

УДК 621.923.42.

**В. В. Кальченко, канд. техн. наук**

*Чернігівський державний технологічний університет*

## **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 не достатньо 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.

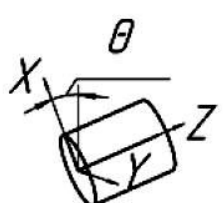
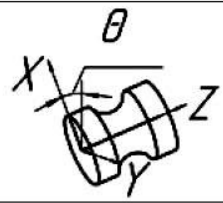
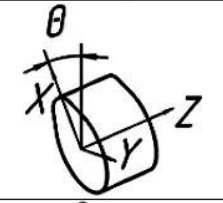
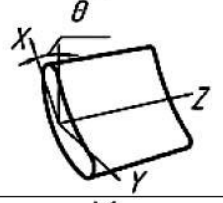
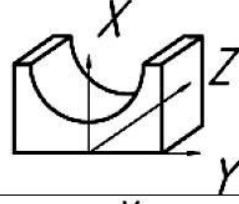
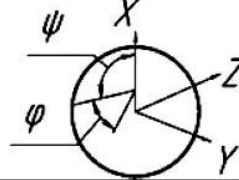
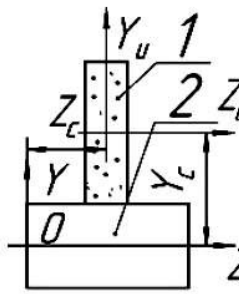
В роботах [1, 2, 3] наведені 3D геометричні моделі формоутворення поверхонь і проектування інструментів при обробці різанням без розгляду задач зняття припуску. Вперше в роботі [4] розроблені 3D модель процесу зняття припуску і наукове положення про роль плями контакту та її параметрів на продуктивність при шліфуванні, що підтверджене в монографії [6, с. 158]. Потім в роботах [5, 6] розглянуто 3D моделювання інструментів, формоутворення поверхонь і зняття припуску при обробці лезовими інструментами. В розглянутих роботах приведені схеми формоутворення, коли один різальний інструмент оброблює одну поверхню на одній зафіксованій деталі. 3D моделі зняття припуску та формоутворення при груповій обробці деталей, коли одним інструментом одночасно оброблюється декілька деталей, а також при безцентровому шліфуванні, де базування виконується по поверхні деталі, що оброблюється і постійно змінюється, не наведені.

В роботі [7] вперше розроблена загальна тривимірна (3D) геометрична модель процесу зняття припуску і формоутворення оброблювальних поверхонь при шліфуванні з перехрещеними осями кругів та деталей. Кінематична схема формоутворення поверхонь, яка заснована на сполученні обертів інструменту та деталі навколо перехрещених осей є найбільш загальною [1, 2]. Всі другі схеми, це її приватні 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 приватні 3D моделі різноманітних оброблюваних поверхонь шляхом виключення тих або інших матриць з вихідної 3D моделі. Це дало можливість по одній програмі розраховувати зняття припуску та формоутворення сферичних, торцевих криволінійних, гвинтових, торових, гіперболоїдів обертання, циліндричних, конічних та інших поверхонь [7]. Були також розроблені загальні (3D) моделі формоутворюючих систем верстатів [9] та поверхонь кругів [10], при шліфуванні з перехрещеними осями інструментів та деталей, з яких приватні 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 приватні моделі отримують виключенням операторів або матриць [11, 12].

В фундаментальній роботі [8] по точності металорізальних верстатів розроблені приватні 3D моделі формоутворюючих систем різноманітних верстатів, але загальних 3D моделей не наведено.

