

УДК 621.02.001.63

DOI:

С.В. Ходыревская, А.А. Горохов, О.Г. Куц, Ю.А. Мальнева

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕЖУЩИХ КРОМОК СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН СБОРНЫХ ФАСОННЫХ ФРЕЗ

Приведен метод аналитического представления режущих кромок сменных многогранных пластин, применяемых в конструкциях сборных фрез, в виде векторных функций: радиуса-вектора режу-

щей кромки, векторов нормали к передней и задней поверхностям.

Ключевые слова: сменные многогранные пластины, сборные фасонные фрезы, модель режущей кромки.

S.V. Khodyrevskaya, A.A. Gorokhov, O.G. Kuts, Yu. A. Malneva

CUTTING EDGE ANALYTICAL DESCRIPTION OF REPLACEABLE INDEXABLE INSERTS OF COMPOUND FORM CUTTERS

The formation of the efficient methods for assessed parameters computation is impossible without a mathematical description of cutting edges of replaceable inserts (RII), its front surface and an end flank. The most expedient way is supposed to be the fulfillment of an analytical description of RII cutting edges by means of the vector functions set: by the function of cutting edge radius-vector; by the function of the vector of normal to a front surface; by the function of the vector of normal to an end flank. The given description was considered by the example of some forms and plates formation (according to SRS 19042-80) used in the designs of compound form cutters, to

wit: of equilateral and equiangular inserts with a radius at the tops; round; rhombic; triangular with faces at the tops. The realization of the given functions in Maple system allowed carrying out the simulation and a geometrical presentation of cutting edges of the RIIs under consideration. The analysis of the results obtained allowed drawing a conclusion of the adequacy of functions obtained which makes it possible to use them at the creation and development of CAD/CAM systems of compound form cutters.

Key words: replaceable indexable inserts, compound form cutters, model of a cutting edge.

Существующие в настоящее время методы проектирования сборных фасонных фрез в основном сводятся к созданию различных моделей и алгоритмов, описывающих как конструкцию фрезы, так и сам процесс фрезерования. Будущий образ проектируемых фрез во многом определяется конструкторскими решениями, при этом основным оценочным критерием является величина погрешности аппроксимации обрабатываемого профиля режущими кромками сменных многогранных пластин (СМП). Построение эффективных методов расчета оценочных параметров невозможно без математического описания режущих кромок СМП, её передней и задней поверхностей. В работах [1-5] данная задача решается путем дискретного представления режущих кромок СМП массивом точек с рассчитанными в каждой точке параметрами: координатами точки в соб-

ственной системе координат, длиной дуги профиля режущей кромки, векторами нормали к передней и задней поверхностям. Для реализации последующих проектных процедур предполагается выполнение перехода от дискретного представления к аналитическому путем применения метода кубической сплайн-интерполяции. Однако реализация подобного подхода на практике требует значительных вычислительных ресурсов, что в первую очередь сказывается на времени выполнения расчетов.

Одним из возможных решений данной проблемы является аналитическое описание режущих кромок СМП набором векторных функций:

$$\bar{r}_k(s_k), \bar{N}_k(s_k), \bar{T}_k(s_k),$$

где $\bar{r}_k(s_k)$ - функция радиуса-вектора режущей кромки k -й СМП; s_k - параметр длины режущей кромки, $s_k = 0..s_{k\max}$;

$\bar{N}_k(s_k)$ - функция вектора нормали к пе-

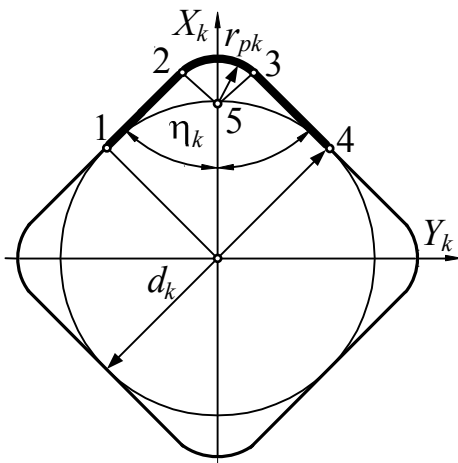


Рис. 1. Схема расчета опорных точек профиля равносторонних и равноугольных пластин с радиусом при вершине

редней поверхности k -й СМП; $\bar{T}_k(s_k)$ - функция вектора нормали к задней поверхности k -й СМП.

