зона контакта длиной дуги *B* между фрезой со сферической рабочей поверхностью и лопаткой, в зависимости от направления обхода контура, смещена относительно нормали *N–N* к точкам геометрической модели лопатки.

Установим функциональную зависимость для расчетного значения плеча  $b_{ip}$  приложения проекции  $P_{yi}$  нормальной составляющей силы фрезерования  $P_i$  на ось  $Y$  из геометрических связей в зоне контакта концевой фрезы со сферической режущей частью со спинкой и корытом лопатки.

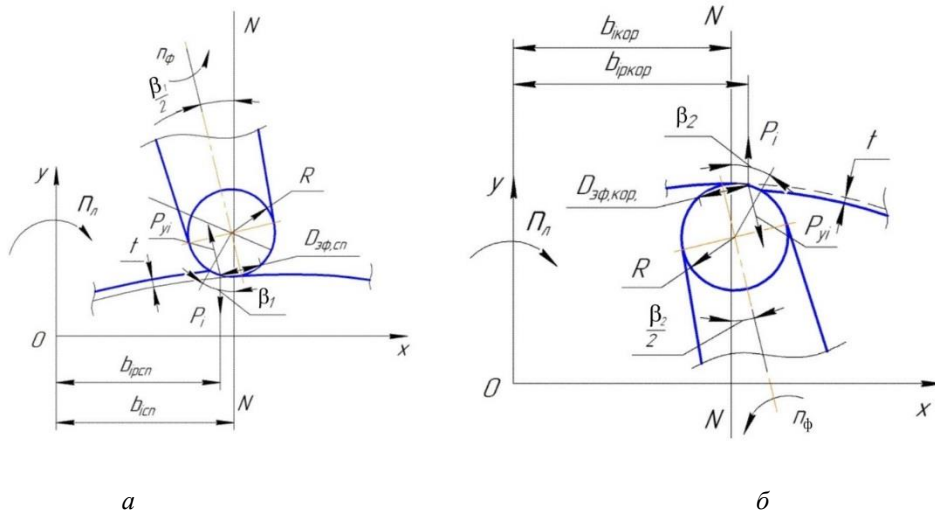


Рис. 2. Геометрические связи в зоне контакта фрезы со сферической рабочей поверхностью спинки (а) и корыта (б) лопатки при встречном фрезеровании:  $t$  – глубина фрезерования;  $n_l, n_f$  – соответственно частоты вращения лопатки и фрезы;  $R$  – радиус сферической режущей части фрезы;  $D_{эф.сп.}, D_{эф.кор.}$  – соответственно средний эффективный диаметр режущей кромки на спинке и корыте;  $\beta_1/2, \beta_2/2$  – соответственно угол разворота оси фрезы от нормали  $N-N$  к точке фрезеруемого профиля на спинке и корыте;  $\beta_1, \beta_2$  – углы дуг (длиной  $B_{сп.}, B_{кор.}$ ) зоны контакта фрезы и лопатки;  $P_{yi}$  – нормальная составляющая силы фрезерования на среднем эффективном диаметре режущей кромки;  $b_{i\text{ сп.}}, b_{i\text{ кор.}}$  – плечи нормалей  $N-N$  к точкам фрезеруемого профиля, согласно чертежу лопатки;  $b_{ip\text{ сп.}}, b_{ip\text{ кор.}}$  – текущие плечи приложения проекций  $P_{yi}$  нормальных составляющих силы фрезерования  $P_i$  на ось  $Y$

Текущее значение плеча  $b_{ip}$  центра давления в зоне контакта проекции  $P_{yi}$  нормальной составляющей силы фрезерования  $P_i$  относительно оси вращения лопатки определяется из выражений:

$$b_{ip\text{ сп.}} = b_{i\text{ сп.}} \pm R \cdot \sin\left(\frac{\beta_1}{2}\right), \quad (2)$$

$$b_{ip\text{ кор.}} = b_{i\text{ кор.}} \pm R \cdot \sin\left(\frac{\beta_2}{2}\right). \quad (3)$$

Знак приращения (или убывания)  $b_{ip}$  по выражениям (2), (3) приведены в табл. 1.

С учетом знака приращения (убывания) координаты  $X(\Delta b_{ip})$  табл. 1 получены аппроксимированные степенные функциональные зависимости для расчета  $\Delta b_{ip}$  в каждой точке сечения А4–А4 рабочей лопатки IV ступени ГТД, с длиной проточной части 151,63 мм, приведенные в табл. 2.

Графики зависимостей плеча  $b_{ip}$  от угла поворота  $\alpha$  приведены на рис. 3 для сечения А4–А4.

Для расчета сил резания при фрезеровании необходимо знание геометрических параметров зоны контакта инструмента со сферической рабочей поверхностью с фрезеруемым профилем спинки и корыта лопатки.

Этими параметрами являются:  $R_{сп.}, R_{кор.}$  – усредненные радиусы соответственно спинки и корыта сечений лопатки,  $B_{сп.}, B_{кор.}$  – длины дуг контакта инструмента соответственно со спинкой и корытом лопатки,  $D_{эф.сп.}, D_{эф.кор.}$  – средние эффективные диаметры режущих кромок инструмента соответственно при фрезеровании спинки и корыта,  $\beta_1, \beta_2$  – углы дуг (длиной  $B_{сп.}, B_{кор.}$ ) зоны контакта фрезы соответственно со спинкой и корытом.