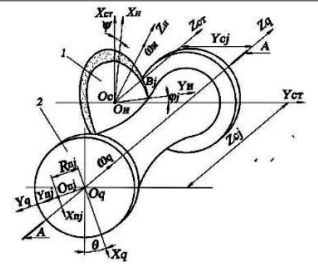
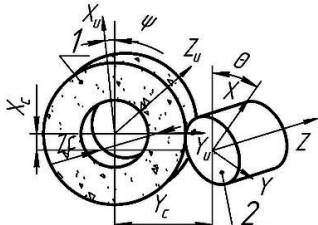
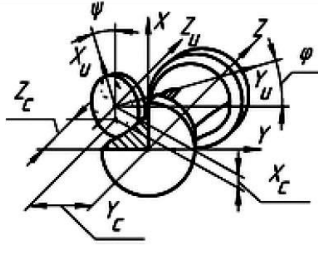
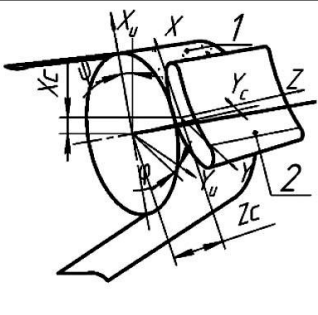
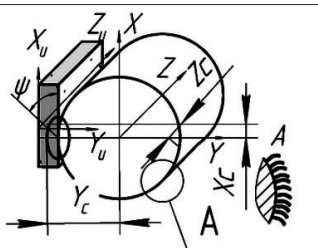
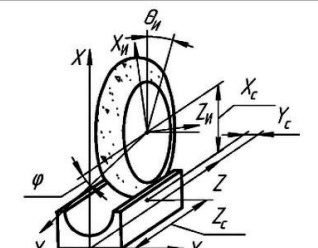
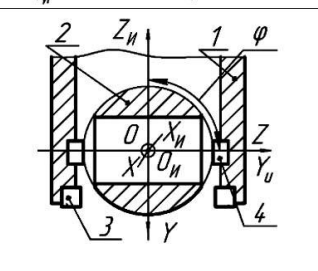
Таблиця 1

## Модульні 3D моделі оброблених поверхонь

Коди	Радіус- вектор $\vec{r}_{\text{дн}} = M_{\text{дн}} \cdot M_{\text{н}} \cdot \vec{e}_4$	Система зв'язків	Схема формууючої системи верстата	Оброб- лована поверх- ня
Точковим інструментом, геометричне моделювання поверхонь				
1.1.1	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y,\theta,z} \cdot \vec{e}^4$	$y = \text{const}$		Цилин- дрич- ня
1.1.2		$z = \text{const}$		Тор- цева
1.1.3		$z = z(\theta)$		Гвин- това
1.1.4	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y,\theta,z} \cdot \vec{e}^4$	$y = y(z)$		Криволіній- на, оберган- ня
1.1.5	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y,\theta,z} \cdot \vec{e}^4$	$y = y(\theta)$		Некругла циліндрична
1.1.6	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y,\theta,z} \cdot \vec{e}^4$	$y = y(z, \theta)$		Подвійної кривизни
1.2.1	$\vec{r}_{\text{дн}} = P_{x,y,z} \cdot \vec{e}^4$	$x = x(y)$		Неповна циліндрична
1.3.1	$\vec{r}_{\text{дн}} = S_{x,\phi,\psi} \cdot \vec{e}^4$	$x = \text{const}$		Сферична
Шліфування поверхонь при паралельних осях інструмента і деталі				
2.1.1.1	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y,\theta,z} \cdot \vec{e}^4$ $\cdot C_{y_u,\theta_u,z_u} \cdot \vec{e}^4$	$y_c = \text{const}, z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_{\text{н}} = \text{const}$ $\frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta} = 0$		Циліндрич- на
2.1.1.2		$z_c = \text{const}, z_{\text{н}} = \text{const}$ $y = y(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial y_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{\text{дн}}}{\partial \theta} = 0$		Торцева пелющина

