

УДК621.914.7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ СТРОЧНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ПЕРА ЛОПАТКИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА МНОГОКООРДИНАТНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

© 2017 С.В. Тарасов, В.И. Свирщёв

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Статья поступила в редакцию 25.05.2017

Известные способы строчного поперечного фрезерования пера лопатки газотурбинного двигателя (ГТД) обеспечивают низкую производительность обработки и низкие показатели качества фрезерованной поверхности профиля пера лопатки, вследствие необоснованного назначения управляемых параметров режима фрезерования при обработке на многокоординатных станках с ЧПУ. Для осуществления высокопроизводительного фрезерования профиля пера лопатки при обеспечении требуемых показателей качества необходимо для каждой точки профиля сечения пера установить сочетание управляемых параметров режима фрезерования, которые будут являться нормативным руководящим материалом для разработки управляющей программы станка с ЧПУ при формообразовании профиля пера лопатки ГТД. Точность профиля пера лопатки для каждой строчки и угла ее поворота определялась по величине деформации лопатки δ , которая не превышала величины допуска $T_{\text{оп}}$ на его изготовление. Были получены аналитические выражения для расчета сочетания управляемых параметров режима поперечного строчного фрезерования, позволяющие обеспечить требуемые параметры качества фрезеруемой поверхности профиля пера лопатки ГТД (точность профиля, шероховатость поверхности) при наивысшей производительности. Показана последовательность расчета сочетания параметров режима фрезерования, которые являются нормативными для разработки управляющей программы станка с ЧПУ при автоматизированном фрезеровании профиля пера лопатки.

Ключевые слова: лопатка, фрезерование, точность профиля, параметры качества, многокоординатная обработка, максимальная производительность обработки.

Известны способы строчного поперечного фрезерования пера лопатки газотурбинного двигателя (ГТД) при которых лопатке сообщают вращение вокруг собственной оси и обрабатывают фрезой со сферической рабочей поверхностью, совершающей вращения и интерполированное осевое перемещение [1, 2, 3, 4]. Недостатком известных способов является низкая производительность обработки и низкие показатели качества фрезерованной поверхности профиля пера лопатки (точность профиля и шероховатость поверхности) [5,6], вследствие необоснованного назначения управляемых параметров режима фрезерования при обработке на многокоординатном станке с ЧПУ [7, 8, 9].

Для осуществления высокопроизводительного фрезерования профиля пера лопатки при обеспечении требуемых показателей качества необходимо для каждой точки профиля сечения пера установить сочетание управляемых параметров режима фрезерования, которые будут являться нормативным руководящим матери-

алом для разработки управляющей программы станка с ЧПУ при формообразовании профиля пера лопатки ГТД.

Точность профиля пера лопатки для каждой строчки и угла ее поворота будет определяться величиной деформации лопатки δ , которая не должна превышать величины допуска $T_{\text{оп}}$ на его изготовление (рис. 1).

При обработке пера поперечными строчками лопатка вращается вокруг оси Z , а фреза вращается и перемещается при прохождении каждой строчки в направлении координат Y и X с подачей S . После одного полного оборота лопатки вокруг оси Z фреза смещается в продольном направлении на шаг строчки и процесс фрезерования возобновляется. Положение каждого сечения обрабатываемой поверхности пера лопатки характеризуется размером a_i . При прохождении фрезой строчки в сечении a_i постоянно изменяется расстояние между ее режущей частью и осью вращения лопатки, т.е. изменяется размер b_i . Для каждой строчки и угла поворота лопатки, при рассмотрении ее как двухопорной балки [10], величина суммарной деформации пера лопатки δ_i определяется как сумма деформаций под действием силы P_i от изгиба (f_{yi}) и скручивания ($f_{\text{кр-}i}$) из следующих выражений [11]:

Тарасов Степан Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения». E-mail: tms2@pstu.ru
Свирщёв Валентин Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные технологии машиностроения». E-mail: tms2@pstu.ru

