

В.И. Кальченко, д-р. техн. наук, В.В. Кальченко, д-р. техн. наук,
А.В. Кологойда, ассистент, г. Чернигов, Украина

МОДУЛЬНОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСЦЕНТРОВОГО ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

It is designed module three-dimensional geometric models process metal transition and forming with different form generating line at infeed centerless grinding. Identify present-position data mechanical trajectory rotation axis metal block in process metal transition and assumed value angle skew axes details and abrasive disk.

В странах с развитым машиностроением существует тенденция развития трехмерного (3D) геометрического моделирования [1, 2]. Однако существующие 3D модели недостаточно учитывают особенности абразивного инструмента, точность формообразования и снятия припуска при шлифовании поверхностей. В современных условиях, когда отечественное машиностроение пытается стать конкурентоспособным, гибким и высокоэффективным, эта проблема приобретает народнохозяйственное значение.

Впервые в работе [3] разработаны 3D модель процесса снятия припуска и научное положение про роль пятна контакта и его параметров на производительность при шлифовании, что подтверждается в монографии [4].

В работе [5] впервые разработана общая трехмерная (3D) геометрическая модель процесса снятия припуска и формообразования обрабатываемых поверхностей при шлифовании со скрещивающимися осями кругов и детали. Кинематическая схема формообразования поверхностей, которая основана на объединении вращений инструмента и детали вокруг скрещивающихся осей, является наиболее общей [6, 7]. Все остальные схемы – это ее частичные случаи.

В работе [8] доказано, что скрещивание осей в одних случаях является положительным явлением, например, при продольном шлифовании на круглошлифовальных станках, и отрицательным – при врезном шлифовании. Рассмотрены [5, 8] схемы шлифования, когда положение осей инструмента и детали задается в процессе обработки. При бесцентровом врезном шлифовании, где базирование выполняется по обрабатываемой поверхности детали и постоянно изменяется в процессе обработки, 3D модели процессов съема припуска и формообразования не приведены.

Целью данной работы является разработка модульных 3D моделей процесса съема припуска и формообразования поверхностей вращения с различной формой образующей при врезном бесцентровом шлифовании и на их базе определение текущего положения оси вращения заготовки и

допускаемых углов скрещивания осей детали и шлифовального круга.

Для достижения цели необходимо разработать:

1. Модульные 3D модели ведущего, шлифовального кругов и опорного ножа.
2. 3D модели эквидистант к поверхностям ведущего, шлифовального кругов и опорного ножа.
3. 3D модели траекторий перемещения оси заготовки в процессе съема припуска.
4. 3D модели, которые описывают углы скрещивания осей детали и шлифовального круга при обработке.

