

Моделирование процесса формообразования дискретно-щелевых структур при бироторной лезвийной обработке

07, июль 2013

DOI: 10.7463/0713.0576656

Иванов Д. В.

УДК 621.9. 025; 621.9. 06

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Niikmtp@mx.bmstu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений развития станкоинструментальной промышленности является создание технологического оборудования для новых высокоэффективных процессов обработки.

Прогрессивность новых способов оценивается степенью реализации в них основных направлений повышения эффективности: получение сложного профиля детали с возможностью распределения припуска между несколькими резцами, интенсификация режимов резания.

Необходимые предпосылки для расширения технологических возможностей и повышения эффективности обработки резанием этих деталей создают технологии на базе способов многолезвийной обработки, имеющих целый ряд преимуществ перед однолезвийными способами.

Применительно к получению наиболее многочисленного класса круглопрофильных деталей эти способы реализуются на бироторных станках токарно-фрезерной группы, имеющих два технологических ротора.

Под технологическим ротором согласно ГОСТ 14334-87 понимается исполнительный орган, обеспечивающий выполнение технологической операции в процессе своего непрерывного вращения [1].

Бироторные станки, за счет наличия двух роторов, имеют более развитую кинематическую структуру формообразования по сравнению токарными и фрезерными станками монороторного исполнения. Такая структура, реализуя преимущества многолезвийной обработки, наряду с повышением производительности обеспечивает

новые технологические возможности лезвийной обработки, а именно, получение деталей с дискретно-щелевой структурой поверхности, имеющих достаточно широкий спектр применения в различных отраслях экономики: щелевые фильтроэлементы, оребренные теплообменники, оребренные поверхности валов под антифрикционные или износостойкие покрытия, торсионы с упруго-диссипативными свойствами.

Например, применительно к получению щелевых фильтроэлементов бироторные лезвийные технологии по сравнению с существующими каркасно-проволочными, каркасно-сетчатыми и штамповочными технологиями обеспечивают высокую проницаемость фильтров, минимальную ширину щелей до 10 мкм, а, следовательно, повышенную тонкость фильтрации, возможность высокоэффективной регенерации противотоком. Кроме того, обеспечивается возможность получения фильтроэлемента в виде монодетали, что существенно сокращает трудозатраты на его изготовление.

В связи с этим, создание бироторных станков многолезвийной обработки и разработка методов их эксплуатации является актуальной научно-технической задачей, тесно связанной с проблемой создания высокотехнологичного и высокопроизводительного оборудования.

Разработка и эффективная эксплуатация бироторного комплекса для обработки деталей с дискретно-щелевой структурой поверхности, реализующие его технологические возможности, требуют знания закономерностей процесса формообразования деталей. При этом необходимо решение ряда прикладных задач, связанных с моделированием и анализом процесса формообразования щелевой структуры, которые на сегодняшний день не решены. Необходимым является создание специализированных программных средств, которые позволяют рассчитывать геометрические параметры дискретно-щелевых структур.

Целью работы разработка модели формообразования дискретно-щелевой структуры на круглопрофильных деталях при бироторной лезвийной обработке.

1 Идентификация геометрических параметров дискретно-щелевой структуры

Цилиндрическая поверхность с такой структурой является дискретной и регулярной. Под регулярностью понимается порядок расположения щелей, при котором конфигурация несколько произвольно взятых фрагментов щелевой поверхности является идентичной. Конфигурация дискретно-щелевой структуры имеет сложную пространственную геометрию и определяется целым рядом геометрических параметров, от которых зависят функциональные свойства деталей и включающих эти детали изделий.

Фрагменты деталей, иллюстрирующих регулярный характер расположения щелей по цилиндрической поверхности с обозначением геометрических параметров щелевой структуры, приведены на рис. 1, 2.

Отдельно взятая щель представляет собой часть пустотелого пространства, ограниченного гранями, в общем случае криволинейными, образованными в цилиндрическом теле заготовки при ее обработке вращающимся лезвийным инструментом.

Геометрические параметры щелевой структуры характеризуются формой и размерами отдельно взятой щели, а также порядком их расположения на цилиндрической поверхности детали.

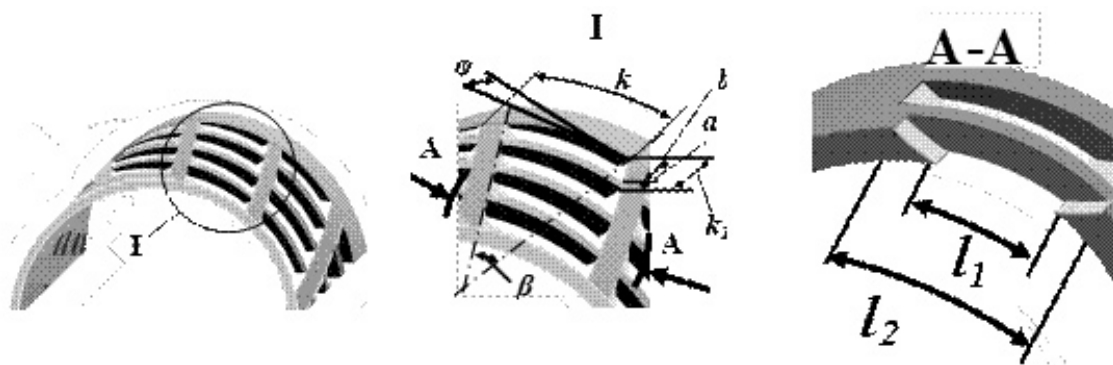


Рис. 1. Фрагменты деталей со сквозной щелевой структурой

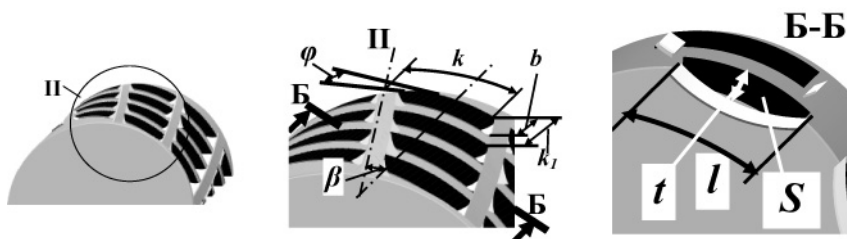


Рис. 2. Фрагменты деталей с глухой щелевой структурой

На рис. 3 в графическом и символьном виде представлены основные геометрические параметры щелевой структуры.

