

УДК 621.9.025; 621.9.06

DOI 10.18698/0536-1044-2017-4-67-75

Параметрический синтез кинематики формирования щели при бироторной лезвийной обработке

Д.В. Иванов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Parametric Synthesis of the Kinematics of Slot Formation in Bi-Rotary Edge Cutting Machining

D.V. IvanovBMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: vsivanov49@yandex.ru

i Применение многолезвийного резания с циклоидальной схемой формообразования для изготовления изделий с щелевой структурой позволяет улучшить их функциональные свойства по сравнению с таковыми, получаемыми при обработке с использованием технологий накатки, навивки и виброрезания. Создаваемые тонкие сквозные щели в сочетании с высокой плотностью их расположения в оболочке повышают проницаемость и тонкость фильтрации жидкостей и газов. Технологии бироторного резания за счет тонкого оребрения поверхности позволяют многократно увеличить интенсивность работы теплообменных систем, а при нанесении покрытий существенно повышают их сцепление с поверхностью изделия. Предложена математическая модель процесса формирования щели при циклоидальном формообразовании. Разработан метод решения модели на базе приведения ее трансцендентных выражений к алгебраическому виду, позволяющий в задаче параметрического синтеза с относительной погрешностью до 0,02 рассчитать кинематическое передаточное отношение угловых скоростей технологических роторов, обеспечивающих требуемую длину щели. Приведен метод последовательных приближений с использованием итерационного алгоритма, гарантирующий получение любой заранее заданной и отличной от нуля погрешности расчета.

Ключевые слова: циклоидальное формообразование, параметрический синтез, кинематическое передаточное отношение, итерационный алгоритм.

i The use of multiblade cutting with a cycloidal scheme of part shaping for manufacturing parts with slot structure, improves their functional performance attributes compared to parts that are machined using knurling, coiling and vibro-cutting technologies. The resulting fine through slots combined with their high-density layout in the shell, improve penetration and fineness of filtration of liquids and gases. Bi-rotary cutting with its fine fining of the surfaces can increase the performance of heat transfer systems multiple times; and when the surfaces are coated, cohesion with the part surfaces is significantly improved. A mathematical model of the slot formation process for the cycloidal scheme is proposed. A method for solving a model problem based on reducing transcendental expressions to the algebraical type is developed. The method allows the calculation of kinematic angular velocity ratio of technological rotors guaranteeing the required length of the slot in the problem of parametric synthesis with relative error up to 0.02. The method of successive approximations using an iterative algorithm is described, which guarantees obtaining any specified calculation error, other than zero.

Keywords: cycloidal formation process, parametrical synthesis, kinematic gear ratio, iterative algorithm.

Бироторные технологические системы обеспечивают новые возможности лезвийной обработки, а именно получение деталей с дискретно-щелевым макрорельефом: щелевых фильтроэлементов, оребренных трубчатых теплообменников и поверхностей валов под нанесение антифрикционных или износостойких покрытий.

Отличительной особенностью бироторных схем профилирования деталей является наличие в их кинематической структуре комбинации двух круговых движений, сообщаемых элементам пары заготовка–инструмент, вокруг параллельных осей. Относительное формирующее движение режущих кромок инструмента в координатах, связанных с деталью, — циклоидальное.

Преимущество многолезвийного резания с циклоидальной схемой формообразования (ЦСФ) щелевой структуры поверхности перед методами накатки, навивки или виброрезания заключается в получении улучшенных функциональных свойств изделий. Технологии резания с ЦСФ в комбинации с деформирующим резанием обеспечивают повышенную проницаемость и тонкость фильтрации в системах очистки воды, нефти и газа, многократное увеличение поверхности теплопередачи теплообменников, а также оребренной поверхности сцепления плунжеров и валов с нанесенными на них антифрикционными или износостойкими покрытиями [1–3].

Эффективная эксплуатация бироторных технологических систем, реализующая их возможности по точности и производительности, требует знания закономерностей процесса формообразования деталей с учетом его многолезвийности, цикличности и взаимонаправленности формирующих движений. В работах по получению щелевых структур нет сведений о циклоидальном характере их формообразования. Методы его оценки применительно к отдельно взятым многолезвийным способам позволяют оперировать такими скалярными технологическими величинами, как частота вращения и круговая подача [4–7]. Базируясь на статическом подходе, основанном на законах планиметрии, эти методы не в полной мере отражают кинематический характер процесса и его интегральный показатель точности — пространственную композицию траекторий рез-

цов, формирующую профиль детали. Также не раскрыта ее взаимосвязь с геометрическими и кинематическими параметрами технологической системы.