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

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

3.1.3-1.10	$\vec{r}_{дн} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot S_{x_c, \psi, \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot e^4$	$\psi = \psi(\theta), \varphi = \varphi(\theta),$ $y_c = y_c(\theta), z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_u = y_u(z_u), x_c = 0,$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Криволінійна обертання
3.1.3-1.11	$\vec{r}_{дн} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot S_{x_c, \psi, \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot e^4$	$\psi = \psi(\theta), \varphi = 0,$ $y_c = y_c(\theta), z_c = \pm p \cdot \theta$ $y_u = const, x_c = x_c(\theta),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Некругла циліндрична
3.1.3-1.12	$\vec{r}_{дн} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot S_{x_c, \psi, \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot e^4$	$\psi = \psi(\theta), \varphi = \varphi(z), y_c = y_c(\theta),$ $y_u = y_u(z_u), x_c = x_c(\theta),$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} = 0,$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Кільцевий жолоб змінного профілю
3.1.3-1.13	$\vec{r}_{дн} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot S_{x_c, \psi, \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot e^4$	$y_u = const$ $y_c = y_c(\theta), x_c = x_c(\theta),$ $\psi = \psi(\theta), \varphi = \varphi(\theta)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z} = 0$		Подвійної кривизни
3.1.3-2.1	$\vec{r}_{дн} = C_{y, \theta, z} \cdot$ $\cdot S_{x_c, \psi, \varphi} \cdot$ $\cdot P_{x_u, y_u, z_u} \cdot e^4$	$\varphi = 0, z_c = p \cdot \theta \pm R \cdot \cos \psi$ $y_c = const, x_c = R \cdot \sin \psi$ $\psi = \psi(\theta), y_u = const$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial x_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Голчаста циліндрична
3.2.3-1.1	$\vec{r}_{дн} = P_{x, y, z} \cdot$ $\cdot S_{x_c, \psi, \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot e^4$	$y_c = const, x_c = const$ $\varphi = const, \psi = 0, y_u = y_u(z_u)$ $z_c = z_c(\theta_u)$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z} = 0$		Неповна циліндрична
3.3.3-1.1	$\vec{r}_{дн} = S_{x, \psi, \varphi} \cdot$ $\cdot S_{x_c, \theta, \varphi} \cdot$ $\cdot C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot e^4$	$\varphi = 90, z_c = 0$ $x_c = 0, y_c = 0$ $y_u = y_u(z_u), \psi = 0$ $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		Неповна сферична

Групова обробка при паралельних осях інструментів і деталей

<p>4.1.1.2.1.1</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\vec{r}_{дн} = C_{y, \theta, z}</math></li> <li><math>\bullet C_{y_B, \theta_B, z_B}</math></li> <li><math>\bullet P_{x_c, y_c, z_c}</math></li> <li><math>\bullet C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot e^4</math></li> </ul>	<p><math>x_c = const, y_c = const,</math>  <math>z_c = const, y_B = R_B,</math>  <math>z_B = const, z_u = const,</math>  <math>y = const, \theta_u = \theta_u(\theta_B),</math>  <math>\theta = const</math></p> $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial y_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		<p>Торцева</p>
--------------------	--	--	--	----------------

Групова обробка з осями інструмента і деталі, що перехрещуються

<p>4.1.1.3.1.1</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\vec{r}_{дн} = C_{y, \theta, z}</math></li> <li><math>\bullet S_{x_z, \psi_z, \varphi_z}</math></li> <li><math>\bullet C_{y_z, \psi_z, x_z}</math></li> <li><math>\bullet S_{x_c, \psi, \varphi}</math></li> <li><math>\bullet C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot e^4</math></li> </ul>	<p><math>y_u = y_u(z_u), y_c = const, \varphi = 0,</math>  <math>\psi = const, x_c = const, z_c = z_c(\theta),</math>  <math>x_z = x_z(z_u), \psi_z = \psi_z(z_u), \varphi_z = \varphi_z(z_u),</math></p> $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta} = 0$		<p>Циліндрична</p>
--------------------	--	---	--	--------------------