Исходя из графических иллюстраций щелевых структур по рис. 1, 2 основными параметрами, характеризующими конфигурацию дискретно - щелевой структуры, являются: l - длина щели; φ - угол наклона винтовой линии расположения щелей; k - окружной шаг расположения щелей по винтовой линии; a - длина межщелевой

перемычки; k_1 – осевой шаг расположения щелей; β – угол наклона винтовой линии расположения рядов щелей к оси детали.

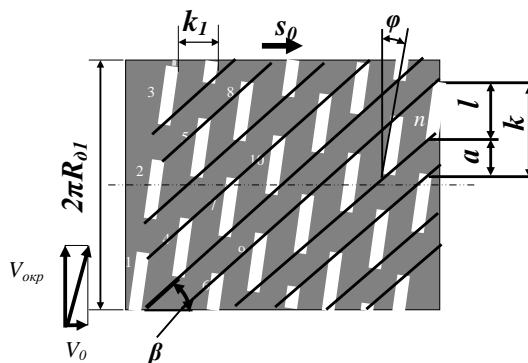


Рис. 3. Основные геометрические параметры щелевой структуры

2 Взаимосвязь геометрических параметров дискретно-щелевой структуры с параметрами технологической системы

Перечисленные параметры являются выходными параметрами процесса циклоидального формообразования, формируются при бироторной лезвийной обработке и функционально зависят от геометрических параметров схемы технологического зацепления, пары «деталь - инструмент», окружного шага расположения резцов, соотношения по величине взаимонаправленности угловых скоростей вращательных формообразующих движений и продольной подачи инструмента относительно детали (рис. 4).

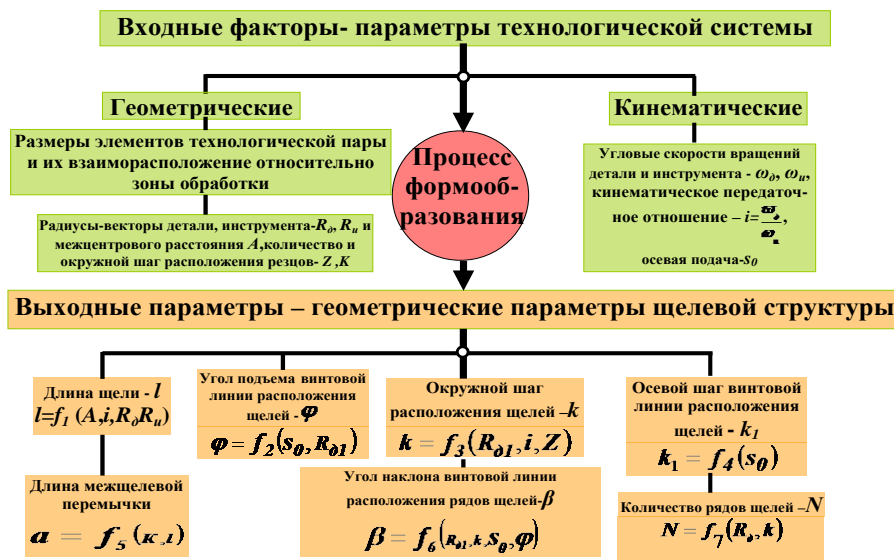


Рис. 4. Блок-схема формирования геометрических параметров щелевой структуры

Длина щели l определяется длиной дуги окружности профиля детали, измеренной между входящей и выходящей ветвями циклоидальной формообразующей траектории движения режущего элемента резца, например его вершины, относительно детали, и функционально зависит от геометрических параметров схемы технологического зацепления и соотношения угловых скоростей вращательных элементарных движений детали и инструмента с учетом их взаимонаправленности и определяется на основе модели циклоидального формообразования щели:

$$l = f(A, i, R_d, R_u). \quad (1)$$

Здесь A – межцентровое расстояние технологической пары; R_d и R_u – радиусы соответственно поверхности детали, на которой измеряется щель, и радиус инструмента;

$i = \frac{\omega_d}{\omega_u}$ – кинематическое передаточное отношение угловых скоростей детали и инструмента.

Угол подъема винтовой линии расположения щелей определяется зависимостью

$$\varphi = \arctg\left(\frac{s_0}{2\pi \cdot R_{d1}}\right), \quad (2)$$

где s_0 , мм/об – продольная подача инструмента на один оборот детали.

Окружной шаг расположения щелей по винтовой линии определяется окружным шагом расположения резцов на инструменте и кинематическим передаточным отношением

$$k = K \cdot i = \frac{2\pi R_{d1} i}{Z}, \quad (3)$$

где K – окружной шаг расположения резцов на инструменте; Z – число резцов на инструменте.

Осевой шаг винтовой линии расположения щелей составляет величину:

$$k_1 = s_0. \quad (4)$$

Длина межщелевой перемычки, измеренная по окружности детали определяется зависимостью

$$a = k \cdot l \quad (5)$$

Далее приводится метод определения угла подъема β винтовой линии расположения рядов щелей на основе анализа его зависимости от технологических факторов многолезвийной обработки.

Поперечный дискретно-щелевой профиль детали формируется несколькими резцами. В координатах, связанных с центром детали, он ограничен пространственной композицией циклоидальных траекторий формообразующего движения резцов относительно детали [2, 3].

В общем случае длина окружности поперечного профиля детали $2\pi R_\delta$ не кратна окружному шагу k расположения щелей (рис. 6):

$$\frac{2\pi R_\delta}{k} \neq N \quad (6)$$

Здесь N – целое число.

Количество полных рядов щелей по окружности детали равно

$$N = E \left[\frac{2\pi R_\delta}{k} \right], \quad (7)$$

где k – окружной шаг расположения рядов щелей по окружности детали; E – целая часть отношения длины окружности детали к окружному шагу k , указанного в скобках.

Схема формирования окружного шага k расположения рядов щелей по окружности детали приведена на рис. 5.