Математическое моделирование процесса формообразования на базе векторного представления схемы технологического зацепления и его кинематики позволяет полнее раскрыть и выявить пути реализации возможностей бироторных систем с ЦСФ.

Цель работы — моделирование и параметрический синтез кинематики циклоидального формообразования щели при бироторной обработке деталей.

Основная часть. Конфигурация дискретно-щелевой поверхности, имеющая сложную пространственную геометрию, зависит от ряда параметров, которые обуславливают функциональные свойства машиностроительных изделий. Одним из них является длина щели l (рис. 1), которая в основном определяет поверхность фильтрации, теплообмена и сцепления покрытия с подложкой и зависит от дуги окружности профиля детали между нисходящей и восходящей ветвями циклоидальной формирующей траектории S (рис. 2).

Длина l , являющаяся выходным параметром процесса формообразования при бироторной обработке (рис. 3), в свою очередь зависит от геометрических параметров схемы технологического зацепления, значения и взаимонаправленности угловых скоростей движений детали и инструмента.

Обобщенная векторная модель схемы обработки (рис. 4) формализована системой геометрических векторов взаиморасположения тех-

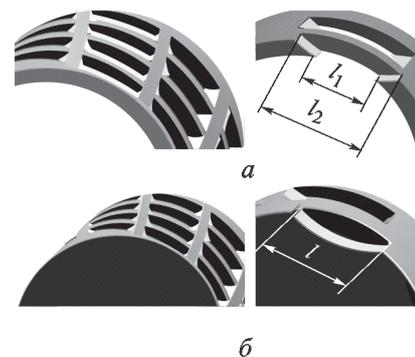


Рис. 1. Фрагменты деталей со сквозной (а) и глухой (б) структурой

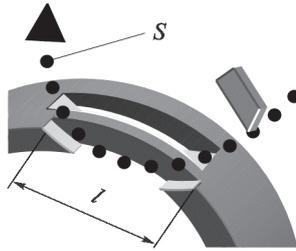


Рис. 2. Схема циклоидального формирования профиля щели

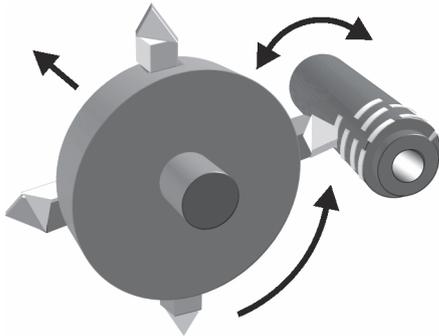


Рис. 3. Схема бироторной лезвийной обработки

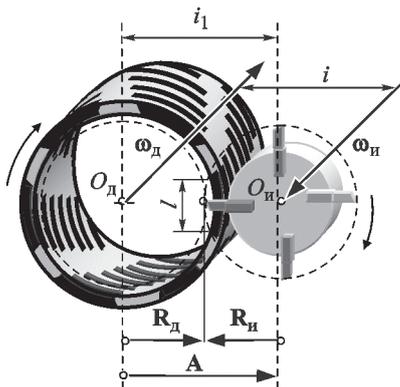


Рис. 4. Векторная модель схемы обработки

нологических роторов в зоне обработки R_d , $R_и$, A и кинематических векторов угловых скоростей ω_d , $\omega_и$ формообразующих движений:

$$R_d = R_d \mathbf{r}; R_и = R_и \mathbf{r}; A = A \mathbf{r}; i_1 = \frac{R_и}{A + R_и};$$

$$\omega_d = \omega_d \mathbf{e}; \omega_и = \omega_и \mathbf{e}; i = \frac{\omega_d}{\omega_и},$$

где R_d и $R_и$ — линейные координаты радиус-векторов детали и инструмента; \mathbf{r} — единичный вектор геометрической координатной оси; A — координата радиуса-вектора центра инструмента $O_и$ относительно центра детали O_d ; i_1 — геометрическое передаточное отношение схемы касания технологической пары; \mathbf{e} — единичный вектор кинематической координа-

ты; ω_d и $\omega_и$ — координаты векторов угловых скоростей детали и инструмента; i — кинематическое передаточное отношение угловых скоростей.