Функциональные зависимости для расчета  $R_{сп}$ ,  $R_{кор}$  для лопатки IV ступени КВД длиной 151,63 мм получены в работе [13] и имеют следующий вид:

$$R_{сп} = 32,008 - 0,3029 \cdot a_i^2 + 16,869 \cdot a_i,$$

$$R_{кор} = 79,087 - 0,2732 \cdot a_i^2 + 60,358 \cdot a_i.$$

Таблица 1

Знак приращения (убывания)  $b_{ip}$

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

Расчетные значения радиусов для различных сочетаний приведены в табл. 3.

Установим значения остальных параметров при формообразовании спинки и корыта сечения А<sub>4</sub>–А<sub>4</sub> лопатки длиной 151,63 мм при следующих исходных данных, мм:  $t = 0,5$ ;  $R = 3$ ;  $R_{сп} = 60,61$ ;  $R_{кор} = 161,75$ ;  $\delta_{пол} = 0,1$  (рис. 4).

Определим угол  $\beta_1$  дуги контакта  $B_{сп}$  инструмента со спинкой лопатки.

Таблица 2

Функциональные зависимости для расчета плеч  $b_{ip}$  для каждой точки в сечении А4-А4

№ точки	$b_{ip} = b_i \pm R \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$
1	$b_{ip} = -4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0022 \cdot \alpha^5 - 0,0412 \cdot \alpha^4 + 0,2081 \cdot \alpha^3 + 0,683 \cdot \alpha^2 - 0,7072 \cdot \alpha - 21,094$
2	$b_{ip} = -4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0022 \cdot \alpha^5 - 0,0398 \cdot \alpha^4 + 0,1982 \cdot \alpha^3 + 0,6798 \cdot \alpha^2 - 0,6357 \cdot \alpha - 20,572$
3	$b_{ip} = -4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0021 \cdot \alpha^5 - 0,0385 \cdot \alpha^4 + 0,1888 \cdot \alpha^3 + 0,6755 \cdot \alpha^2 - 0,569 \cdot \alpha - 20,054$
4	$b_{ip} = -3 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,002 \cdot \alpha^5 - 0,0359 \cdot \alpha^4 + 0,1711 \cdot \alpha^3 + 0,6637 \cdot \alpha^2 - 0,4486 \cdot \alpha - 19,016$
5	$b_{ip} = -3 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0019 \cdot \alpha^5 - 0,0332 \cdot \alpha^4 + 0,1539 \cdot \alpha^3 + 0,6475 \cdot \alpha^2 - 0,3376 \cdot \alpha - 17,931$
6	$b_{ip} = -3 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0017 \cdot \alpha^5 - 0,0307 \cdot \alpha^4 + 0,1377 \cdot \alpha^3 + 0,6311 \cdot \alpha^2 - 0,2338 \cdot \alpha - 16,887$
7	$b_{ip} = -2 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0012 \cdot \alpha^5 - 0,021 \cdot \alpha^4 + 0,0777 \cdot \alpha^3 + 0,5418 \cdot \alpha^2 + 0,1106 \cdot \alpha - 12,564$
8	$b_{ip} = -1 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0007 \cdot \alpha^5 - 0,0112 \cdot \alpha^4 + 0,0223 \cdot \alpha^3 + 0,4211 \cdot \alpha^2 + 0,3782 \cdot \alpha - 7,9516$
9	$b_{ip} = -6 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0003 \cdot \alpha^5 - 0,0026 \cdot \alpha^4 - 0,0222 \cdot \alpha^3 + 0,2871 \cdot \alpha^2 + 0,5456 \cdot \alpha - 3,6344$
10	$b_{ip} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0002 \cdot \alpha^5 + 0,006 \cdot \alpha^4 - 0,0634 \cdot \alpha^3 + 0,126 \cdot \alpha^2 + 0,6514 \cdot \alpha + 0,9617$
11	$b_{ip} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0007 \cdot \alpha^5 + 0,0143 \cdot \alpha^4 - 0,0985 \cdot \alpha^3 - 0,0579 \cdot \alpha^2 + 0,6814 \cdot \alpha + 5,6457$

