

## РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ ШЛИФОВАНИЯ СО СКРЕЩИВАЮЩИМИСЯ ОСЯМИ ИНСТРУМЕНТА И ДЕТАЛИ

*Increase of efficiency of the polishing with the crossing axes of instrument and detail with a profile as the arc of circumference due to creation of new methods of abrasive treatment, which are based on the analysis of modules 3D models of polishing process, and also determination of terms and their rational application domains. General and special modules 3D models of formbuilding, profiling of instrument and removal of allowance are offered.*

В работе [1] предлагается проводить 3D моделирование абразивной обработки различных поверхностей деталей с использованием трехмерных геометрических моделей, которые представляют собой произведения унифицированных модулей: прямоугольного, цилиндрического и сферического. Моделирование процесса формообразования деталей с круговым профилем упрощается при переводе цилиндрического модуля в сферический. В этом случае поверхность вращения с профилем в виде дуги окружности описывается радиусом и двумя независимыми угловыми параметрами. Описание поверхности в виде дуги окружности сферическими модулями позволяет упростить интегрирование, поскольку профиль такой поверхности можно задать в виде функциональной зависимости, а не в виде набора координат точек. При использовании сферических модулей остальные параметры модели являются функциями от независимых параметров или преобразуются в константы. Использование моделей третьего уровня иерархии [1], которые являются произведением трех сферических модулей, наиболее рационально для моделирования шлифования поверхностей с профилем в виде дуги окружности.

Целью данной работы является трехмерное геометрическое моделирование процесса формообразования поверхностей с профилем в виде дуги окружности с помощью модульных сферических моделей.

Для разработки общей модели необходимо решить прямую задачу теории формообразования [2]. Для чего нам необходимо математически описать поверхность комплексной детали, которая представляет общий

случай всех возможных поверхностей. Поверхность детали описывается через сферический модуль. Сферичность модуля обуславливается наличием двух независимых угловых параметров:  $\theta_\delta$  – угол поворота вокруг оси  $O_\delta Z_\delta$  вращения детали (рис. 1), который описывает вращение детали, и  $\varphi_\delta$  – угловой координаты кругового профиля, которая может принимать положительное или отрицательное значение в зависимости от расположения начальной точки относительно осевой плоскости профиля. Все остальные параметры модели находятся в функциональной зависимости от этих двух параметров. Таким образом, общая 3D модель номинальной поверхности комплексной детали имеет вид:

$$\bar{r}_\delta = S_{z_\delta \cdot \theta_\delta \cdot y_\delta \cdot \varphi_\delta \cdot y_n}^\delta \cdot \bar{e}^4, \quad (1)$$

где:  $\bar{r}_\delta$  – радиус-вектор точек поверхности комплексной детали;  $S_{z_\delta \cdot \theta_\delta \cdot y_\delta \cdot \varphi_\delta \cdot y_n}^\delta$  – сферический модуль, представляющий собой матрицу перехода от начальной точки в систему координат детали;  $e_4 = (0,0,0,1)^T$  – радиус-вектор начальной точки [3].

Сферический модуль, описывающий деталь, состоит из однокоординатных матриц [3]:

$$S_{z_\delta \cdot \theta_\delta \cdot y_\delta \cdot \varphi_\delta \cdot y_n}^\delta = M_3(z_\delta) \cdot M_6(\theta_\delta) \cdot M_2(y_\delta) \cdot M_4(\varphi_\delta) \cdot M_2(y_n), \quad (2)$$

где:  $z_\delta$  – осевая координата смещения профиля, которая обеспечивает винтовую поверхность;  $y_\delta = R_\delta$  – координата, описывающая расстояние от центра профиля до оси вращения детали;  $y_n = \rho_\delta$  – координата, описывающая радиус профиля детали.