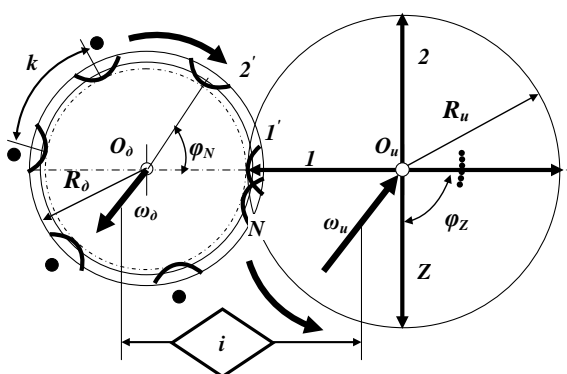


Рис. 5. Схема формирования окружного шага расположения рядов щелей по окружности детали

Окружной шаг k расположения рядов щелей по окружности детали определяется формулой

$$k = \varphi_N R_\partial = \frac{2\pi}{Z} i R_\partial, \quad (6)$$

где $\varphi_N = \frac{\varphi_Z}{i} = \frac{2\pi}{Zi}$, рад – угловой шаг расположения рядов щелей по окружности детали;

$\varphi_Z = \frac{2\pi}{Z}$, рад – угловой шаг расположения резцов по окружности инструмента;

Z – число резцов, равномерно расположенных по окружности инструмента;

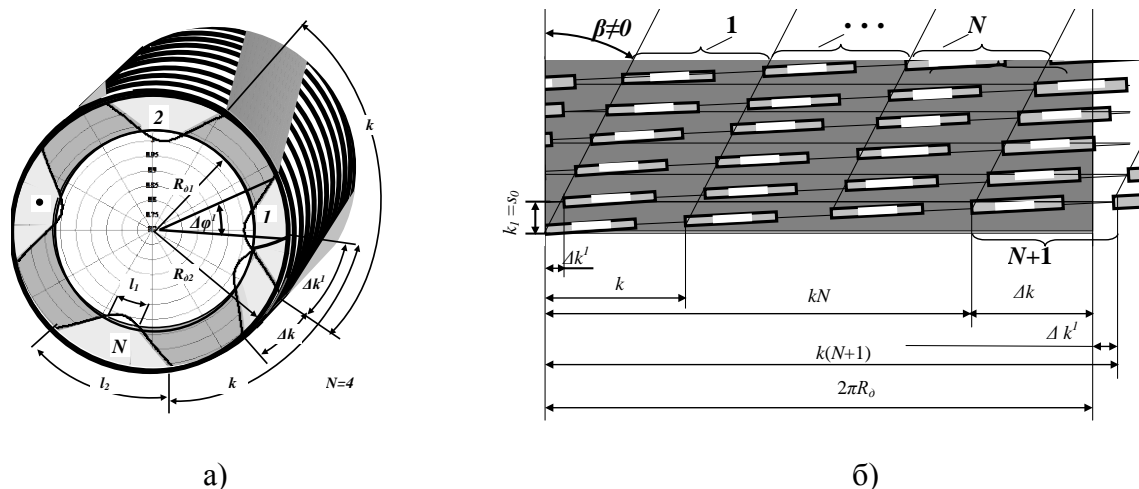
$i = \frac{\omega_\partial}{\omega_u} = \frac{n_\partial}{n_u}$ – кинематическое передаточное отношение вращательных движений детали и инструмента;

$\omega_\partial, n_\partial, \omega_u, n_u$ – угловые скорости и частоты вращений соответственно детали и инструмента;

R_∂ – радиус детали.

Одна часть $(N+1)$ - го окружного шага расположения рядов щелей, замыкающая один полный виток винтовой линии расположения щелей на цилиндрической поверхности детали, исходя из схемы на рис 6, определяется соотношением

$$\Delta k = 2\pi R_\partial - N k. \quad (9)$$



а- общий вид трубчатой детали с дискретно-щелевым поперечным профилем;
б-развертка поперечного дискретно-щелевого профиля

Рис. 6. Схема формирования угла наклона винтовых рядов щелей

Вторая часть $(N+1)$ -го окружного шага расположения рядов щелей переходит на второй виток винтовой линии расположения щелей и определяется выражением

$$\Delta k^I = k(N+1) - 2\pi R_0. \quad (10)$$

Смещение Δk^I $(N+1)$ -го окружного шага вызывает пропорциональное угловое смещение $\Delta \varphi^I$ расположения щелей на втором витке винтовой линии по отношению к первому и аналогичное угловое смещение расположения щелей на каждом последующем витке по отношению к предыдущему:

$$\Delta \varphi^I = \frac{\Delta k^I}{2\pi R_0} \text{ рад} \quad (11)$$

За счет углового смещения $\Delta \varphi^I$ щелей на соседних витках винтовой линии их расположения ряды щелей располагаются также по винтовой линии. Угол подъема β винтовой линии расположения рядов щелей согласно схеме по рис. 9 определяется отношением части окружного шага расположения рядов щелей, переходящей на второй виток винтовой линии Δk^I к осевому шагу винтовой линии расположения щелей k_I :

$$\beta = \text{arctg} \left(\frac{\Delta k^I}{k_I} \right). \quad (12)$$

Окончательно с учетом формул (4), (8-10) зависимость (12) угла подъема β винтовой линии расположения рядов щелей можно представить через технологические параметры многолезвийной обработки в виде

$$\beta = \text{arctg} \left(\frac{\Delta k^I}{k_I} \right) = \text{arctg} \left(\frac{k(N+1) - 2\pi R_0}{s_0} \right), \quad (13)$$

где s_0 - продольная подача инструмента на оборот заготовки; N и k определяются зависимостями (7) и (8).

Представленные зависимости позволяют определять геометрические параметры дискретно-щелевой структуры в зависимости от геометрических параметров схемы технологического зацепления и кинематических параметров элементарных формообразующих движений.

Ширина b получаемого щелевого зазора зависит от используемого метода резания.

При резании со снятием стружки поперечный профиль щели копирует профиль реза (рис. 7 а). Поэтому ширина щели b равна максимальной ширине профиля инструмента.



а - при резании со снятием стружки; б - при деформирующем резании

Рис. 7. Схема формирования ширины щели

При деформирующем резании ширина щели b формируется в процессе пластических деформаций прорезанных и отогнутых слоев заготовки и определяется согласно схеме, представленной на рисунке 7 б по формуле [4, 5]

$$b = s_0 (\sin(\varphi + \varphi_1) - \xi \cdot \sin \varphi) . \quad (14)$$

Здесь s_0 – продольная подача на оборот заготовки, мм/об; φ и φ_1 – соответственно передний и задний углы в плане; ξ - коэффициент утолщения межщелевой перемычки в результате пластических деформаций материала детали.

