

МОДУЛЬНЕ 3D МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ СИСТЕМ ШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ, ІНСТРУМЕНТІВ ТА ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ

Вперше запропоновано модульне 3D моделювання формуючих систем шліфувальних верстатів, інструментів та оброблюваних поверхонь на базі трьох уніфікованих модулів. Використовуючи системний підхід, розроблена ієрархія загальних моделей формуючих систем верстатів та нові способи шліфування поверхонь з перехрещеними осями інструментів та деталей.

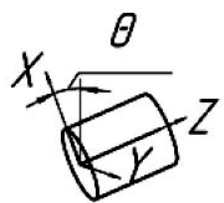
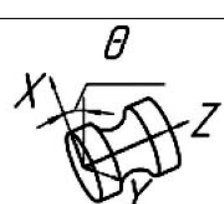
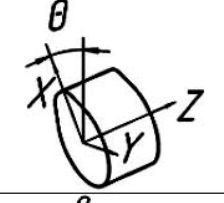
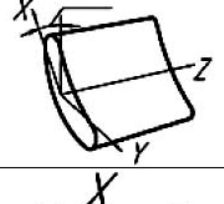
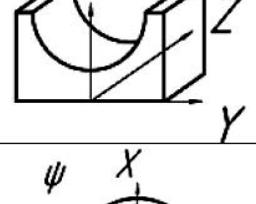
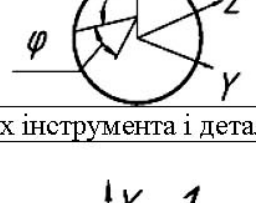
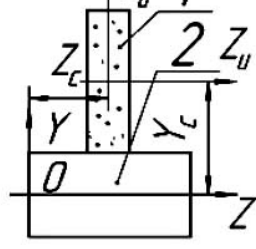
У країнах з розвиненим машинобудуванням наявна тенденція розвитку тривимірного (3D) геометричного моделювання. Однак існуючі 3D моделі недостатньо враховують специфічні особливості абразивного інструменту, точність формоутворення та зняття припуску при шліфуванні поверхонь. У сучасних умовах, коли вітчизняне машинобудування намагається стати конкурентноспроможним, гнучким та високоефективним, ця проблема набуває народногосподарського значення.

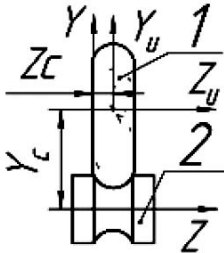
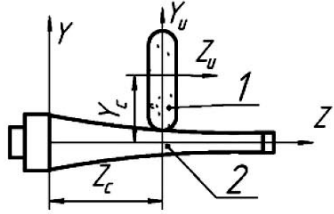
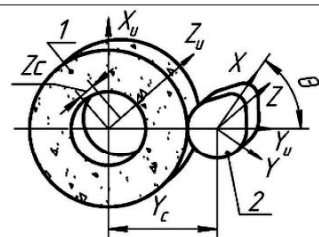
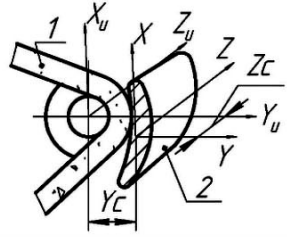
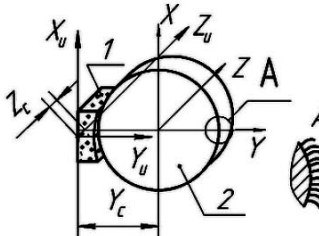
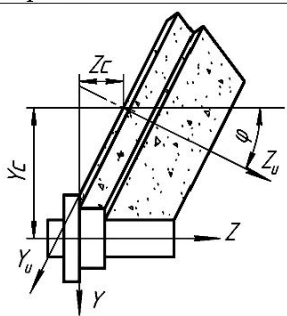
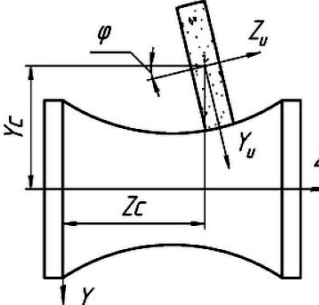
У роботах [1, 2, 3] наведені 3D геометричні моделі формоутворення поверхонь і проектування інструментів при обробленні різанням без розгляду задач зняття припуску. Вперше в роботі [4] розроблені 3D модель процесу зняття припуску і наукове положення про роль плями контакту та її параметрів на продуктивність при шліфуванні, що підтверджене в монографії [6]. Потім у роботах [5, 6] розглянуто 3D моделювання інструментів, формоутворення поверхонь і зняття припуску при обробленні лезовими інструментами. У розглянутих роботах наведені схеми формоутворення, коли один різальний інструмент оброблює одну поверхню на одній зафіксованій деталі. 3D моделі зняття припуску та формоутворення при груповому обробленні деталей, коли одним інструментом одночасно оброблюється декілька деталей, а також при безцентровому шліфуванні, де базування виконується по оброблюваній поверхні деталі і постійно змінюється, не наведені.