Таким образом, матрицы [3], составляющие модуль имеют следующий геометрический смысл:

$$M_2(y_n) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \pm \rho_\delta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ — матрица перемещения точки вдоль}$$

оси  $O_\delta Y_\delta$ . Поскольку предполагается, что радиус кривизны профиля комплексной детали изменяется в зависимости от осевой координаты  $z_\delta$ , которая в свое время находится в функциональной зависимости от угла поворота  $\theta_\delta$ , то параметр  $y$  матрицы  $M_2$  является функцией от  $\theta_\delta$ :

$y_n = \rho_\theta(\theta_\theta)$ . В частном случае, когда радиус профиля детали не изменяется, параметр матрицы преобразуется в константу. Знак «±» указывает на то, что радиус может задаваться в разных направлениях относительно оси  $O_\theta Y_\theta$ .

Знак «+» указывает на вогнутый внешний или выпуклый внутренний профиль, а «-» — на выпуклый внешний или внутренний вогнутый профили (рис. 1).

$$M_4(\pm\varphi_\theta) = \begin{pmatrix} \cos \varphi_\theta & 0 & \sin \varphi_\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_\theta & 0 & \cos \varphi_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ — матрица обобщенных}$$

поворотов точки относительно оси  $O_\theta X_\theta$ . Диапазон изменения параметра лежит в пределах центрального угла  $\xi$ .

Положительные или отрицательные значения параметров  $\rho_\theta$  и  $\varphi_\theta$  устанавливаются в зависимости от направления осей выбранной системы координат. На рисунке 1 показаны направления осей системы координат и соответствующие знаки параметров  $\rho_\theta$  и  $\varphi_\theta$  для различных поверхностей с круговым профилем. Так, например, для описания вогнутого внешнего профиля канавки внутреннего кольца подшипника  $\rho_\theta$  и  $\varphi_\theta$  принимают положительные значения (рис. 1, а), а для выпуклого внешнего профиля шкива ременной передачи — отрицательные (рис. 1, б). На рисунке 1, а-г) показаны поверхности с центральным углом профиля  $\xi=180^\circ$ . На рисунке 1, д) изображен общий случай вогнутой внешней поверхности, для которой центральный угол не равен  $180^\circ$ .

$$M_2(y_\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & R_\theta \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ — матрица перемещения точки вдоль оси}$$

$O_\theta Y_\theta$ , которая устанавливает координату центра профиля детали. Для комплексной детали данный параметр, аналогично  $y_n$ , является функцией от угла поворота  $\theta_\theta$  и преобразуется в постоянное значение  $R_\theta$  для цилиндрических деталей.

$$M_6(\theta_\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta_\theta & -\sin \theta_\theta & 0 & 0 \\ \sin \theta_\theta & \cos \theta_\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ — матрица обобщенных}$$

поворотов относительно оси  $O_\theta Z_\theta$  вращения детали.