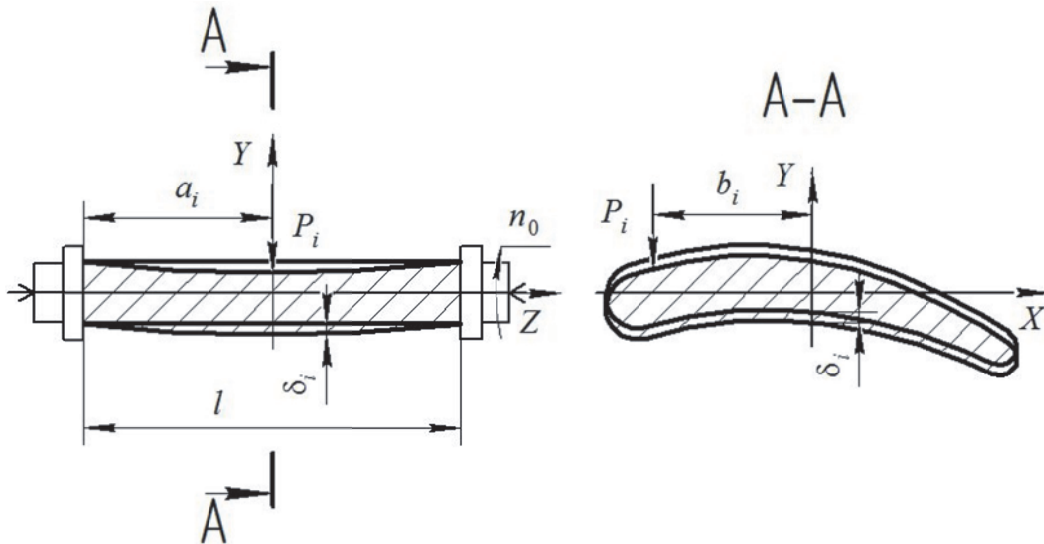


Рис. 1. Схема к расчету деформации лопатки при поперечном строчном фрезеровании: l – длина пера лопатки; a_i – координата строчки лопатки; P_i – составляющая силы фрезерования в направлении координаты Y для каждой строчки и угла поворота лопатки; b_i – плечо приложения силы P_i относительно оси Z ; δ_i – суммарная деформация пера лопатки от изгиба и скручивания под действием силы P_i для каждой строчки и угла поворота, n_0 – частота вращения лопатки.

$$f_{yi} = \frac{P_i \cdot l^3}{3EJ_x} \left(2 \frac{a_i^3}{l^3} - \frac{a_i^4}{l^4} - \frac{a_i^2}{l^2} \right),$$

$$f_{кр-i} = \frac{P_i b_i^2 a_i}{GJ_k},$$

где: E – модуль упругости обрабатываемого материала, H/m^2 ; G – модуль сдвига материала, H/m^2 ; J_x – момент инерции площади поперечного сечения пера лопатки относительно оси X , m^4 ; J_k – момент инерции площади поперечного сечения пера лопатки при кручении относительно оси Z , m^4 .

Суммарное значение линейных и угловых деформаций пера лопатки определяется выражением

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

Для расчета δ_i по формуле (1), необходимо знать числовые значения моментов инерции J_x и J_k , которые должны быть предварительно рассчитаны для каждой строчки и угла поворота лопатки по чертежу геометрической модели лопатки для операции фрезерования.

Точность обработки профиля пера лопатки определяется зависимостью

$$\delta_i \leq K T_{он}, \quad (2)$$

где: $K=0,3...0,7$ – коэффициент использования поля допуска, $T_{он}$ – допуск на операционные размеры при фрезеровании профиля пера лопатки.