<p>5.1.1.2.3.1.1</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\vec{r}_{дн} = C_{y, \theta, z}</math></li> <li><math>\bullet C_{y_B, \theta_B, z_B}</math></li> <li><math>\bullet P_{x_c, y_c, z_c}</math></li> <li><math>\bullet S_{x_z, \psi, \varphi}</math></li> <li><math>\bullet C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot e^4</math></li> </ul>	<p><math>x_c = const, y_c = const, z_c = const,</math>  <math>x_z = const, y_u = y_u(z_u), y_B = R_B,</math>  <math>\theta_u = \theta_u(\theta_B), z_B = const, \psi = const,</math>  <math>\varphi = const, y = const, \theta = \theta(\theta_B)</math></p> $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_B} = 0$		<p>Торцева</p>
----------------------	---	--	--	----------------

<p>6.3.3.1.2.3.1.1</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\vec{r}_{дн} = S_{x_n, \psi_n, \varphi_n}</math></li> <li><math>\bullet S_{x_\theta, \psi_\theta, \varphi_\theta}</math></li> <li><math>\bullet C_{y_B, \theta_B, z_B}</math></li> <li><math>\bullet P_{x_c, y_c, z_c}</math></li> <li><math>\bullet S_{x_z, \psi, \varphi}</math></li> <li><math>\bullet C_{y_u, \theta_u, z_u} \cdot e^4</math></li> </ul>	<p><math>x_c = const,</math>  <math>y_c = const,</math>  <math>z_c = const,</math>  <math>x_z = const,</math>  <math>y_u = y_u(z_u),</math>  <math>y_B = R_B,</math>  <math>\varphi_\theta = \varphi_\theta(\theta_B),</math>  <math>z_B = const,</math>  <math>\psi = const,</math>  <math>\varphi = const,</math>  <math>\psi_\theta = \psi_\theta(\theta_B),</math>  <math>x_\theta = x_\theta(\theta_B),</math></p> $\frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_u} \times \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial z_u} \cdot \frac{\partial \vec{r}_{дн}}{\partial \theta_B} = 0$		<p>Сферична</p>
------------------------	---	---	--	-----------------

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 обробку. У процесі зняття припуску, ось 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 обробки.

Аналіз відомих 3D геометричних моделей процесів зняття припуску і формоутворення поверхонь, в тому числі і розроблених раніше нами, показує, що вони охоплюють обробку окремих груп деталей: торцевих, криволінійних та інших. Сучасне машинобудування потребує сполучення 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 розробка 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 розробки нових.

Основне рівняння теорії формоутворення, яке представляє 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 поверхні, що обробляється;  $M_{qu}$  – матриця переходу із системи координат інструменту в систему координат деталі, яка визначається формоутворюючим кодом [8] верстату при обробці 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 добуткам однокоординатних матриць [8], число яких залежить від складності формоутворюючих систем верстату при шліфуванні деталі і правці круга, а загальна матриця  $M$  формоутво-

рюючої системи дорівнює

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

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

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

де  $\Phi$  – модуль формоутворення;  $P$  – модуль похибки положення деталі відносно її номінального положення, наприклад, при безцентровому шліфуванні;  $T$  – транспортно-подавальний модуль, наприклад, при груповій обробці деталей;  $K$  – координатний модуль;  $O$  – модуль орієнтації інструменту відносно деталі, що обробляється;  $I$  – модуль інструменту.

При математичному описі модулі уявляти в вигляді добутку однокоординатних матриць четвертого порядку [8]. Ця вимога пов'язана з тим, що розробляємо 3D моделі (1) повинні описувати не тільки процес зняття припуску і формоутворення, але і використовуватися в якості номінального радіуса-вектора поверхні деталі при варіаційному розрахунку точності [8] верстатів, у яких два спряжених вузла в відносному русі мають одну ступінь свободи.