При разработке технологических процессов получения дискретно-щелевых структур одним из основных параметров, требующих аналитической оценки, является длина щели l (рис. 1, 2, 6), определяющая эксплуатационные характеристики изделия, например пропускную способность фильтроэлемента, теплоотдачу теплообменника, прочность сцепления антифрикционного или износостойкого покрытия с щелевой поверхностью вала, или упруго-диссипативные свойства демпферов.

3 Разработка циклоидальной модели формообразования щели

С целью однозначного математического описания законов формообразования при различных схемах циклоидальной обработки и в частности для описания интегрального параметра - траектории формообразования S , характеризующего конфигурацию получаемого профиля изделия, технологическое зацепление пары деталь-инструмент и ее кинематика может быть формализована в виде системы векторов (рис. 8) с использованием методов векторной алгебры [6-8].

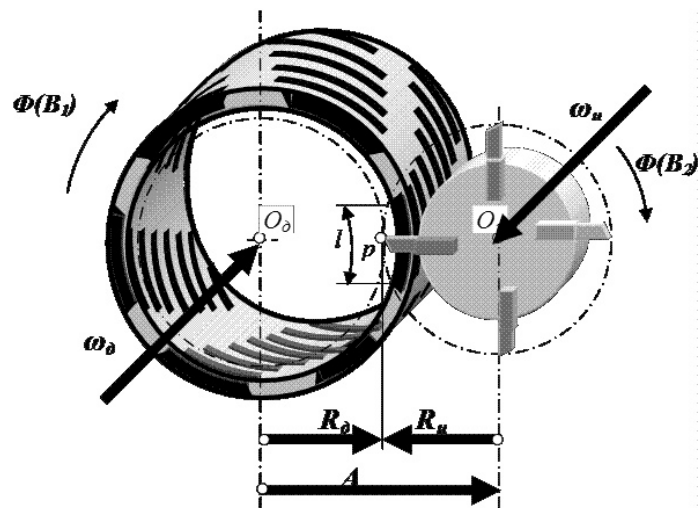
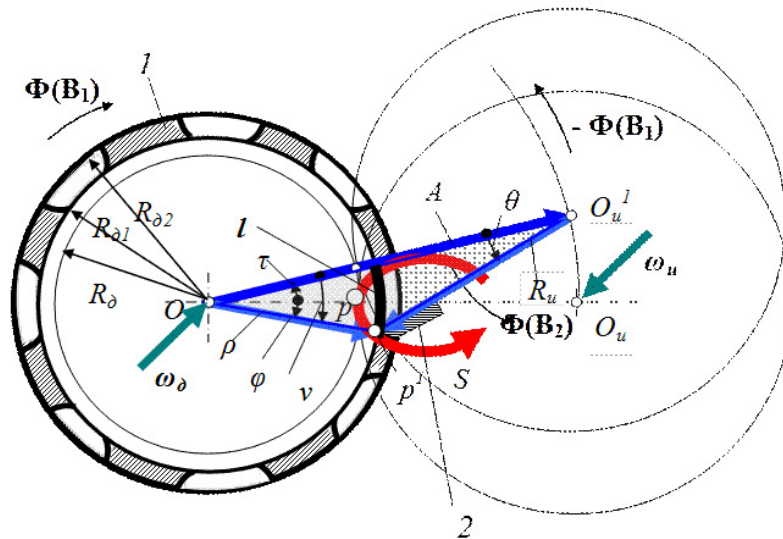


Рис. 8. Внутренняя формализация технологической схемы бироторной лезвийной обработки

Для описания траектории формообразования S , функционально представляемой в полярных координатах (ρ, φ) зависимостью $\rho = F(\varphi)$ использован принцип относительности движений [8, 9], согласно которому деталь 1 и связанную с ней систему координат фиксируют от вращения, а инструменту 2 с центром O_n сообщают обратное вращательное движение $-\Phi(B_1)$ вокруг центра детали O_d с угловой скоростью $-\omega_d$, равной по величине и противоположной по направлению угловой скорости ω_d реального вращения $\Phi(B_1)$ детали 1 (рис. 9).

Рассмотрим результирующее циклоидальное движение Φ_Σ формообразующей точки (вершины резца) характеризуемое зависимостью $\rho = F(\varphi)$ в координатах, связанных с центром O_d детали 1.

Обозначим угловое отклонение центра O_n^1 инструментального шпинделя, характеризуемое новым положением радиуса-вектора A межцентрового расстояния в обратном движении от нулевого положения по истечении некоторого времени t через τ . За это время точка зацепления детали и инструмента переместится из полюса p в новое положение p^1 , при этом радиус-вектор R_n этой точки повернется вокруг центра O_n на угол θ относительно нулевого положения.



1-деталь; 2- инструмент; S- траектория формообразования; l- длина прорези по внутренней поверхности; ρ- радиус формообразования; φ – угол формообразования

Рис. 9. Обобщенная векторная модель формообразования щели

При этом справедливы соотношения

$$\tau = -\omega_{\delta} t ; \theta = \omega_u t . \quad (14)$$

Текущий радиус - вектор формообразования ρ , являющийся одним из дифференциальных показателей траектории формообразования, направленный из центра O_d в точку зацепления p' , в векторном виде определяется суммой векторов \bar{A} и \bar{R}_u :

$$\bar{\rho} = \bar{A} + \bar{R}_u . \quad (15)$$

Здесь \bar{A} – вектор расположения центра инструмента O_u относительно начала координат O_d , направленный из O_d в O_u и численно равный межцентровому расстоянию A ; \bar{R}_u – радиус-вектор координирующий вершину резца относительно центра инструмента O_u .

Модуль радиуса-вектора A межцентрового расстояния с учетом знака координаты R_u может быть определен из векторного треугольника $A R_u \rho$ (рис. 9) двумя способами.

1) На основе теоремы косинусов модуль A определяется из соотношения

$$\rho^2 = A^2 + R_u^2 + 2AR_u \cos \theta . \quad (17)$$

Знак (+) для третьего слагаемого проставлен с учетом того, что R_u – координата радиуса – вектора инструмента в начальном положении (для внешней схемы технологического зацепления $R_u < 0$, т.к. противоположно направлена относительно заданной положительной координаты R_o).