№ точки	$b_{ip} = b_i \pm R \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$
12	$b_{ip} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0011 \cdot \alpha^5 + 0,0222 \cdot \alpha^4 - 0,1267 \cdot \alpha^3 - 0,2685 \cdot \alpha^2 + 0,6231 \cdot \alpha + 10,434$
13	$b_{ip} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0016 \cdot \alpha^5 + 0,0296 \cdot \alpha^4 - 0,1468 \cdot \alpha^3 - 0,5101 \cdot \alpha^2 + 0,4621 \cdot \alpha + 15,344$
14	$b_{ip} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0021 \cdot \alpha^5 + 0,0366 \cdot \alpha^4 - 0,1601 \cdot \alpha^3 - 0,7792 \cdot \alpha^2 + 0,2131 \cdot \alpha + 20,38$
15	$b_{ip} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0023 \cdot \alpha^5 + 0,0401 \cdot \alpha^4 - 0,1663 \cdot \alpha^3 - 0,9154 \cdot \alpha^2 + 0,0831 \cdot \alpha + 22,904$
16	$b_{ip} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0025 \cdot \alpha^5 + 0,0432 \cdot \alpha^4 - 0,1719 \cdot \alpha^3 - 1,0324 \cdot \alpha^2 - 0,0267 \cdot \alpha + 25,082$
17	$b_{ip} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0025 \cdot \alpha^5 + 0,0415 \cdot \alpha^4 - 0,1531 \cdot \alpha^3 - 1,078 \cdot \alpha^2 - 0,2313 \cdot \alpha + 24,929$
18	$b_{ip} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0022 \cdot \alpha^5 + 0,0373 \cdot \alpha^4 - 0,1432 \cdot \alpha^3 - 0,9303 \cdot \alpha^2 - 0,1143 \cdot \alpha + 22,041$
19	$b_{ip} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0019 \cdot \alpha^5 + 0,0335 \cdot \alpha^4 - 0,14317 \cdot \alpha^3 - 0,8117 \cdot \alpha^2 - 0,0478 \cdot \alpha + 19,553$
20	$b_{ip} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0015 \cdot \alpha^5 + 0,0253 \cdot \alpha^4 - 0,0972 \cdot \alpha^3 - 0,6279 \cdot \alpha^2 - 0,0727 \cdot \alpha + 14,905$
21	$b_{ip} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,001 \cdot \alpha^5 + 0,017 \cdot \alpha^4 - 0,063 \cdot \alpha^3 - 0,4387 \cdot \alpha^2 - 0,0883 \cdot \alpha + 10,181$
22	$b_{ip} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0005 \cdot \alpha^5 + 0,0086 \cdot \alpha^4 - 0,0267 \cdot \alpha^3 - 0,259 \cdot \alpha^2 - 0,1328 \cdot \alpha + 5,5088$
23	$b_{ip} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,00005 \cdot \alpha^5 + 0,0001 \cdot \alpha^4 + 0,0119 \cdot \alpha^3 - 0,0874 \cdot \alpha^2 - 0,2052 \cdot \alpha + 0,8627$
24	$b_{ip} = -7 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0004 \cdot \alpha^5 - 0,0085 \cdot \alpha^4 + 0,0532 \cdot \alpha^3 + 0,0729 \cdot \alpha^2 - 0,3136 \cdot \alpha - 3,7308$
25	$b_{ip} = -1 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0009 \cdot \alpha^5 - 0,017 \cdot \alpha^4 + 0,095 \cdot \alpha^3 + 0,2179 \cdot \alpha^2 - 0,4459 \cdot \alpha - 8,096$
26	$b_{ip} = -2 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0014 \cdot \alpha^5 - 0,0263 \cdot \alpha^4 + 0,1439 \cdot \alpha^3 + 0,3626 \cdot \alpha^2 - 0,6327 \cdot \alpha - 2,796$
27	$b_{ip} = -3 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 - 0,0019 \cdot \alpha^5 - 0,0354 \cdot \alpha^4 + 0,1919 \cdot \alpha^3 + 0,5002 \cdot \alpha^2 - 0,8215 \cdot \alpha - 17,333$
28	$b_{ip} = -3 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,002 \cdot \alpha^5 - 0,0375 \cdot \alpha^4 + 0,2035 \cdot \alpha^3 + 0,5291 \cdot \alpha^2 - 0,8726 \cdot \alpha - 18,358$
29	$b_{ip} = -4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0021 \cdot \alpha^5 - 0,0398 \cdot \alpha^4 + 0,2152 \cdot \alpha^3 + 0,5659 \cdot \alpha^2 - 0,9152 \cdot \alpha - 19,521$
30	$b_{ip} = -4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0022 \cdot \alpha^5 - 0,042 \cdot \alpha^4 + 0,2257 \cdot \alpha^3 + 0,6035 \cdot \alpha^2 - 0,9463 \cdot \alpha - 20,633$
31	$b_{ip} = -4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0023 \cdot \alpha^5 - 0,0428 \cdot \alpha^4 + 0,2293 \cdot \alpha^3 + 0,6225 \cdot \alpha^2 - 0,9493 \cdot \alpha - 21,118$
32	$b_{ip} = -4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^6 + 0,0023 \cdot \alpha^5 - 0,0434 \cdot \alpha^4 + 0,2307 \cdot \alpha^3 + 0,6421 \cdot \alpha^2 - 0,9344 \cdot \alpha - 21,505$