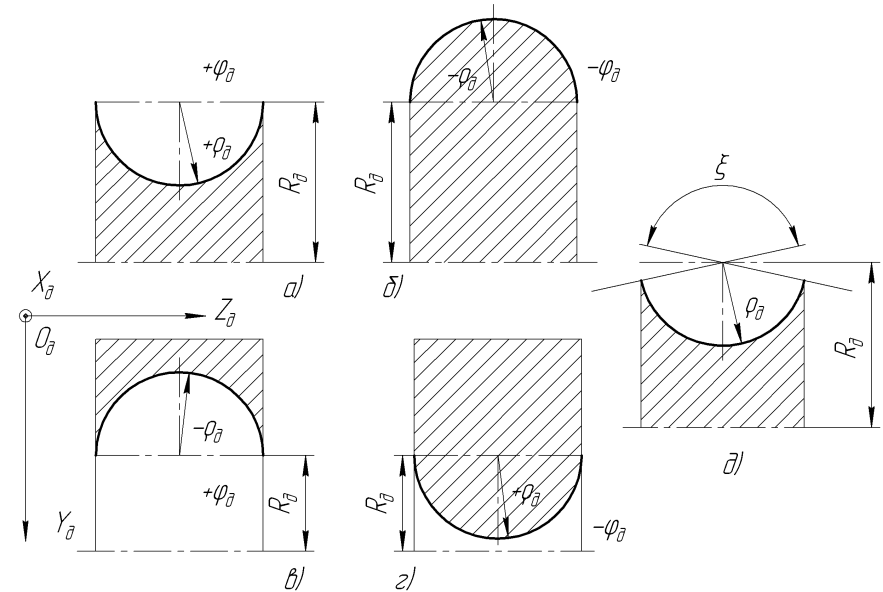


Рис. 1 — Определение вида профиля детали

$$M_3(z_\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_\theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ — матрица осевого смещения профиля.}$$

Вращая профиль детали вокруг ее оси вращения с угловой координатой  $\theta_\theta$  и сообщая ему, осевое смещение с координатой  $z_\theta$ , мы окончательно формируем поверхность детали. Осевая координата винтовой поверхности  $z_\theta$  является функцией от угла поворота детали:

$$z_{\delta} = \theta_{\delta} \cdot p, \quad (3)$$

где:  $p = \frac{S}{2\pi}$  – параметр винтового движения,  $S$  – шаг винтовой поверхности.

Модель (1) является общей и описывает все возможные поверхности деталей с круговым профилем. Принимая в качестве константы некоторые параметры модели, можно описать поверхности конкретных деталей. Рассмотрим возможные специальные модели, которые можно получить из общей модели.

1. Винтовая поверхность с профилем в виде дуги окружности. Винтовая поверхность характеризуется зависимостью угловой координаты винта  $z_{\delta}$  от угла поворота детали  $\theta_{\delta}$ , постоянством расстояния  $R_{\delta}$  от центра профиля до оси вращения детали и радиуса профиля детали  $\rho_{\delta}$ . Таким образом, радиус-вектор точек винтовой поверхности, исходя из общей модели (1) и модуля детали (2) будет иметь вид:

$$\bar{r}_{\delta} = S_{z_{\delta} \cdot \theta_{\delta} \cdot R_{\delta} \cdot \varphi_{\delta} \cdot \rho_{\delta}}^{\delta} \cdot \bar{e}^4, \quad (4)$$

$$S_{z_{\delta} \cdot \theta_{\delta} \cdot R_{\delta} \cdot \varphi_{\delta} \cdot \rho_{\delta}}^{\delta} = M_3(z_{\delta}(\theta_{\delta})) M_6(\theta_{\delta}) \cdot M_2(R_{\delta}) \cdot M_4(\varphi_{\delta}) \cdot M_2(\pm \rho_{\delta}). \quad (5)$$

Значение  $\rho_{\delta}$  может принимать положительное и отрицательное значения; положительное значение указывает на внешнюю вогнутую винтовую поверхность, а отрицательное — внутреннюю вогнутую винтовую поверхность. Модель (4) может описывать, например, винтовые поверхности винта и гайки шарико-винтовых передач.

2. Поверхность вращения с переменным круговым профилем по углу поворота детали. Такая поверхность характеризуется отсутствием угловой координаты винта  $z_{\delta}$  и постоянством расстояния  $R_{\delta}$  от центра профиля до оси вращения детали. Таким образом, радиус-вектор точек поверхности вращения с переменным круговым профилем, исходя из общей модели (1) и модуля детали (2) будет иметь вид:

$$\bar{r}_{\delta} = S_{\theta_{\delta} \cdot R_{\delta} \cdot \varphi_{\delta} \cdot y_n}^{\delta} \cdot \bar{e}^4, \quad (6)$$

$$S_{\theta_{\delta} \cdot R_{\delta} \cdot \varphi_{\delta} \cdot y_n}^{\delta} = M_6(\theta_{\delta}) \cdot M_2(R_{\delta}) \cdot M_4(\varphi_{\delta}) \cdot M_2(y_n). \quad (7)$$

Модель (6) может описывать, например, рабочую поверхность трубопрокатных валков для изготовления бесшовных труб. Для таких валков, параметры матриц  $y_n$  и  $\varphi_{\delta}$  на обжимном участке являются функциями от

независимого параметра  $\theta_{\delta}$ . На калибрующем участке, где профиль становится неизменным, они преобразуются в константы.