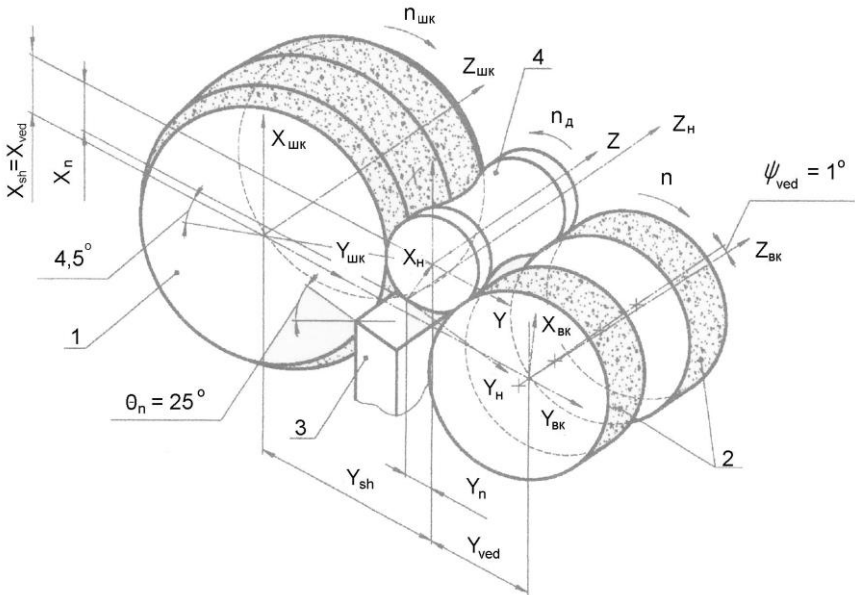


Рис. 1 – Схема процесса бесцентрового врезного шлифования

Рассмотрим схему бесцентрового врезного шлифования криволинейной и цилиндрической поверхности детали (\varnothing (62...70) h7, длина 120 мм (рис. 1)) с припуском на обработку от 0,2 до 0,3 мм на радиус. Согласно схеме обработки (рис. 1), форма образующей шлифовального круга 1 соответствует форме образующей обрабатываемой поверхности детали 4. Ось $OZ_{шк}$ шлифовального круга расположена параллельно оси OZ детали. Ось $OZ_{вк}$ ведущих кругов 2 выполнена повернутой в вертикальной плоскости на угол $\psi_{вед} = 1^\circ$ относительно оси шлифовального круга, что обеспечивает осевую фиксацию детали по торцу в процессе шлифования. Опорная плоскость ножа

З выполнена параллельной оси шлифовального круга и имеет скос под углом $\theta_n = 25^\circ$ в сторону ведущего круга 2.

Построение трехмерных моделей трех инструментов, которые принимают участие в процессе обработки, а именно: ведущего круга, шлифовального круга и опорного ножа, осуществляется кинематическим методом ($\vec{N} \cdot \vec{V} = 0$) [7]. То есть, решается прямая задача теории формообразования, где профилем детали будут образовываться инструментальные поверхности. После этого будет проверяться правильность формообразования инструментов, путем определения координат центров поперечных сечений детали (точек пересечения эквидистантных поверхностей инструментов). Затем будет рассматриваться обратная задача теории формообразования, где будет проводится построение траектории перемещения оси заготовки в крайних и центральном поперечном сечениях в процессе обработки.

Математическое моделирование процесса бесцентрового врезного шлифования проводим на основании модульного аппарата [8] преобразования координат с использованием программного пакета MathCAD 11 Enterprise Edition немецкой фирмы MathSoft, который наиболее удобный для подобных расчетов.

Уравнение осевого сечения детали запишем с помощью функции Хевисайда:

$$R_{det}(z) = \Phi(z) \cdot 35 - \Phi(z - 20) \cdot 35 + \Phi(z - 20) \cdot \text{cubspline}(z) - \Phi(z - 100) \cdot \text{cubspline}(z) + \Phi(z - 100) \cdot 35 - \Phi(z - 120,001) \cdot 35,$$

где z – осевая координата детали; $R_{det}(z)$ – радиус детали в функции от координаты z .

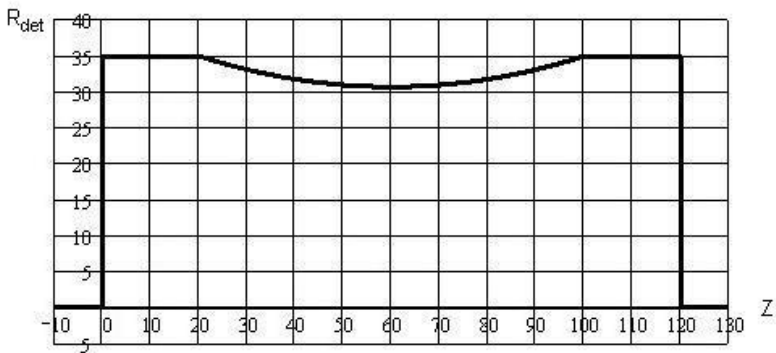


Рис. 2 – Осевое сечение детали

Поверхность детали образуется путем вращения профиля (рис. 2),

модульная 3D модель которой имеет вид

$$\vec{r}(z, \theta) = C_1(z, \theta, R_{\text{det}}(z)) \cdot \vec{e}_4,$$

где z и θ в цилиндрическом модуле C_1 , [8] – независимые параметры, которые определяют вид поверхности детали; $\vec{e}_4 = (0, 0, 0, 1)^T$ – радиус-вектор начала координат, совпадающего с формообразующей точкой.