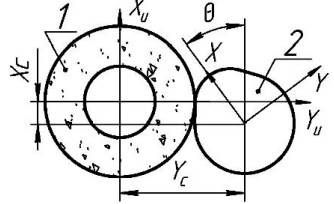
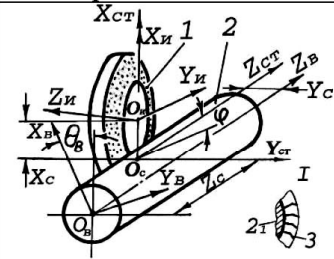
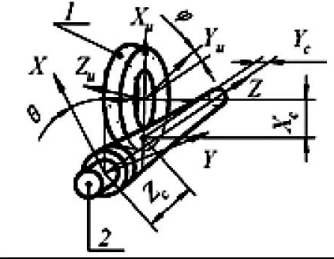
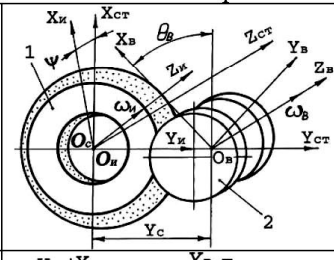
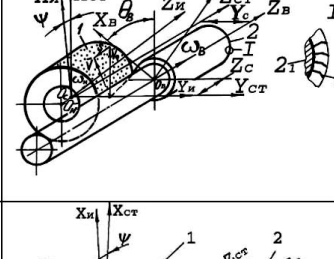
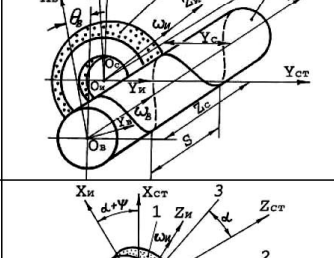
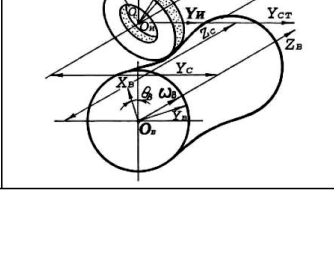
У роботі [7] вперше розроблена загальна тривимірна (3D) геометрична модель процесу зняття припуску і формоутворення оброблюваних поверхонь при шліфуванні з перехрещеними осями кругів та деталей. Кінематична схема формоутворення поверхонь, яка заснована на об'єднанні обертів інструменту та деталі навколо перехрещених осей, є найбільш загальною [1, 2]. Усі інші схеми – це її часткові випадки. Запропонована [7] загальна 3D модель – це добуток однокоординатних матриць [8], які відображають перетворення систем координат вздовж та навколо координатних осей. На базі загальної одержані часткові 3D моделі різноманітних оброблюваних поверхонь шляхом виключення тих або інших матриць з вихідної 3D моделі. Це дало можливість за однією програмою розраховувати зняття припуску та формоутворення сферичних, торцевих криволінійних, гвинтових, торових, гіперболоїдів обертання, циліндричних, конічних та інших поверхонь [7]. Були також розроблені загальні (3D) моделі формуючих систем верстатів [9] та поверхонь кругів [10], при шліфуванні з перехрещеними осями інструментів та деталей, з яких часткові 3D моделі отримують також виключенням матриць з вихідних 3D моделей. Потім, на базі математичного апарату багатопараметричних відображень простору для схем формоутворення при перехрещених осях інструмента та деталі, були розроблені вихідні 3D моделі, з яких часткові моделі отримують виключенням операторів або матриць [11, 12].

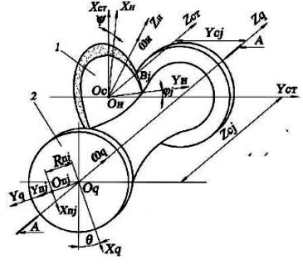
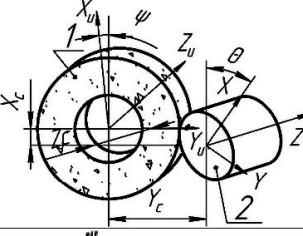
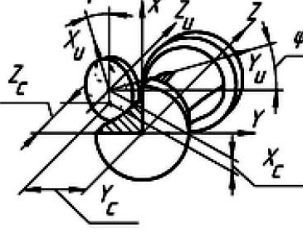
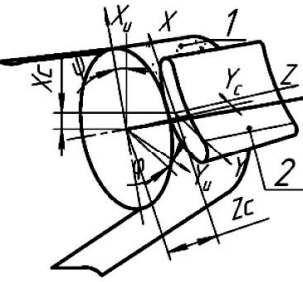
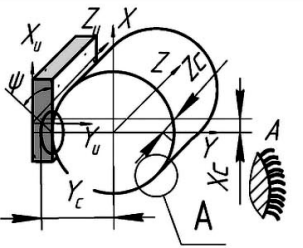
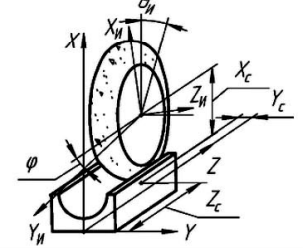
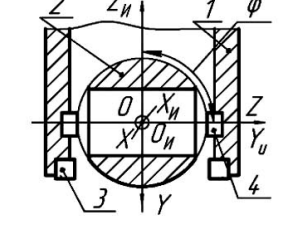
У фундаментальній роботі [8] за точністю металорізальних верстатів розроблені часткові 3D моделі формуючих систем різноманітних верстатів, але загальних 3D моделей не наведено.