Для описания траектории S принята полярная система координат (ρ, φ) с центром O_d (рис. 5), что обусловлено круглой формой профилей детали и инструмента, а также вращательным типом формообразующих движений [8].

При моделировании использован принцип относительности движений [9], согласно которому деталь и связанную с ней систему координат фиксируют от вращения, а инструменту с центром $O_и$ сообщают обратное вращательное движение $-\Phi_s(B_1)$ вокруг центра O_d с угловой скоростью $-\omega_d$, равной по значению и противоположной по направлению угловой скорости ω_d реального вращения детали.

Исходная модель формирования щели, определяющая траекторию S как годограф радиус-вектора формообразования ρ , записывается в виде суммы векторов A и $R_и$ (см. рис. 5):

$$\rho = A + R_и,$$

где A — вектор расположения центра инструмента $O_и$ относительно начала координат O_d , направленный из O_d в $O_и$ и численно равный межцентровому расстоянию A ; $R_и$ — радиус-вектор, координирующий вершину резца относительно центра $O_и$.

Результирующее циклоидальное движение Φ_s формообразующей точки инструмента характеризуется зависимостью $\rho = F(\varphi)$ в обобщенной системе координат, связанной с центром детали O_d .

В параметрическом виде модель представляет собой систему из четырех уравнений, содержащих восемь переменных. Уравнения модели определяют форму и текущее пространственное положение векторного треугольника $AR_и\rho$. Возможны два вида записи модели. Один из них базируется на использовании метода проекций, другой — теоремы косинусов [10]:

$$\begin{cases} A = \rho \cos v - R_и \cos \theta; \\ \rho \sin v = R_и \sin \theta; \\ \varphi = \tau + v; \\ \tau = -i\theta; \end{cases} \quad (1)$$

воляет в явном виде выразить параметр θ , и в итоге из моделей (1), (2) нельзя точно определить требуемое значение кинематического передаточного отношения i .

Параметрический синтез значений i при решении моделей (1), (2) основан на использовании при расчетах методов приближений.

Первый метод базируется на приведении элементарных трансцендентных функций в первом и втором уравнениях модели (2) к алгебраическому виду с использованием известных соотношений [9, 10] и дальнейшим определением параметров θ и i в явном виде.

Первоначально выразим функциональную взаимосвязь предельного значения угловой координаты φ радиуса формообразования ρ , равного по модулю радиусу наружного или внутреннего контура детали R_d . Координата φ определяется дугой окружности профиля детали между начальным положением на линии центров и точкой пересечения входящей или выходящей ветвей траектории S с контуром профиля (см. рис. 5):

$$\varphi = \frac{l}{2R_d}, \text{ рад.} \tag{5}$$

С помощью соотношения (5) модель (2) приводим к системе из двух трансцендентных уравнений

$$\begin{cases} R_d^2 = A^2 + R_n^2 + 2AR_n \cos \theta; \\ R_d \sin \left(\frac{l}{2R_d} + i\theta \right) = R_n \sin \theta. \end{cases} \tag{6}$$

Далее с использованием известных формул приближений [9, 10] трансцендентные функции $\sin x$ и $\cos x$ можно представить в алгебраическом виде

$$\sin x = x; \tag{7}$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2}. \tag{8}$$

Здесь через x обозначены аргументы элементарных тригонометрических функций в уравнениях (7) и (8), выраженные в радианах.

Относительная погрешность приближений Δ , выполненных с помощью преобразований по зависимостям (7) и (8) в диапазоне x от 0 до $\pi/9$ рад, которая приведена в табл. 2, не превышает 0,02.

Результат оценки относительной погрешности Δ вполне допустим для машиностроительных расчетов.

С использованием приближений (7), (8) можно представить систему уравнений (6) в алгебраическом виде:

$$\begin{cases} R_d^2 = A^2 + R_n^2 + 2AR_n \left(1 - \frac{\theta^2}{2} \right); \\ R_d \left(\frac{l}{2R_d} + i\theta \right) = R_n \theta. \end{cases} \tag{9}$$

Решением этой системы (9) является значение кинематического передаточного отношения i угловых скоростей инструмента и детали, определяемое из ее второго уравнения по зависимости

$$i = \frac{R_n - l/(2\theta)}{R_d}, \tag{10}$$

где предельный угол контакта θ реза с деталью вычисляется из первого уравнения системы (9) по выражению

$$\theta = \pm \sqrt{\frac{(A + R_n)^2 - R_d^2}{AR_n}}. \tag{11}$$

Согласно данным табл. 1, знак «+» перед радикалом формулы (10) соответствует условиям ВР, так как $\theta > 0$, а знак «-» — ПР, поскольку $\theta < 0$.

