

УДК 621.9.06.001.63

В.В. Куц, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: kuc-vadim@yandex.ru)

Д.С. Гридин, аспирант, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: swsu.st@inbox.ru)

М.С. Разумов, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: mika_1984_@mail.ru)

О.С. Зубкова, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: zubkova-oksana@bk.ru)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОРЦЕВЫХ ФРЕЗ С КОНСТРУКТИВНОЙ ОСЕВОЙ ПОДАЧЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ВАЛОВ С РАВНООСНЫМ КОНТУРОМ

В узлах машин одними из наиболее ответственных соединений являются разъемные соединения для передачи крутящего момента. К ним предъявляются высокие требования по усталостной прочности и долговечности. Однако существующие методы обработки имеют ряд недостатков. В связи с чем, было предложено использовать торцевую фрезу с конструктивной осевой подачей, что позволило исключить возвратно-поступательные движения инструмента и/или заготовки. Предполагалось, что частота вращения фрезы и вала имеют одинаковые значения и профиль вала обрабатывается за один оборот инструмента, и что соответственно при высоких требованиях к качеству поверхности приводит к увеличению габаритных размеров инструмента (увеличению металлоемкости) и соответственно увеличению себестоимости обработки. В статье показаны результаты решения прямой задачи проектирования, связанные с определением производящей поверхности торцевой фрезы для обработки валов с равноосным контуром, полученные с применением геометрической теории формирования поверхностей режущими инструментами. Рассмотрены случаи, когда оси фрезы и детали пересекаются под прямым углом и меньшими углами. Показаны результаты расчета и геометрического моделирования производящих поверхностей подобных фрез для РК-профильного вала заданного размера. Применение торцевой фрезы с конструктивной осевой подачей позволит обрабатывать участок вала шириной, равной ширине фрезерования, исключая возвратно-поступательные движения и не используя специальные приспособления, достичь высокой точности обработки наиболее важных участков валов с равноосным контуром (оптимальной шероховатости и правильной геометрической формы обрабатываемой поверхности валов), а также высокой производительности обработки, вследствие упрощения схемы формообразования валов данного типа.

Ключевые слова: фреза; производящая поверхность; конструктивная осевая подача; равноосный контур; геометрическая модель; формообразование.

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-4-24-31

Ссылка для цитирования: Моделирование производящих поверхностей торцевых фрез с конструктивной осевой подачей для обработки валов с равноосным контуром / В.В. Куц, Д.С. Гридин, М.С. Разумов, О.С. Зубкова // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 4(79). С. 24-31.

В узлах машин одними из наиболее ответственных соединений являются разъемные соединения для передачи крутящего момента. К ним предъявляются высокие требования по усталостной прочности, долговечности и др. В настоящее время в машинах разного функционального назначения для передачи крутящего момента наибольшее применение находят шлицевые и шпоночные соеди-

нения. Профильные соединения, известные еще давно, находят ограниченное применение в отечественном машиностроении вследствие недостаточной технологичности, что связано с отсутствием необходимого для их производства технологического оборудования, которое имеет сложную кинематическую структуру и обладает высокой стоимостью [1-8].

Так, например, в работе [9] предложен способ обработки валов с равноосным контуром торцевой фрезой, расположенной перпендикулярно оси детали, ширина которой постоянна по всей производящей поверхности, т.е. подъем на зуб отсутствует, при котором для получения РК-профиля фрезе и заготовке сообщают возвратно-поступательное перемещение с амплитудой, равной величине эксцентриситета профиля и частотой, зависящей от количества граней РК-профиля. Недостатком указанного способа является то, что этот способ не обеспечивает высокой производительности и обработки.

Для устранения недостатков данного способа было предложено использовать торцевую фрезу с конструктивной осевой подачей [10,11], что позволило исключить возвратно-поступательные движения инструмента и/или заготовки. Предполагалось, что частота вращения фрезы и вала имеет одинаковые значения и профиль вала обрабатывается за один

оборот инструмента, что соответственно при высоких требованиях к качеству поверхности приводит к увеличению габаритных размеров инструмента (увеличению металлоемкости) и соответственно увеличению себестоимости обработки.

Для решения данной проблемы авторами предлагается за один оборот фрезы выполнять обработку одного типового участка вала (РК-профильной кривой). Соответственно частота вращения фрезы будет в N -раз больше вращения вала, где N – число граней РК-профильного вала. Реализация данного способа предполагает создание новой конструкции торцевой фрезы с конструктивной осевой подачей, производящая поверхность которой может быть найдена следующим образом.