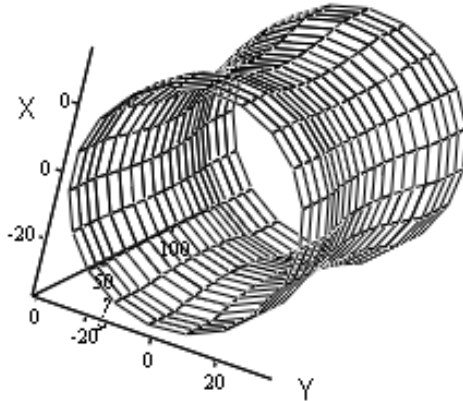


Рис. 3 – 3D моделирование поверхности детали

Конструктивные параметры системы (рис. 1):

$R_{\text{det al}} = 35$ мм – радиус цилиндрической части детали (максимальный);

$R_{\text{sh}} = 205$ мм – радиус шлифовального круга;

$R_{\text{ved}} = 150$ мм – радиус ведущего круга;

Расстояние между осями детали и круга

$$x = (R_{\text{sh}} + R_{\text{det al}}) \cdot \sin\left(4,5 \cdot \frac{\pi}{180}\right);$$

$x = x_{\text{ved}} = x_{\text{sh}} = 22,3608$ мм – расстояние по оси x ;

$y_{\text{ved}} = \sqrt{(R_{\text{ved}} + R_{\text{det al}})^2 - x_{\text{ved}}^2} = 183,6437$ мм – расстояние от оси $Z_{\text{вк}}$ ведущего круга до оси детали Z по оси y ;

$y_{\text{sh}} = \sqrt{(R_{\text{sh}} + R_{\text{det al}})^2 - x_{\text{sh}}^2} = 284,1214$ мм – расстояние от оси $Z_{\text{шк}}$ шлифовального круга до оси детали Z по оси y .

Составим модульную 3D модель ведущего круга.

Поверхность круга в глобальной системе координат описывается матричным уравнением

$$\bar{r}_{\text{BK}}(\Theta, \psi_v, z, \theta) = C_1(0, \Theta, 0) \cdot S(0, \psi_v, 0) \cdot P(0, y_{\text{ved}}, x_{\text{ved}}) \cdot C_1(z, \theta, R_{\text{det}}(z)) \cdot \bar{e}_4,$$

где C, S, P – цилиндрический, сферический и прямоугольный модули [8].
Векторы касательных к поверхности круга находим из уравнений:

$$\bar{A} = \frac{\partial \bar{r}_{\text{BK}}}{\partial \theta} = C_1(0, \Theta, 0) \cdot S(0, \psi_v, 0) \cdot P(0, y_{\text{ved}}, x_{\text{ved}}) \cdot D2C_1(z, \theta, R_{\text{det}}(z)) \cdot \bar{e}_4;$$

$$\bar{B} = \frac{\partial \bar{r}_{\text{BK}}}{\partial z} = C_1(0, \Theta, 0) \cdot S(0, \psi_v, 0) \cdot P(0, y_{\text{ved}}, x_{\text{ved}}) \cdot D3C_1(z, \theta, R_{\text{det}}(z)) \cdot \bar{e}_4.$$

Вектор нормали к поверхности ведущего круга, определяется как векторное произведение векторов касательных

$$\bar{N}(\Theta, \psi_v, z, \theta) = \bar{A}(\Theta, \psi_v, z, \theta) \times \bar{B}(\Theta, \psi_v, z, \theta).$$

Вектор единичной нормали равен

$$\bar{n}(\Theta, \psi_v, z, \theta) = \frac{\bar{A}(\Theta, \psi_v, z, \theta) \times \bar{B}(\Theta, \psi_v, z, \theta)}{|\bar{A}(\Theta, \psi_v, z, \theta) \cdot \bar{B}(\Theta, \psi_v, z, \theta)|}.$$

Вектор скорости вращения ведущего круга описывается уравнением

$$\bar{V}_{\text{BK}}(\Theta, \psi_v, z, \theta) = D2C_1(0, \Theta, 0) \cdot S(0, \psi_v, 0) \cdot P(0, y_{\text{ved}}, x_{\text{ved}}) \cdot C_1(z, \theta, R_{\text{det}}(z)) \cdot \bar{e}_4.$$

Условие формообразования ($\bar{N} \cdot \bar{V} = 0$) имеет вид

$$\bar{V}_{\text{BK}}(\Theta, \psi_v, z, \theta) \cdot \bar{n}(\Theta, \psi_v, z, \theta) = 0.$$

