DOI: 10.15593/2224-9982/2017.49.10

УДК 621.914.7

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

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

НОРМАТИВНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЧЕНИЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Чертежи конструкций компрессорных лопаток газотурбинных двигателей, содержащие требования к геометрическим показателям качества, являются основой для создания трехмерных геометрических моделей лопаток. Однако они не содержат дополнительных геометрических параметров сечений проточной части лопаток, необходимых для прогнозирования и технологического обеспечения их показателей качества в процессе изготовления на многокоординатных станках с ЧПУ. К таким геометрическим параметрам для каждого сечения проточной части относятся: площадь сечения, аппроксимированные радиусы спинки и корыта, осевые и полярные моменты инерции. Эти параметры сечений будут влиять на точность профиля и шероховатость поверхности проточной части лопаток при их изготовлении, а соответственно, определять сочетание управляемых параметров режима метода формообразования проточной части на многокоординатных станках с ЧПУ. Описана методология и получены аналитические выражения для расчета нормативных площади, аппроксимированных радиусов спинки и корыта, осевых и полярных моментов инерции сечений по длине проточной части лопатки, необходимых для назначения сочетания управляемых параметров режима метода формообразования при разработке управляющей программы автоматизированного формообразования профиля пера лопатки на станке с ЧПУ.

Ключевые слова: профиль пера лопатки, геометрические параметры сечений, параметры качества поверхности, многокоординатное формообразование профиля лопатки.

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

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

NORMATIVE GEOMETRIC PARAMETERS OF THE CROSS SECTIONS OF FLOW PASSAGE OF THE GAS-TURBINE ENGINE COMPRESSOR VANES NECESSARY FOR FORECASTING AND TECHNOLOGICAL SUPPORT QUALITY RATING

Design drawings of compressor vanes of gas turbine engines, containing the requirements for geometric quality parameters are the basis for the creation of 3D geometric models of vanes. However, they do not contain additional geometric parameters of cross sections of the vane flow passages needed for forecasting and technological support of quality parameters in the manufacturing process on the multi-axis CNC machines. These geometric parameters for each section of the flow passage include cross-sectional area, approximated radius of suction and pressure sides, axial and polar moments of inertia. These section parameters affect the accuracy of the profile and the surface roughness of the vane flow passages during manufacture, and consequently determine the combination of controlled parameters of the mode of forming the flow passage on the multi-axis CNC machines. It is described the methodology and analytical expressions for calculating the normative area, the approximate radius of suction and pressure sides, axial and polar moments of inertia along the length of vane flow passage, required for the definition of a combination of controlled parameters of the mode of forming in the development of the control program of the automated shaping the profile of the vanes on the machine with NC.

Keywords: profile of the vanes, geometric parameters of the cross sections, surface quality parameters, multi-axis shaping the vanes profile.

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, 6] обеспечиваются обоснованным назначением сочетания управляемых параметров режима метода формообразования при обработке на многокоординатных станках с ЧПУ [7–9], которые будут являться нормативными руководящими материалами для разработки управляющей программы станка с ЧПУ.

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

Рис. 1. Схема 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 ; δ_i – суммарная деформация пера лопатки от изгиба и скручивания под действием силы P_i для каждой строчки и угла поворота; n_0 – частота вращения лопатки

Величина δ_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/м²; J_x – момент инерции площади поперечного сечения пера лопатки относительно оси X , м⁴; G – модуль сдвига материала, Н/м²; J_p – момент инерции площади поперечного сечения пера лопатки при кручении относительно оси Z , м⁴.

Доминирующая систематическая составляющая профиля поперечной шероховатости при механической обработке определяется равенством [12]

$$Rz = h_1 + h_2, \quad (2)$$

где h_1 , h_2 – составляющие профиля шероховатости, обусловленные соответственно формой режущей части инструмента и кинематикой его перемещения, колебаниями лопатки.