Таблица 2

Оценка погрешности приближений по зависимостям (7) и (8)

x, рад	Зависимость				
	(7)		(8)		
	sin x	Δ	cos x	1 - x ² /2	Δ
0,0872 (π/36)	0,0871	0,001	0,9962	0,9962	0,0000
0,1744 (π/18)	0,1736	0,005	0,9848	0,9848	0,0000
0,2617 (π/12)	0,2588	0,011	0,9659	0,9658	0,0001
0,3489 (π/9)	0,3420	0,020	0,9397	0,9391	0,0006

Ниже приведены рассчитанные с помощью зависимостей (10)–(11) значения искомых переменных θ, i для режимов ВР и ПР при следующих исходных данных: $R_d = 22$ мм, $R_n = -95$ мм (внешняя схема касания), межцентровое расстояние $A = 104$ мм, требуемая длина щели $l = 20$ мм.

Расчетные значения кинематических параметров для условий ПР и ВР

	Режим ПР	ВР
θ , рад.....	-0,202	0,202
i	-2,07	6,39

Второй метод расчета кинематического передаточного отношения i по модели формообразования базируется на методе последовательных приближений с использованием итерационного алгоритма. Для этого уравнение (4) с неявно выраженной переменной θ приводим к рекуррентному соотношению [10–11], суть которого заключается в определении последующего значения параметра θ через предыдущее по зависимости

$$\theta_{j+1} = \arcsin \left[\frac{R_d}{R_n} \sin \left(\pm \arccos \frac{A + R_n \cos \theta_j}{R_d} \right) \right], \quad (12)$$

где θ_{j+1} и θ_j — значения угла контакта инструмента с деталью на текущей и предыдущей вычислительных итерациях.

Из зависимости (3) следует, что $\arccos [(A + R_n \cos \theta_j) / R_d]$ является углом контакта ν , поэтому, согласно данным табл. 1, верхний знак «+» перед ним в уравнении (12) соответствует ПР, а нижний знак «-» — ВР.

Блок-схема алгоритма решения модели (2) относительно кинематического передаточного отношения i приведена на рис. 6.

В блоке 1 задаются исходные данные: параметры схемы касания пары деталь–инструмент R_d, R_n, A , значение требуемой длины щели l и допустимая погрешность расчета $[\Delta]$.

Процесс расчета [12] начинается с присвоения текущему значению параметра θ минимального значения $\theta_j = 0$ (операция 2). В блоке 3 по рекуррентному соотношению (4) вычисляется следующее значение угла θ_{j+1} .