Углы, которые определяют положение линии контакта ведущего круга на поверхности детали, можно определить при помощи блока

$$K_{\text{BK}}(\psi_v) = \begin{cases} q \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..a \\ \quad m \leftarrow i + 1 \\ \quad e_m \leftarrow \frac{Z}{a} \cdot i \\ \quad Q_m \leftarrow \text{root}(\bar{V}_{\text{BK}}(0, \psi_v, e_m, q), q) \\ \quad M^{<m>} \leftarrow \begin{pmatrix} e_m \\ Q_m \end{pmatrix} \\ M^T \end{cases}$$

$$Kk_{\text{BK}} = \text{cspline}(K_{\text{BK}}(\psi_v)^{<1>}, K_{\text{BK}}(\psi_v)^{<2>});$$

$$Y_{\text{BK}}(z_t) = \text{int erp}(Kk_{\text{BK}}(\psi_v), K_{\text{BK}}(\psi_v)^{<1>}, K_{\text{BK}}(\psi_v)^{<2>}, z_t).$$

Уравнение линии контакта ведущего круга с деталью описывается модульным уравнением

$$Lk_{BK}(\Theta_{ved}, z_t) = C_1(0, \Theta_{ved}, 0) \cdot S(0, \psi_v, 0) \cdot P(0, y_{ved}, x_{ved}) \cdot C_1(z_t, Y_{BK}(z_t), R_{det1}) \cdot \overline{e^4}.$$

Профиль ведущего круга равен

$$Rt = 0;$$

$$R_{BK}(\Theta_{ved}, z_t) = \begin{pmatrix} Lk_{BK}(\Theta_{ved}, z_t)_1 + Rt \cdot \bar{n}(\Theta_{ved}, \psi_v, z_t, Y_{BK}(z_t))_1 \\ Lk_{BK}(\Theta_{ved}, z_t)_2 + Rt \cdot \bar{n}(\Theta_{ved}, \psi_v, z_t, Y_{BK}(z_t))_2 \\ Lk_{BK}(\Theta_{ved}, z_t)_3 + Rt \cdot \bar{n}(\Theta_{ved}, \psi_v, z_t, Y_{BK}(z_t))_3 \end{pmatrix};$$

$$Vk(\Theta_{ved}, z_t) = P(0, y_{ved}, -x_{ved}) \cdot R_{BK}(\Theta_{ved}, z_t).$$

Аналогично можно записать модульные 3D модели для шлифовального круга и опорного ножа.

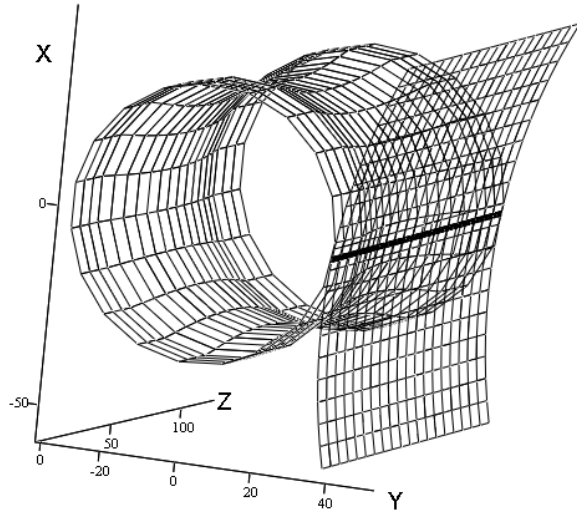


Рис. 4 – 3D моделирование поверхности детали и ведущего круга

Линия контакта шлифовального круга и детали описывается модульным уравнением

$$Lk_{шк}(\Theta_{sh}, z_t) = C_1(0, \Theta_{sh}, 0) \cdot S(0, \psi_{sh}, 0) \cdot P(0, y_{sh}, x_{sh}) \cdot C_1(z_t, Y_{шк}(z_t), R_{det}(z_t)) \cdot \overline{e^4}.$$

Профиль шлифовального круга находим из выражения

$$R_{шк}(\Theta_{sh}, z_t) = \begin{pmatrix} Lk_{шк}(\Theta_{sh}, z_t)_1 + Rt_{шк} \cdot \bar{n}(\Theta_{sh}, \psi_{sh}, z_t, Y_{шк}(z_t))_1 \\ Lk_{шк}(\Theta_{sh}, z_t)_2 + Rt_{шк} \cdot \bar{n}(\Theta_{sh}, \psi_{sh}, z_t, Y_{шк}(z_t))_2 \\ Lk_{шк}(\Theta_{sh}, z_t)_3 + Rt_{шк} \cdot \bar{n}(\Theta_{sh}, \psi_{sh}, z_t, Y_{шк}(z_t))_3 \end{pmatrix}.$$