Схема образования составляющей h_1 профиля поперечной шероховатости на спинке и корыте приведена на рис. 2, а расчетные выражения для их определения имеют вид [13]

$$h_1^{\text{сп}} = \left[(R_{\text{сп}} + r) \cos \left(\arcsin \frac{S_z}{2R_{\text{сп}}} \right) - R_{\text{сп}} - \sqrt{r^2 - (R_{\text{сп}} + r)^2 \frac{S_z^2}{4R_{\text{сп}}^2}} \right] \cdot \frac{1}{\cos \gamma}, \quad (3)$$

$$h_1^{\text{кор}} = \left[R_{\text{кор}} - (R_{\text{кор}} - r) \cos \left(\arcsin \frac{S_z}{2R_{\text{кор}}} \right) - \sqrt{r^2 - (R_{\text{кор}} - r)^2 \frac{S_z^2}{4R_{\text{кор}}^2}} \right] \cdot \frac{1}{\cos \gamma}, \quad (4)$$

где γ – передний угол режущего инструмента.

Рис. 2. Схема образования составляющей h_1 профиля шероховатости в поперечном направлении пера лопатки: *а* – на спинке; *б* – на корыте; S_z – подача на зуб фрезы, мм/зуб; h_1 – высота микронеровностей, мкм; $R_{\text{сп}}$, $R_{\text{кор}}$ – аппроксимированные радиусы кривизны обрабатываемой поверхности, мм; r – радиус сферы инструмента

Составляющая h_2 профиля поперечной шероховатости определяется частотой λ возмущающей силы и частотой ω собственных колебаний лопатки [12]:

$$h_2 = \frac{P_i}{C_i \left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2} \right)}, \quad (5)$$

где C_i – жесткость лопатки.

Подставляя выражения (3), (4), (5) в равенство (2), получим окончательные выражения для определения поперечной шероховатости поверхности на спинке и корыте лопатки:

$$R_{\text{зсп}} = \left[(R_{\text{сп}} + r) \cos \left(\arcsin \frac{S_z}{2R_{\text{сп}}} \right) - R_{\text{сп}} - \sqrt{r^2 - (R_{\text{сп}} + r)^2 \frac{S_z^2}{4R_{\text{сп}}^2}} \right] \frac{1}{\cos \gamma} + \frac{P_i}{C_i \left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2} \right)}, \quad (6)$$

$$R_{\text{зкор}} = \left[R_{\text{кор}} - (R_{\text{кор}} - r) \cos \left(\arcsin \frac{S_z}{2R_{\text{кор}}} \right) - \sqrt{r^2 - (R_{\text{кор}} - r)^2 \frac{S_z^2}{4R_{\text{кор}}^2}} \right] \frac{1}{\cos \gamma} + \frac{P_i}{C_i \left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2} \right)}. \quad (7)$$

Анализ выражений (1), (6) и (7) показывает, что для прогнозирования и технологического обеспечения требуемых показателей точности и шероховатости проточной части профиля пера лопатки необходимо значение для каждого сечения зависимостей осевых J_x и полярных J_p моментов инерции, аппроксимирующих радиусов спинки $R_{\text{сп}}$ и корыта $R_{\text{кор}}$ лопатки от координаты a_i длины проточной части лопатки. Эти зависимости могут быть получены на основании данных, приведенных на рабочих чертежах конструкций компрессорных лопаток (рис. 3).

- [illegible]