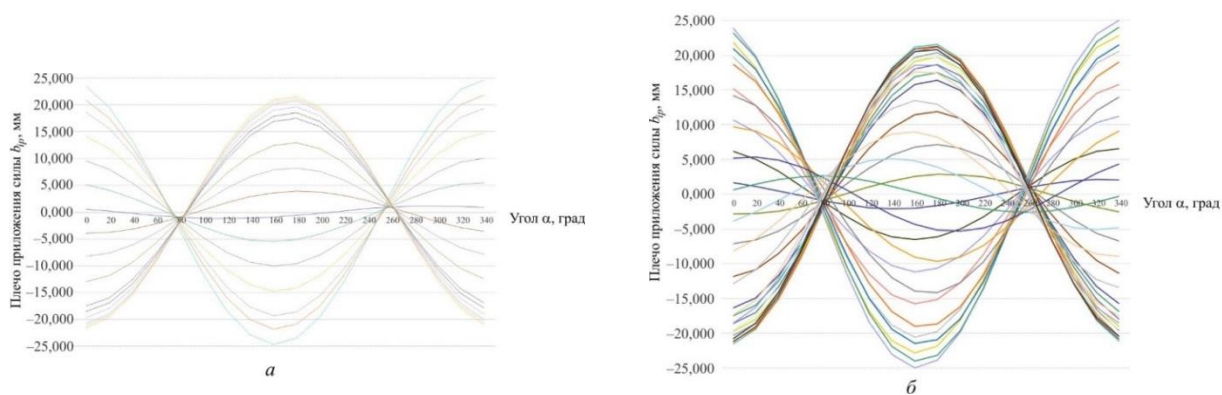


Рис. 3. Графики зависимостей плеча  $b_{ip}$  от угла поворота  $\alpha$  для сечения А4–А4:  
 а – спинки лопатки, б – корыта лопатки

Значения радиусов для лопатки длиной  $L = 151,63$  мм

Номер сечения	Координата сечения $z$ , мм	$R_{сн}$ , мм	$R_{кор}$ , мм
3	7,87	54,09	136,58
4	16,85	60,61	161,75
5	34,82	76,75	251,66
6	52,79	91,12	320,74
7	70,76	109,39	390,85
8	88,73	126,64	420,41
9	97,72	134,41	490,85
10	106,70	149,84	530,29
11	124,67	160,09	600,57
12	142,64	170,05	664,39
13	151,63	179,2	708,26

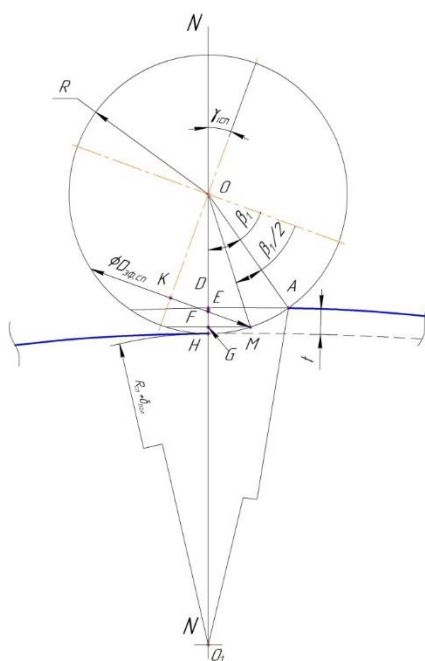


Рис. 4. Геометрические параметры зоны контакта фрезы со спинкой пера лопатки

Согласно теореме косинусов [14], параметры равны, мм:

$$\cos \beta_1 = \frac{OA^2 + OO_1^2 - AO_1^2}{2 \cdot OA \cdot OO_1}, \quad (4)$$

где

$$OA = R = 3,$$

$$OO_1 = R_{сн} + \delta_{пол} + R = 60,61 + 0,1 + 3 = 63,71,$$

$$AO_1 = R_{сн} + \delta_{пол} + t = 60,61 + 0,1 + 0,5 = 61,21.$$

Подставляя численные значения параметров в выражение (4), получим  $\cos(\beta_1) = 0,8405$ ,  $\beta_1 = 32^\circ 48'$ ,  $\beta_1/2 = 16^\circ 24'$ . Определим численные значения отрезков, расположенных на нормали  $N-N$ , мм:

$$GH = R - R \cdot \cos(\beta_1 / 2) = R \cdot (1 - \cos(\beta_1 / 2)) = 3 \cdot 0,047 = 0,122,$$

$$DE = R - R \cdot \cos(\beta_1) = 3 - 3 \cdot \cos(32^\circ 48') = 0,0218,$$

$$DG = t - GH - DE = 0,5 - 0,122 - 0,0216 = 0,3562,$$

$$FG = \frac{R \cdot \sin(\frac{\beta_1}{2})}{\text{ctg}(\gamma_{\text{сн}})}.$$

Получим аналитические зависимости для отрезков  $FM$  и  $KF$ :

$$FM = \sqrt{FG^2 + (R \cdot \sin(\frac{\beta_1}{2}))^2},$$

$$KF = (R - GH - FG) \cdot \sin(\gamma_{\text{сн}}) = (R - GH - R \cdot \sin(\frac{\beta_1}{2}) \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{сн}})) \cdot \sin(\gamma_{\text{сн}}).$$

Согласно рис. 4 запишем следующее выражение:

$$\sin(\gamma_{\text{сн}} + \frac{\beta_1}{2}) = \frac{FM + KF}{R} = \frac{\sqrt{FG^2 + (R \cdot \sin(\frac{\beta_1}{2}))^2} + (R - GH - R \cdot \sin(\frac{\beta_1}{2}) \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{сн}})) \cdot \sin(\gamma_{\text{сн}})}{R}.$$