Из выражения (2) может быть определено предельно допустимое значение составляющей силы фрезерования $[P_i]$ для каждой строчки и угла поворота лопатки

$$[P_i] \leq \frac{3 \cdot K T_{он} E J_x}{l^3 \left(2 \frac{a_i^3}{l^3} - \frac{a_i^4}{l^4} - \frac{a_i^2}{l^2} + \frac{3EJ_x \cdot b_i^2 a_i}{GJ_k l^3} \right)}. \quad (3)$$

Составляющая силы фрезерования P_i определяется из выражения [12]

$$P_i = C_p V_p^{-x} S_i^y, \quad (4)$$

где: C_p , x , y – коэффициент и показатели степени, определяемые экспериментально, V_p – скорость фрезерования, $m/min.$, S_i – подача фрезы при строчном фрезеровании, $mm/min.$ При фрезеровании титановых сплавов: $C_p = 55...65$, $x=0,15...0,2$, $y=0,65...0,7$; $V_p \geq 120m/min.$, $S_i \leq 1000mm/min.$, $t = 0,1...0,2$ (при окончательных проходах).

Предельно допустимое значение составляющей силы фрезерования $[P_i]$ зависит от двух взаимно независимых управляемых параметров режима фрезерования (V_p , S_i), сочетание которых должно быть обеспечено для каждой строчки и угла поворота лопатки согласно условию (3). Рекомендуемая скорость фрезерования V_p обеспечивается для каждой строчки и угла поворота лопатки интерполированным разворотом оси фрезы от нормалей к точкам профиля сечения лопатки относительно оси, перпендикулярной оси фрезы и проходящей через центр сферической рабочей поверхности, на угол γ (рис. 2).

В процессе формообразования поперечной строчки каждая точка, образующая профиль пера лопатки, характеризуется своим положением нормалей: N_1 , N_2 , N_3 и т.д. При этом для обеспечения постоянства значений эффективных радиусов R_{min} режущей кромки фрезы угол наклона γ ее оси должен быть отличным от 0, что возможно, если нормальям N_1 , N_2 , N_3 отвечают соответственно положения осей фрезы O_1 , O_2 , O_3 и т.д. В этом случае R_{min} отличны от нуля, что исключает процессы пластического деформиро-

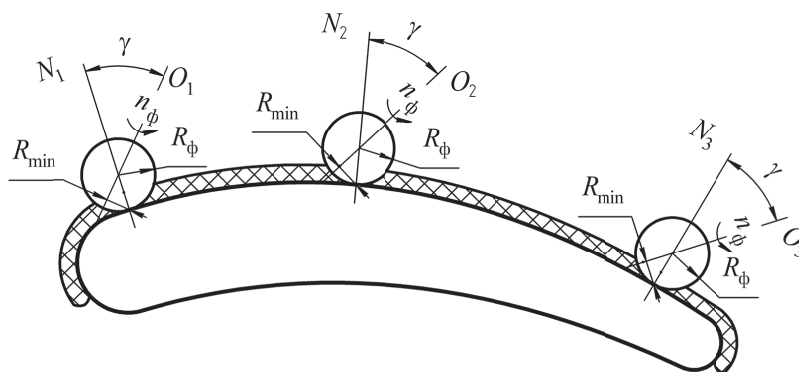


Рис. 2. Схема контакта сферической рабочей поверхности фрезы и обрабатываемой поверхности:

N_1, N_2, N_3 - нормали к поверхности профиля сечения лопатки;

O_1, O_2, O_3 - положение осей фрезы;

R_ϕ - радиус сферической поверхности фрезы;

R_{min} - эффективный радиус режущей кромки фрезы;

n_ϕ - частота вращения фрезы;

γ - угол разворота оси фрезы от нормалей к поверхности профиля сечения лопатки.

вания (подмятие материала вершиной фрезы) при фрезеровании профиля пера лопатки. При окончательном фрезеровании профиля пера значение угла разворота γ оси фрезы относительно нормалей к точкам профиля может быть найдено из геометрических соотношений, приведенных на рис. 3.