Таблица 1

Размеры пера лопатки, мм

Feature	A_1-A_1	A_1-A_2	A_1-A_3	A_1-A_4	A_1-A_5	A_1-A_6	A_1-A_7	A_1-A_8	A_1-A_9	A_1-A_{10}	A_1-A_{11}	A_1-A_{12}	A_1-A_{13}
Z	0.000	34.50	7.870	16.950	34.820	52.790	70.760	88.720	97.720	106.700	124.670	142.640	151.630
μ_{mean}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
μ_{std}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	-0.0993	3.057	2.324	-2.078	2.944	2.234	-2.187	2.828	2.220	-2.408	2.964	1.887	-2.0993
2	-2.0448	3.211	2.211	-2.033	2.993	2.033	-2.045	2.713	1.765	-2.121	2.131	1.718	-2.0448
3	-9.882	3.385	2.096	-9.980	2.233	2.000	-2.009	3.52	1.897	-2.281	2.882	1.669	-9.882
4	-4.8811	3.657	1.773	-4.8791	3.401	1.728	-4.914	2.628	1.197	-4.945	3.175	1.516	-4.8811
5	-6.7120	3.660	1.772	-6.7183	3.743	1.697	-6.7802	2.628	1.103	-6.857	3.332	1.799	-6.7120
6	-6.6629	4.017	1.607	-6.6648	3.694	1.574	-6.7653	1.519	0.859	-6.699	3.421	1.637	-6.6629
7	-2.2864	4.247	1.414	-2.2864	3.932	1.309	-2.2831	3.992	1.021	-2.2801	3.984	1.354	-2.2864
8	-7.940	4.474	0.949	-7.946	3.912	0.464	-7.997	3.842	0.427	-7.980	3.584	0.354	-7.940
9	-3.533	3.599	-0.330	-3.502	34.30	-3.322	-3.459	33.92	-3.312	-3.379	34.44	-3.095	-3.533
10	0.829	2.561	-1.63	0.992	2.519	-1.311	0.973	2.459	-1.243	1.114	-1.095	1.142	0.829
11	5.93	1.222	-2.608	5.286	1.231	-2.497	5.055	1.249	-2.53	5.648	1.304	-2.082	5.93
12	9.958	-0.570	-4.029	9.680	-0.491	-3.847	9.937	-0.387	-3.613	10.758	-0.379	-3.626	9.958
13	13.922	-9.924	-5.612	14.074	-2.725	-5.340	14.270	-2.529	-5.007	14.667	-2.018	-4.308	13.922
14	18.267	-5.689	-7.524	18.665	-5.571	-7.405	18.657	-5.665	-6.665	19.176	-4.479	-6.665	18.267
15	20.680	-7.148	-6.620	20.666	-7.051	-6.490	20.998	-6.566	-6.742	21.431	-5.570	-6.526	20.680
16	22.631	-9.072	-9.611	22.761	-8.536	-9.325	23.104	-8.792	-8.703	23.686	-8.666	-8.748	22.631
R_1	0.465	0.456	0.451	0.450	0.432	0.397	0.389	0.362	0.358	0.336	0.328	0.278	0.465
R_2	0.358	0.361	0.361	0.362	0.355	0.361	0.359	0.368	0.368	0.359	0.336	0.278	0.358
X_1^*	-20.595	-20.622	-20.773	-20.950	-21.359	-21.622	-22.187	-22.574	-22.755	-22.907	-23.134	-23.776	-20.595
X_2^*	22.291	22.902	22.773	23.324	24.238	24.948	25.611	26.715	26.406	26.634	27.004	27.792	22.291
X_3^*	2.698	2.605	2.487	2.247	1.836	1.412	0.944	0.102	-0.440	-1.042	-2.389	-3.960	2.698
Y_1^*	-9.196	-8.721	-2.126	-6.904	-4.983	-3.336	-1.895	-0.113	0.797	1.812	3.997	6.327	-9.196
σ^*	$+4.3824^{**}$	$+3.7433^{**}$	$+3.3453^{**}$	$+1.7337^{**}$	-8.2446^{**}	$+5.44332^{**}$	-3.2108^{**}	-0.1504^{**}	-1.7519^{**}	-3.2029^{**}	-7.1414^{**}	-1.73243^{**}	$+4.3824^{**}$
σ_1	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
σ_2	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
σ_3	1.669	1.637	1.598	1.520	1.348	1.186	1.111	1.039	0.968	0.948	0.863	0.794	1.669
C_1	0.922	0.993	0.902	0.816	0.808	0.798	0.774	0.775	0.727	0.763	0.690	0.623	0.922
C_2	3.605	3.787	3.627	3.424	3.071	2.773	2.537	2.343	2.248	2.181	2.003	1.874	3.605
C_{mean}	45.246	45.426	45.616	46.043	46.099	47.763	48.607	49.470	49.901	50.923	51.204	52.039	45.246
b_1	21.993	21.817	21.817	22.191	22.708	22.556	22.556	22.935	23.767	23.448	23.470	23.423	21.993
b_2	22.653	22.683	22.686	24.592	25.362	25.362	25.969	26.424	26.782	26.994	27.329	27.577	22.653

Таблица 2

Допуск формы и расположения пера

[illegible]

Рис. 3. Лопатка рабочая IV ступени ГТД

Для установления функциональной зависимости осевых J_x и полярных J_p моментов инерции сечений от угла поворота лопатки α и длины проточной части $a_i J_x = f(\alpha, a_i)$, $J_p = f(a_i)$ на основании данных табл. 1, чертежа лопатки с помощью программного обеспечения системы «Компас 16» [14] создавались контуры каждого сечения лопатки, приведенные на рис. 4.