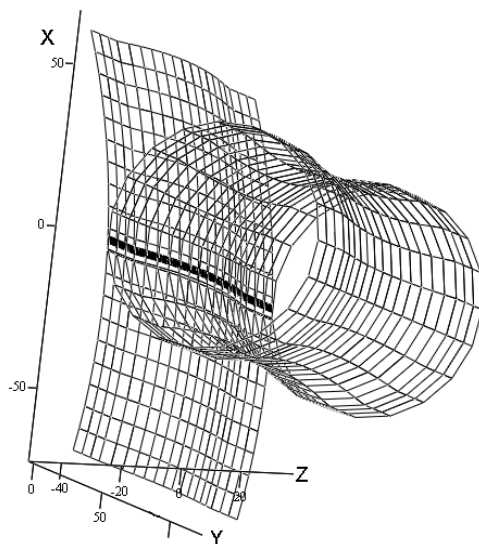


Рис. 5 – 3D моделирование поверхности детали и шлифовального круга

Линия контакта ножа с деталью описывается произведением трех модулей

$$Lk_n(y, z_t) = P(0, y_n, x_n) \cdot C_1(0, \theta_n, y) \cdot C_2(z_t, Y_n(z_t), -R_{\text{detail}}) \overline{e^4}.$$

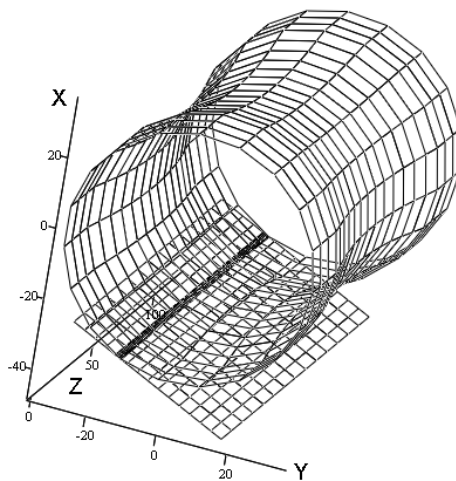


Рис. 6 – 3D моделирование поверхности детали и ножа

Профиль ножа равен

$$R_n(y, z_t) = \begin{pmatrix} Lk_n(y, z_t)_1 + Rt_n \cdot \bar{n}(y, \theta_n, z_t, Y_n(z_t))_1 \\ Lk_n(y, z_t)_2 + Rt_n \cdot \bar{n}(y, \theta_n, z_t, Y_n(z_t))_2 \\ Lk_n(y, z_t)_3 + Rt_n \cdot \bar{n}(y, \theta_n, z_t, Y_n(z_t))_3 \end{pmatrix}$$

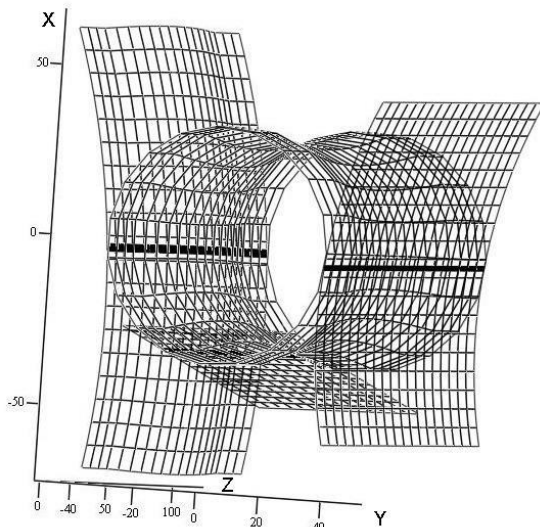


Рис. 7 – Математическая модель зоны обработки

Рассмотрим обратную задачу теории формообразования. То есть, построим траектории перемещения оси заготовки в крайних и центральном поперечном сечениях в процессе обработки.

Уравнение профиля образующей заготовки запишем в виде функции Хевисайда

$$R_{zag}(z) = \Phi(z) \cdot 35.3 - \Phi(z - 20.8) \cdot 35.3 + \Phi(z - 20.8) \cdot \text{cubspline}(z) - \Phi(z - 99.1) \cdot \text{cubspline}(z) + \Phi(z - 99.1) \cdot 35.2 - \Phi(z - 120,001) \cdot 35.2.$$