Из зависимости (17) следует выражение

$$\rho = \sqrt{A^2 + R_u^2 + 2AR_u \cos \theta} \quad (18)$$

или в приведенном к единичному радиусу детали виде, удобному для анализа, выражение

$$\tilde{\rho} = \sqrt{\tilde{A}^2 + i_1^2 + 2\tilde{A}i_1 \cos \theta}, \quad (19)$$

где $\tilde{\rho} = \rho/R_o$ – модуль (абсолютная величина) приведенного радиуса – вектора формообразования; $i_1 = R_u/R_o$ – геометрическое передаточное отношение схемы технологи-ческого зацепления; $\tilde{A} = A/R_o$ – приведенное межцентровое расстояние.

2) С использованием метода проекций модуль A определяется соотношением

$$A = \rho \cos v - R_u \cos \theta, \quad (20)$$

где ρ – текущий радиус формообразования, координирующий положение вершины резца в системе полярных координат, связанных с центром детали; θ – текущий угол отклонения радиуса – вектора формообразующей точки инструмента (вершина резца) от нулевого положения (полнос зацепления ρ), или отклонение радиуса – вектора инструмента R_u от линии центров ; v – угловое отклонение радиуса- вектора формообразования ρ относительно начального положения (линии центров) в подвижной системе координат; R_u – координата радиуса – вектора инструмента в начальном положении (для внешней схемы технологического зацепления $R_u < 0$, так как противоположно направлена относительно заданной положительной координате R_o [8, 9]).

Угловое положение ρ в абсолютных координатах, связанных с деталью, определяется центральным углом φ отклонения его от начального положения (линии центров). В свою очередь угол φ определяется угловым отклонением τ центра O_1 в обращенном движении и угловым отклонением v радиуса- вектора формообразования ρ относительно начального положения в подвижной системе координат с центром O_n :

$$\varphi = \tau + v. \quad (21)$$

Углы ν и θ взаимосвязаны исходя из векторного треугольника $A R_u \rho$ согласно теореме синусов соотношением

$$\rho \sin \nu = R_u \sin \theta \quad (22)$$

Поскольку за положительное направление принято направление абсолютного вращения детали ($\omega_\delta > 0$), то угловое отклонение в обращенном движении ($\tau = -\omega_\delta t$) отрицательно, а знаки угловых отклонений ν и θ определяются в сравнении с направлением угла τ . В случае их однонаправленности они отрицательны, в случае разнонаправленности – положительны. Взаимосвязь угловых отклонений τ и θ определяется кинематическим передаточным отношением i :

$$\tau / \theta = \frac{-\omega_\delta t}{\omega_u t} = -i; \quad i = \frac{\omega_\delta}{\omega_u} \quad \text{или} \quad \tau = i \theta. \quad (23)$$

Выражений (20-23) определяют кинематическую модель циклоидального формообразования деталей при бироторной лезвийной обработке по одной траектории, которую можно записать в виде систем уравнений [8, 9]

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{A^2 + R_u^2 + 2AR_u \cos \theta}, \\ \rho \sin \nu = R_u \sin \theta, \\ \varphi = \tau + \nu, \\ \tau = -i \theta, \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} A = \rho \cos \nu - R_u \cos \theta \\ \rho \sin \nu = R_u \sin \theta \\ \varphi = \tau + \nu, \\ \tau = -i \theta \end{cases}, \quad (25)$$

Обе записи модели формообразования могут быть использованы при различных методах их решения в задачах анализа и параметрического синтеза.

Первые два уравнения моделей (24, 25) определяют форму векторного треугольника $A R_u \rho$, четвертое – определяет его положение в абсолютной системе координат, третье - определяет угловую координату радиуса вектора формообразования в координатах, связанных с деталью.

Модели однозначно определяют взаимосвязь выходных параметров ρ , φ траектории формообразования S с входными геометрическими параметрами схемы технологического зацепления A , R_u , i_1 и кинематическими параметрами процесса i , θ , τ , ν . Они содержат восемь переменных, функционально связанных четырьмя уравнениями. Решение каждой из них заключается в определении четырех переменных при заданных четырех.

В задачах анализа при заданных параметрах A , R_u , i и ρ , приравненным к радиусу окружности поверхности детали, на которой измеряется длина щели, например внутренней, $\rho = R_d$ определяется сначала центральный угол φ отклонения радиуса формообразования от нулевого положения в точке пересечения траекторией S и окружности профиля внутренней поверхности трубы радиусом R_{d1} . Далее определяется длина щели по зависимости

$$l - 2R_{d1} \varphi , \quad (26)$$

где l и R_{d1} выражены в мм, φ - в радианах.

Для решения модели относительно межцентрового расстояния A в задачах параметрического синтеза в исходных данных задаются l , R_u , i и ρ .

Применительно к циклоидальным процессам формообразования деталей при бироторной лезвийной обработке модели (24, 25) являются универсальными и справедливыми для различных схем технологического зацепления: внешней, внутренней, охватывающей, режимов тангенциального точения и фрезерования, реализуемых как в условиях встречного так и попутного резания.

Для упрощения модели (25), путем сокращения количества переменных и уравнений, выразим значение угла ν в первом уравнении чрез φ , θ , i , используя уравнения 3,4 модели (25). После преобразований модель (25) приводится к системе, состоящей из двух трансцендентных уравнений

$$\begin{cases} A = \rho \cos(\varphi + i\theta) - R_u \cos\theta \\ \rho \sin(\varphi + i\theta) = R_u \sin\theta \end{cases} \quad (27)$$

В задачах анализа при определении длины l щели уравнения (27) решаются относительно центрального угла φ , который связан с l зависимостью

$$\varphi = \frac{l}{2R_{d1}}, \text{ рад.} \quad (28)$$

Центральный угол θ , определяется половиной дуги щели по внутренней окружности кольцевого профиля детали, этом текущий радиус формообразования приравнивается радиусу внутренней поверхности трубы, по которой измеряется длина щели $\rho = R_{o1}$.

С учетом соотношения (28) модель (27) приводится к виду

$$\begin{cases} A = R_{o1} \cdot \cos\left(\frac{l}{2R_{o1}} + i\theta\right) - R_u \cos\theta, \\ R_{o1} \sin\left(\frac{l}{2R_{o1}} + i\theta\right) = R_u \sin\theta. \end{cases} \quad (29)$$

Из второго уравнения модели (29) получаем выражение

$$\theta = \arcsin\left(\frac{R_{o1} \sin\left(\frac{l}{2R_{o1}} + i\theta\right)}{R_u}\right). \quad (30)$$

Выражение (30) представляет собой трансцендентное уравнение с неявновыраженной переменной, где параметр θ не может быть представлен в явном виде. Следовательно, модель (29) не имеет абсолютно точного решения.