3. Вогнутая торговая поверхность. Такая поверхность характеризуется отсутствием угловой координаты винта  $z_{\delta}$ , постоянством расстояния  $R_{\delta}$  от центра профиля до оси вращения детали и радиуса профиля торговой поверхности  $\rho_{\delta}$ . Таким образом, радиус-вектор точек тела вращения с вогнутой торговой поверхностью, исходя из общей модели (1) и модуля детали (2) будет иметь вид:

$$\bar{r}_{\delta} = S_{\theta_{\delta} \cdot R_{\delta} \cdot \varphi_{\delta} \cdot \rho_{\delta}}^{\delta} \cdot \bar{e}^4, \quad (8)$$

$$S_{\theta_{\delta} \cdot R_{\delta} \cdot \varphi_{\delta} \cdot \rho_{\delta}}^{\delta} = M_6(\theta_{\delta}) \cdot M_2(R_{\delta}) \cdot M_4(\varphi_{\delta}) \cdot M_2(\pm \rho_{\delta}). \quad (9)$$

Значение  $\rho_{\delta}$  может принимать положительное и отрицательное значения. Положительное значение указывает на внешнюю вогнутую торговую поверхность, а отрицательное — на внутреннюю. Модель (8) может описывать, например, канавки внутреннего и внешнего колец подшипников.

4. Выпуклая торговая поверхность. Такая поверхность характеризуется отсутствием угловой координаты винта  $z_{\delta}$ , постоянством расстояния  $R_{\delta}$  от центра профиля до оси вращения детали и радиуса профиля торговой поверхности  $\rho_{\delta}$ . Таким образом, радиус-вектор точек тела вращения с выпуклой торговой поверхностью, исходя из общей модели (1) и модуля детали (2) будет иметь вид:

$$\bar{r}_{\delta} = S_{\theta_{\delta} \cdot R_{\delta} \cdot \varphi_{\delta} \cdot \rho_{\delta}}^{\delta} \cdot \bar{e}^4, \quad (10)$$

$$S_{\theta_{\delta} \cdot R_{\delta} \cdot \varphi_{\delta} \cdot \rho_{\delta}}^{\delta} = M_6(\theta_{\delta}) \cdot M_2(R_{\delta}) \cdot M_4(-\varphi_{\delta}) \cdot M_2(-\rho_{\delta}). \quad (11)$$

Согласно рисунку 1, значение  $\varphi_{\delta}$  и  $\rho_{\delta}$  для внешней выпуклой торговой поверхности принимает отрицательные значения. Модель (10) может описывать, например, поверхности натяжных роликов и шкивов ременных передач.

После математического описания номинальной поверхности детали необходимо представить модульные 3D модели теоретических инструментальных поверхностей. Независимо от того, какой моделью описывается номинальная поверхность детали, радиус-вектор инструмента в модульном виде описывается матрицей перехода, исходя из формы детали

$$\bar{r}_u = M_{u\delta} \cdot \bar{r}_{\delta}, \quad (12)$$

где:  $M_{u\delta}$  – матрица перехода из системы координат детали в систему координат инструмента. Эта матрица представляет формообразующую систему станка.

Матрица перехода (12) представляет собой произведение двух сферических модулей

$$M_{u\delta} = S_{\theta_u \cdot y_c}^{\phi_u} \cdot S_{\psi_u}^o, \quad (13)$$

где:  $S_{\theta_u \cdot y_c}^{\phi_u}$  – модуль формообразования инструмента;  $S_{\psi_u}^o$  – модуль угловой ориентации инструмента относительно детали.