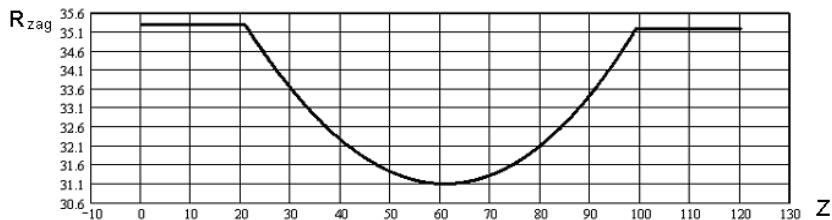


Рис. 8 – Профиль образующей заготовки

В процессе обработки (рис. 1) ведущий круг 2 и нож 3 остаются

неподвижными, врезание производится шлифовальным кругом 1, который подается в зону обработки. Путем пошагового расчета получим траектории движения оси заготовки в крайних и центральном поперечном сечениях.

Для расчета запишем радиус-векторы шлифовального и ведущего кругов и ножа как функции от расстояний построения эквидистантных поверхностей

$$R_n(y, R_n, z_t) = \begin{pmatrix} Lk_n(y, z_t)_1 + R_n \cdot \bar{n}(y, \theta_n, z_t, Y_n(z_t))_1 \\ Lk_n(y, z_t)_2 + R_n \cdot \bar{n}(y, \theta_n, z_t, Y_n(z_t))_2 \\ Lk_n(y, z_t)_3 + R_n \cdot \bar{n}(y, \theta_n, z_t, Y_n(z_t))_3 \end{pmatrix};$$

$$Noz(y, R_n, z_t) = P(0, y_n, x_n) \cdot R_n(y, R_n, z_t);$$

$$R_{BK}(\Theta_{ved}, R_{vk}, z_t) = \begin{pmatrix} Lk_{BK}(\Theta_{ved}, z_t)_1 + R_{vk} \cdot \bar{n}(\Theta_{ved}, \psi_v, z_t, Y_{BK}(z_t))_1 \\ Lk_{BK}(\Theta_{ved}, z_t)_2 + R_{vk} \cdot \bar{n}(\Theta_{ved}, \psi_v, z_t, Y_{BK}(z_t))_2 \\ Lk_{BK}(\Theta_{ved}, z_t)_3 + R_{vk} \cdot \bar{n}(\Theta_{ved}, \psi_v, z_t, Y_{BK}(z_t))_3 \end{pmatrix};$$

$$Vk(\Theta_{ved}, R_{vk}, z_t) = P(0, y_{ved}, x_{ved}) \cdot R_{BK}(\Theta_{ved}, R_{vk}, z_t);$$

$$R_{шк}(\Theta_{sh}, R_{sh}, z_t) = \begin{pmatrix} Lk_{шк}(\Theta_{sh}, z_t)_1 + R_{sh} \cdot \bar{n}(\Theta_{sh}, \psi_{sh}, z_t, Y_{шк}(z_t))_1 \\ Lk_{шк}(\Theta_{sh}, z_t)_2 + R_{sh} \cdot \bar{n}(\Theta_{sh}, \psi_{sh}, z_t, Y_{шк}(z_t))_2 \\ Lk_{шк}(\Theta_{sh}, z_t)_3 + R_{sh} \cdot \bar{n}(\Theta_{sh}, \psi_{sh}, z_t, Y_{шк}(z_t))_3 \end{pmatrix};$$

$$Sh(\Theta_{sh}, R_{sh}, z_t) = P(0, y_{sh}, x_{sh}) \cdot R_{шк}(\Theta_{sh}, R_{sh}, z_t).$$

Расчет системы модульных уравнений проводим итерационным методом, поэтому изначально задаются приближенные значения неизвестных компонент. Суть решения – сначала задается координата Z расположения поперечного сечения, потом находятся расстояния построения эквидистантных поверхностей к инструментам, при которых точка пересечения этих поверхностей находится в заданном сечении.

Результаты данного расчета заносим в матрицы координат траектории движения оси заготовки M_{knz} , M_{kcz} , M_{kkz} в начальном, центральном та конечном поперечных сечениях для их дальнейшего графического изображения. Первый столбец матрицы отвечает положению пересечения эквидистант по координате X, мм, второй столбец – по координате Y, мм, третий столбец – по координате Z, мм.