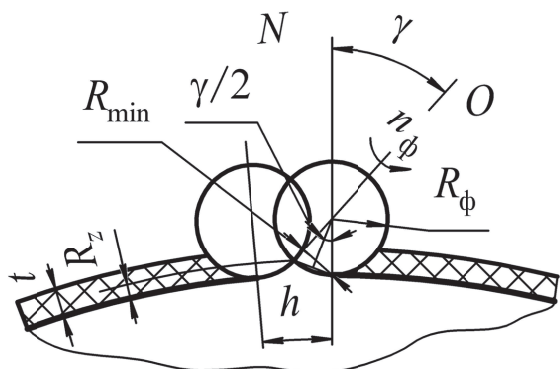


Рис. 3. Схема контакта фрезы и обрабатываемой поверхности для соседних поперечных строчек:

h - шаг строчек вдоль оси лопатки;

R_z - высотный параметр продольной шероховатости профиля пера лопатки;

t - глубина фрезерования.

$$R_\phi \sin(\gamma/2) = \frac{1}{2} \sqrt{R_z^2 + h^2/4}, \quad (5)$$

где R_ϕ - радиус сферической поверхности фрезы, м; R_z - высотный параметр продольной шероховатости профиля пера лопатки при поперечном строчном фрезеровании, оговариваемый чертежом, м; h - шаг строчек вдоль оси лопатки, м.

После преобразования (5), получим

$$\gamma = \arccos \left(1 - \frac{R_z^2 + h^2/4}{2R_\phi^2} \right). \quad (6)$$

Частота вращения фрезы n_ϕ , соответствующая рассчитанному по формуле (6) углу разворота оси фрезы γ и требуемой скорости фрезерования V_p , определяется из выражения

$$n_\phi = \frac{V_p}{2 \cdot \pi R_\phi \sin(\gamma)}, \quad (7)$$

где: n_ϕ - частота вращения фрезы, с⁻¹.

Подставляя (4) в (3) получим выражение для расчета второго управляемого параметра режима фрезерования S_i для каждой строчки и угла поворота лопатки в виде

$$S_i = \left[\frac{3 \cdot k T_{on} E J_x \cdot V_p^x}{C_p \cdot l^3 \left(2 \frac{a_i^3}{l^3} - \frac{a_i^4}{l^4} - \frac{a_i^2}{l^2} + \frac{3 E J_x b_i^2 a_i}{G J_k l^3} \right)} \right]^{1/y}, \quad (8)$$

по значению которого задают частоту вращения лопатки n_0 для каждой строчки и угла поворота лопатки из следующего выражения

$$n_0 = S_i \cdot \cos(\beta_i) / (2 \cdot \pi R_{ai}), \quad (9)$$

где: S_i - окружная подача фрезы; R_{ai} - радиус точки профиля пера лопатки относительно оси ее вращения, соответствующей углу поворота α для i -ой строчки; β_i - угол между вектором S_i и перпендикуляром к радиусу R_{ai} .

Выбор n_0 для каждой строчки и угла поворота лопатки изменяет производный режим фрезерования $S_i = S_z \cdot z \cdot n_0$, где S_z - рекомендуемая подача на зуб фрезы, z - число зубьев фрезы, и соответственно обеспечивает максимальную производительность фрезерования через изменение машинного времени

$$t_m = \sum_{i=1}^N L_i / S_i,$$

где: L - длина контура при фрезеровании i -ой строчки, N - число строчек при фрезеровании лопатки.

Для обеспечения требуемой точности профиля и шероховатости поверхности пера лопатки при максимальной производительности обработки установлена зависимость управляемого параметра режима фрезерования для каждой

строчки N и угла поворота лопатки α в виде $n_o = f(N, \alpha)$.

Для осуществления процесса поперечного строчного фрезерования предварительно рассчитывают осевой и полярный моменты инерции сечений лопатки для каждой строчки N и угла поворота α лопатки. Устанавливается зависимость $J_x, J_p = f(N, \alpha)$.

Определяют предельно допустимое значение составляющей силы фрезерования $[P_i]$ для каждой строчки N и угла поворота лопатки α в соответствии с выражением (3). Устанавливается зависимость $[P_i] = f(N, \alpha)$.

Из условия обеспечения требуемой шероховатости R_z поверхности лопатки и рекомендуемой скорости фрезерования V_p рассчитывается для каждой строчки N и угла поворота лопатки α угол разворота оси фрезы γ относительно нормали к точкам профиля сечения лопатки относительно оси, перпендикулярной оси фрезы и проходящей через центр сферической рабочей поверхности, в соответствии с выражением (6), и соответствующая ему частота вращения фрезы n_ϕ в соответствии с выражением (7). Устанавливаются числовые значения γ и n_ϕ .