Зададим основное уравнение формообразования РК-профильного вала, соответствующее рассматриваемому способу обработки

$$\bar{r}_0 = A_{0,4} \cdot \bar{r}_4, \quad (1)$$

где \bar{r}_0 – уравнения обрабатываемой поверхности РК профильного вала

$$\bar{r}_0 = \begin{bmatrix} (R - e \cdot \cos(N\theta) \cos(\theta) - Ne \cdot \sin(N\theta) \sin(\theta)) \\ (R - e \cdot \cos(N\theta) \sin(\theta) + Ne \cdot \sin(N\theta) \cos(\theta)) \\ z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где R – средний радиус РК-профиля; e – эксцентриситет РК-профиля; θ – параметрический угол ($0 \leq \theta \leq 2\pi$); $A_{0,4}$ – матрица преобразования формообразующей системы (рис.1).

$$A_{0,4} = A_{0,1}^6(\theta_1) A_{1,2}^1(x) A_{2,3}^3(z) A_{3,4}^4(\theta_2), \quad (3)$$

где $A_{0,1}^6(\theta_1)$ – матрица, учитывающая поворот заготовки вокруг оси Z на величину угла поворота вала θ_1 (табл.1); $A_{1,2}^1(x)$ – матрица, учитывающая смещение фрезы вдоль оси X ; $A_{2,3}^3(z)$ – матрица, учитывающая смещение фрезы вдоль оси Z на величину z ; $A_{3,4}^4(\theta_2)$ – матрица поворота фрезы вокруг оси X на угол θ_2 (табл.); \bar{r}_4 – искомое уравнение производящей поверхности торцевой фрезы.

Исходя из того, что за один оборот фрезы будет обрабатываться $1/N$ -я часть профиля вала, задавая связи в формообразующей системе (см. рис.1)

$$\theta_2 = -\theta_1 \cdot N, x = R + B, z = R_f - H, \quad (4)$$

где H – ширина фрезерования; B – толщина среднего радиуса фрезы; R_f – средний радиус фрезы, в результате перемножения матриц обобщенных движений, матрица преобразований (3) примет вид

$$A_{0,4} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \sin(\theta_1) \cos(\theta_1 N) \sin(\theta_1) \sin(\theta_1 N) (R+B) \cos(\theta_1) \\ -\cos(\theta_1) \cos(\theta_1) \cos(\theta_1 N) \cos(\theta_1) \sin(\theta_1 N) (R+B) \sin(\theta_1) \\ 0 & 0 & -\sin(\theta_1 N) \cos(\theta_1 N) R_f + H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