Рассмотрим методы расчета этих функций для некоторых форм и исполнений пластин (по ГОСТ 19042-80), применяемых в конструкциях сборных фасонных фрез.

1. Равносторонние и равноугольные пластины с радиусом при вершине. Исходные данные для выполнения расчета (рис. 1): N_k - количество типовых участков режущей кромки (число сторон пластины); d_k - диаметр вписанной окружности; r_{pk} - радиус при вершине; S_{pk} - толщина пластины; α_k, γ_k - задний и передний углы пластины.

На основе этих параметров выполним расчет опорных точек участка профиля (точки 1-5):

$$x_1 = \frac{d_k}{2} \sin(\eta_k); \quad y_1 = -\frac{d_k}{2} \cos(\eta_k),$$

где η_k - половина угла при вершине,

$$\eta_k = \pi(N_k - 2)/2N_k;$$

$$x_2 = \frac{d_k/2 - r_{pk} \cos^2(\eta_k)}{\sin(\eta_k)}; \quad y_2 = -r_{pk} \cos(\eta_k);$$

$$x_3 = x_2; \quad y_3 = -y_2;$$

$$x_5 = (d_k/2 - r_{pk}) \sin^{-1}(\eta_k); \quad y_5 = 0.$$

Функции координат радиуса-вектора типового участка профиля (точки 1-4) режущей кромки k -й СМП

$$\bar{r}_{ki}(s_{ki}) = [x_{ki}(s_{ki}), y_{ki}(s_{ki}), z_{ki}(s_{ki}), 1]^T \quad (1)$$

представим как

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ s_{ki}(y_2 - y_1)/s_2 + y_1, & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ -r_{pk} \sin(\pi/2 - \eta_k - (s_{ki} - s_2)/r_{pk}), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ (s_{ki} - s_3)(y_4 - y_3)/(s_4 - s_3) + y_3, & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ y_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases}$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ x_1 + (x_2 - x_1)(y_{ki}(s_{ki}) - y_1)/(y_2 - y_1), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ x_5 + r_{pk} \cos(\pi/2 - \eta_k - (s_{ki} - s_2)/r_{pk}), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ x_3 + (x_4 - x_3)(y_{ki}(s_{ki}) - y_3)/(y_4 - y_3), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ x_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases}$$

$$z_{ki}(s_k) = -S_{pk},$$

где s_2, s_3, s_4 - длина профиля режущей кромки соответственно в точках 2, 3 и 4.

$$s_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad s_3 = s_2 + (\pi - 2\eta_k)r_{pk}, \quad s_4 = s_2 + s_3.$$

Тогда с учетом (1) функцию радиуса-вектора всей режущей кромки k -й СМП запишем как

$$\bar{r}_k(s_k) = A^6 \left(\frac{2\pi}{N_k} \left[\frac{s_k}{s_{ki \max}} \right] \right) \cdot \bar{r}_{ki} \left(s_k - \left[\frac{s_k}{s_{ki \max}} \right] \cdot s_{ki \max} \right), \quad (2)$$

где $s_{ki\max} = s_4$.