Для примера рассмотрим центральное сечение при $z = 60$ мм при расположении шлифовального круга на расстоянии $-R_{det}(z_t) - 0,3663$ мм.

$$\text{Given } R_n = -R_{datal}; R_{sh} = -R_{det}(z_t); z_t = 60;$$

$$Vk(\Theta_{ved}, R_{vk}, z_T)_1 = Sh(\Theta_{sh}, R_{sh}, z_t)_1;$$

$$Vk(\Theta_{ved}, R_{vk}, z_T)_2 = Sh(\Theta_{sh}, R_{sh}, z_t)_2;$$

$$Vk(\Theta_{ved}, R_{vk}, z_T)_3 = Sh(\Theta_{sh}, R_{sh}, z_t)_3;$$

$$Vk(\Theta_{ved}, R_{vk}, z_T)_1 = Noz(y, R_n, z_t)_1;$$

$$\begin{aligned}
& \text{Vk}(\Theta_{\text{ved}}, R_{\text{vk}}, z_T)_2 = \text{Noz}(y, R_n, z_t)_2; \\
& \text{Vk}(\Theta_{\text{ved}}, R_{\text{vk}}, z_T)_3 = \text{Noz}(y, R_n, z_t)_3; \\
& \text{Sh}(\Theta_{\text{sh}}, R_{\text{sh}}, z_t)_1 = \text{Noz}(y, R_n, z_t)_1; \\
& \text{Sh}(\Theta_{\text{sh}}, R_{\text{sh}}, z_t)_2 = \text{Noz}(y, R_n, z_t)_2; \\
& \text{Sh}(\Theta_{\text{sh}}, R_{\text{sh}}, z_t)_3 = \text{Noz}(y, R_n, z_t)_3; \\
& \text{rez} = \text{Find}(R_{\text{vk}}, R_{\text{sh}}, R_n, \Theta_{\text{ved}}, \Theta_{\text{sh}}, y, z_t, z_T); \\
& \text{rez}^T = (-35.17 \quad -30.73 \quad -35.3 \quad -0.0056 \quad 0 \quad 0 \quad 60 \quad 60.4); \\
& \text{Vk}(\text{rez}_4, \text{rez}_1, \text{rez}_8)^T = (0 \quad 0 \quad 60 \quad 1); \\
& \text{Sh}(\text{rez}_5, \text{rez}_2, \text{rez}_7)^T = (0 \quad 0 \quad 60 \quad 1); \\
& \text{Noz}(\text{rez}_6, \text{rez}_3, \text{rez}_7)^T = (0 \quad 0 \quad 60 \quad 1).
\end{aligned}$$

Матрицы координат траектории движения оси заготовки в крайних и центральном поперечных сечениях в процессе обработки составляются из результатов расчета, которые получают в расчетном блоке. Для нахождения матрицы M_{kcz} разница радиусов заготовки и детали (припуск) 0,3663 мм разбивается на n -количество частей (например на 7).

$$M_{\text{kcz}} = \begin{pmatrix} 0.000095 & -0.000008 & 0 \\ 0.0244 & -0.0521 & 0 \\ 0.048655 & -0.104143 & 0 \\ 0.072936 & -0.156217 & 0 \\ 0.097219 & -0.208289 & 0 \\ 0.121502 & -0.260365 & 0 \\ 0.145787 & -0.312444 & 0 \end{pmatrix};$$

$$M_{\text{kcz}} = \begin{pmatrix} 0.0573 & -0.0045 & 60 \\ 0.3658 & -0.7844 & 60 \\ 0.7323 & -1.57040 & 60 \\ 1.0986 & -2.35590 & 60 \\ 1.4656 & -3.14305 & 60 \\ 1.8334 & -3.14305 & 60 \\ 2.2015 & -3.93180 & 60 \end{pmatrix};$$

$$M_{kkz} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 120 \\ 0.0486 & -0.1041 & 120 \\ 0.0971 & -0.2083 & 120 \\ 0.1457 & -0.3124 & 120 \\ 0.1943 & -0.4166 & 120 \\ 0.2428 & -0.5208 & 120 \\ 0.2914 & -0.6250 & 120 \end{pmatrix}.$$

Блок подготовки данных для графического изображения координат траекторий движения центров заготовки

Начальное поперечное сечение

$$X_{nz} = \begin{cases} \text{for } i \in 1..\text{rows}(M_{knz}) \\ Mx_i \leftarrow M_{knz_{i,1}} \\ Mx \end{cases} ; \quad Y_{nz} = \begin{cases} \text{for } i \in 1..\text{rows}(M_{knz}) \\ My_i \leftarrow M_{knz_{i,2}} \\ My \end{cases} ;$$

$$Z_{nz} = \begin{cases} \text{for } i \in 1..\text{rows}(M_{knz}) \\ Mz_i \leftarrow M_{knz_{i,3}} \\ Mz \end{cases}.$$

Блоки для центрального и конечного поперечных сечений аналогичны.