Для решения модели формирования щели должны быть разработаны методы, позволяющие находить результат с требуемой точностью вычислений.

Одним из методов решения модели является приведение трансцендентных выражений к алгебраическому виду.

Для реализации метода с использованием зависимости (13) и известных тригонометрических соотношений [10,11]

$$\check{A} = 1 - i_1, \cos\theta = 1 - 2\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (31)$$

преобразуем первое уравнение модели (24) к виду

$$\tilde{\rho} = \sqrt{1 - 4(1 - i_1)i_1 \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (32)$$

Для внешней схемы технологического зацепления, где предельные значения углов контакта детали и инструмента ν и θ не превышают 15° . модель (24) можно существенно

упростить. Выражая входной угол контакта инструмента с деталью $\theta_{вх}$ в радианах и используя известные формулы приближений [10] для углов θ и ν до 15 угл. град. ($\pi/9$) рад (реально встречающиеся углы контакта в схемах внешнего зацепления), с погрешностью до 3 % (табл. 1) можно записать [10] равенства

$$\sin^2\left(\frac{\theta_{вх}}{2}\right) = \left(\frac{\theta_{вх}}{2}\right)^2 = \frac{\theta_{вх}^2}{4}. \quad (33)$$

В табл. 1 выделена область определения угла α и области значений функций $\sin^2(\alpha)$ и α^2 , соответствующие области значений относительной погрешности $\Delta < 0,03$.

Таблица 1

Сравнительные результаты приведения трансцендентной функции $\sin^2(\alpha)$ к алгебраическому виду для малых углов α

α , град	5	10	15	20	30
$\sin \alpha$	0,0872	0,1736	0,2588	0,3420	0,5000
$\sin^2(\alpha)$	0,0076	0,0301	0,0670	0,1170	0,2500
α , рад	0,0872	0,1744	0,2617	0,3484	0,5233
α^2	0,0076	0,0304	0,0685	0,1214	0,2738
Δ	0,000	0,0100	0,0224	0,0376	0,0952

Так как R_δ и R_η в технологической практике соизмеримы, (как правило $0,5 < |i_1| < 2$), а $\frac{\theta_{вх}^2}{4} \ll 1$, то, используя также известное приближение $\sqrt{1-x} = 1 - \frac{x}{2}$ [10, 11], где $x = 4(1-i_1)i_1 \sin^2(\theta/2) \ll 1$, с погрешностью до 1% (табл. 2) можно записать модель (24) циклоидального формообразования, содержащую два трансцендентных уравнения, в виде системы алгебраических уравнений [11]

$$\begin{cases} \tilde{\rho} = 1 - \frac{1}{2}(1-i_1)i_1\theta^2, \\ \tilde{\rho}\nu = i_1\theta, \\ \varphi = \tau + \nu, \\ \tau = -i\theta, \end{cases} \quad (34)$$

где угловые координаты θ , ν , τ , φ выражены в радианах.

В табл. 2 выделена область значений относительной погрешности приближенной алгебраической функции $1 - \frac{x}{2}$ в сравнении с точной функцией $\sqrt{1-x}$, соответствующая $\Delta < 0,01$.

В табл.1 и 2 представлена относительная погрешность приближений

$$\Delta = \left| \frac{A_1 - A_2}{A_1} \right|, \quad (35)$$

где A_1 – результат вычислений по точной зависимости; A_2 - результат вычислений по приближенной зависимости.

В тонированных ячейках таблицы 2 выделены значения относительной погрешности приближений, не превышающие 1% ($\Delta \leq 0,01$).

Подставляя значение $\tau = -i\theta$ в третье уравнение модели (34) и преобразуя, получаем равенство

$$v = \varphi + i\theta. \quad (36)$$

Таблица 2

Сравнительные результаты приведения трансцендентной функции $\sqrt{1-x}$ к алгебраическому виду для малых значений x

x	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3
$\sqrt{1-x}$	0,9950	0,9747	0,9487	0,8944	0,8367
$1 - \frac{x}{2}$	0,9950	0,9750	0,9500	0,9000	0,8500
Δ	0,000	0,0003	0,0014	0,0063	0,0159

Подставляя значение v из (34) во второе уравнение модели (34), получаем

$$\tilde{\rho}(\varphi + i\theta) = i_1\theta, \quad (37)$$

откуда следует равенство

$$\varphi = \theta(i_1 - i\tilde{\rho}) \quad (38)$$

Так как приведенный радиус формообразования $\tilde{\rho}$ находится в пределах $0,99\dots 1$, то с погрешностью менее 1% [10, 11] уравнение (38) приводится к виду

$$\theta = \frac{\varphi}{(i_1 - i)}. \quad (39)$$

Окончательно уравнение циклоидальной траектории формообразования щели в виде явно выраженной функции $\tilde{\rho} = F(i_1, i, \varphi)$ может быть получено подстановкой значения θ из выражения (39) в первое уравнение модели (34):

$$\tilde{\rho} = 1 - \frac{1}{2} (1 - i_1) i_1 \left(\frac{\varphi}{i_1 - i} \right)^2. \quad (40)$$

Здесь $i_1 = R_u / R_\delta$ - геометрическое передаточное отношение схемы технологического зацепления; $i = \omega_\delta / \omega_u$ - кинематическое передаточное отношение координат угловых скоростей ω_δ и ω_u ; φ - текущее значение угловой координаты радиуса-вектора формообразования ρ , выраженное в рад.

Для определения абсолютного значения радиуса формообразования ρ значение приведенного радиуса формообразования $\tilde{\rho}$ умножаются на номинальное значение радиуса детали R_δ , мм, по которому определяется длина дуги щели:

$$\rho = R_\delta \tilde{\rho} = \tilde{\rho} = 1 - \frac{1}{2} (1 - i_1) i_1 \left(\frac{\varphi}{i_1 - i} \right)^2, \text{ мм.} \quad (41)$$

Здесь $R_\delta = A + R_u$ - настроечная координата схемы технологического зацепления, мм.