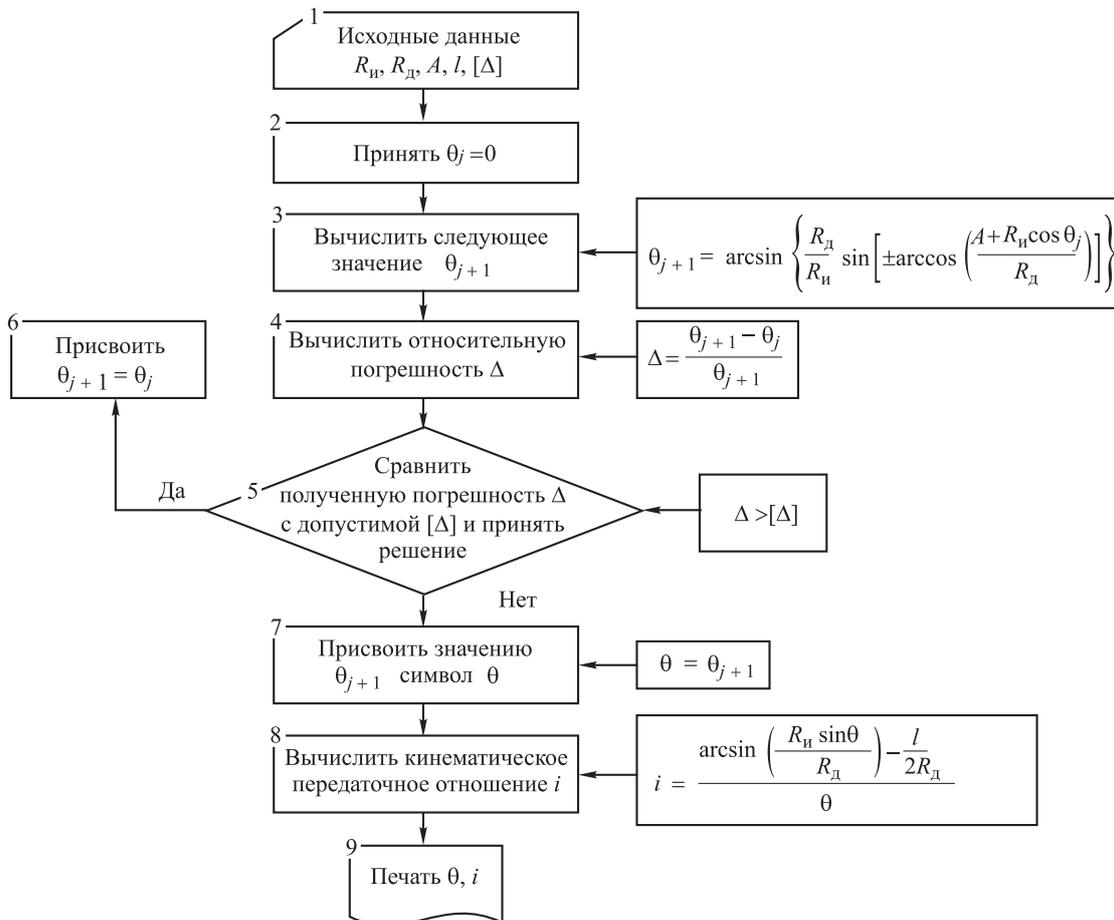


Рис. 6. Блок-схема итерационного алгоритма расчета кинематического передаточного отношения i

Таблица 3

Значения относительной погрешности расчета по итерациям

Номер итерации j	ПР		ВР	
	θ_j/θ_{j+1} , рад	Δ	θ_j/θ_{j+1} , рад	Δ
1	0/0,0691	1,0000	0/-0,0691	1,0000
2	0,0691/0,0609	0,1346	-0,0691/-0,0609	0,1346
3	0,0609/0,0628	0,0302	-0,0609/-0,0628	0,0302
4	0,0628/0,0624	0,0063	-0,0628/-0,0624	0,0063
5	0,0624/ 0,0625	0,0015	-0,0624/ -0,0625	0,0015

После этого определяется относительная разница вычислений угла θ (операция 4):

$$\Delta = \frac{\theta_{j+1} - \theta_j}{\theta_{j+1}}$$

Затем проводится сравнение (операция 5) полученного значения относительной разницы вычислений Δ и допустимой погрешности расчета $[\Delta]$. Если $\Delta > [\Delta]$, то вычисленному последующему значению θ_{j+1} присваивается индекс j текущего значения параметра θ (операция 6) и далее реализуется следующий итерационный вычислительный цикл, начиная с операции 3. Итерационные циклы продолжаются до тех пор, пока в логической операции сравнения 5 не нарушится справедливость указанного выше неравенства. При отрицательном результате сравнения расчет прекращается и окончательно принимается последний результат вычислений θ_{j+1} , который обеспечен требуемой точностью расчета.

Далее полученному значению θ_{j+1} присваивается символ θ (операция 7) для его использования при расчете требуемого значения кинематического передаточного отношения i по зависимости, полученной из второго уравнения модели (5):

$$i = \frac{\arcsin\left(\frac{R_{\text{и}} \sin\theta}{R_{\text{д}}}\right) - \frac{l}{2R_{\text{д}}}}{\theta}$$

Полученные значения θ и i выводятся на печать (операция 9).

В табл. 3 и 4 приведены результаты расчета кинематических параметров θ_j , θ_{j+1} и i при ПР и ВР для следующих заданных параметров: $R_{\text{д}} = 22$ мм (внутренний радиус трубы), $R_{\text{и}} = -95$ мм (внешняя схема касания), $A = 116$ мм, массив значений требуемой длины щели $l = 5 \dots 50$ мм, допустимая погрешность расчета $[\Delta] = 0,005$.