Модуль формообразования (13) состоит из произведения двух матриц

$$S_{\theta_u \cdot y_c}^{\phi_u} = M_6(\theta_u) \cdot M_2(y_c), \quad (14)$$

где:  $\theta_u$  – угол поворота системы координат детали относительно оси вращения инструмента;  $y_c$  – расстояние между осями вращения инструмента и детали.

Модуль ориентации (13) представлен матрицей относительных поворотов

$$S_{\psi_u}^o = M_5(\psi_u), \quad (15)$$

где  $\psi_u$  – угол наклона круга.

Абразивный инструмент правится по константной поверхности, поэтому в модуле (15) используется только один переменный параметр – угол наклона круга  $\psi_u$ .

Для профилирования инструмента необходимо составить уравнение, которое определяет линию контакта

$$\bar{V}_{u\delta} \cdot \bar{n}_\delta = 0, \quad (16)$$

где:  $\bar{n}_\delta$  – единичный вектор нормали к поверхности детали;  $\bar{V}_{u\delta}$  – вектор скорости относительного движения этой поверхности в системе координат инструмента.

Нормаль, как известно, может быть найдена как векторное произведение векторов касательных к поверхности. Для нахождения нормали необходимо дифференцировать радиус-вектор поверхности детали по обоим параметрам.

При однопараметрическом огибании [3] связь между параметрами  $\varphi_\delta$  и  $\theta_\delta$  имеет вид равенства нулю смешанного произведения трёх векторов частных производных вектора  $\bar{r}_u$ .

$$\left( \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \varphi_\delta} \times \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta_\delta} \right) \cdot \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_\delta} = 0, \quad (17)$$

где:  $\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \varphi_\delta} \times \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta_\delta} = \bar{n}_\delta$  – вектор нормали к поверхности детали в точке с

криволинейными координатами  $\varphi_\delta$ ,  $\theta_\delta$ ;  $\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_\delta} = \bar{V}_{u\delta}$  – вектор скорости

относительного движения детали относительно круга;  $\tau_\delta$  – время перемещения детали, при повороте её на угол  $\theta_u$  в инверсионном движении относительно оси  $O_u Z_u$  круга.

Скорость движения детали (17) относительно круга определяется через матрицу перехода из системы координат детали в систему координат инструмента

$$\frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \tau_\delta} = \frac{\partial M_6(\theta_u)}{\partial \theta_u} \cdot \frac{\partial \theta_u}{\partial \tau_\delta} \cdot M_{u\delta}, \quad (18)$$

где  $\frac{\partial \theta_u}{\partial \tau_\delta} = \varpi_{u\delta}$  – угловая скорость поворота детали относительно оси

круга.

Скалярное произведение векторов  $\bar{n}_\delta$  и  $\bar{V}_{u\delta}$  находим, вычислив определитель

$$\bar{V}_{u\delta} \cdot \bar{n}_\delta = \begin{vmatrix} X_{V_{u\delta}} & Y_{V_{u\delta}} & Z_{V_{u\delta}} \\ X_{\varphi_\delta} & Y_{\varphi_\delta} & Z_{\varphi_\delta} \\ X_{\theta_\delta} & Y_{\theta_\delta} & Z_{\theta_\delta} \end{vmatrix} = 0, \quad (19)$$

где:  $X_{V_{u\delta}} Y_{V_{u\delta}} Z_{V_{u\delta}}$  – координаты вектора  $\bar{V}_{u\delta}$ ;  $X_{\varphi_\delta} Y_{\varphi_\delta} Z_{\varphi_\delta}$  –

координаты вектора касательной  $\bar{A}_\delta = \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \varphi_\delta}$ ;  $X_{\theta_\delta} Y_{\theta_\delta} Z_{\theta_\delta}$  – координаты

вектора касательной  $\bar{B}_\delta = \frac{\partial \bar{r}_u}{\partial \theta_\delta}$ .