Вектор нормали к передней поверхности типового участка профиля (точки 1-4) режущей кромки k -й СМП рассчитаем как

$$\bar{N}_{ki}(s_{ki}) = \left(-\bar{j}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\sin(\gamma_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, \bar{i}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\sin(\gamma_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, -\cos(\gamma_k), 0 \right)^T,$$

а вектор нормали всей режущей кромки k -й СМП - как

$$\bar{N}_k(s_k) = A^6 \left(\frac{2\pi}{N_k} \left[\frac{s_k}{s_{ki\max}} \right] \right) \cdot \bar{N}_{ki} \left(s_k - \left[\frac{s_k}{s_{ki\max}} \right] \cdot s_{ki\max} \right). \quad (3)$$

Вектор нормали к задней поверхности типового участка профиля (точки 1-4) режущей кромки k -й СМП рассчитаем как

$$\bar{T}_{ki}(s_{ki}) = \left(\bar{j}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\cos(\alpha_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, -\bar{i}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\cos(\alpha_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, \sin(\alpha_k), 0 \right)^T,$$

а вектор нормали всей режущей кромки k -й СМП - как

$$\bar{T}_k(s_k) = A^6 \left(\frac{2\pi}{N_k} \left[\frac{s_k}{s_{ki\max}} \right] \right) \cdot \bar{T}_{ki} \left(s_k - \left[\frac{s_k}{s_{ki\max}} \right] \cdot s_{ki\max} \right). \quad (4)$$

2. Для круглой СМП координаты опорных точек участка профиля (рис. 2) рассчитаем как

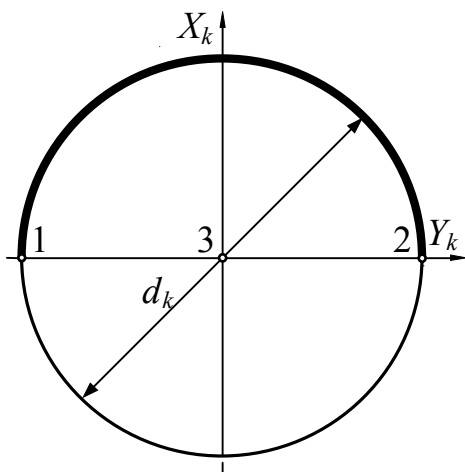


Рис. 2. Схема расчета опорных точек профиля круглой СМП

$$x_1 = 0; y_1 = -d_k/2;$$

$$x_2 = 0; y_2 = d_k/2;$$

$$x_3 = 0; y_3 = 0.$$

Функции координат радиуса-вектора типового участка профиля (точки 1 и 2) режущей кромки k -й СМП запишем как

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ -d_k/2 \cos(2s_{ki}/d_k), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ y_2, & s_{ki} > s_2; \end{cases}$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ -d_k/2 \sin(2s_{ki}/d_k), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ x_2, & s_{ki} > s_2; \end{cases}$$

где $s_2 = d_k \pi/2$.

Тогда функции радиуса-вектора всей режущей кромки СМП, векторов нормали к передней и задней поверхностям рассчитаем по формулам (2), (3) и (4), принимая $N_k = 2$ и $s_{ki\max} = s_2$.

3. Для ромбической пластины (рис. 3) координаты опорных точек профиля (точки 1-9) рассчитаем как