Преобразуем последнее выражение, подставив  $FG$ :

$$\sqrt{(R \cdot \sin(\frac{\beta_1}{2}) \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{сн}}))^2 + (R \cdot \sin(\frac{\beta_1}{2}))^2} = R \cdot \sin(\frac{\beta_1}{2}) - (R - GH - R \cdot \sin(\frac{\beta_1}{2}) \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{сн}})) \cdot \sin(\gamma_{\text{сн}}).$$

Подставив численные значения  $R$ ,  $GH$ ,  $\beta_1 / 2$  и  $\sin(\beta_1 / 2)$ , окончательно получим:

$$\begin{aligned} &0,717 \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{сн}})^2 + 0,717 - 9 \cdot \sin(\gamma_{\text{сн}} + 16,4)^2 + \\ &+ 6 \cdot \sin(\gamma_{\text{сн}} + 16,4) \cdot \sin(\gamma_{\text{сн}}) \cdot (2,878 - 0,846 \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{сн}})) - \\ &-(2,878 - 0,846 \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{сн}}))^2 \cdot \sin(\gamma_{\text{сн}})^2 = 0. \end{aligned}$$

Решая последнее трансцендентное выражение в программном обеспечении *Matcad*, установили, что оно справедливо для любого значения  $\gamma_{\text{сн}}$  в диапазоне от  $29^\circ 8'$  до  $4^\circ 30'$ .

Поэтому для дальнейших проектных расчётов примем среднее значение  $\gamma_{\text{сн}} = \frac{\beta_1}{2} = 16^\circ 24'$ .

Выполнив аналогичную процедуру преобразования для контакта фрезы с корытом лопатки, получим следующие выражение:

$$\begin{aligned} &0,765 \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{кор}})^2 + 0,765 - 9 \cdot \sin(\gamma_{\text{кор}} + 16,95)^2 + \\ &+ 6 \cdot \sin(\gamma_{\text{кор}} + 16,95) \cdot \sin(\gamma_{\text{кор}}) \cdot (2,87 - 0,8748 \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{кор}})) - \\ &-(2,87 - 0,8748 \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{кор}}))^2 \cdot \sin(\gamma_{\text{кор}})^2 = 0. \end{aligned}$$

При решении последнего трансцендентного выражения в программном обеспечении *Matcad* установлено, что оно справедливо для любого значения  $\gamma_{\text{кор}}$  в диапазоне от  $29^\circ 25'$  до  $4^\circ 18'$ .

Поэтому для дальнейших проектных расчётов примем среднее значение  $\gamma_{\text{кор}} = \frac{\beta_2}{2} = 16^\circ 57'$ .

Определим длину дуги контакта  $B_{\text{сн}}$  и  $D_{\text{эф.сн}}$ , мм:

$$B_{\text{сп}} = \frac{\pi \cdot R \cdot \beta_1}{180} = \frac{3,14 \cdot 3 \cdot 32^\circ 48'}{180} = 1,718,$$

$$D_{\text{эф.сп}} = 2R \cdot \sin \beta_1 = 3,25.$$

Определим скорость резания при фрезеровании спинки лопатки [4]:

$$V_{\text{рсп}} = \frac{C_v \cdot D_{\text{эф.сп}}^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B_{\text{сп}}^u \cdot z^p} \cdot K_v,$$

где  $C_v = 35$ ;  $q = 0,6$ ;  $m = 0,35$ ;  $x = 0,3$ ;  $y = 0,3$ ;  $p = 0,2$ ;  $u = 0,2$ ;  $K_v = 1$  – поправочный коэффициент [14, 15];  $T = 15$  мин;  $D_{\text{эф.сп}} = 3,25$  мм;  $B_{\text{сп}} = 1,718$  мм;  $t = 0,5$  мм;  $S_z = 0,03$  мм/зуб [2];  $z = 4$ . Найдем  $V_{\text{рсп}}$ , м/мин:

$$V_{\text{рсп}} = \frac{35 \cdot 3,25^{0,6}}{15^{0,35} \cdot 0,5^{0,3} \cdot 0,03^{0,3} \cdot 1,718^{0,2} \cdot 4^{0,2}} \cdot 1 = 65,97.$$

Полученное значение близко к рекомендуемому [2], поэтому принимаем  $V_{\text{рсп}} = 70$ . Найдем  $n_{\text{ф.сп}}$ , об/мин:

$$n_{\text{ф.сп}} = \frac{70 \cdot 1000}{3,14 \cdot 3,25} = 6859.$$

Процесс фрезерования сферическими фрезами схож с фрезерованием фасонными фрезами с выпуклым профилем. Тангенциальная составляющая силы резания при фрезеровании  $P_{\text{зсп}}$  определяется из выражения [16]:

$$P_{\text{зсп}} = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B_{\text{сп}}^n \cdot z}{D_{\text{эф.сп}}^q \cdot n_{\text{ф.сп}}^w} \cdot K_{pz}, \quad (5)$$

где  $C_p$  – постоянный коэффициент;  $t$  – глубина фрезерования;  $S_z$  – подача на зуб;  $B_{\text{сп}}$  – ширина фрезерования;  $D_{\text{эф.сп}}$  – эффективный диаметр фрезы;  $z$  – число зубьев фрезы;  $n$  – частота вращения фрезы,  $K_{pz} = \left(\frac{G_b}{750}\right) = 1,15$ .