Радиус-вектор  $\bar{r}_u$  описывает множество инструментальных поверхностей. Выбор рациональной осуществляют на основании анализа

геометрических параметров наружной поверхности детали, заготовки и снимаемого припуска  $\delta$ . От этих же параметров зависит и ориентация инструмента относительно обрабатываемой детали. Начальный угол скрещивания выбирается таким образом, чтобы радиус профиля круга  $\rho_u$  был меньше радиуса профиля заготовки  $\rho_s$ . Последний может быть определен исходя из радиуса профиля детали  $\rho_d$ , путем учета величины припуска  $\delta$ . Такой подход в определении радиуса профиля заготовки оправдан тем, что при шлифовании со скрещенными осями инструмента и детали с круговым профилем припуск снимается по эквидистантным кривым.

Перед абразивной обработкой детали производится правка круга. При правке круга в качестве инструмента выступают алмазный карандаш или ролик, а абразивный круг выступает в роли детали. В профилировании абразивного круга *И* принимает участие алмазный инструмент *Иа* и формообразующая система станка *ФСИ* (рис. 2) [1].



Рис. 2 — Структура формообразующей системы станка при профилировании круга

Радиус-вектор круга описывается сферическим модулем, который подобен аналогичному модулю детали (1), но со своими параметрами

$$\bar{r}_u = S_{\theta_u \cdot y_u \cdot \varphi_u \cdot y_n}^u \cdot \bar{e}^4, \quad (20)$$

$$S_{\theta_u \cdot y_u \cdot \varphi_u \cdot y_n}^u = M_6(\theta_u) \cdot M_2(y_u) \cdot M_4(\varphi_u) \cdot M_2(y_n), \quad (21)$$

где:  $\bar{r}_u$  – радиус-вектор точек поверхности инструмента;  $S_{\theta_u \cdot y_u \cdot \varphi_u \cdot y_n}^u$  – сферический модуль, представляющий собой матрицу перехода от начальной точки в систему координат инструмента;  $\theta_u$  – угол поворота вокруг оси  $O_u Z_u$  вращения инструмента;  $y_u=R_u$  – расстояние от центра профиля инструмента до его оси вращения;  $\varphi_u$  – угол поворота вокруг оси  $O_u Y_u$ ;  $y_n=\rho_u$  – радиус профиля круга.

При шлифовании со скрещивающимися осями правка круга может производиться алмазным карандашом (рис. 3) или алмазным роликом [1].

Перед правкой моделируется профиль инструментальной поверхности (12), по которой изготавливается алмазный ролик или определяются координаты траектории движения алмазного карандаша. Правка алмазным роликом является наиболее точной, поскольку форма ролика полностью соответствует форме обрабатываемой детали. Но такой способ правки

является дорогостоящим и оправдывает себя только в условиях массового производства. Использование алмазного карандаша упрощает правку, особенно при обработке деталей, не требующих высокой точности. Если профиль детали требует более точной правки, уточнение профиля круга может осуществляться путем смещения правящего алмазного карандаша в вертикальном направлении на величину  $h$  и ориентацией его относительно горизонтальной плоскости (рис. 3). Еще более высокую точность правки можно достичь при обработке круга на станке с ЧПУ, где вершина карандаша будет двигаться по траектории, которая повторяет линию контакта круга и детали в момент формообразования поверхности детали.

При такой правке круга радиус-вектор инструмента описывается двумя сферическими модулями

$$\bar{r}_u = S_{\psi_u \cdot h}^o \cdot S_{\theta_u \cdot R_u \cdot \varphi_u \cdot R_p}^{\phi_u} \cdot \bar{e}^4, \quad (22)$$

$$S_{\psi_u \cdot h}^o = M_5(\psi_u) \cdot M_1(h), \quad (23)$$

$$S_{\theta_u \cdot R_u \cdot \varphi_u \cdot R_p}^{\phi_u} = M_6(\theta_u) \cdot M_2(R_u) \cdot M_4(\varphi_u) \cdot M_2(R_p). \quad (24)$$

Радиус-вектор  $\bar{r}_u$ , полученный по модульной модели (2.22) описывает множество инструментальных поверхностей. Выбор рациональной поверхности круга производится из общей 3D модели поверхности инструмента при шлифовании со скрещивающимися осями.