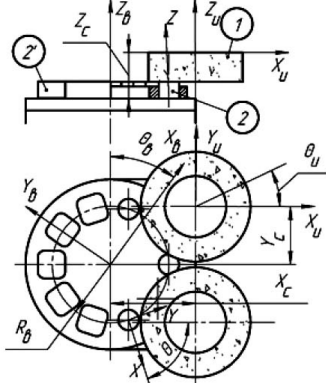
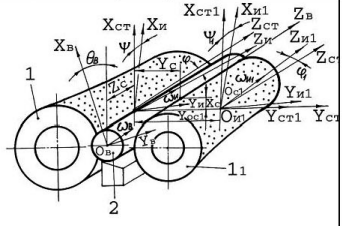
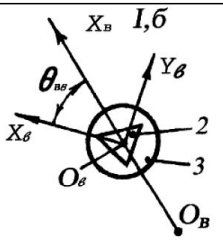
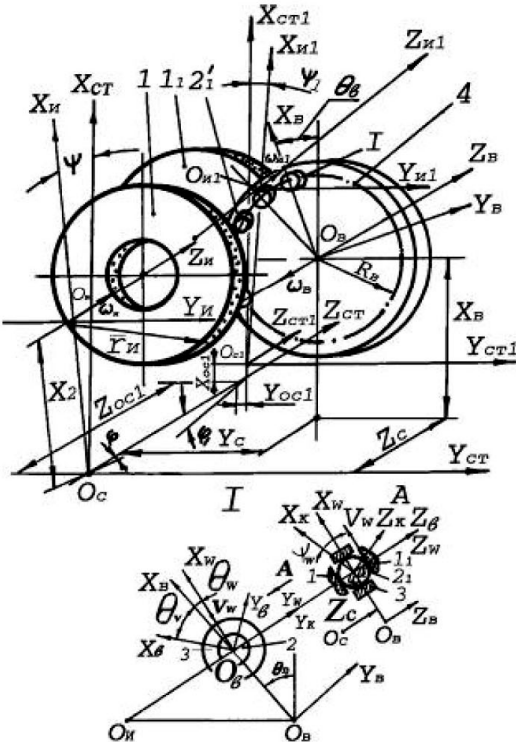
Таблиця 1

Модульні 3D моделі оброблюваних поверхонь				
Коди	Радіус- вектор $\vec{r}_{ди} = M_{ди} \cdot M_{и} \cdot \vec{e}_4$	Система зв'язків	Схема формоутворюючої системи верстата	Оброб- лювана поверх- ня
Точковим інструментом, геометричне моделювання поверхонь				
1.1.1	$\vec{r}_{ди} = C_{y,\theta,z} \cdot \vec{e}_4$	$y = const$		Цин- дрич- на
1.1.2		$z = const$		Тор- цева
1.1.3		$z = z(\theta)$		Гвин- това
1.1.4	$\vec{r}_{ди} = C_{y,\theta,z} \cdot \vec{e}_4$	$y = y(z)$		Криволіній- на, обертан- ня
1.1.5	$\vec{r}_{ди} = C_{y,\theta,z} \cdot \vec{e}_4$	$y = y(\theta)$		Некругла циліндрична
1.1.6	$\vec{r}_{ди} = C_{y,\theta,z} \cdot \vec{e}_4$	$y = y(z, \theta)$		Подвійної кривизни
1.2.1	$\vec{r}_{ди} = P_{x,y,z} \cdot \vec{e}_4$	$x = x(y)$		Неповна циліндрична
1.3.1	$\vec{r}_{ди} = S_{x,\phi,\psi} \cdot \vec{e}_4$	$x = const$		Сферична
Шліфування поверхонь при паралельних осях інструмента і деталі				
2.1.1.1	$\vec{r}_{ди} = C_{y,\theta,z} \cdot \vec{e}_4$ $\cdot C_{y_u,\theta_u,z_u} \cdot \vec{e}_4$	$y_c = const, z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_H = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{ди}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{ди}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{ди}}{\partial \theta} = 0$		Циліндрич- на
2.1.1.2		$z_c = const, z_H = const$ $y = y(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{ди}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{ди}}{\partial y_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{ди}}{\partial \theta} = 0$		Торцева площина

2.1.1.3	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot \vec{e}^4$	$z_c = \text{const}, y_c = \text{const}$ $\frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta} = 0$ $y_u = y_u(z_u)$		Торова
2.1.1.4	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot \vec{e}^4$	$y_u = y_u(z_u)$ $y_c = y_c(z_c)$ $\frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta} = 0$ $z_c = \pm p \cdot \theta$		Обертання з криволінійною твірною
2.1.1.5	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot \vec{e}^4$	$z_c = \text{const}$ $y_u = \text{const}$ $y_c = y_c(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta} = 0$		Некругла циліндрична
2.1.1.6	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot \vec{e}^4$	$y_u = y_u(z_u), y_c = y_c(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta} = 0$ $\frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial z} = 0$		Подвійної кривизни
2.1.2.1	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot P_{x_u, y_u, z_u} \cdot \vec{e}^4$	$y_u = y_u(x_u), z_c = z_c(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial x_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta} = 0$ $y_c = \text{const}$		Циліндрична голчаста
Шліфування поверхонь з осями інструмента і деталі, що перехрещуються				
Орієнтація інструмента по твірній				
3.1.3.1.1	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot S_{x_c, \psi, \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot \vec{e}^4$	$\varphi = \text{const}, y_u = y_u(z_u)$ $\phi = 0, x_c = 0$ $y_c = \text{const}, z_c = \text{const}$ $\frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta} = 0$		Ступінчаста циліндрична
3.1.3.1.2	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot S_{x_c, \psi, \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot \vec{e}^4$	$\varphi = \varphi(z), y_u = y_u(z_u)$ $\phi = 0, x_c = 0$ $y_c = y_c(z), z_c = z_c(z)$ $\frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta} = 0$		Обертання з криволінійною твірною