Для каждого сечения лопатки определялся исходный угол α_0 положения сечения (рис. 5) и площадь сечения, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Координаты, площади и исходные углы положения сечений пера лопатки

Номер сечения	Координата сечения z , мм	Площадь сечения S , мм ²	Исходный угол положения сечения α_0 , град
A1–A1	0,00	128,507	6,233
A2–A2	3,45	125,252	5,983
A3–A3	7,87	122,706	5,517
A4–A4	16,85	116,999	5,017
A5–A5	34,82	106,523	3,867
A6–A6	52,79	97,564	2,65
A7–A7	70,76	91,93	1,483
A8–A8	88,73	86,68	–0,65
A9–A9	97,72	83,930	–1,967
A10–A10	106,70	81,76	–3,45
A11–A11	124,67	75,55	–6,667
A12–A12	142,64	73,68	–10,45
A13–A13	151,63	71,71	–12,55

Рис. 4. Сечения лопатки

Рис. 5. Исходное угловое положение сечения лопатки

Вращением каждого сечения лопатки от исходного положения вокруг начала системы координат с дискретой 20° в системе «Компас 16» определялись осевые J_x и полярные J_p моменты инерции, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Моменты инерции J_x, J_p сечений

Номер сечения	Координата сечения z , мм	Полярный момент инерции J_p	Угол поворота сечения α , град									
			α_0	$\alpha_0 + 20$	$\alpha_0 + 40$	$\alpha_0 + 60$	$\alpha_0 + 80$	$\alpha_0 + 100$	$\alpha_0 + 120$	$\alpha_0 + 140$	$\alpha_0 + 160$	
			Моменты инерции J_x , мм ⁴									
A1–A1	0,00	15111,01	1221,018	5197,017	10414,032	14431,103	15368,518	12787,620	7896,104	2982,74	346,550	
A2–A2	3,45	15178,41	1052,343	4779,609	9805,742	13778,930	14840,671	12493,157	7835,322	3046,656	367,945	
A3–A3	7,87	14578,09	945,771	4604,361	9659,962	13746,388	14952,127	12713,015	8076,151	3211,818	395,718	
A4–A4	16,85	13828,53	685,550	3980,633	8824,820	12951,452	14429,635	12563,589	8236,893	3463,622	481,362	
A5–A5	34,82	13384,9	383,502	3133,738	7652,846	11826,631	13701,202	12400,432	8532,493	3907,431	689,017	
A6–A6	52,79	13197,78	229,685	2567,289	6839,460	11047,202	13221,421	12345,144	8828,224	4316,230	920,449	
A7–A7	70,76	13032,65	152,977	2114,622	6174,626	10433,161	12897,261	12414,449	9210,745	4784,534	1207,347	
A8–A8	88,73	12957,8	136,618	1623,405	5399,608	9698,400	12508,179	12514,236	9714,010	5417,288	1634,942	
A9–A9	97,72	12937,51	160,577	1384,433	4993,247	9297,677	12283,316	12551,961	9977,345	5764,831	1887,014	
A10–A10	106,70	12276,86	216,537	1153,069	4576,891	8885,846	12063,941	12623,747	10303,641	6189,105	2205,418	
A11–A11	124,67	12294,61	406,592	729,779	3584,381	7634,542	10985,097	12068,851	10377,945	6703,994	2766,020	
A12–A12	142,64	12358,95	744,991	440,341	2790,333	6695,478	10328,586	11989,517	10901,315	7572,982	3561,914	
A13–A13	151,63	15111,01	976,154	344,094	2447,655	6302,694	10105,425	12076,633	11293,584	8123,238	4048,596	