Центральный угол φ щели определяется преобразованием выражения (41):

$$\varphi = \left| (i_1 - i) \sqrt{\frac{1 - \frac{\rho}{A + R_u}}{\frac{1}{2} (1 - i_1) i_1}} \right|, \text{ рад.} \quad (42)$$

Длина щели определяется удвоенным произведением радиуса формообразования ρ на величину центрального угла φ [11] с учетом зависимостей (26 и 42):

$$l = 2\rho\varphi = 2\rho \left| (i_1 - i) \sqrt{\frac{1 - \frac{\rho}{A + R_u}}{\frac{1}{2} (1 - i_1) i_1}} \right|, \text{ мм.} \quad (43)$$

Уравнения (42, 43) позволяют в технологических задачах анализа рассчитать длину прорезаемой щели при заданной схеме технологического зацепления и кинематических параметрах обработки, а в задачах параметрического синтеза определять параметры схемы обработки для требуемой длины щели.

4 Алгоритм расчета длины щели в задаче анализа

Задача расчета

Определить длину щели l , получаемую при заданных геометрических параметрах схемы технологического зацепления $\rho=R_{\delta 1}$ и R_u (внешняя схема зацепления), межцентровом расстоянии A и угловых скоростях детали и инструмента ω_d, ω_u .

Последовательность расчета

1) Определить геометрическое передаточное отношение схемы технологического зацепления

$$i_1 = \frac{R_u}{R_\delta} = \frac{R_u}{A + R_u},$$

где R_δ, R_u, A – координаты соответствующих векторов в принятой системе координат, связанной с центром детали; $R_\delta=A+R_u$ – начальный (настроечный) радиус детали, соответствующий, расстоянию от центра детали O_d до вершины инструмента при расположении его на линии центров $O_d O_u$.

2) Определить кинематическое передаточное отношение угловых скоростей детали и инструмента по формуле (23)

$$i = \omega_d / \omega_u.$$

3) Приравнять текущий радиус формообразование к радиусу внутренней или наружной поверхности трубчатой заготовки:

$$\rho=R_{\delta 1} \text{ или } \rho =R_{\delta 2}.$$

4) Определить центральный угол φ формообразования щели, исходя из формулы (42):

$$\varphi = \left| (i_1 - i) \sqrt{\frac{1 - \frac{\rho}{A + R_u}}{\frac{1}{2}(1 - i_1)i_1}} \right|, \text{ рад.}$$

5) Определить длину прорезаемой щели

$$l = 2R_{\delta 1}\varphi.$$

Пример

Для исходных данных: $R_{dl} = 22$ мм, $R_u = -95$ мм, $A = 116,5$ мм, $\omega_d = 2\pi \cdot 500$ рад/мин, $\omega_u = -2\pi \cdot 500$ рад/мин ($i = -1$) при попутном резании; $\omega_u = 2\pi \cdot 500$ рад/мин ($i = 1$) при встречном резании длина щели l составляет: $l_1 = 6,644$ мм – для попутного резания и $l_2 = 10,515$ мм – для встречного.

Сопоставление результатов расчета показало, что для одних и тех же исходных данных щель, полученная при попутном резании, существенно короче чем при встречном, что подтверждает необходимость учета при расчете параметров щелевых структур взаимонаправленности вращательных формообразующих движений, представленной кинематическим передаточным отношением угловых скоростей детали и инструмента.

Заключение

Дискретно-щелевая поверхность имеет сложную пространственную геометрию и определяется рядом геометрических параметров, от которых зависят функциональные свойства деталей и включающих эти детали изделий. Геометрические параметры щелевой структуры характеризуются формой и размерами отдельно взятой щели, а также порядком их расположения на цилиндрической поверхности детали

Приведенная блок- схема процесса формирования геометрических параметров щелевой структуры характеризует их взаимосвязь с входными параметрами процесса – геометрией схемы технологического зацепления и многолезвийного инструмента и кинематическими параметрами формообразующих движений. Разработаны функциональные зависимости для определения геометрических параметров получаемой дискретно-щелевой структуры.

На основе исходной концепции циклоидального формообразования дискретно-щелевых структур при многолезвийной обработке круглопрофильных деталей на бироторных станках приведена векторная формализация геометрии схем технологического зацепления пары деталь-инструмент и кинематики формообразующих движений в виде системы коллинеарных векторов, координируемых по геометрической и кинематической осям, являющейся универсальной применительно к внешней, внутренней и охватывающей схемам технологического зацепления пары деталь-инструмент, к фрезерованию и тангенциальному точению, попутному и встречному способам реализации резания.

Формирование продольного профиля отдельно взятой щели носит циклоидальный характер и определяется видом циклоидальной траектории формообразования,

получаемой при относительном движении резца в координатах, связанных с центром детали.

Разработана обобщенная векторная модель циклоидального формообразования щели в виде подвижного векторного треугольника со сторонами: радиус–вектор межцентрового расстояния, радиус-вектор инструмента, радиус–вектор формообразования щели, изменяющего в процессе обработки свое положение и форму. Непрерывная последовательность положений вершины радиуса–вектора формообразования формирует циклоидальную траекторию формообразования, определяющую геометрию продольного профиля щели. Модель формализована в виде системы уравнений, увязывающих радиальную и угловую координаты радиуса-вектора формообразования с текущими координатами центра инструмента и его вершины. Модель позволяет в задачах анализа определять длину щели, а в задачах параметрического синтеза – межцентровое расстояние и кинематическое передаточное отношение формообразующих движений детали и инструмента.

Разработан метод решения модели циклоидального формообразования щели на базе приведения трансцендентных выражений модели к алгебраическому виду, позволяющий с относительной погрешностью до 0,03 в технологических задачах анализа рассчитать длину прорезаемой щели при заданной схеме технологического зацепления и кинематических параметрах обработки, а в задачах параметрического синтеза определять параметры схемы обработки для получения требуемой длины щели.

Список литературы

1. ГОСТ 14334-87. Линии автоматические роторные и роторно-конвейерные. Термины и определения. Введ. 01.07.1988. М.: Изд-во стандартов, 2011. 4 с.
2. Иванов В.С., Иванов Д.В. Композиционный анализ процесса формообразования круглопрофильных деталей при многолезвийной обработке на токарно-фрезерных станках // Технология машиностроения. 2011. № 10. С. 16-21.
3. Иванов В.С., Иванов Д.В. Методика расчета параметров композиции траекторий формообразования на станках токарно-фрезерной группы // Технология машиностроения. 2011. № 9. С. 11-15.
4. Зубков Н.Н., Слепцов А.Д. Управление шириной щелевого зазора фильтрующей структуры, получаемой методом деформирующего резания // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 5. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/182415.html> (дата обращения 03.05.2012).