Орієнтація інструмента по напрямній				
3.1.3.1.3	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e}^4$	$x_c = x_c(\theta), \varphi = 0$ $\psi = 0, y_c = y_c(\theta)$ $z_c = const, y_u = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Некрутла циліндрична
Орієнтація інструмента по твірній і напрямній				
3.1.3.1.4	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e}^4$	$x_c = const, \varphi = const$ $\psi = 0, y_u = y_u(z_u)$ $y_c = const, z_c = \pm p \cdot \theta$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Циліндрична голчаста
3.1.3.1.5	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e}^4$	$x_c = x_c(\theta), y_c = y_c(\theta)$ $\psi = 0, \varphi = \varphi(\theta), z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_u = y_u(z_u),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Криволінійна обертання
Орієнтація інструмента по твірній, напрямній і навколо нормалі				
3.1.3.1.6	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e}^4$	$x_c = 0, y_c = const$ $\psi = const, \varphi = 0, z_c = const$ $y_u = y_u(z_u),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Торова
3.1.3.1.7	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e}^4$	$\psi = const, x_c = 0, y_c = const$ $\varphi = 0, y_u = const, z_c = \pm p \cdot \theta$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Циліндрична голчаста
3.1.3.1.8	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e}^4$	$\psi = const, x_c = 0, y_c = const$ $\varphi = 0, y_u = y_u(z_u), z_c = p \cdot \theta$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Гвинтова
3.1.3.1.9	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e}^4$	$\psi + \alpha = const, \varphi = 0,$ $y_c = const, z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_u = const, x_c = \pm p \cdot \theta \cdot \tan \alpha,$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Гіперболоїдна

3.1.3.1.10	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e^4}$	$\psi = \psi(\theta), \varphi = \varphi(\theta),$ $y_c = y_c(\theta), z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_u = y_u(z_u), x_c = 0,$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Криволінійна обертання
3.1.3.1.11	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e^4}$	$\psi = \psi(\theta), \varphi = 0,$ $y_c = y_c(\theta), z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_u = const, x_c = x_c(\theta),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Некругла циліндрична
3.1.3.1.12	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e^4}$	$\psi = \psi(\theta), \varphi = \varphi(z), y_c = y_c(\theta),$ $y_u = y_u(z_u), x_c = x_c(\theta),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} = 0,$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Кільцевий жолоб змінного профілю
3.1.3.1.13	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e^4}$	$y_u = const$ $y_c = y_c(\theta), x_c = x_c(\theta),$ $\psi = \psi(\theta), \varphi = \varphi(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z} = 0$		Подвійної кривизни
3.1.3.2.1	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot P_{x_u \cdot y_u \cdot z_u} \cdot \vec{e^4}$	$\varphi = 0, z_c = p \cdot \theta \pm R \cdot \cos \psi$ $y_c = const, x_c = R \cdot \sin \psi$ $\psi = \psi(\theta), y_u = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial x_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Голчаста циліндрична
3.2.3.1.1	$\vec{r}_{дн} = P_{x \cdot y \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e^4}$	$y_c = const, x_c = const$ $\varphi = const, \psi = 0, y_u = y_u(z_u)$ $z_c = z_c(\theta_u)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z} = 0$		Неповна циліндрична
3.3.3.1.1	$\vec{r}_{дн} = S_{x \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \theta \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot \vec{e^4}$	$\varphi = 90, z_c = 0$ $x_c = 0, y_c = 0$ $y_u = y_u(z_u), \psi = 0$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Неповна сферична

Групова обробка при паралельних осях інструментів і деталей				
4.1.1.2.1.1	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot C_{y_B \cdot \theta_B \cdot z_B} \cdot$ $\cdot P_{x_c \cdot y_c \cdot z_c} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot e^4$	$x_c = const, y_c = const,$ $z_c = const, y_B = R_B,$ $z_B = const, z_u = const,$ $y = const, \theta_u = \theta_u(\theta_B),$ $\theta = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial y_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Торцева
Групова обробка з осями інструмента і деталі, що перехрещуються				
4.1.1.3.1.1	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot S_{x_z \cdot \psi_z \cdot \varphi_z} \cdot$ $\cdot C_{y_z \cdot \psi_z \cdot x_z} \cdot$ $\cdot S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot e^4$	$y_u = y_u(z_u), y_c = const, \varphi = 0,$ $\psi = const, x_c = const, z_c = z_c(\theta),$ $x_z = x_z(z_u), \psi_z = \psi_z(z_u), \varphi_z = \varphi_z(z_u),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Циліндрична
5.1.1.2.3.1.1	$\vec{r}_{дн} = C_{y \cdot \theta \cdot z} \cdot$ $\cdot C_{y_B \cdot \theta_B \cdot z_B} \cdot$ $\cdot P_{x_c \cdot y_c \cdot z_c} \cdot$ $\cdot S_{x_z \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot e^4$	$x_c = const, y_c = const, z_c = const,$ $x_z = const, y_u = y_u(z_u), y_B = R_B,$ $\theta_u = \theta_u(\theta_B), z_B = const, \psi = const,$ $\varphi = const, y = const, \theta = \theta(\theta_B)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_B} = 0$		Торцева
6.3.3.1.2.3.1.1	$\vec{r}_{дн} = S_{x_n \cdot \psi_n \cdot \varphi_n} \cdot$ $\cdot S_{x_\theta \cdot \psi_\theta \cdot \varphi_\theta} \cdot$ $\cdot C_{y_B \cdot \theta_B \cdot z_B} \cdot$ $\cdot P_{x_c \cdot y_c \cdot z_c} \cdot$ $\cdot S_{x_z \cdot \psi \cdot \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} \cdot e^4$	$x_c = const,$ $y_c = const,$ $z_c = const,$ $x_z = const,$ $y_u = y_u(z_u),$ $y_B = R_B,$ $\varphi_\theta = \varphi_\theta(\theta_B),$ $z_B = const,$ $\psi = const,$ $\varphi = const,$ $\psi_\theta = \psi_\theta(\theta_B),$ $x_\theta = x_\theta(\theta_B),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_B} = 0$		Сферична

При шліфуванні різноманітних поверхонь профіль абразивного круга, згідно з сучасною теорією формоутворення [1, 2, 3], визначається формою оброблюваної поверхні і не залежить від кількості деталей, які одночасно обробляються одним кругом, точності і якості їх поверхні, форми заготовки, циклу шліфування та іншого. Аналіз відомих 3D моделей, які описують інструментальні поверхні обертання, спряжені з оброблюваною поверхнею деталей, показує, що задача знаходження їх є багатоваріантною. Але, як спрямувати її на підвищення продуктивності і точності обробки, не наведено. Розроблений нами спосіб шліфування торової поверхні (табл. 1, код 3.1-3.1.6), показує, що при профілюванні круга, з урахуванням не тільки форми деталі, а і форми заготовки, та керуванням, у процесі зняття припуску, кутом перехрещення осей деталі і круга, продуктивність збільшується в 1,5-2 рази в залежності від геометричних параметрів заготовки і деталі.