При знаходженні інструментальної поверхні  $\bar{r}_u$ , її розраховувати 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 розробки у вигляді набору уніфікованих елементів – модулів. Аналіз формоутворюючих систем верстатів показав, що в залежності від їх типів обробка 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  $P, T, K, O$  і  $I$  показав, що вони відповідають математичному опису модулів  $C, P$ , і  $S$ . Так для найбільш загальної формоутворюючої системи при безцентровому груповому шліфуванні шариків на розробленій нами установці на базі верстату 3342АДО (табл. 1, код 6.3.3.1.2.3.1.1, рис. 1, рівень 6)

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

$$O = S_{x_2 \cdot \psi \cdot \varphi} = M_1(x_2) \cdot M_5(\psi) \cdot M_4(\varphi), \quad (10)$$

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

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

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

При розробці 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.



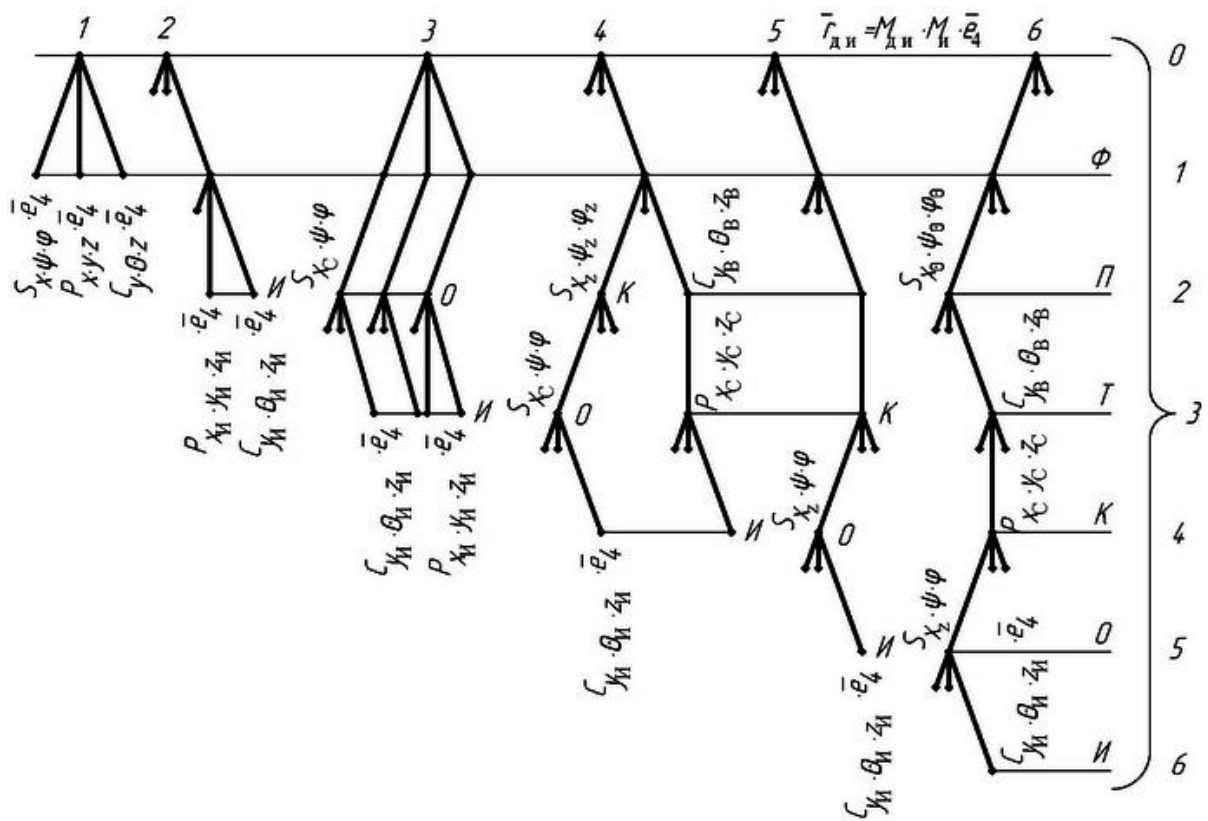


Рис. 1. Корневі дерева модульних 3D моделей формоутворюючих систем

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  $\Phi$  модуль, присутній у всіх корневих деревах (рис. 1) – це підтверджує, що він є головним і може бути циліндричним, прямокутним чи сферичним. Інструментальний модуль  $I$  також присутній у всіх корневих деревах, крім першого, де 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  $I$  (рис. 1). Модуль похибки  $\Pi$  розташований перед модулем формоутворення  $\Phi$ .