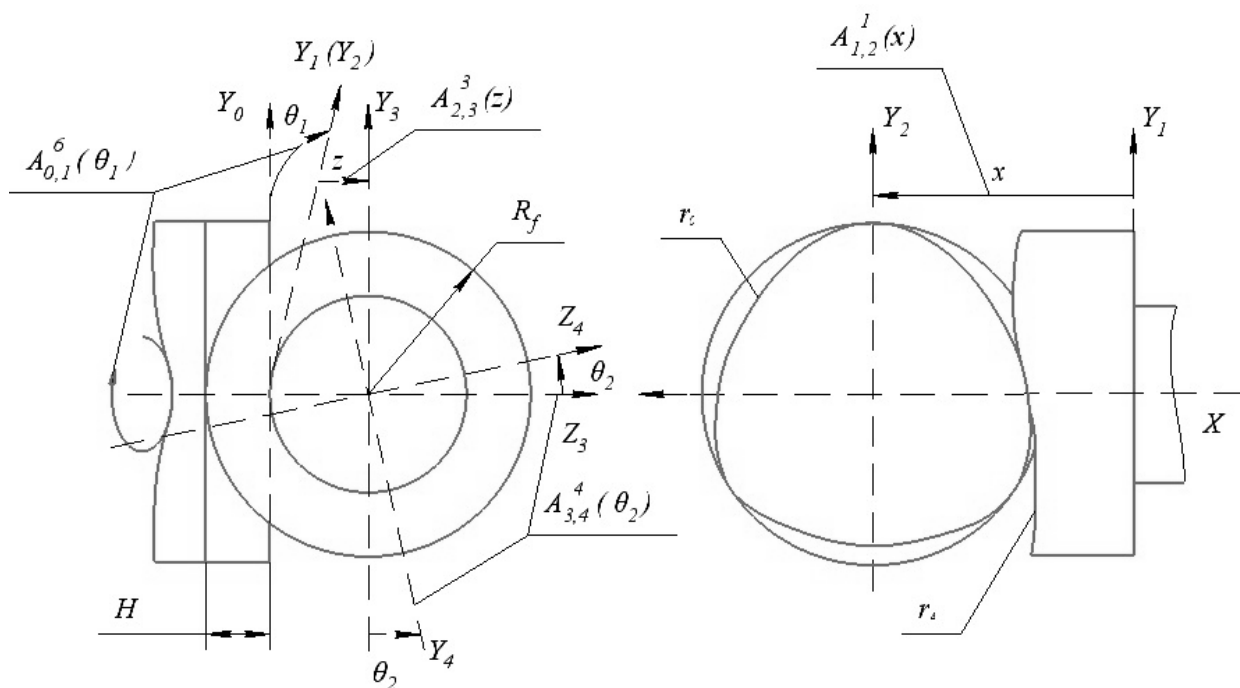


Рис. 1. Схема обработки валов с равноосным контуром торцевой фрезой с осевой конструктивной подачей

Матрицы обобщенных перемещений

Вид движения	Матрицы, моделирующие движение относительно оси		
	X	Y	Z
Поступательное вдоль оси	$A^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Вращательное вокруг оси	$A^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^5 = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^6 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Искомое уравнение производящей поверхности \bar{r}_4 найдем как

$$\bar{r}_4 = (A_{0,4})^{-1} \bar{r}_0.$$

Для построения уравнения производящей поверхности определим связь огибания в формообразующей системе (ФС) путем решения относительно параметра θ_1 уравнения

$$\det(B) = 0, \quad (5)$$

где B – матрица частных производных вектора \bar{r}_4 по параметрам θ, θ_1, z

$$B = \begin{bmatrix} \bar{l}_4 \cdot \frac{\partial \bar{r}_4}{\partial \theta} & \bar{j}_4 \cdot \frac{\partial \bar{r}_4}{\partial \theta} & \bar{k}_4 \cdot \frac{\partial \bar{r}_4}{\partial \theta} \\ \bar{l}_4 \cdot \frac{\partial \bar{r}_4}{\partial z} & \bar{j}_4 \cdot \frac{\partial \bar{r}_4}{\partial z} & \bar{k}_4 \cdot \frac{\partial \bar{r}_4}{\partial z} \\ \bar{l}_4 \cdot \frac{\partial \bar{r}_4}{\partial \theta_1} & \bar{j}_4 \cdot \frac{\partial \bar{r}_4}{\partial \theta_1} & \bar{k}_4 \cdot \frac{\partial \bar{r}_4}{\partial \theta_1} \end{bmatrix},$$

где $\bar{l}_4, \bar{j}_4, \bar{k}_4$ – определяющие орты системы координат инструмента.

Так как уравнение (5) имеет 2 решения

$$\theta_{1,1} = \arctan \left(\frac{\cos(\theta) \sin(N\theta) e - \sin(\theta) \cdot t}{\sin(N\theta) \sin(\theta) e + \cos(\theta) \cdot t} \right),$$

и

$$\theta_{1,2} = \arctan \left(\frac{\cos(\theta) \sin(N\theta) e + \sin(\theta) \cdot t}{\sin(N\theta) \sin(\theta) e + \cos(\theta) \cdot t} \right),$$

где

$$t = \sqrt{(R_f + z)^2 - e^2 \sin^2(N\theta) + H^2 - 2H(R_f - z)},$$

и

$$\theta_{2,1} = \arctan \left(\frac{e \cos(\theta) \sin(N\theta) (N \sin(\beta) - t)}{e \sin(N\theta) \sin(\theta) (N^2 - t)} \right)$$

$$\theta_{2,2} = \arctan \left(\frac{e \cos(\theta) \sin(N\theta) (N \sin(\beta) - t)}{e \sin(N\theta) \sin(\theta) (N^2 + t)} \right),$$

$$\text{где } t = \sqrt{\cos(\beta)^2 z^2 + 2Ne^2 \sin(\beta) + 2R_f z \cos(\beta) + R_f^2 - 2HR_f - 2Hz \cos(\beta)},$$

где N – число граней РК-профильного вала;

то связь огибания будет определяться по формуле

$$\theta_1 = \max(\theta_{1,1}, \theta_{1,2}). \quad (6)$$

На рисунке 2 показан результат геометрического моделирования производящей поверхности торцевой фрезы с конструктивной осевой подачей для обработки РК-профильного вала со следующими параметрами: $H = 20$ мм; $R_f = 100$ мм; $N = 3$; $e = 1$ мм; $R = 50$ мм; $B = 20$ мм.