Відомі способи безцентрового повздовжнього шліфування циліндричних деталей, де ділянка профілю шліфувального круга, на якій виконується основне зняття металу, має конічну поверхню, кут нахилу твірної якої залежить від припуску на оброблення. У процесі зняття припуску, вісь обертання деталі постійно змінює своє положення, що знижує точність шліфування. Невідомі 3D геометричні моделі, які описують траєкторію переміщення осі обертання деталі в залежності від форм ведучого і шліфувального кругів та опорного ножа. Аналіз таких моделей дав би можливість розробити нові способи шліфування, зі стабілізацією положення осі обертання деталі у процесі зняття припуску і формоутворення, що підвищує точність і продуктивність оброблення.

Аналіз відомих 3D геометричних моделей процесів зняття припуску і формоутворення поверхонь, у тому числі і розроблених раніше нами, показує, що вони охоплюють оброблення окремих груп деталей: торцевих, криволінійних та інших. Сучасне машинобудування потребує поєднання високого рівня і якості виробів із високою продуктивністю і гнучкістю виробництва. Це забезпечується, зокрема, застосуванням автоматизованих систем проектування і виробництва CAD/CAM, геометричним ядром яких повинні бути ефективні та універсальні 3D моделі.

Метою роботи є розроблення компактних модульних 3D геометричних моделей формоутворюючих систем шліфувальних верстатів, робочих абразивних інструментальних поверхонь і їх профілювання на верстаті та оброблюваних поверхонь. 3D моделі повинні бути універсальними і використовуватись, як для аналізу існуючих верстатів і способів шліфування, так і для розроблення нових.

Основне рівняння теорії формоутворення, яке являє собою 3D модель формоутворюючої системи і пов'язує координати формоутворюючих точок інструменту з координатами точок оброблюваної поверхні деталі, має вигляд

$$\bar{r}_{qu} = M_{qu} \cdot M_{ua} \cdot \bar{e}_4, \quad (1)$$

де $\bar{r}_{qu}$ – радіус-вектор точок оброблюваної поверхні; M_{qu} – матриця переходу із системи координат інструменту в систему координат деталі, яка визначається формоутворюючим кодом [8] верстату при обробленні деталі; M_{ua} – матриця переходу із системи координат точки алмазного олівця, який профілює круг, в систему координат інструменту, яка визначається формоутворюючим кодом верстату при профілюванні на ньому круга; $\bar{e}_4 = (0, 0, 0, 1)^T$ – радіус-вектор початку координат, який співпадає з точкою алмазного олівця при профілюванні робочої поверхні абразивного круга.

Радіус-вектор $\bar{r}_u$ точок робочої поверхні шліфувального круга в його системі координат має вигляд

$$\bar{r}_u = M_{ua} \cdot \bar{e}_4. \quad (2)$$

Аналіз рівняння (1) показує, що матриці M_{qu} і M_{ua} дорівнюють добутку однокоординатних матриць [8], число яких залежить від складності формоутворюючих

систем верстату при шліфуванні деталі і правці круга, а загальна матриця M формоутворюючої системи дорівнює

$$M = M_{qu} \cdot M_{ua} \quad (3)$$

При системному аналізі і синтезі загальних формоутворюючих систем пропонується матрицю M уявляти у вигляді добутку функціональних модулів, розташованих у визначеній послідовності.

$$M = \Phi \cdot \Pi \cdot T \cdot K \cdot O \cdot I, \quad (4)$$

де Φ – модуль формоутворення; Π – модуль похибки положення деталі відносно її номінального положення, наприклад, при безцентровому шліфуванні; T – транспортно-подавальний модуль, наприклад, при груповому обробленні деталей; K – координатний модуль; O – модуль орієнтації інструменту відносно оброблюваної деталі; I – модуль інструменту.

При математичному описі модулі слід уявляти у вигляді добутку однокоординатних матриць четвертого порядку [8]. Ця вимога пов'язана з тим, що розроблювані 3D моделі (1) повинні описувати не тільки процес зняття припуску і формоутворення, але і використовуватися як номінальний радіус-вектор поверхні деталі при варіаційному розрахунку точності [8] верстатів, у яких два спряжених вузли при відносному русі мають один ступінь вільності.

При знаходженні інструментальної поверхні $\bar{r}_u$, її розраховують за допомогою зворотної матриці M_{qu}^{-1} (1) із співвідношення

$$\bar{r}_u = M_{qu}^{-1} \cdot \bar{r}_{qu}, \quad (5)$$

що спрощує розрахунки при вирішенні прямої та зворотної задач теорії формоутворення за рахунок використання добутку матриць четвертого порядку.

Невід'ємною частиною системного підходу є вираз об'єкта розроблення у вигляді набору уніфікованих елементів – модулів. Аналіз формоутворюючих систем верстатів показав, що в залежності від їх типів оброблення виконується у циліндричній, прямокутній та сферичній системах координат. Тому пропонується, в якості модулів формоутворення, застосовувати циліндричний (6), прямокутний (7) та сферичний (8) модулі:

$$C_{y \cdot \theta \cdot z} = M_2(y) \cdot M_6(\theta) \cdot M_1(z), \quad (6)$$

$$P_{x \cdot y \cdot z} = M_1(x) \cdot M_2(y) \cdot M_3(z), \quad (7)$$

$$S_{x \cdot \psi \cdot \varphi} = M_1(x) \cdot M_5(\psi) \cdot M_4(\varphi), \quad (8)$$

де M_1, M_2, M_3 – матриці лінійних переміщень вздовж осей X, Y, Z ; M_4, M_5, M_6 – матриці кутових поворотів навколо осей X, Y, Z [8].