Таблица 4

Значения кинематического передаточного отношения при ПР и ВР для заданного массива длины

l , мм	i	
	ПР	ВР
5	-6,1782	-2,5514
10	-8,0060	-0,7332
15	-9,8241	1,0849
20	-11,6423	2,9031
30	-15,2787	6,5395
40	-18,2414	10,1856
50	-22,5514	13,8122

На рис. 7 показана динамика итерационного процесса вычислений предельного угла контакта θ радиуса-вектора инструмента с профилем заготовки, а на рис. 8 — зависимости кинематического передаточного отношения, обеспечивающего требуемую длину щели в режимах ПР и ВР.

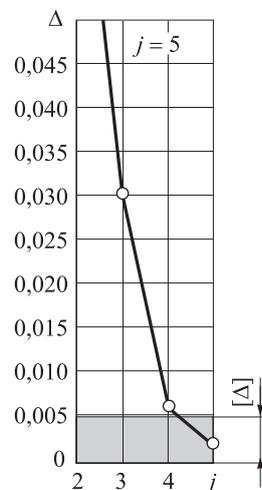


Рис. 7. Динамика погрешности расчета угла контакта θ

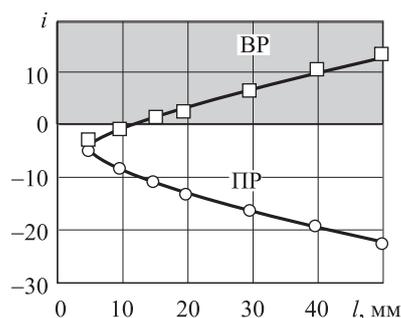


Рис. 8. Зависимость кинематического передаточного отношения i от требуемой длины щели l

Данные табл. 3 и рис. 7 свидетельствуют о сходимости итерационного процесса вычислений. Требуемая полупроцентная погрешность расчета для приведенного примера получена на пятой итерации.

Выводы

1. Установлено, что математическую модель процесса формирования щели при циклоидальном формообразовании, заданную параметрическими уравнениями, нельзя представить в явном виде.

2. Разработанный метод решения модели на основе приведения трансцендентных функций к алгебраическому виду позволяет выполнять расчет кинематического передаточного отно-

шения с относительной погрешностью приближений до 0,02, и он вполне приемлем для вычислений кинематических параметров в области значений предельных углов контакта инструмента с заготовкой, не превышающих $\pi/9$ рад.

3. Предложенный метод параметрического синтеза, базирующийся на использовании рекуррентных выражений и итерационного алгоритма, дает возможность вычислить соотношения угловых скоростей технологических роторов с любой заранее заданной и отличной от нуля допустимой погрешностью расчета. Его целесообразно применять при получении длиномерных щелей с предельными углами контакта более $\pi/9$ рад.

4. Из приведенных данных следует, что абсолютное значение кинематического передаточного отношения монотонно растет с увеличением требуемой длины щели.

5. Обеспечение одинаковой по длине щели в условиях ПР и ВР достигается существенным различием в соотношении частот вращения детали и инструмента, а также их окружных скоростей, и в ряде случаев разными методами обработки: тангенциальным точением, круговым фрезерованием.

6. Разница абсолютных значений кинематических передаточных отношений возрастает с увеличением требуемой длины щели.

Литература

- [1] Зубков Н.Н., Слепцов А.Д. Получение полимерных щелевых фильтрующих труб методом деформирующего резания. *Вестник машиностроения*, 2010, № 12, с. 51–53.
- [2] Зубков Н.Н. Восстановление исходных размеров и подготовка поверхностей под нанесение покрытий методом деформирующего резания. *Метр*, 1988, № 2, с. 38–43.
- [3] Зубков Н.Н. Обработка труб теплообменников деформирующим резанием. *Оборудование и инструмент для профессионалов*, 2004, № 4(51), с. 20–22.
- [4] Ермаков Ю.М. *Технология и станки тангенциального точения*. Москва, Машиностроение, 1979. 152 с.
- [5] Этин А.О. *Кинематический анализ методов обработки металлов резанием*. Москва, Машиностроение, 1964. 321 с.
- [6] Эстерзон М.А., ред. *Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом*. Москва, ЭНИМС, 1994. 185 с.
- [7] Зубков Н.Н. Особенности реализации метода деформирующего резания. *Технология машиностроения*, 2001, № 1, с. 19–26.
- [8] Иванов В.С., Иванов Д.В. Исследование процесса формирования щели на трубчатом профиле при обработке вращающимся лезвийным инструментом по параметрам траектории формообразования. *Технология машиностроения*, 2009, № 2, с. 21–25.
- [9] Иванов В.С. Моделирование процесса циклоидального формообразования при лезвийной обработке поверхностей вращения. *Технология машиностроения*, 2007, № 7, с. 19–23.
- [10] Корн Г., Корн К. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. Москва, Наука, 1974. 832 с.