Анализ модели (22) показывает, что при формообразовании геометрическая погрешность формы детали равна нулю, когда углы скрещивания инструмента при правке и формообразовании поверхности детали совпадают.

Общая модель поверхности комплексной детали описывается тремя сферическими модулями через радиус-вектор инструментальной поверхности:

$$\bar{r}_{du} = S_{z_d \cdot \theta_d \cdot y}^{\phi} \cdot S_{\varphi_u \cdot \psi_u \cdot x_u}^o \cdot \bar{r}_u, \quad (25)$$

где:  $S_{z_d \cdot \theta_d \cdot y}^{\phi} = M_3(z_d) \cdot M_6(\theta_d) \cdot M_2(y)$  – модуль формообразования детали;  $\theta_d$  – угол поворота системы координат инструмента относительно оси вращения детали;  $y$  – текущая координата межосевого расстояния инструмента и детали;  $y_c$  – расстояние между осями круга и детали в положении окончательного формирования поверхности детали;  $S_{\varphi_u \cdot \psi_u \cdot x_u}^o = M_4(\varphi_u) \cdot M_5(\pm\psi_u) \cdot M_1(x_u)$  – модуль угловой ориентации инструмента относительно детали.

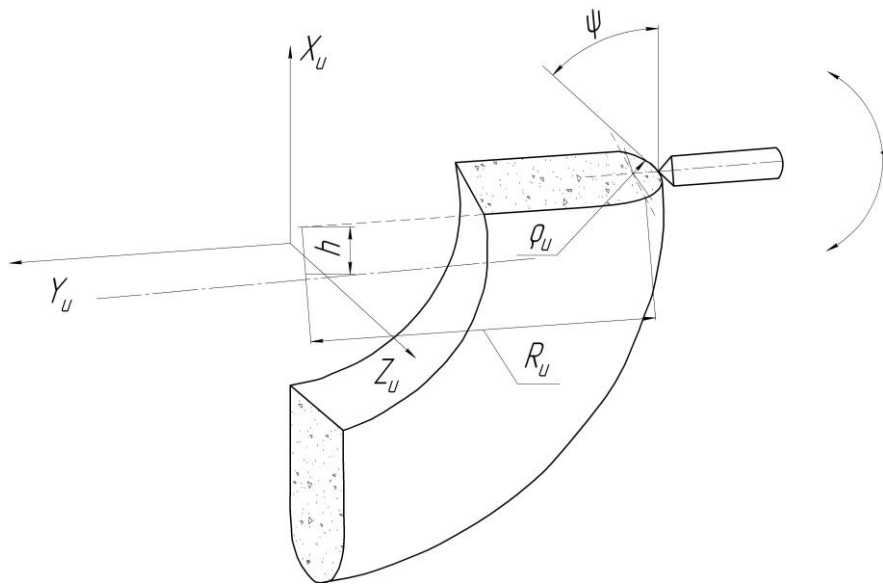


Рис. 3 — Правка круга алмазным карандашом

На основе анализа общей модели (25) можно получить специальные модели, которые описывают обработанные поверхности различных деталей.