Аналіз функціонального призначення модулів Π , T , K , O і I показав, що вони відповідають математичному опису модулів C , P , і S . Так для найбільш загальної формоутворюючої системи при безцентровому груповому шліфуванні кульок на розроблених нами установці на базі верстату 3342АДО (табл. 1, код 6.3.3.1.2.3.1.1, рис. 1, рівень 6)

$$I = C_{y_u \cdot \theta_u \cdot z_u} = M_2(y_u) \cdot M_6(\theta_u) \cdot M_1(z_u), \quad (9)$$

$$O = S_{x_c \cdot \psi \cdot \varphi} = M_1(x_c) \cdot M_5(\psi) \cdot M_4(\varphi), \quad (10)$$

$$K = P_{x_c \cdot y_c \cdot z_c} = M_1(x_c) \cdot M_2(y_c) \cdot M_3(z_c), \quad (11)$$

$$T = C_{y_\theta \cdot \theta_\theta \cdot z_\theta} = M_2(y_\theta) \cdot M_6(\theta_\theta) \cdot M_3(z_\theta), \quad (12)$$

$$\Pi = S_{x_\theta \cdot \psi_\theta \cdot \varphi_\theta} = M_1(x_\theta) \cdot M_5(\psi_\theta) \cdot M_4(\varphi_\theta). \quad (13)$$

При розробленні модульних 3D моделей усіх формоутворюючих систем (рис. 1), модульних 3D моделей оброблюваних поверхонь і модульних 3D моделей інструментів (табл. 1) використовувались тільки три уніфікованих модулі C , P , і S , що значно спрощує 3D моделювання.

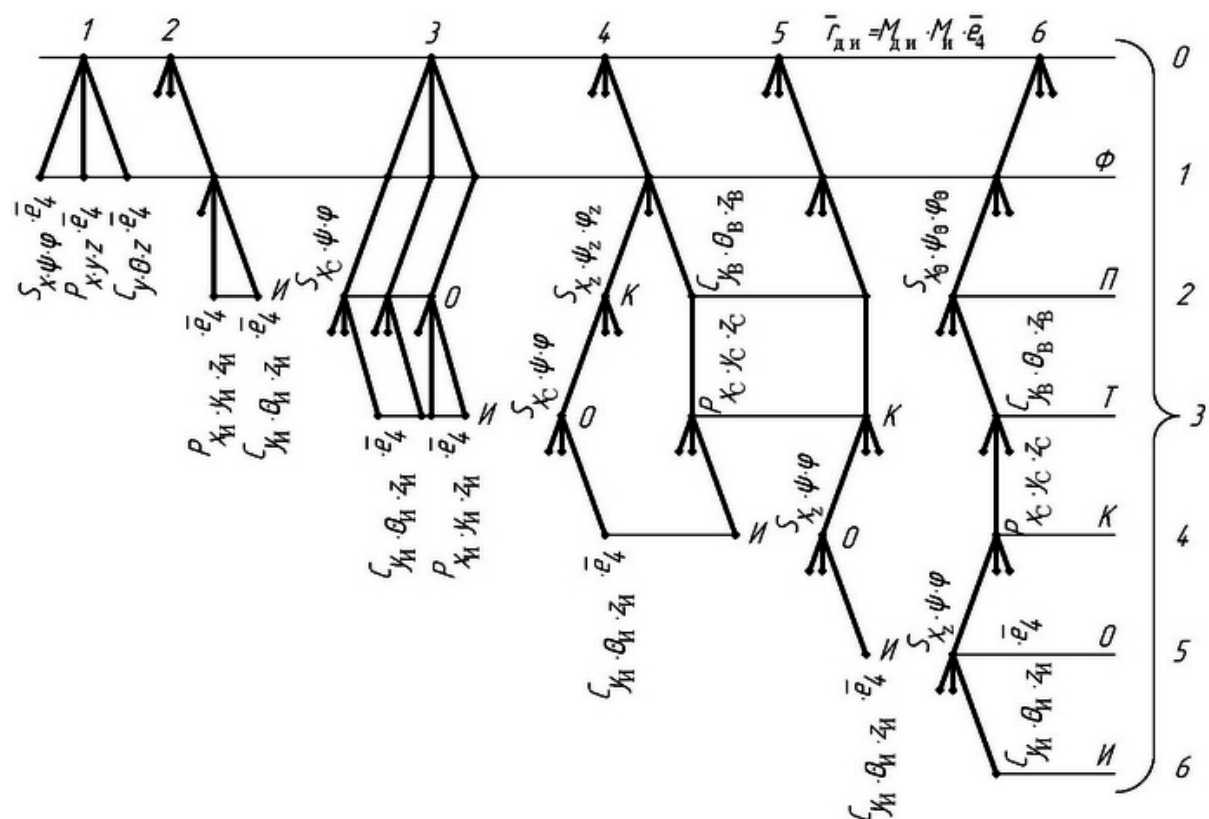


Рис. 1. Кореневі дерева модульних 3D моделей формоутворюючих систем

Аналіз корневих дерев модульних 3D моделей формоутворюючих систем (рис. 1) і модульних 3D моделей оброблювальних поверхонь (табл. 1) показує, що перший рівень ієрархії, де розташований формоутворюючий Φ модуль, наявний у всіх корневих деревах (рис. 1). Це підтверджує, що він є головним і може бути циліндричним, прямокутним чи сферичним. Інструментальний модуль $И$ також наявний у всіх корневих деревах, крім першого, де є точковий інструмент. Розташування інструментального модуля від другого до шостого рівнів (рис. 1) залежить від складності формоутворюючої системи. Інструментальний модуль може бути циліндричним, наприклад, для шліфувального круга, прямокутним для абразивних брусків, або сферичним. Модуль орієнтації O , як правило сферичний – S і розташований перед інструментом $И$ (рис. 1). Модуль похибки $П$ розташований перед модулем формоутворення Φ .