Значения коэффициентов и степенных показателей для формулы силы резания  $P_z$ , Н, равны [2]:  $C_p = 12,5$ ;  $x = 0,85$ ;  $y = 0,75$ ;  $n = 1,0$ ;  $q = 0,73$ ;  $w = -0,13$ .

$$P_{\text{зсп}} = \frac{10 \cdot 12,5 \cdot 0,5^{0,85} \cdot 0,03^{0,75} \cdot 1,718 \cdot 4}{3,25^{0,73} \cdot 6859^{-0,13}} \cdot 1,15 = 46,86.$$

Нормальная составляющая  $P_{\text{уисп}}$  устанавливается из соотношения с главной составляющей силой  $P_{\text{зсп}}$  [16]:

$$P_{\text{уисп}} = (0,4 - 0,6) \cdot P_{\text{зсп}}.$$

С учетом этого соотношения преобразуем формулу (5) путем домножения числителя и знаменателя на  $z^y$ :

$$P_{\text{уисп}} = \frac{5 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_{\text{об}}^y \cdot B_{\text{сп}}^n \cdot z^{1-y}}{D_{\text{эф.сп}}^q \cdot n^w},$$

где  $S_{\text{об}}$  – подача на оборот фрезы.

Тогда  $P_{\text{уисп}} = 23,43$  Н.

Проекция нормальной составляющей силы фрезерования в направлении координаты  $Y$  для каждой строчки и угла поворота лопатки  $P_i$  может быть определена как [17–19]:



$$P_{исп} = P_{уисп} \cdot \cos\left(\frac{\beta_1}{2}\right).$$

$$P_{уисп} = \frac{5 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_{об}^y \cdot B_{сн}^n \cdot z^{1-y}}{D_{эф.сн}^q \cdot n^w} \cdot \cos\left(\frac{\beta_1}{2}\right).$$

Выполнив аналогичную процедуру расчета для контакта фрезы с корытом лопатки, получим следующие числовые значения:

$$V_{ркор} = 68,99.$$

Принятое значение  $V_{ркор} = 70$ .

Также получим  $P, H$ :

$$P_{zикор} = 43,95,$$

$$P_{уикор} = 22,$$

$$P_{икор} = P_{уикор} \cdot \cos\left(\frac{\beta_2}{2}\right) = 21.$$

Длина дуги контакта  $B_{кор}$  и  $D_{эф.кор}$ , мм:

$$B_{кор} = \frac{\pi \cdot R \cdot \beta_2}{180} = \frac{3,14 \cdot 3 \cdot 33^\circ 55'}{180} = 1,774,$$

$$D_{эф.кор} = 2R \cdot \sin(\beta_2) = 3,54.$$

Блок-схема алгоритма формирования исходной информации для прогнозирования прогиба проточной части лопаток приведена на рис. 5.

Полученные аналитические выражения конструкторско-технологических и геометрических исходных данных для расчета прогиба лопаток являются основой для расчета и назначения сочетаний управляемых параметров режима фрезерования проточной части лопатки при проектировании технологических операций и разработке управляющей программы многокоординатной обработки на станке с ЧПУ, обеспечивающих требуемую точность обработки.

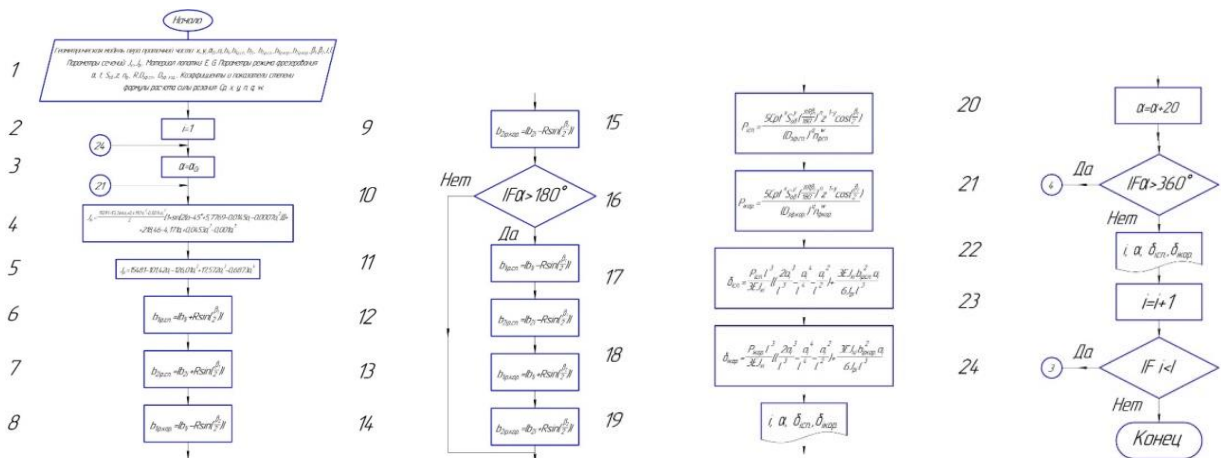


Рис. 5. Блок-схема алгоритма формирования исходной информации для прогнозирования прогиба проточной части лопаток