Для обеспечения максимальной производительности обработки, при неизменной рекомендуемой скорости фрезерования V_p , из условия обеспечения предельно допустимого значения силы фрезерования $[P_i]$, в соответствии с выражением (3), устанавливают функциональную зависимость для каждой строчки N и угла поворота лопатки α для второго управляемого параметра режима фрезерования S_p , в соответствии с выражением (8), по значению которого определяют значения n_o , в соответствии с выражением (9). Устанавливают зависимость $n_o = f(N, \alpha)$.

Установленные функциональные зависимости управляемых параметров режима фрезерования для каждой i -ой строчки и угла поворота лопатки α в виде $n_\phi, n_o = f(N, \alpha)$ из условия обеспечения требуемых точности и шероховатости поверхности профиля пера лопатки при максимальной производительности фрезерования используется для разработки управляющей программы для станка с ЧПУ.

Рассмотрим пример конкретного выполнения операции поперечного строчного фрезерования пера лопатки по базовому и предлагаемому способу фрезерования.

На 5 - координатном фрезерном станке с ЧПУ фирмы Matsuura модели MAM 72-63V фрезеровалась рабочая лопатка IV ступени ГТД из сплава ВТ 8М длиной 151,63мм, к точности формы, размеров и расположения пера которой предъявляются требования 13-14 качества (предельное отклонение контуров сечений профиля пера от теоретического $T_{on} = 0,1$ мм). Шероховатость поверхности профиля пера $R_z = 20$ мкм. Лопатка

обрабатывалась фрезой со сферической рабочей поверхностью D12R6-64RL12 TiAlN фирмы Cerin (диаметр фрезы 12мм, число зубьев $z = 4$, радиус сферической рабочей поверхности $R_\phi = 3,5$ мм) на рекомендуемых базовых параметрах режима: скорость фрезерования $V_p = 120$ м/мин., подача на зуб фрезы $S_z = 0,05$ мм/зуб. При заданной рекомендуемой скорости фрезерования частота вращения фрезы $n_p = 1000V_p / (2\pi R_\phi) = 2730$ об/мин., что определяет производную базовую скорость окружной подачи $S_m = S_z \cdot z \cdot n_p = 546$ мм/мин. Строчное фрезерование выполнялось со смещением фрезы вдоль оси лопатки на величину шага строчки $h = 1,5$ мм. Полное формообразование пера лопатки осуществлялось после фрезерования 100 строчек. Машинное время фрезерования пера лопатки составило $t_m = \sum_{i=1}^{100} L_i / S_m = 87,5$ мин.

По предлагаемому способу фрезерования предварительно определялись осевой и полярный моменты инерции для всех строчек и углов поворота лопатки. Выполним проектный расчет окружной подачи фрезы S_i по выражению (8) при фрезеровании строчки $N_i = 59$ ($a_i = 87$ мм, $b_i = 0$), когда возможен наибольший прогиб δ_i под действием составляющей силы фрезерования P_i . Для этого сечения и углов поворота лопатки предварительно рассчитывают осевые моменты инерции J_x приведенные в табл. 1.

Согласно данным таблицы наибольший прогиб лопатки в этом сечении будет происходить при углах поворота $\alpha = 0, 180^\circ$, наименьший – при $\alpha = 90, 270^\circ$. Расчет S_i выполним при следующих значениях параметров, входящих в выражения (8): $T_{on} = 0,1$ мм, $k = 0,7$, $a_i = 87$ мм, $b_i = 0$, $l = 151,63$ мм, $E = 2,1 \cdot 10^5$ Н/мм², $G = 8 \cdot 10^4$ Н/мм², $V_p = 120$ м/мин, $C_p = 60$, $J_{xmin} = 62,49$ мм⁴, $J_{xmax} = 121,1$ мм⁴.