Окончание табл. 2

Номер сечения	Координата сечения z , мм	Полярный момент инерции J_p	Угол поворота сечения α , град									
			$\alpha_0 + 180$	$\alpha_0 + 200$	$\alpha_0 + 220$	$\alpha_0 + 240$	$\alpha_0 + 260$	$\alpha_0 + 280$	$\alpha_0 + 300$	$\alpha_0 + 320$	$\alpha_0 + 340$	
			Моменты инерции J_x , мм ⁴									
A1–A1	0,00	15111,01	1221,030	5197,038	10414,003	14431,061	15368,490	12787,679	7896,171	2982,721	346,54	
A2–A2	3,45	15178,41	1052,328	4779,622	9805,592	13779,463	14840,040	12492,488	7835,221	3046,496	367,903	
A3–A3	7,87	14578,09	945,713	4604,420	9659,844	13746,513	14952,229	12712,825	8076,142	3211,726	395,717	
A4–A4	16,85	13828,53	685,549	3980,633	8824,817	12951,448	14429,631	12563,589	8236,893	3463,622	481,362	
A5–A5	34,82	13384,9	383,502	3133,788	7652,847	11826,515	13701,253	12400,697	8532,684	3907,286	689,017	
A6–A6	52,79	13197,78	229,685	2567,304	6839,504	11047,277	13221,759	12345,486	8828,476	4316,376	920,449	
A7–A7	70,76	13032,65	152,978	2114,705	6174,845	10433,365	12897,759	12414,909	9210,422	4784,379	1211,699	
A8–A8	88,73	12957,8	136,621	1623,405	5399,767	9698,549	12508,365	12514,471	9714,010	5417,349	1634,943	
A9–A9	97,72	12937,51	160,065	1384,668	4993,247	9304,208	12286,047	12550,019	9972,307	5758,901	1882,928	
A10–A10	106,70	12276,86	216,532	1153,069	4576,851	8885,8458	12063,816	12623,885	10303,760	6189,182	2205,418	
A11–A11	124,67	12294,61	406,602	729,779	3584,303	7634,547	10985,235	12068,664	10377,838	6703,913	2765,960	
A12–A12	142,64	12358,95	744,980	440,312	2790,492	6695,712	10328,813	11989,617	10901,106	7572,670	3561,663	
A13–A13	151,63	15111,01	976,497	344,140	2447,812	6302,910	10105,673	12076,604	11293,600	8122,991	4048,365	

Графическое представление результатов определения осевого момента инерции J_x приведено на рис. 6.

Рис. 6. Зависимость осевого момента инерции J_x сечений от угла поворота лопатки

Изменение осевого момента инерции J_x от угла поворота α для каждого сечения может быть аппроксимировано периодической функцией

$$J_x = \frac{A}{2} \left[1 + \sin \left[2 \cdot (\alpha - 45^\circ + \alpha_0) \right] \right] + b, \quad (8)$$

параметры которой A , b , α_0 приведены на рис. 7.

Рис. 7. Параметры аппроксимирующей функции

Определив по рис. 6 численные значения A , b и α_0 из табл. 1 для каждого сечения лопатки, строим графики $A = f(a_i)$, $b = f(a_i)$, $\alpha_0 = f(a_i)$, приведенные на рис. 8–10, по аппроксимирующим степенным зависимостям в которых устанавливаются следующие функции:

$$A(a_i) = -0,0014a_i^3 + 0,4192a_i^2 - 53,206a_i + 15091, \quad (9)$$

$$b(a_i) = -0,0001a_i^3 + 0,0453a_i^2 - 4,1716a_i + 218,46, \quad (10)$$

$$\alpha_0(a_i) = -0,0007a_i^2 - 0,0145a_i + 5,7769. \quad (11)$$

Подставив выражения (9), (10) и (11) в функцию (8), получим функциональную зависимость $J_x = f(\alpha, a_i)$ в виде

$$J_x(\alpha, a_i) = \frac{-0,0014a_i^3 + 0,4192a_i^2 - 53,206a_i + 15091}{2} \times \\ \times \left[1 + \sin \left[2 \cdot \left(\alpha - 45^\circ + (-0,0007a_i^2 - 0,0145a_i + 5,7769) \right) \right] \right] + \\ + (-0,0001a_i^3 + 0,0453a_i^2 - 4,1716a_i + 218,46). \quad (12)$$

Рис. 8. Зависимость параметра A от координаты сечения a_i

Рис. 9. Зависимость параметра b от координаты сечения a_i

 Рис. 10. Зависимость параметра α_0 от координаты сечения a_i

На основании данных табл. 2 функциональная зависимость $J_p = f(a_i)$ имеет вид

$$J_p = -0,6873a_i^4 + 17,572a_i^3 - 126,01a_i^2 - 101,42a_i + 15481. \quad (13)$$

Зависимость, полученная по выражению (13), представлена на рис. 11.