Геометрия моделирования производящей поверхности торцевой фрезы.

В случае, если обработка вала с равноосным контуром будет выполняться торцевой фрезой под некоторым углом β относительно исходного положения оси инструмента, то матрица преобразования ФС будет иметь вид

$$A_{0,5} = A_{0,1}^6(\theta_1) A_{1,2}^1(x) A_{2,3}^5(\beta) \times A_{3,4}^3(z) A_{4,5}^4(\theta_2), \quad (7)$$

где $A_{0,1}^6(\theta_1)$ – матрица, учитывающая поворот заготовки вокруг оси Z на угол θ_1 ; $A_{1,2}^1(x)$ – матрица, учитывающая смещение фрезы вдоль оси X ; $A_{2,3}^5(\beta)$ – матрица, поворота фрезы вокруг оси Y под углом β ; $A_{3,4}^3(z)$ – матрица, учитывающая смещение фрезы вдоль оси Z ; $A_{4,5}^4(\theta_2)$ – матрица поворота фрезы вокруг оси X на угол θ_2 (см.табл.).

Выполняя расчет аналогично, как и в первом случае получаем для уравнения (5) с учетом (7) следующие решения:

На рисунке 3 показан результат моделирования профиля поверхности торцевой фрезы для обработки РК-профильных соединений при различных

значениях угла β при $H = 20$ мм, $R_f = 20$ мм, $N = 3$, $e = 1$ мм, $R = 50$ мм, $B = 20$ мм.

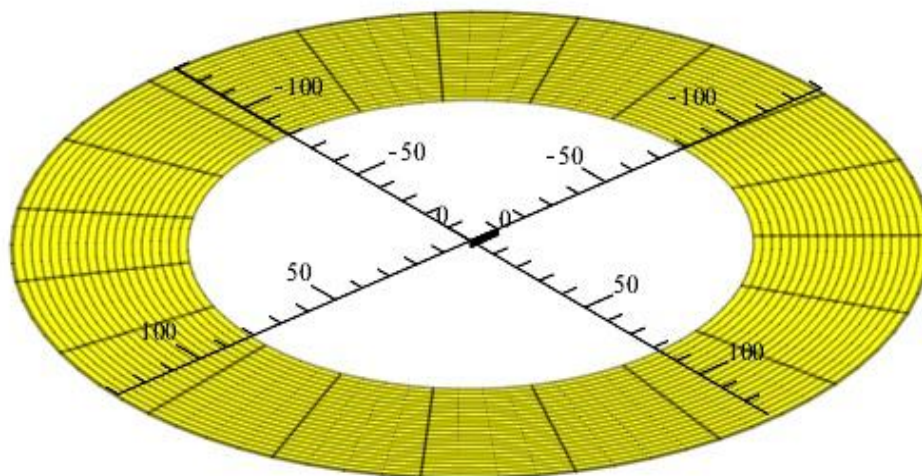
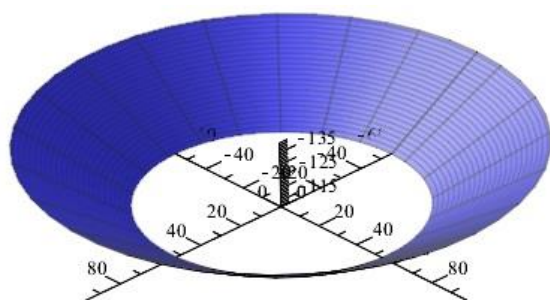
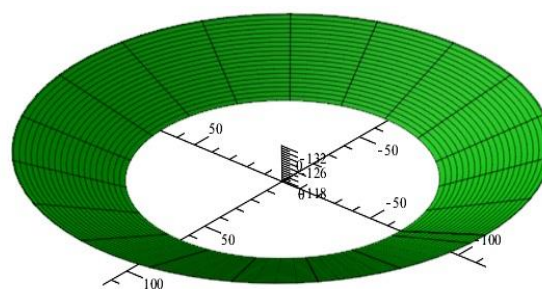