При модульному 3D моделюванні оброблюваних поверхонь рівняння (1) описує загальну частину рівнянь, різноманітних поверхонь деталей. 3D модель конкретної оброблюваної поверхні повинна містити в собі дві незалежні змінні. Для досягнення цього на аргументи в матрицях модулів накладають зв'язки (табл. 1): функціональні, огинання чи скриті [8] – і отримують вираз усіх змінних через два аргументи. Для повноти 3D моделі додають нерівності, що обмежують інтервали значень параметрів. Рівень ієрархії загальної 3D моделі визначається числом модулів у рівнянні (1). Це рівняння можна подати у матричному вигляді, замінивши модулі їх математичним виразом з рівнянь (6-13).

Перше корневе дерево відповідає першому рівню загальних моделей формоутворюючих систем, де працює тільки один модуль. Наприклад, циліндричний модуль (6) відповідає обробленню точковим інструментом при профілюванні абразивного круга алмазним олівцем або токарному обробленні гостро загостреним різцем.

Цей модуль описує загальну частину рівнянь різноманітних поверхонь деталей, що обробляються на верстаті, без урахування зв'язків у формотвірній системі. Сумарне

число N схем оброблення визначається з формули (14), яка зменшує кількість варіантів у порівнянні з [8]

$$N = \sum_{j=1}^k (n_{j\max} - n_{jo} - n_{jз} - n_{jc}), \quad (14)$$

де k – число різноманітних типів інструменту на верстаті; $n_{j\max}$ – максимальне число варіантів зв'язків між рухами формоутворення при обробленні j -им типом інструменту; n_{jo} – число зв'язків, які дають однаковий вид поверхні при обробленні одним j -им типом інструменту; $n_{jз}$ – число зв'язків, які зупиняють головний рух або один з рухів огинання; n_{jc} – число зв'язків, заборонених спеціалізацією верстату. Максимальне значення $n_{j\max}$ для першого рівня дорівнює 7 при геометричному моделюванні поверхонь. При обробленні точковим інструментом для першого рівня у таблиці наведено 6 варіантів схем, тому що заборонено зупиняти головний рух обертаючої деталі.

Перший рівень загальних моделей забезпечує геометричне моделювання поверхонь, таблиця 1, ліній (2D і 3D) та окремих точок. Кодування схем обробки і поверхонь здійснюється таким чином. На першому місці ставиться цифра, яка вказує на рівень ієрархії загальної моделі та відповідає номеру кореневого дерева (рис. 1). Потім ставиться добуток кількості цифр, які відповідають задіяним модулям. При цьому циліндричному модулю C відповідає цифра 1, прямокутному P – 2, а сферичному S – 3. Наприклад, при шліфуванні циліндричної поверхні, коли осі круга і деталі паралельні, код 2.1.1.1 (табл. 1) вказує: 2 – рівень ієрархії загальної 3D моделі; 1.1 – це добуток двох задіяних циліндричних модулів; 1 – порядковий номер для даного рівня і об'єднання двох модулів при обробленні конкретної деталі.

Другий рівень загальних моделей формоутворюючих систем (табл. 1), де працює добуток двох модулів, описує загальну частину поверхонь, які обробляються при паралельних осях інструменту і деталі (табл. 1). Але найбільш перспективним при обробленні однієї зафіксованої деталі одним інструментом є третій рівень (табл. 1), де працює добуток трьох модулів. У порівнянні з другим рівнем додається модуль орієнтації інструменту відносно деталі. У фундаментальній роботі [13] за формоутворенням фасонних поверхонь на верстатах з числовим програмним керуванням вперше було застосоване спеціальне математичне забезпечення, яке, за рахунок орієнтації інструменту відносно деталі, оптимізувало процес формоутворення на фрезерних верстатах.

Для кожного нормального перерізу поверхні (деталі або інструменту) його кривизна за формулою Ейлера дорівнює

$$\frac{1}{R} = \frac{\cos^2 \alpha}{R_1} + \frac{\sin^2 \alpha}{R_2}, \quad (15)$$

де R , R_1 та R_2 – біжучий та головні радіуси кривизни в опорній точці поверхні, що обробляється; α – кут орієнтації біжучого перерізу відносно головного.

Аналіз формули (15) показує, що за рахунок відносної орієнтації інструменту та деталі можна змінювати біжучі контактуючі радіуси кривизни і як наслідок довжину лінії їх контакту в процесі зняття припуску і формоутворення. У роботах [13, 14] наведені схеми обробки з оптимізацією положення інструмента відносно деталі з позицій підвищення продуктивності формоутворення поверхонь, без аналізу процесу зняття припуску та в основному при обробленні лезовим інструментом. У роботі [4] розроблені наукові основи шліфування криволінійних поверхонь з керованою орієнтацією абразивного інструменту, але загальні 3D моделі не розглянуті. Нами запропоновані модульні 3D моделі (табл. 1) з орієнтацією інструменту за твірною, прямою та навколо нормалі, на базі аналізу яких розроблені нові способи шліфування. Код 3.1.3.1.4 – спосіб шліфування голчатої циліндричної поверхні робочих