$$x_1 = 0; y_1 = -\frac{r_{pk}(\cos(\eta_k) - 1) + d_k/2}{\cos(\eta_k)};$$

$$x_2 = r_{pk} \sin(\eta_k);$$

$$y_1 = -\frac{r_{pk}(\cos^2(\eta_k) - 1) + d_k/2}{\cos(\eta_k)};$$

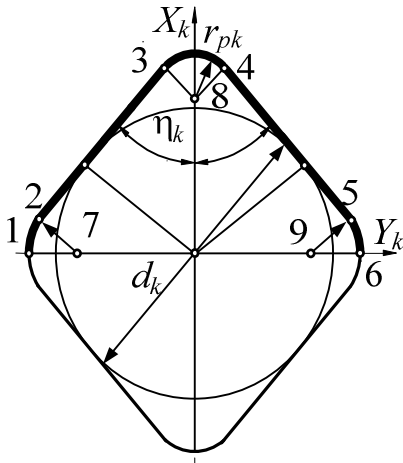


Рис. 3. Схема расчета опорных точек профиля ромбической СМП

$$x_3 = -\frac{r_{pk} \cos^2(\eta_k) - d_k/2}{\sin(\eta_k)};$$

$$\begin{aligned} y_3 &= -r_{pk} \cos(\eta_k); \\ x_4 &= x_3; y_4 = -y_3; \\ x_5 &= x_2; y_5 = -y_2; \\ x_6 &= x_1; y_6 = -y_1; x_7 = 0; \\ y_7 &= -\frac{d_k/2 - r_{pk}}{\cos(\eta_k)}; \\ x_8 &= -\frac{d_k/2 - r_{pk}}{\sin(\eta_k)}; y_8 = 0; \\ x_9 &= x_7; y_9 = -y_7. \end{aligned}$$

Функции координат радиуса-вектора типового участка профиля (точки 1-6) режущей кромки k -й СМП запишем как

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ y_7 - r_{pk} \cos(s_{ki}/r_{pk}), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ (s_{ki} - s_2)(y_3 - y_2)/(s_3 - s_2) + y_2, & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ -r_{pk} \cos(\eta_k + (s_{ki} - s_3)/r_{pk}), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ (s_{ki} - s_4)(y_5 - y_4)/(s_5 - s_4) + y_4, & s_4 < s_{ki} \leq s_5; \\ y_9 + r_{pk} \cos((s_{ki} - s_5)/r_{pk} + \eta_k), & s_5 < s_{ki} \leq s_6; \\ y_6, & s_{ki} > s_6; \end{cases}$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ r_{pk} \sin(s_{ki}/r_{pk}), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ (x_3 - x_2)(y_{ki}(s_{ki}) - y_2)/(y_3 - y_2) + x_2, & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ x_8 + r_{pk} \sin(\eta_k + (s_{ki} - s_3)/r_{pk}), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ (x_5 - x_4)(y_{ki}(s_{ki}) - y_4)/(y_5 - y_4) + x_4, & s_4 < s_{ki} \leq s_5; \\ -r_{pk} \sin((s_{ki} - s_5)/r_{pk} - \eta_k), & s_5 < s_{ki} \leq s_6; \\ x_6, & s_{ki} > s_6; \end{cases}$$

где $s_2 = \eta_k r_{pk}$, $s_3 = s_2 + \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}$, $s_4 = s_3 + (\pi - 2\eta_k)r_{pk}$, $s_5 = s_3 + s_4 - s_2$, $s_6 = s_5 + s_2$.

Функции радиуса-вектора всей режущей кромки СМП, векторов нормали к передней и задней поверхностям рассчитаем по формулам (2), (3) и (4), принимая $N_k = 2$ и $s_{ki \max} = s_6$.

$$x_1 = \frac{d_k}{2} \sin(\eta_k); y_1 = -\frac{d_k}{2} \cos(\eta_k);$$

4. Для треугольной пластины с фасками при вершине без отверстия (по ГОСТ 27302-87) координаты опорных точек профиля (точки 1-5) рассчитаем как (рис. 4)

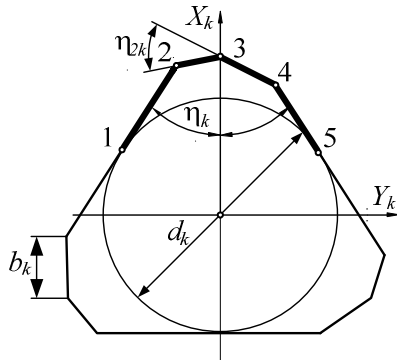


Рис. 4. Схема расчета опорных точек профиля треугольной СМП с фасками при вершине

$$x_2 = b_k \left[\frac{(2 \cos^2(\eta_k) - 1)}{\cos(\eta_{2k})} \sin(\eta_k - \eta_{2k}) + \frac{1 - 2 \cos^2(\eta_k)}{\sin(\eta_k)} \right] + \frac{d_k}{2 \sin(\eta_k)}$$