5. Слепцов А.Д. Разработка и исследование метода получения шелевых фильтрующих структур: автореф. дисс.... канд. техн. наук. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 15 с.
6. Бугров Я.С., Никольский С.М. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии. М.: Наука, 1980. 176 с.
7. Иванов В.С., Иванов Д.В. Векторный анализ методов лезвийной обработки деталей // Технология машиностроения. 2010. № 4. С. 8-13.
8. Иванов В.С. Векторное моделирование способов многолезвийной обработки // Технология машиностроения. 2007. № 5. С. 24-28.
9. Иванов В.С. Моделирование процесса циклоидального формообразования при лезвийной обработке поверхностей вращения // Технология машиностроения. 2007. № 7. С. 19-23.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров : пер. с англ. М.: Наука, 1974. 832 с.
11. Иванов В. С., Васильев Г.Н., Зубков Н.Н., Иванов Д.В. Моделирование процесса формообразования при получении шелевых структур вращающимся лезвийным инструментом // Технология машиностроения. 2007. № 8. С. 14-17.

Simulation of forming process of discrete-slot structure in case of bi-rotatory edge cutting machining

07, July 2013

DOI: 10.7463/0713.0576656

Ivanov D.V.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

Niikmtp@mx.bmstu.ru

Creation of bi-rotatory machines of multiblade processing and development of methods for their exploitation is an actual scientific-technical task closely connected with the problem of creation of high-technology and high-performance equipment. Development and efficient exploitation of a bi-rotatory complex for processing details with a discrete-slot surface structure which implement its technological capabilities require knowledge of the regularities of formation of details. In this case it is necessary to solve a number of problems associated with the modeling and analysis of the formation process of this kind of structure, which haven't been solved yet. The aim of this research is an identification and functional interrelation analysis of geometrical parameters of a curvilinear slot with geometric and kinematic parameters of a bi-rotatory cut-map. Functional relations for determination of geometrical parameters of the obtained discrete-slot structure were developed. Vector formalization of configuration of a technological gearing scheme was introduced basing on the concept of cycloidal forming. The generalize vector model of cycloidal forming which is universal for external, internal and encircle technological gearing schemes of the couple (detail-tool), for milling, tangential turning, climb cutting and counter cutting, was developed. A solution method for the model of a cycloidal slot forming based on the transcendence formula reduction to algebraic form, which allows one to calculate a slot length to a precision of 0.03 in defined technological gearing scheme and kinematic processing parameters, was also developed; in the tasks of a parametric synthesis it allows one to determine parameters of a cut-map in order to obtain the required slot length.

Publications with keywords: [deskretno-slot-hole structure](#), [birotary machine](#), [mnogolezviyny processing](#), [cycloidal formoobrazovaniye](#), [scheme of technological gearing](#)

Publications with words: [deskretno-slot-hole structure](#), [birotary machine](#), [mnogolezviyny processing](#), [cycloidal formoobrazovaniye](#), [scheme of technological gearing](#)

References

1. *GOST 14334-87. Linii avtomaticheskie rotornye i rotorno-konveyernye. Terminy i opredeleniya* [State Standard 14334-87. Rotary and rotary conveyor automatic lines.

Terms and definitions]. Moscow, Standards Publishing House, 2011. 4 p.

2. Ivanov V.S., Ivanov D.V. Kompozitsionnyy analiz protsessa formoobrazovaniya krugloprofil'nykh detaley pri mnogolezviynoy obrabotke na tokarno-frezernykh stankakh [Process study of round-type profile parts shaping at turn/mill multipoint machining]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2011, no. 10, pp. 16-21.
3. Ivanov V.S., Ivanov D.V. Metodika rascheta parametrov kompozitsii traektoriy formoobrazovaniya na stankakh tokarno-frezernoy gruppy [Trajectory composition data design procedure of the geometry generation at the lathes and milling machines]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2011, no. 9, pp. 11-15.
4. Zubkov N.N., Sleptsov A.D. Upravlenie shirinoi shchelevogo zazora fil'truyushchey struktury, poluchaemoy metodom deformiruyushchego rezaniya [Slot width controlling for filter structure produced by deformational cutting]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 5. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/182415.html>, accessed 03.05.2012.
5. Sleptsov A.D. *Razrabotka i issledovanie metoda polucheniya shelevykh fil'truyushchikh struktur. Avtoref. kand. diss.* [Development and research of the method of obtaining of slotted filter structures. Abstract of cand. diss.]. Moscow, Bauman MSTU, 2011. 15 p.
6. Bugrov Ya.S., Nikol'skiy S.M. *Elementy lineynoy algebry i analiticheskoy geometrii* [Elements of linear algebra and analytical geometry]. Moscow, Nauka, 1980. 176 p.
7. Ivanov V.S., Ivanov D.V. Vektorny analiz metodov lezviynoy obrabotki detaley [Vector analysis of the edge cutting machining of the parts]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2010, no. 4, pp. 8-13.
8. Ivanov V.S. Vektornoe modelirovanie sposobov mnogolezviynoy obrabotki [Multiple-edge machining procedures vector modeling]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2007, no. 5, pp. 24-28.
9. Ivanov V.S. Modelirovanie protsessa tsikloidal'nogo formoobrazovaniya pri lezviynoy obrabotke poverkhnostey vrashcheniya [Cycloidal forming process simulation at revolving surface cut]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2007, no.7, pp. 19-23.
10. Korn G., Korn T. *Mathematical Handbook for scientists and engineers. Definitions, Theorems and Formulas for Reference and Review*. 2nd ed. McGraw-Hill Book Company, 1967. (Russ. ed.: Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. Moscow, Nauka, 1974. 832 p.).
11. Ivanov V.S., Vasil'ev G.N., Zubkov N.N., Ivanov D.V. Modelirovanie protsessa formoobrazovaniya pri poluchenii shchelevykh struktur vrashchayushchimsya lezviynym instrumentom [Forming process simulation at slotted structure obtaining by revolving cut]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2007, no. 8, pp. 14-17.