валиків чесальних машин торцем орієнтованого круга, який підвищив якість і продуктивність загострювання голок. Код 3.1-3-1.5 – новий спосіб шліфування криволінійних поверхонь оправок станів холодної прокатки труб, який підвищує продуктивність за рахунок орієнтації круга за твірною і напрямною поверхнею деталі. Коди 3.1-3-1.6 і 3.1-3-1.8 – нові способи шліфування торових та гвинтових поверхонь, які підвищили точність і продуктивність обробки за рахунок оптимального профілювання орієнтованого круга і одночасного переміщення і повороту навколо нормалі до профілю. Коди 3.1-3-1.10 і 3.1-3-1.11 – нові способи шліфування криволінійних поверхонь валків прокатних станів [15] і некруглих циліндричних поверхонь, де підвищення продуктивності забезпечується орієнтацією круга за твірною, напрямною та навколо нормалі. Код 3.1-3-2.1 – новий спосіб загострювання валиків текстильних машин, де підвищення якості забезпечується круговим поступальним рухом торців брусків, що приводить до зрізання задирок на торцях голок і, як наслідок, ліквідування обривання ниток при прочісуванні. Код 3.3-3-1.1 – новий спосіб комбінованого оброблення неповних сферичних поверхонь охоплюючим інструментом, формотворний діаметр якого дорівнює діаметру сфери, що дозволяє обробляти її з однієї установки на прохід набором послідовно розміщених обертових інструментів (різцевою головкою, абразивними чи алмазними брусками), вісь яких перпендикулярна до осі деталі. Це забезпечує підвищення продуктивності і точності оброблення.

При безцентровому шліфуванні циліндричних (табл. 1, код 4.1-3-3-1.1) та сферичних (табл. 1, код 6.3-3-1-2-3-1.1) поверхонь при 3D моделюванні вперше розраховується за допомогою модуля *П* (4) біжуча похибка положення деталі відносно її номінального положення і вплив її на точність формоутворення. При цьому біжучі координати розраховують на основі розв'язання рівнянь трьох еквідистант: ведучого і шліфувального кругів та опорного ножа чи диска. Розроблені рекомендації, які ліквідують геометричні похибки формоутворення [16], та нові способи шліфування.

Вперше розроблені основи модульного 3D моделювання формоутворюючих систем шліфувальних верстатів, робочих абразивних інструментальних поверхонь і їх профілювання на верстаті та оброблюваних поверхонь. Моделювання виконується на базі трьох уніфікованих модулів з постійним математичним забезпеченням кожного, що спрощує процес моделювання.

Ієрархія загальних моделей дає можливість оптимізувати і спростити розрахунки у порівнянні з відомими загальними моделями для груп деталей [7,9-12], де незалежно від складності форми деталі враховуються усі матриці чи оператори вихідної моделі. У запропонованих моделях для першого рівня (табл. 1) задіяні 3 матриці, для шостого рівня – 18 матриць.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на впровадження модульного 3D моделювання для лезового оброблення.

Model 3D designs of the surface formation systems of polishing machine-tools, instruments and processed surfaces are first offered on the base of three compatible modules. Taking systems approach the developed hierarchy of general models of the surface formation systems of machine-tools and new methods of polishing of surfaces with the crossed axes of instruments and details.

Література

1. Равская Н.С., Родин П.Р. Основы теории формообразования поверхностей при механической обработке // Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт», Машиностроение. – № 33, 1998. – С. 74-82.
2. Равська Н.С., Родін П.Р., Ніколаєнко Т.П., Мельничук П.П. Основы формоутворення поверхонь при механічній обробці. Житомир: ЖІТІ, 2000. – 232 с.
3. Перепелица Б.А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием. – Харьков: Вища школа, 1991. – 512 с.
4. Кальченко В.И. Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента. Дисс...докт. техн. наук. – Харьков, 1994. – 329 с.
5. Кондусова О.Б. Тривимірне геометричне моделювання зняття припуску, формоутворення і проектування інструментів при обробці різанням. Автореф. дис...докт. техн. наук. – Київ, 1999. – 35 с.

6. 3D – моделирование инструментов, формообразования и съема припуска при обработке резанием / А.И. Грабченко, Е.Б. Кондусова, А.В.Кривошея и др. /Под ред. П. Р. Родина. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – 304 с.
7. 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.
8. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
9. Кальченко В.В. Общая (3D) модель формообразующих систем станков при шлифовании поверхностей со скрещивающимися осями кругов и деталей // Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн. – техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001, Вып. 59. – С. 118-123.
10. Кальченко В.В. Общая трехмерная (3D) модель поверхностей кругов при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента и детали // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”: Збірка наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2001. – № 6. – С. 114-118.
11. Зубкова Н.В. Удосконалення 3D моделювання різальних інструментів і елементів припуску шляхом уніфікації структур багатопараметричних відображень простору. Автореф. дис... канд. техн. наук. – Харків, 2002. – 20 с.
12. Мироненко О.Л. Удосконалення 3D моделей формоутворення різанням спеціальних конічних зубчастих колес для двопараметричних передач. Автореф. дис... канд. техн. наук. – Харків, 2004. – 20 с.
13. Родин П.Р., Линкин П.А., Титаренко В.Н. Обработка фасонных поверхностей на станках с числовым программным управлением. К.: Техника, 1976. – 200с.
14. Радзевич С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ. К.: Вища школа, 1991. – 192 с.
15. Кальченко В.В. 3D моделирование глубинного шлифования поверхностей вращения на станках с ЧПУ со скрещивающимися осями круга и валка // Вестник НТУ «ХПИ». Машиностроение. Киев: НТУ «ХПИ», 2002, № 43. – С. 123-126.
16. Кальченко В.В. Безцентрове поздовжнє шліфування циліндричних поверхонь зі стабілізацією положення вісі обертання деталей. // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2003, Т. 8, № 3. – С. 83-90.

Одержано 04.01.05 р.