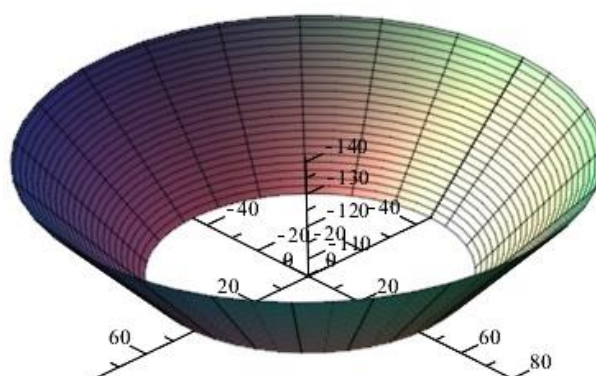
Рис. 2.



а)



б)



в)

Рис. 3. Моделирование поверхности торцевой фрезы. Расположение поверхности фрезы под углом: а – $\beta=15^\circ$, б – $\beta=30^\circ$, в – $\beta=45^\circ$

Применение торцевой фрезы с конструктивной осевой подачей позволит обрабатывать участок вала шириной, равной ширине фрезерования, исключая возвратно-поступательные движения и не используя специальные приспособления, достичь высокой точности обработки наиболее важных участков валов с равноосным контуром (оптимальной шероховатости и правильной геометрической формы обрабатываемой поверхности валов), а также высокой производительности обработки, вследствие упрощения схемы формообразования валов данного типа [12].

В дальнейшем основной задачей следующего исследования станет определение метода моделирования зубьев торцевой фрезы, а также определение требуемых режимов обработки на станке.

Работа выполнена в рамках финансирования Стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2018-2020 годы СП-591.2018.1.

Список литературы

1. Разумов М.С. Повышение производительности формообразования многогранных наружных поверхностей посредством планетарного механизма: автореф. дис.. канд. техн. наук. Курск, 2011. 18 с.
2. Барботько А.И., Разумов М.С., Гладышкин А.О. Определение погрешности формы при обработке многогранников на токарном станке // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №3 (36). С. 130 -135.

3. Кузьменко А.П., Куц В.В., Максименко Ю.А. Построение модели режущих кромок дисковой фрезы для обработки валов с равноосным контуром // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 1-1 (40). С. 116-120.

4. Разумов М.С., Гречухин А.Н., Пыхтин А.И. Определение погрешности формы при полигональном точении многогранников с нечетным количеством граней // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сборник научных трудов I Международной научной конференции молодых ученых. Новосибирск, 2014. С. 137 -140.

5. Razumov M.S., Gladyshevskiy A.O., Pykhtin A.I. Evaluation of rational quantity of profile moment-transferring joints sides // Source of the Document Tehnicki Vjesnik. 2016. № 23 (2). P. 575 -577.

6. Формообразование многогранных наружных поверхностей с переменным профилем / С.Г. Емельянов, М.С. Разумов, А.Н., Гречухин А.О. Гладышкин, А.И. Пыхтин. Курск, 2015.

7. Формообразование гранных поверхностей тел вращения посредством планетарного механизма построителя / С.Г. Емельянов, А.И. Барботько, М.С. Разумов, А.О. Гладышкин, А.Н. Гречухин, А.И. Пыхтин. Курск, 2014, 188 с.

8. Ивахненко А.Г. Методология структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем. Комсомольск-на-Амуре, 2015. 282 с.

9. А.с. 1599158 А I СССР В 23 С 3/08, В 24 в 19/08 Способ обработки валов с профилем типа равноосный контур / А.И. Тимченко, А.Г. Схиртладзе. Опубл. 15.10.90. Бюлл. №38.

10. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем, Курск, 2010. 153 с.

11. Куц В.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Моделирование производящих поверхностей фрез-протяжек для обработки валов с равноосным контуром. Курск, 2011. 7 с.

12. А.с. 103317 В 23 С 5/06 Фреза торцевая для обработки валов с равноосным контуром / В.В. Куц, А.Г. Ивахненко, М.Л. Сторублев. Опубл. 10.04.2011. Бюл. № 10.