При модульному 3D моделюванні оброблених 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 всіх 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 представити в 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 обробці точковим інструментом при профілюванні абразивного круга алмазним олівцем або токарній обробці різцем, який гостро заточений.

Цей модуль описує загальну частину рівнянь різноманітних поверхонь деталей, що обробляються на верстаті, без урахування зв'язків в формотворній системі. Сумарне число  $N$  схем обробки визначається з формули (14), яка зменшує кількість варіантів у порівнянні з [8]

$$N = \sum_{j=1}^k (n_{j_{\max}} - n_{j_o} - n_{j_z} - n_{j_c}) \quad (14)$$

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

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 рівень ієрархії загальної моделі та відповідає номеру корневого 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 сполучення двох модулів при обробці 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 обробці однієї зафіксованої деталі одним інструментом є третій рівень (табл. 1), де працює добуток трьох модулів. В порівнянні з другим рівнем добавляється модуль орієнтації інструменту відносно деталі. В фундаментальній роботі [13] по формоутворенню 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  $R_2$  – поточний та головні радіуси кривизни в опорній точці поверхні, що обробляється;  $\alpha$  – кут орієнтації поточного перерізу відносно головного.

Аналіз формули (15) показує, що за рахунок відносної орієнтації інструменту та деталі можна змінювати поточні радіуси кривизни, що контактують і як наслідок довжину лінії їх контакту в процесі зняття припуску і формоутворення. В роботах [13, 14] наведені схеми обробки з оптимізацією положення інструмента відносно деталі с позицій підвищення продуктивності формоутворення поверхонь, без аналізу процесу зняття припуску та в основному при обробці лезовим інструментом. В 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 по твірній, напрямній 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 заточування голок. Код 3.1·3·1.5 – новий спосіб шліфування криволінійних поверхонь оправок станів холодної прокатки труб, який підвищує продуктивність за рахунок орієнтації круга по твірній і

напрямній поверхні 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 по твірній, напрямній та навколо нормалі. Код 3.1·3·2.1 – новий спосіб заточування валиків текстильних машин, де підвищення якості забезпечується круговим поступальним рухом торців брусків, що приводить до зрізання задирок на торцях голок і як наслідок ліквідування обриву ниток при прочосі. Код 3.3·3·1.1 – новий спосіб комбінованої обробки 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), ось яких перпендикулярна осі деталі. Це забезпечує підвищення продуктивності і точності обробки.

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  $\Pi$  (4) поточна похибка положення деталі відносно її номінального положення і вплив її на точність формоутворення. При цьому поточні координати розраховують на базі вирішення 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 в порівнянні з відомими загальними моделями для груп деталей [7,9-12], де незалежно від складності форми деталі враховуються всі матриці чи оператори вихідної моделі. В 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 лезової обробки.

*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. Монография. Под редакцией Родина П. Р. Авторы: Грабченко А.И. Кондусова Е.Б. Кривошея А.В., Равская Н.С., Родин П.Р. Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – 304 с.

7. Кальченко В.В. 3D моделювання оброблюваних поверхностей при шліфуванні со скрещуваними осями круга і деталі // 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. – 336с.
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. «Техніка» 1976, 200с.
14. Радзевич С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ. К.: Вища шк., 1991. – 192 с.
15. Кальченко В.В. 3D моделювання глибокого шліфування поверхностей вращения на станках с ЧПУ со скрещивающимися осями круга и вала // 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. Науковий журнал. 2003, том 8, № 3, с. 83-90.