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ s_{ki}(y_2 - y_1)/s_2 + y_1, & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ (s_{ki} - s_2)(y_3 - y_2)/(s_3 - s_2) + y_2, & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ (s_{ki} - s_3)(y_4 - y_3)/(s_4 - s_3) + y_3, & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ (s_{ki} - s_4)(y_5 - y_4)/(s_5 - s_4) + y_4, & s_4 < s_{ki} \leq s_5; \\ y_5, & s_{ki} > s_5; \end{cases}$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ x_1 + (x_2 - x_1)(y_{ki}(s_{ki}) - y_1)/(y_2 - y_1), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ x_2 + (x_3 - x_2)(y_{ki}(s_{ki}) - y_2)/(y_3 - y_2), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ x_3 + (x_4 - x_3)(y_{ki}(s_{ki}) - y_3)/(y_4 - y_3), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ x_4 + (x_5 - x_4)(y_{ki}(s_{ki}) - y_4)/(y_5 - y_4), & s_4 < s_{ki} \leq s_5; \\ x_5, & s_{ki} > s_5; \end{cases}$$

где $s_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$, $s_3 = s_2 + \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}$, $s_4 = s_3 + \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}$, $s_5 = s_4 + \sqrt{(x_5 - x_4)^2 + (y_5 - y_4)^2}$.

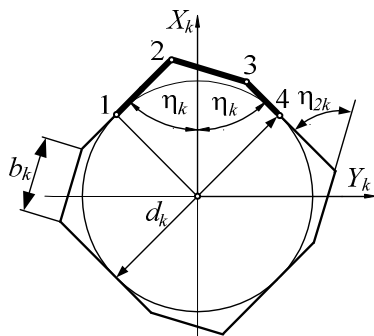


Рис. 5. Схема расчета опорных точек профиля квадратной СМП с фасками при вершине

$$y_2 = b_k \frac{(2 \cos^2(\eta_k) - 1)}{\cos(\eta_{2k})} \cos(\eta_k - \eta_{2k});$$

$$x_3 = \frac{d_k - 2b_k(2 \cos^2(\eta_k) - 1)}{2 \sin(\eta_k)}; y_3 = 0;$$

$$x_4 = \frac{d_k - 2b_k \cos^2(\eta_k)}{2 \sin(\eta_k)}; y_4 = b_k \cos(\eta_k).$$

Функции координат радиуса-вектора типового участка профиля (точки 1-5) режущей кромки k -й СМП запишем как

Функции радиуса-вектора всей режущей кромки СМП, векторов нормали к передней и задней поверхностям рассчитаем по формулам (2), (3) и (4), принимая $N_k = 3$ и $s_{ki \max} = s_5$.

5. Для квадратной пластины с фасками при вершине без отверстия (по ГОСТ 27302-87) координаты опорных точек профиля (точки 1-4) рассчитаем как (рис. 5)

$$x_1 = \frac{d_k}{2} \sin(\eta_k); y_1 = -\frac{d_k}{2} \cos(\eta_k);$$

$$x_2 = a \cdot \cos(\eta_k - \arccos(d_k/2a));$$

$$y_2 = -a \cdot \sin(\eta_k - \arccos(d_k/2a)),$$

где $a = \sqrt{(d_k/2)^2 + (d_k/2 - b_k \cos(\eta_{2k}))^2}$;

$$x_3 = b \cdot \cos(\eta_k - \arccos(d_k/2b));$$

$$y_3 = b \cdot \sin(\eta_k - \arccos(d_k/2b)),$$

где $b = \sqrt{(d_k/2)^2 + (d_k/2 - b_k \sin(\eta_{2k}))^2}$;

$$x_4 = x_1; \quad y_4 = -y_1.$$

Функции координат радиуса-вектора типового участка профиля (точки 1-4) режущей кромки k -й СМП запишем как