Поступила в редакцию 15.07.18

UDC 621.9.06.001.63

V.V. Kuts, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: kuc-vadim@yandex.ru)

D.S. Gridin, Post-Graduate Student, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: swsu.st@inbox.ru(kursk, swsu))

M.S. Razumov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: mika_1984_@mail.ru(kursk, swsu))

O.S. Zubkova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: zubkova-oksana@bk.ru(kursk, swsu))

MODELING PRODUCING SURFACES OF END MILLS WITH A DESIGN AXIAL DIRECTION FOR SHAFT MACHINING WITH EQUIAXED CIRCUIT

The article shows the results of the solution of the direct design problem associated with the definition of the producing surface of the end mill for processing shafts with an equiaxed contour, obtained using the geometric theory of surface formation by cutting tools. The cases when the axis of the cutter and the parts intersect at a right angle and smaller angles. The results of calculation and geometric modeling of producing surfaces of such mills for the RC-profile shaft of a given size are shown.

The work was carried out as part of the funding of the Grant of the President of the Russian Federation to young scientists and graduate students engaged in promising research and development in priority areas of modernization of the Russian economy, for 2018-2020 SP-591.2018.1

Key words: milling cutter; producing surface; structural axial feed; equiaxed contour; geometric model; forming.

DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-4-24-31

For citation: Kuts V.V., Gridin D.S., Razumov M.S., Zubkova O.S. Modeling Producing Surfaces of End Mills with a Design Axial Direction for Shaft Machining with Equiaxed Circuit. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 4(79), pp. 24-31 (in Russ.).

Reference

1. Razumov M.S. Povyshenie proizvoditel'nosti formoobrazovaniya mnogo-

grannyh naruzhnyh poverhnostej posredstvom planetarnogo mehanizma. Avtoref. diss. kand. tehn. nauk. Kursk, 2011, 18 p.

2. Barbot'ko A.I., Razumov M.S., Gladyshevskiy A.O. Opredelenie pogreshnosti formy pri obrabotke mnogogrannikov na tokarnom stanke. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no.3 (36), pp. 130 -135.
3. Kuz'menko A.P., Kuc V.V., Maksimenko Ju.A. Postroenie modeli rezhushhih kro-mok diskovoy frezy dlja obrabotki valov s ravnoosnym konturom. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 1-1 (40), pp. 116-120.
4. Razumov M.S., Grechuhin A.N., Pyhtin A.I. Opredelenie pogreshnosti formy pri poligonal'nom tochenii mnogogrannikov s nechetnym kolichestvom granej. *Jel'ektrotehnika. Jenergetika. Mashinostroenie.: sbornik nauchnyh trudov I Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchenykh*, Novosibirsk, 2014, pp. 137 -140.
5. Razumov M.S., Gladyshevskiy A.O., Pyhtin A.I. Evaluation of rational quantity of profile moment-transferring joints sides Source of the Document *Tekhniki Vjesnik*, 2016, no. 23 (2), pp. 575 -577.
6. Emel'janov S.G., Razumov M.S., Grechuhin A.N., Gladyshevskiy A.O., Pyhtin A.I. Formoobrazovanie mnogogrannyh naruzhnyh poverhnostej s peremennym profilem. Kursk, 2015.
7. Emel'janov S.G., Barbot'ko A.I., Razumov M.S., Gladyshevskiy A.O., Grechuhin A.N., Pyhtin A.I. Formoobrazovanie grannyh poverhnostej tel vrashhenija posredstvom planetarnogo mehanizma postroitelja. Kursk, 2014, 188 p.
8. Ivahnenko A.G. Metodologija strukturno-parametricheskogo sinteza metallorehushhih sistem. Komsomol'sk-na-Amure, 2015, 282 p.
9. A.s. 1599158 A I SSSR V 23 S 3/08, V 24 v 19/08 Sposob obrabotki valov s profilem tipa ravnoosnyj kontur. A.I. Timchenko, A.G. Shirladze. Opublikovano 15.10.90. *Bjulleten'* no. 38.
10. Ivahnenko A.G., Kuc V.V. Strukturno-parametricheskij sintez tehnologicheskikh sistem. Kursk, 2010, 153 p.
11. Kuc V.V., Ivahnenko A.G., Storublev M.L. Modelirovanie proizvodjashhih poverhnostej frezprotjazhek dlja obrabotki valov s ravnoosnym konturom, Kursk, 2011, 7 p.
12. A.s. 103317 V 23 S 5/06 Freza torcevaja dlja obrabotki valov s ravnoosnym konturom. V.V. Kuc, A.G. Ivahnenko, M.L. Storublev. Opublikovano 10.04.2011, *Bjulleten'* no. 10.