Например, радиус-вектор винтовой поверхности детали описывается тремя сферическими модулями:

$$\bar{r}_{\partial u} = S_{z_{\partial} \cdot \theta_{\partial} \cdot y}^{\phi} \cdot S_{\psi_u}^o \cdot \bar{r}_u, \quad (26)$$

где:  $S_{z_{\partial} \cdot \theta_{\partial} \cdot y}^{\phi} = M_3(z_{\partial}) \cdot M_6(\theta_{\partial}) \cdot M_2(-y_c - t \cdot k)$  – модуль формообразования детали;  $y = -y_c - t \cdot k$  – текущая координата межосевого расстояния инструмента и детали;  $y_c$  – расстояние между осями круга и детали в положении окончательного формирования поверхности детали,  $t$  – величина поперечной подачи круга в направлении, перпендикулярном оси  $O_{\partial}Z_{\partial}$  вращения детали, на один ее оборот;  $k$  – количество рабочих ходов, необходимых для съема припуска  $\delta$ ;  $S_{\psi_u}^o = M_5(\pm \psi_u)$  – модуль угловой ориентации инструмента относительно детали.

## ВЫВОДЫ

1. Общая трехмерная модель номинальной поверхности комплексной

детали с профилем в виде дуги окружности, в виде сферического модуля с линейным параметром  $\rho_{\partial}$  и двумя угловыми параметрами  $\theta_{\partial}$  и  $\varphi_{\partial}$ , является основой для разработки частных моделей поверхностей деталей с кольцевым желобом постоянного и переменного профиля, винтовых поверхностей с профилем в виде дуги окружности и торových поверхностей.

2. Представленная 3D модель номинальной поверхности детали дала возможность разработать общую трехмерную модель профилирования инструмента. Матрица перехода из системы координат детали в систему координат инструмента, представляющая формообразующую систему станка при правке круга, состоит из двух сферических модулей: формообразования и ориентации. Разработанная методика профилирования круга позволяет править поверхность инструмента алмазным роликом или алмазным карандашом. Смещение карандаша в вертикальном направлении и дополнительная его угловая ориентация позволяют уменьшить погрешность правки инструмента.

3. Предложена общая трехмерная модульная модель обработанной поверхности комплексной детали с профилем в виде дуги окружности, состоящая из двух сферических модулей: формообразования поверхности детали и ориентации инструмента. На основе анализа общей модели разработаны специальные модели формообразования поверхностей с профилем в виде дуги окружности.

**Список литературы:** 1. Кальченко В.В. Наукові основи ефективного шліфування зі схрещеними осями абразивного інструменту та деталі // Дисертація докт. тех. наук. Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – 489 с. 2. Равська Н.С. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці / Н.С. Равская, П.Р. Родин, П.П. Мельничук, Т.П. Ніколенко. - Житомир, 2000. – 163с. 3. Портман В. Т., Решетов Д. Н. Точность металлорежущих станков. – М., 1986. – 320 с. 4. Кальченко В.В. Модульне 3D моделювання шліфування зовнішніх торových поверхонь со схрещиваючимися осями круга і деталі / Кальченко В.В., Єрошенко А.М. // Учнієні записки Кримського інженерно-педагогічного університету. – Симферополь, 2008. – Вып. 16. – С. 26-29. 5. Кальченко В.В. Шліфування методом копіювання кільцевого жолоба змінного профілю зі схрещеними осями інструмента і деталі / Кальченко В.В., Єрошенко А.М. // Вісник Тернопільського держ. технічн. ун-ту. Науковий журнал. – Тернопіль, 2008. – Том. 13, №4. – С. 94-99. 6. Кальченко В.В. Модульне 3D моделювання зняття припуску і формоутворення внутрішніх канавок шарошок бурових доліт зі схрещеними осями інструмента і деталі / Кальченко В.В., Єрошенко А.М. // Нафтогазова енергетика. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – №9. – С. 63-67. 7. Кальченко В.В. Шліфування методом послідовального копіювання кільцевого жолоба змінного профілю трубопрокатних валков орієнтованим інструментом / Кальченко В.В., Єрошенко А.М. // Динаміка, надійність і довговічність механічних і біомеханічних систем та елементів їхніх конструкцій: матер. міжнародн. науковотехн. конф., (2-5 вересня 2008 р. Севастополь) - Севастополь: СевНТУ, 2008. – С. 436-447.

Поступила в редколлегию 26.06.09