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ s_{ki}(y_2 - y_1)/s_2 + y_1, & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ (s_{ki} - s_2)(y_3 - y_2)/(s_3 - s_2) + y_2, & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ (s_{ki} - s_3)(y_4 - y_3)/(s_4 - s_3) + y_3, & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ y_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases}$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ x_1 + (x_2 - x_1)(y_{ki}(s_{ki}) - y_1)/(y_2 - y_1), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ x_2 + (x_3 - x_2)(y_{ki}(s_{ki}) - y_2)/(y_3 - y_2), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ x_3 + (x_4 - x_3)(y_{ki}(s_{ki}) - y_3)/(y_4 - y_3), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ x_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases}$$

где $s_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$,

$$s_3 = s_2 + \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2},$$

$$s_4 = s_3 + \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}.$$

Реализация данных функций в системе Maple позволила выполнить моделирование и геометрическое представление ре-

жущих кромок рассматриваемых СМП (рис. 6).

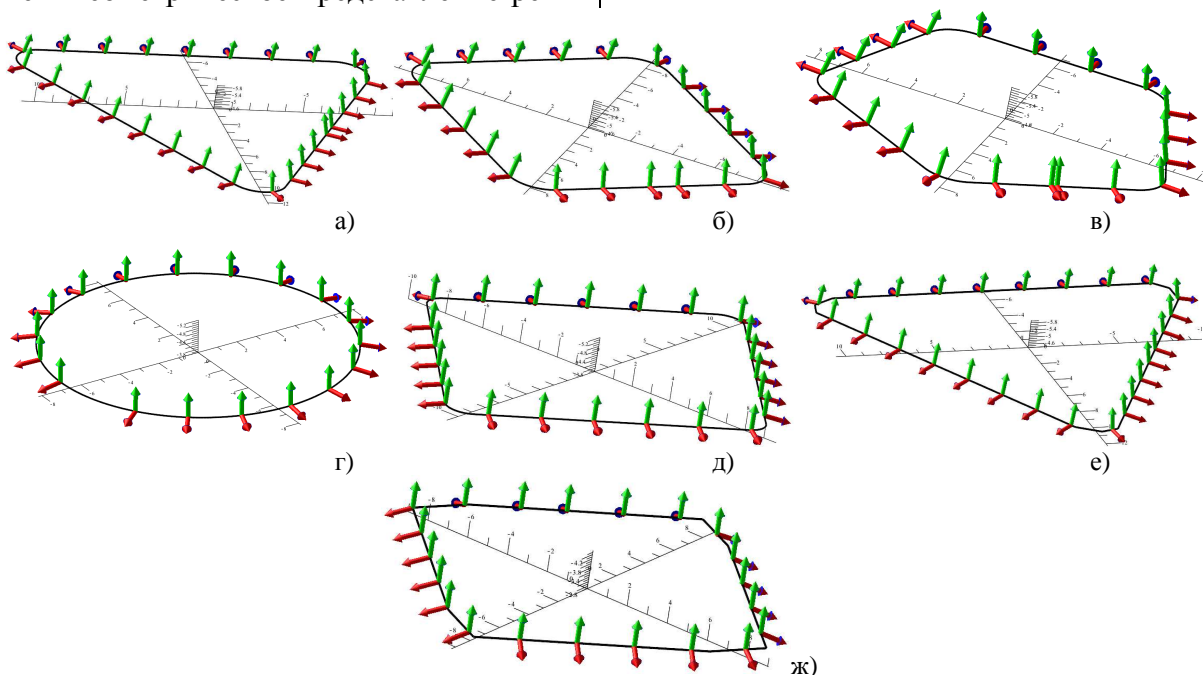


Рис. 6. Геометрическое представление результатов математического моделирования режущих кромок СМП: а - треугольной с радиусом при вершине; б - квадратной с радиусом при вершине; в - пятигранной с радиусом при вершине; г - круглой; д - ромбической; е - треугольной с фасками при вершине; ж - квадратной с фасками при вершине