- [11] Иванов В.С., Иванов Д.В. Численное моделирование процесса формообразования при получении щелевых структур вращающимся лезвийным инструментом. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2008, № 2, с. 120–127.
- [12] Иванов В.С., Иванов Д.В., Ширшов А.Г. *Расчет межцентрового расстояния при би-роторном прорезании щели на базе итерационного алгоритма*. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012617550, 2012.

References

- [1] Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Production of slotted polymer filter tubes by deformational cutting. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 12, pp. 1231–1233.
- [2] Zubkov N.N. Vosstanovlenie iskhodnykh razmerov i podgotovka poverkhnostei pod nanesenie pokrytii metodom deformiruiushchego rezaniia [Restore the original size and preparation of surfaces for coating by the method of deforming cutting]. *Metro [Metro]*. 1988, no. 2, pp. 38–43.
- [3] Zubkov N.N. Obrabotka trub teploobmennikov deformiruiushchim rezaniem [Treatment of heat exchanger tubes deforming cutting]. *Oborudovanie i instrument dlia professionalov [Equipment and tools for professionals]*. 2004, no. 4(51), pp. 20–22.
- [4] Ermakov Iu.M. *Tekhnologiia i stanki tangentsial'nogo tocheniia* [Technology and machines of tangential turning]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1979. 152 p.
- [5] Etn A. O. *Kinematicheskii analiz metodov obrabotki metallov rezaniem* [The kinematic analysis methods of metal cutting]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1964. 321 p.
- [6] *Kinematicheskii analiz i vybor effektivnykh metodov obrabotki lezviinym instrumentom* [Kinematic analysis and selection of effective methods of processing cutting tool]. Ed. Esterzon M.A. Moscow, ENIMS publ., 1994. 185 p.
- [7] Zubkov N.N. Osobennosti realizatsii metoda deformiruiushchego rezaniia [Features of implementation of the method of deforming cutting]. *Tekhnologiia mashinostroeniia [Tekhnologiya Mashinostroeniya]*. 2001, no. 1, pp. 19–26.
- [8] Ivanov V.S., Ivanov D.V. Issledovanie protsessa formirovaniia shcheli na trubchatom profile pri obrabotke vrashchaiushchimsia lezviinym instrumentom po parametram traektorii formoobrazovaniia [Investigation of the chink formation on the tubular shape at rotating edge tool-type work according to the path characteristics of generation of geometry]. *Tekhnologiia mashinostroeniia [Tekhnologiya Mashinostroeniya]*. 2009, no. 2, pp. 21–25.
- [9] Ivanov V.S. Modelirovanie protsessa tsikloidal'nogo formoobrazovaniia pri lezviinoi obrabotke poverkhnostei vrashcheniia [Cycloidal forming process simulation at revolving surface cut]. *Tekhnologiia mashinostroeniia [Tekhnologiya Mashinostroeniya]*. 2007, no. 7, pp. 19–23.
- [10] Korn G., Korn K. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Handbook on mathematics for researchers and engineers]. Moscow, Nauka publ., 1974. 832 p.
- [11] Ivanov V.S., Ivanov D.V. Chislennoe modelirovanie protsessa formoobrazovaniia pri poluchenii shchelevykh struktur vrashchaiushchimsia lezviinym instrumentom [Numerical Simulation of Process of Shaping in Obtaining of Slotted Structures by Rotating Cutter]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 2008, no. 2, pp. 120–127.
- [12] Ivanov V.S., Ivanov D.V., Shirshov A.G. *Raschet mezhtsentrovogo rasstoianiia pri birotornom prorezanii shcheli na baze iteratsionnogo algoritma* [The calculation of distances between centers when birotor to cutting the slit on the basis of the iterative algorithm]. Certificate of state registration of computer programs no. 2012617550, 2012.

Статья поступила в редакцию 09.01.2017

Информация об авторе

ИВАНОВ Дмитрий Вячеславович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: vsivanov49@yandex.ru).

Information about the author

IVANOV Dmitriy Vyacheslavovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Metal Cutting Machines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vsivanov49@yandex.ru).