### 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 Рос. 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 надёжность лопаток газовых турбин. – М.: Машиностроение, 1966. – 223 с.
6. Семенченко И.В., Мирер Я.Г. Повышение надёжности 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. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей / В.Ф. Безязычный, В.Н. Крыхов, В.А. Полетаев и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 566 с.
9. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: учеб. пособие / Ю.С. Елисеев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 511 с.
10. Способ строчного фрезерования пера лопатки газотурбинного двигателя на многокоординатных станках с ЧПУ: пат. 2607880 Рос. Федерация: МКН В23С3/18 / Свирщёв 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. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов / Г.М. Ицкович, А.И. Винокуров, Л.С. Минин [и др.]. – М.: Высшая школа, 1970. – 544 с.
12. Свирщёв 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 ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 49. – С. 103–117.
13. Мережников В.В. Методология и расчетные значения радиусов спинки и корыта компрессорных лопаток ГТД для обеспечения точности проточной части при поперечном строчном фрезеровании на станках с ЧПУ // Научные исследования по приоритетным направлениям для создания инновационных технологий: сб. ст. МНПК. – Киров, 2022. – С. 96–99.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 831с.
15. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 240 с.
16. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под. ред. А.М. Дальского, А.Г. Сусллова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2. – 944 с.
17. Мережников В.В., Свирщев В.И. Аналитическое описание упругих деформаций лопатки как двухопорной балки от поперечных нормальных составляющих сил резания при строчном фрезеровании // Актуальные проблемы теории, методологии и практики научной деятельности: сб. ст. МНПК. – Уфа, 2022. – С. 74–78.
18. Мережников В.В., Свирщев В.И. Определение функциональной зависимости фактического значения плеча приложения нормальной составляющей силы фрезерования относительно оси вращения лопатки при попутном поперечном строчном фрезеровании проточной части компрессорных лопаток ГТД на станках с ЧПУ // Инновационные научные исследования. – 2022. – № 2-1(16). – С. 23–37.
19. Мережников В.В. Анализ геометрических связей в зоне контакта фрезы со сферической рабочей поверхностью и криволинейным профилем проточной части компрессорных лопаток ГТД и определение функциональной зависимости для расчетного значения плеча приложения нормальной составляющей силы фрезерования при встречном поперечном строчном фрезеровании на станках с ЧПУ // Актуальные научные исследования: сб. ст. IV МНПК. – Пенза: Наука и просвещение, 2022. – С. 101–109.

### References

1. Krymov V.V., Yeliseyev Yu.S., Zudin K.I. *Proizvodstvo lopatok gazoturbinykh dvigateley* [Production of blades for gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2002, 376 p.
2. Poletayev V.A. *Tekhnologiya avtomatizirovannogo proizvodstva lopatok gazoturbinykh dvigateley* [Technology of automated production of blades for gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2006, 256 p.
3. V.I. Svirshchev, I.G. Bashkatov, D.V. Okoneshnikov, Yu.N. Stepanov, S.V. Tsytkov. *Sposob strochnogo frezerovaniya pera lopatki gazoturbinnogo dvigatelya* [Method for line milling of a blade feather of a gas turbine engine]. Patent 2354508, MKN V23S3/18 Rossiyskaya Federatsiya., №2007124229/02; 5 p.
4. Sulima A.M., Noskov A.A., Serebrennikov G.Z. *Osnovnyye tekhnologii proizvodstva gazoturbinykh dvigateley* [Main technologies for the production of gas turbine engines]. Moscow: Mashinostroyeniye. 1996, 480 p.
5. Rakhmarova M.S., Mirer YA.G. *Vliyaniye tekhnologicheskikh faktorov na nadezhnost lopatok gazovykh turbin* [Influence of technological factors on the reliability of gas turbine blades]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1966, 223 p.
6. Semenchenko I.V., Mirer Ya.G. *Povysheniye nadezhnosti lopatok gazoturbinykh dvigateley* [Improving the reliability of gas turbine engine blades]. 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. V.F. Bezyazychnyy, V.N. Krykhov, V.A. Poletayev, etc. *Avtomatizatsiya tekhnologii izgotovleniya gazoturbinykh aviatsionnykh dvigateley* [Automation of manufacturing technology for gas turbine aircraft engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2005, 566 p.
9. Yu. S. Yeliseyev, etc. *Tekhnologiya proizvodstva aviatsionnykh gazoturbinykh dvigateley: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Production Technology of Aircraft Gas Turbine Engines: textbook for universities]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2003, 511 p.
10. Svirshchev V.I., Tarasov S.V., Tukachev D.V., Cherepanov S.E. *Sposob strochnogo frezerovaniya pera lopatki gazoturbinnogo dvigatelya na mnogokoordinatnykh stankakh s CHPU* [The method of line milling of the blade feather of a gas turbine engine on multi-axis CNC machines]. Patent 2607880 Rossiyskaya Federatsiya: MKN V23S3/18, № 2015124625, 5 p.
11. G.M. Itskovich, A.I. Vinokurov, L.S. Minin and etc. *Rukovodstvo k resheniyu zadach po soprotivleniyu materialov* [A Guide to Solving Strength of Materials Problems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1970, 544 p.
12. Svirshchëv 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 sections of the flow part of the compressor blades of a gas turbine engine, necessary for forecasting and technological support of quality indicators]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2017, no. 49, pp.103-117.
13. Merezchnikov V.V. *Metodologiya i raschetnyye znacheniya radiusov spinki i koryta kompressornykh lopatok GTD dlya obespecheniya tochnosti protochnoy chasti pri poperechnom strochnom frezerovanii na stankakh s CHPU* [Methodology and calculated values of the radii of the back and trough of the GTE compressor blades to ensure the accuracy of the flow path during transverse line milling on CNC machines]. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference «*Nauchnyye issledovaniya po prioritnym napravleniyam dlya sozdaniya innovatsionnykh tekhnologiy*», Kirov, 2022, pp. 96-99.
14. G. Korn, T. Korn, *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook of mathematics for scientists and engineers]. Moscow: Nauka, 1984, 831 p.
15. Ya. L. Gurevich, M.V. Gorokhov, V.I. Zakharov and etc. *Rezhimy rezaniya trudnoobrabatyvayemykh materialov: Spravochnik* [Cutting Conditions for Difficult-to-Machine Materials: A Handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1968, ed. 2, 240 p.
16. A.M. Dalskiy, A.G. Suslov, A.G. Kosilova, R.K. Meshcheryakov. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya* [Handbook of the technologist-machine builder]. Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2003, vol. 2, 944 p.
17. Merezchnikov V.V., Svirshchev V.I. *Analiticheskoye opisaniye uprugikh deformatsiy lopatki kak dvukhopornoy balki ot poperechnykh normalnykh sostavlyayushchikh sil rezaniya pri strochnom frezerovanii* [Analytical description of elastic deformations of a blade as a two-bearing beam from transverse normal components of cutting forces during line milling]. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference «*Aktualnyye problemy teorii, metodologii i praktiki nauchnoy deyatel'nosti*», Ufa, 2022, pp. 74-78.
18. Merezchnikov V.V., Svirshchev V.I. *Opredeleniye funktsionalnoy zavisimosti fakticheskogo znacheniya plecha prilozheniya normalnoy sostavlyayushchey sily frezerovaniya otnositelno osi vrashcheniya lopatki pri*