На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод о правильности построенных функций, что позволя-

ет использовать их для создания CAD/CAM-систем сборных фасонных фрез.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ №16-38-00166.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Лашнев, С.И. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: монография / С.И. Лашнев, А.Н. Борисов, С.Г. Емельянов. - Курск: КГТУ, 1997. - 391 с. 2. Куц, В.В. Повышение эффективности расчета сборных дисковых фрез для обработки шеек коленчатых валов на основе компьютерно-ориентированного моделирования: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Куц. - М., 2000. 3. Емельянов, С.Г. Корректировка положения сменных многогранных пластин при проектировании сборных дисковых фрез / С.Г. Емельянов, В.В. Куц // СТИН. - 2000. - № 2. - С. 11-12. | <ol style="list-style-type: none"> 4. Емельянов, С.Г. Моделирование процесса обработки шейки коленчатого вала сборной дисковой фрезой, оснащенной сменными многогранными пластинами / С.Г. Емельянов, В.В. Куц // Техника машиностроения. - 1999. - № 2. - С. 28-31. 5. Куц, В.В. Расчет величин искажения профиля обрабатываемой фасонной поверхности при разработке CAD/CAM-системы сборных фасонных фрез / В.В. Куц // Автоматизация. Современные технологии. - 2004. - № 11. - С. 5-8. |
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Lashnev, S.I. <i>Geometrical Theory of Surface Formation by Cutters</i>: monograph / S.I. Lashnev, A.N. Borisov, S.G. Yemeliyanov. - Kursk: KSTU, 1997. - pp. 391. 2. Kuts, V.V. Efficiency increase of compound disk cutter computation for crankshaft journals machining based on computer-directed modeling: <i>Thesis for Can. Eng. degree</i> / V.V. Kuts. - M., 2000. 3. Yemeliyanov, S.G. <i>Replaceable Indexable Inserts at Designing Compound Disk Cutters</i> / S.G. Yemeliyanov, V.V. Kuts // STIN. - 2000. - № 2. - pp. 11-12. | <ol style="list-style-type: none"> 4. Yemeliyanov, S.G. Simulation of crankshaft journal machining with compound disk cutter equipped with replaceable indexable inserts / S.G. Yemeliyanov, V.V. Kuts // <i>Techniques of Mechanical Engineering</i>. - 1999. - № 2. - pp. 28-31. 5. Kuts, V.V. Computation of profile distortion values of formed surface machined at development of CAD/CAM system of compound form cutters / V.V. Kuts // <i>Automation. Current Techniques</i>. - 2004. - № 11. - pp. 5-8. |

*Статья поступила в редколлегию 2.03.17.
Рецензент: д.т.н., профессор Юго-Западного
государственного университета
Ивахненко А.Г.*

Сведения об авторах:

Ходыревская Светлана Васильевна, к.т.н., доцент Юго-Западного государственного университета, e-mail: svetlana.hod@mail.ru.

Горохов Александр Анатольевич, к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета, e-mail: nauka46@regionika.ru.

Khodyrevskaya Svetlana Vasilievna, Can. Eng., Assistant Prof., South-Western State University, e-mail: svetlana.hod@mail.ru.

Gorokhov Alexander Anatolievich, Can. Eng., Assistant Prof., Bryansk State Technical University, e-mail: nauka46@regionika.ru.

Мальнева Юлия Андреевна, к.т.н., доцент Юго-Западного государственного университета, e-mail: maximenckoyuliya2010@yandex.ru.

Куц Ольга Геннадьевна, аспирант Юго-Западного государственного университета, e-mail: kuts.ekocentr@mail.ru.

Malneva Julia Andreevna, Can. Eng., Assistant Prof., South-Western State University, e-mail: maximenckoyuliya2010@yandex.ru.

Kuts Olga Gennadievna, Post graduate student, South-Western State University, e-mail: kuts.ekocentr@mail.ru.