Расчетные значения S_i составили: при $\alpha = 0, 180^\circ - S_i = 355$ мм/мин, при $\alpha = 90, 270^\circ - S_i = 947$ мм/мин. По полученным значениям в соответствии с выражением (9) устанавливают значение управляемого параметра режима фрезерования n_o . Аналогичный проектный расчет выполнен для фрезерования каждой строчки и угла поворота лопатки.

Получив зависимость управляемых параметров режима фрезерования в виде $n_\phi, n_o = f(N, \alpha)$, разрабатывают управляющую программу для станка с ЧПУ.

Переменность окружной скорости подачи S_{nep} при фрезеровании каждой строчки лопатки позволило снизить машинное время фрезерования пера, расчетное значение которого составило $t_m = \sum_{i=1}^N L_i / S_{nep} = 73,4$ мин.

При обработке лопатки по базовому и рекомендуемому способам параметрах режима

Таблица 1. Расчетные значения осевого момента инерции J_x

Сечение, a_i , мм	Угол поворота α , градусы									
	0,180	10,190,	20,200,	30,210,	40,220,	50,230,	60,240,	70,250,	80,260,	90,270
		170,350	160,340	150,330	140,320	130,310	120,300	110,290	100,280	
	$J_x=f(\alpha)$, мм ⁴									
87	62,49	69,00	75,51	82,03	88,54	95,05	101,56	108,08	114,58	121,1

фрезерования были обеспечены требуемые параметры точности и шероховатости поверхности профиля пера лопатки. Рекомендуемые способом параметры режима фрезерования, за счет сокращения машинного времени, позволили повысить производительность обработки в 1,2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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. Патент 2354508, МКН В23С3/18 Российская Федерация. Способ строчного фрезерования пера лопатки газотурбинного двигателя / В.И. Свищёв, И.Г. Башкатов, Д.В. Оконешиников, Ю.Н. Степанов, С.В. Цыков, №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. 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: учебное пособие для вузов / Ю.С. Елисеев и др. М.: Машиностроение, 2003. 511 с.
9. Полетаев В.А. Основные технологические принципы автоматизированного производства лопаток ГТД // Научные труды в машиностроении: 2012. № 8. С.11-16.
10. Полетаев В.А. Технологические базы лопаток компрессора газотурбинных двигателей: Справочник // Инженерный журнал. 2004. №10. С. 20-24.
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. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986, 240 с.

TECHNOLOGICAL SUPPORT THE REQUIRED PARAMETERS OF QUALITY TRANSVERSE ROW-WISE MILLING FEATHER VANES OF GAS TURBINE ENGINE ON MULTI-AXIS CNC MACHINES

© 2017 S.V. Tarasov, V.I. Svirshchev

Perm National Research Polytechnic University

Known methods the line cross-milling feather vanes of a gas turbine engine (GTE) provide low processing performance and low levels of quality milled surface profile of the feather vanes due to unreasonably use parameter controlled milling mode in the processing of multi-axis CNC machines. For the implementation of high-performance milling profile of the vanes, while ensuring the required quality parameters required for each point of the profile section feather to establish a combination of controlled parameters milling mode, which will be the regulatory guidance material for the development of machine control software CNC in forming profile feather turbine engine vanes. The accuracy of the profile of the vanes for each line and the angle of its rotation was determined by the magnitude of vanes deformation δ_p , which does not exceed the magnitude of limit T_{0p} for its production. The analytical expressions for calculating a combination of controlled parameters mode transverse horizontal milling, allowing to provide the required surface quality of milled profile settings feather vanes gas turbine engines (profile accuracy, surface roughness) at the highest performance. It is shown that the sequence of calculating the combination of cutting mode parameters, which are the regulations for the development of machine control software for automated CNC milling profile of the vanes.

Keywords: vanes, milling, precision profile, parameters of quality, Multi-Axis machining, the maximum processing performance.

Stepan Tarasov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Innovative Technologies of Mechanical Engineering Department. E-mail tms2@pstu.ru
Valentin Svirshchev, Doctor of Technics, Professor at the Innovative Technologies of Mechanical Engineering Department. E-mail tms2@pstu.ru