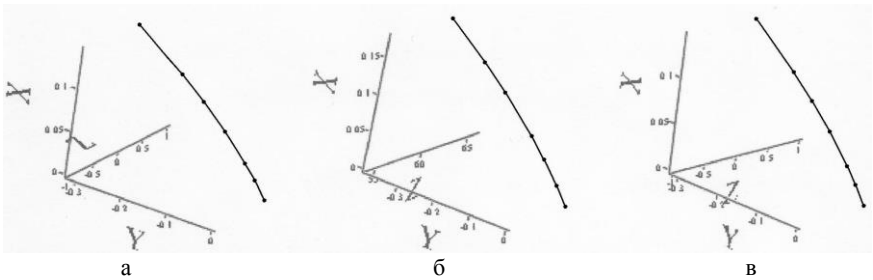


Рис. 9 – Графическая интерпретация траектории движения оси заготовки в процессе обработки

а) начальное б) центральное в) конечное поперечные сечения

На основании полученных координат траектории движения оси заготовки в процессе ее обработки (рис. 9) определяем углы скрещивания осей шлифовального круга и детали из выражений

$$\varphi = \left| \arctg \left(\frac{x_1 - x_2}{z_2 - z_1} \right) \right| ; \quad \psi = \left| \arctg \left(\frac{y_1 - y_2}{z_2 - z_1} \right) \right|,$$

где φ , ψ – углы поворота оси заготовки вокруг осей X, Y.

Расчет погрешности формообразования осуществляют по методике,

изложенной в работе [8]. Анализ расчета показывает, что точность бесцентрового врезного шлифования зависит от конструктивных параметров технологической системы (рис. 1) и погрешности заготовки. На основании анализа расчетов для каждой детали можно определить допусковые отклонения заготовки и, как следствие, углы скрещивания осей шлифовального круга и детали, которые обеспечивают получение требуемой точности формообразования поверхностей вращения с различной формой образующей.

Выводы

Разработаны модульные 3D модели процесса съема припуска и формообразования поверхностей с различной формой образующей при врезном бесцентровом шлифовании. Определены текущие координаты траектории движения оси вращения заготовки в процессе съема припуска и допусковые углы скрещивания осей детали и шлифовального круга в зависимости от конструктивных параметров технологической системы, требуемой точности формообразования и максимальных углов наклона касательных в крайних точках обрабатываемого профиля, например, торовой поверхности.

Список литературы: 1. *T. Hesz, C. Matson.* Centerless grinding machines with epoxy granite bases. Non-metallic machine tool structures 3RD biennial international machine tool technical conference, September 3-10, 1986. P. 439-460. 2. *Stout K.J., Sullivan P.J.* The development of methods for the characterization of roughness in three-dimensions. Interim report No/2 for EC Contract No 3374/1/0/170/90/2. The University of Birmingham I L'Ecole Centrale de Lyon, 1993. - 280. 3. *Кальченко В.И.* Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента// Диссертация докт.техн.наук. Харьков: ХГПУ.- 1994.- 329 с. 4. *Грабченко А.И., Кондусова Е.Б. и др.* 3D – моделирование инструментов, формообразования и съема припуска при обработке резанием.- Харьков, 2001, 302с. 5. *Кальченко В.В.* 3D моделирование обрабатываемых поверхностей при шлифовании со скрещивающимися осями круга и детали //Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць. НТУ „ХПІ”. – Харків, 2001. – Вип. 1 (4). С. 149-153. 6. *Равская Н.С., Родин П.Р.* Основы теории формообразования поверхностей при механической обработке //Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт», Машиностроение. - №33, 1998. – С. 74-82. 7. *Равская Н.С., Родин П.Р. та ін.* Основы формоутворення поверхонь при механічній обробці. Житомир: ЖПІ, 2000. – 232 с. 8. *Кальченко В.И., Кальченко В.В.* Модульное 3D моделирование обрабатываемых поверхностей при различном функциональном назначении скрещивания осей шлифовального круга и детали //Сучасні технології у машинобудуванні: Збірник наукових статей. За заг. ред. А.І. Грабченка – Харків: НТУ “ХПІ”, 2007 – с. 154 –166.

Поступила в редколлегию 15.06.08