poputnom poperechnom strochnom frezerovaniy protochnoy chasti kompressornykh lopatok GTD na stankakh s CHPU [Determination of the functional dependence of the actual value of the shoulder of the application of the normal component of the milling force relative to the axis of rotation of the blade during associated transverse line milling of the flow path of the GTE compressor blades on CNC machines]. Innovative scientific research, Ufa, №2-1(16), 2022, pp. 23-37.

19. Merezchnikov V.V. Analiz geometricheskikh svyazey v zone kontakta frezy so sfericheskoy rabochey poverkhnost'yu i krivolinyeynym profilem protochnoy chasti kompressornykh lopatok GTD i opredeleniye funktsionalnoy zavisimosti dlya raschetnogo znacheniya plecha prilozheniya normalnoy sostavlyayushchey sily frezerovaniya pri vstrechnom poperechnom strochnom frezerovaniy na stankakh s CHPU [Analysis of geometric relationships in the contact zone of the cutter with a spherical working surface and a curvilinear profile of the flow path of the GTE compressor blades and determination of the functional dependence for the calculated value of the shoulder for applying the normal component of the milling force during counter-cross line milling on CNC machines]. Collection of articles of the IV International Scientific and Practical Conference «Aktualnyye nauchnyye issledovaniya», Penza: MTSNS «Nauka i prosveshcheniye», 2022, pp. 101-109.

#### Об авторах

**Свирищев Валентин Иванович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: svirshchev@pstu.ru).

**Тарасов Степан Викторович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: tarasovsv100@mail.ru).

**Мережников Владислав Владимирович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Инновационные технологии машиностроения», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 29, e-mail: merejnikov.v@yandex.ru).

#### About the authors

**Valentin I. Svirshchev** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Innovative technologies of mechanical engineering”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: svirshchev@pstu.ru).

**Stepan V. Tarasov** (Perm, Russian Federation) – C.Sc in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Innovative technologies of mechanical engineering”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: tarasovsv100@mail.ru).

**Vladislav V. Merezchnikov** (Perm, Russian Federation) – Post Graduate Student, Department “Innovative technologies of mechanical engineering”, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: merejnikov.v@yandex.ru).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 18.06.2022

Одобрена: 20.06.2022

Принята к публикации: 10.11.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Свирищев, В.И. Аналитическое описание конструкторско-технологических и геометрических исходных данных для прогнозирования прогиба компрессорных лопаток газотурбинного двигателя при поперечном строчном фрезеровании проточной части на станках с числовым программным управлением / В.И. Свирищев, С.В. Тарасов, В.В. Мережников // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 70. – С. 50–61. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.05

Please cite this article in English as: Svirshchev V.I., Tarasov S.V., Merezchnikov V.V. Analytical description of technological and geometric initial data for predicting the deflection of gas turbine engine compressor vanes during transverse line milling of the flow path on Computer Numerical Control machines. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 70, pp. 50-61. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.05