 Рис. 11. Зависимость полярного момента инерции J_p от координаты сечения a_i

Для установления функциональной зависимости для расчета аппроксимированных радиусов спинки ($R_{сп}$) и корыта ($R_{кор}$) на профилях спинки и корыта выбираются три точки 1, 2, 3, по координатам которых (см. рис. 3, табл. 1) в системе «Компас 16» определяется расстояние между ними – x , x_1 , x_2 (рис. 12).

Соотношения между параметрами, приведенными на рис. 12, определяются следующими аналитическими выражениями [15]

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{x}{2R_{сп,кор}}, \quad (14)$$

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{x_1}{2R_{сп,кор}}, \quad (15)$$

$$x_2^2 = 2R_{сп,кор}^2 - 2R_{сп,кор}^2 \cos(\alpha + \beta) = 2R_{сп,кор}^2 (1 - \cos(\alpha + \beta)). \quad (16)$$

Рис. 12. Схема определения аппроксимированных радиусов спинки и корыта лопатки:
 $R_{\text{сп}}$, $R_{\text{кор}}$ – соответственно радиус спинки и корыта лопатки; x – расстояние между точками 1 и 2;
 x_1 – расстояние между точками 2 и 3; x_2 – расстояние между точками 1 и 3

Подставив выражения (14) и (15) в уравнение (16) и преобразовав окончательное выражение для расчета аппроксимированных радиусов спинки ($R_{\text{сп}}$) и корыта ($R_{\text{кор}}$) для каждого сечения лопатки, получаем

$$R_{\text{сп,кор}} = \frac{xx_1x_2}{\sqrt{2(x^2x_1^2 + x^2x_2^2 + x_1^2x_2^2) - x^4 - x_1^4 - x_2^4}}. \quad (17)$$

Расчетные значения $R_{\text{сп}}$ и $R_{\text{кор}}$ для каждого сечения лопатки приведены в табл. 3, а функциональные зависимости $R_{\text{сп}}$, $R_{\text{кор}} = f(a_i)$ – на рис. 13.

Таблица 3

Значения радиусов $R_{\text{сп}}$ и $R_{\text{кор}}$ для лопатки длиной $l = 151,5$ мм

Номер сечения	Координата сечения a_i , мм	$R_{\text{сп}}$, мм	$R_{\text{кор}}$, мм
A1–A1	0,00	49,753	115,795
A2–A2	3,45	50,509	118,830
A3–A3	7,87	54,834	135,386
A4–A4	16,85	62,134	167,421
A5–A5	34,82	78,204	243,427
A6–A6	52,79	95,401	322,861
A7–A7	70,76	113,776	419,500
A8–A8	88,73	132,832	511,437
A9–A9	97,72	140,468	519,854
A10–A10	106,70	150,957	562,527
A11–A11	124,67	167,273	602,931
A12–A12	142,64	177,276	668,049
A13–A13	151,63	181,336	690,370

Рис. 13. Зависимость изменений $R_{кор}$, $R_{сп}$ от длины лопатки:

$$R_{кор} = 3,7656a_i + 122,66; \quad R_{сп} = 0,9206a_i + 48,269$$

Полученные нормативные аналитические выражения (12), (13), (17) для прогнозирования осевых и полярных моментов инерции, аппроксимированных радиусов спинки и корыта сечений лопатки являются основой для установления сочетаний управляемых параметров режима метода формообразования проточной части лопатки в управляющей программе многокоординатной обработки станка с ЧПУ, обеспечивающих требуемые параметры качества обработки.

Библиографический список

1. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зулин 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 / Свирщев 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. Автоматизация технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей / В.Ф. Безъязычный, В.Н. Крыхов, В.А. Полетаев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2005. – 566 с.
8. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей: учеб. пособие для вузов / Ю.С. Елисеев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2003. – 511 с.
9. Полетаев В.А. Основные технологические принципы автоматизированного производства лопаток ГТД // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2012. – № 8. – С. 11–16.
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. Руководство к решению задач по сопротивлению материалов / Г.М. Ицкович, А.И. Винокуров, Л.С. Минин [и др.]. – М.: Высш. шк., 1970. – 544 с.
12. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

13. Кирилов А.Ю., Свирщев В.И., Макаров В.Ф. Влияние условий обработки сложнопрофильных поверхностей на качество поверхности при чистовом фрезеровании // Перспективные процессы и технологии в машиностроительном производстве: сб. тез. докл. юбилейной МНПК. – Пермь, 2005. – С. 35–38.

14. Компас-3D V16. Руководство пользователя // Компас: официальный сайт. – URL: <http://kompas.ru/publications/docs> (дата обращения: 20.02.2017).

15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 831 с.

Refereces

1. Krymov V.V., Eliseev Yu.S., Zudin K.I. Proizvodstvo lopatok gazoturbinykh dvigateley [Production of gas turbine engine vanes]. Moscow, Mashinostroenie, 2002, 376 p.

2. Poletaev V.A. Tekhnologiya avtomatizirovannogo proizvodstva lopatok gazoturbinykh dvigateley [Technology-aided manufacturing gas turbine engine vanes]. Moscow, Mashinostroenie, 2006, 256 p.

3. Svirshchev V.I., Bashkatov I.G., Okoneshnikov D.V. et al. Sposob strochnogo frezerovaniya pera lopatki gazoturbinnogo dvigatelya [The process of horizontal milling feather vanes of gas turbine engine]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 2354508 (2009).

4. Sulima A.M., Noskov A.A., Serebrennikov G.Z. Osnovnye tekhnologii proizvodstva gazoturbinykh dvigateley [Main production technology of gas turbine engines]. Moscow, Mashinostroenie, 1996, 480 p.

5. Rakhmarova M.S., Mirer Ya.G. Vliyanie tekhnologicheskikh faktorov na nadezhnost lopatok gazovykh turbin [Influence of technological factors on the reliability of gas turbine vanes]. Moscow, Mashinostroenie, 1966, 223 p.

6. Semenchko I.V., Mirer Ya.G. Povyshenie nadezhnosti lopatok gazoturbinykh dvigateley [Increasing the reliability of gas turbine engine vanes]. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 160 p.

7. Bezyazychnyy V.F., Krykhov V.N., Poletaev V.A. et al. Avtomatizatsiya tekhnologii izgotovleniya gazoturbinykh aviatsionnykh dvigateley [Automation of manufacturing technology of gas turbine aircraft engines]. Moscow, Mashinostroenie, 2005, 566 p.

8. Eliseev Yu.S. et al. Tekhnologiya proizvodstva aviatsionnykh gazoturbinykh dvigateley: uchebnoe posobie dlya vuzov [Technology of production of aircraft gas turbine engines: a textbook for high schools]. Moscow, Mashinostroenie, 2003, 511 p.

9. Poletaev V.A. Osnovnye tekhnologicheskie printsipy avtomatizirovannogo proizvodstva lopatok GTD [Main technological principles for the automated production of GTE vanes]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyeni*, 2012, no. 8, pp. 11-16.

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 process of the line milling the vane of a gas turbine engine on multi-axis CNC machines]. Patent Rossiyskaya Federatsiya no. 2607880 (2015).

11. Itskovich G.M., Vinokurov A.I., Minin L.S. et al. Rukovodstvo k resheniyu zadach po soprotivleniyu materialov [Guide for problem solving on the strength of materials]. Moscow, Vysshaya shkola, 1970, 544 p.

12. Suslov A.G. Tekhnologicheskoe obespechenie parametrov sostoyaniya poverkhnostnogo sloya detalей [Technological support of the state parameters of the surface layer of the parts]. Moscow, Mashinostroenie, 1987, 208 p.

13. Kirilov A.Yu., Svirshchev V.I., Makarov V.F. Vliyanie usloviy obrabotki slozhnoprofilnykh poverkhnostey na kachestvo poverkhnosti pri chistovom frezerovanii [Influence of processing conditions on the surfaces of complex-surface quality during fine milling]. *Sbornik tezisov dokladov yubileyroy konferentsii "Perspektivnye protsessy i tekhnologii v mashinostroyitel'nom proizvodstve"*, Perm, 2005, pp. 35-38.

14. Compass - 3D V16. User guide, available at: <http://kompas.ru/publications/docs/> (accessed 20 February 2017).

15. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical handbook for scientists and engineers]. Moscow, Nauka, 1984, 831 p.

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).

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) – магистрант кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

About the authors

Valentin I. Svirshchev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

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

Vladislav V. Merezchnikov (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Innovative Engineering Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Получено 1.03.2017