

**УДК 621.923.42**

*КАЛЬЧЕНКО В.І., Д-Р ТЕХН. НАУК, КАЛЬЧЕНКО В.В., Д-Р ТЕХН.. НАУК,  
РУДИК А.В., КАНД. ТЕХН. НАУК, ВЕНЖЕГА В.І., АСИСТЕНТ*

## **МОДУЛЬНЕ ТРЬОХВИМІРНЕ ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ І ОБРОБЛЮВАНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ ШЛІФУВАННІ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ КРУГА ТА ДЕТАЛІ**

### ***Вступ***

Останнім часом просліджується тенденція розвитку трьохвимірного (3D) геометричного моделювання в країнах з високим рівнем машинобудування. Але відомі 3D моделі не достатньо враховують специфічні особливості абразивного інструменту, точність формоутворення і зняття припуску при шліфуванні поверхонь. В умовах ринкової економіки, коли вітчизняне машинобудування прагне стати конкурентоспроможним, ця проблема набуває важливого народногосподарського значення.

### ***Аналіз останніх досліджень та публікацій***

Вперше 3D моделі процесу зняття припуску, формоутворення і аналіз впливу плями контакту і його параметрів на продуктивність шліфування наведені в роботі [1].

3D моделювання формоутворення поверхонь, інструментів і зняття припуску при обробці лезовими інструментами розроблені в роботах [2, 3]. В них наведені схеми формоутворення, коли один ріжучий інструмент обробляє одну поверхню однієї деталі. 3D моделі зняття припуску і формоутворення при груповій обробці деталей, коли одним інструментом одночасно обробляється кілька деталей – обробка на двохсторонніх торцешліфувальних верстатах, а також при безцентровому шліфуванні, де базування відбувається по поверхні деталі, що обробляється і постійно змінюється, не приведені.

В роботі [4] наведені окремі 3D моделі формоутворюючих систем різних верстатів, їх точності, але узагальнених 3D моделей і методики їх побудови не приведено.

Аналіз відомих 3D геометричних моделей процесів зняття припуску і формоутворення поверхонь, в тому числі і розроблених раніше, показує, що вони [5, 6, 7] охоплюють обробку окремих груп деталей: торцевих, циліндричних, криволінійних та інших. Сучасне машинобудування потребує поєднання високого рівня і якості виробів з високою продуктивністю і гнучкістю виробництва. Це забезпечується, зокрема, застосуванням автоматизованих систем проектування і виробництва

CAD/CAM, геометричним ядром яких повинні бути ефективні і універсальні 3D моделі.

Метою даної роботи є:

- розробка компактних модульних 2D та 3D моделей твірних та напрямних ліній;
- розробка 3D моделей інструментальних та оброблюваних поверхонь.

### **Методи та результати**

Відмінною особливістю шліфувальних верстатів є те, що абразивний круг перед початком процесу шліфування повинен бути заправлений на цьому ж верстаті. Структура формоутворюючої системи шліфувального верстата має дві підсистеми, які здійснюють формоутворення абразивного інструмента 1 і поверхні деталі 2 (рис.1).

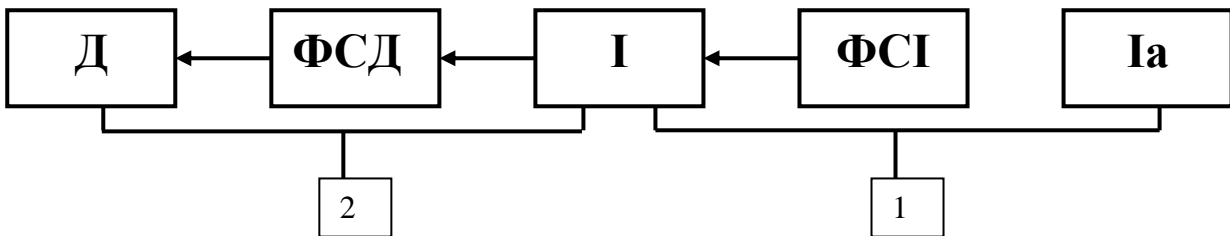


Рисунок 1 – Структура формоутворюючої системи шліфувального верстата

При вирішенні прямої і зворотної задач теорії формоутворення (1) зв'язок між координатами точок інструмента в його системі координат і координатами тих же точок в системі оброблюваної деталі описується рівнянням

$$\vec{r}_{oi} = M_{oi} \vec{r}_i, \quad (1)$$

де  $\vec{r}_i$  – радіус-вектор точок ріжучого інструмента, який визначається при його профілюванні;

$M_{oi}$  – матриця переходу із системи координат інструмента в систему координат деталі, яка визначається формоутворюючим кодом верстата.

Радіус-вектор  $\vec{r}_i$  робочої поверхні абразивного інструмента, який при правці являє собою оброблювану деталь, описується рівнянням

$$\vec{r}_i = M_{ia} \cdot \vec{e}^4, \quad (2)$$

де  $\vec{e}^4 = (0,0,0,1)^T$  – радіус-вектор початку координат, який співпадає з точкою алмазного олівця при профілюванні робочої поверхні круга ;

$M_{ia}$  – матриця переходу із системи координат точки алмазного олівця, який профілює круг, в систему координат  $O_i X_i Y_i Z_i$  абразивного круга.

З урахуванням формули (2), радіус-вектор  $\vec{r}_{oi}$  точок деталі буде мати вигляд

$$\vec{r}_{oi} = M_{oi} \cdot M_{ia} \cdot \vec{e}^4 \quad (3)$$

Невід'ємною частиною системного підходу є представлення об'єкта розробки у вигляді набору уніфікованих елементів–модулів [3]. Дослідження формоутворюючих систем верстатів показало, що в залежності від їх функціонального призначення обробка здійснюється в циліндричній, прямокутній і сферичній системі координат. Тому в якості модулів формоутворення пропонується застосовувати циліндричний  $C^\phi$ , прямокутний  $P^\phi$ , та сферичний  $S^\phi$  :

$$C_{z_\phi-\theta_\phi-y_\phi}^\phi = M_3(z_\phi) \cdot M_6(\theta_\phi) \cdot M_2(y_\phi), \quad (4)$$

$$P_{z_\phi-y_\phi-x_\phi}^\phi = M_3(z_\phi) \cdot M_2(y_\phi) \cdot M_1(x_\phi), \quad (5)$$

$$S_{\varphi_\phi-\psi_\phi-x_\phi}^\phi = M_4(\varphi_\phi) \cdot M_5(\psi_\phi) \cdot M_1(x_\phi), \quad (6)$$

де  $M_1, M_2, M_3$  – матриці четвертого порядку, які описують лінійні переміщення вздовж осей  $X, Y, Z$ ;

$M_4, M_5, M_6$  - матриці кутових поворотів відносно осей  $X, Y, Z$ ;

$x_\phi, y_\phi, z_\phi, \varphi_\phi, \psi_\phi, \theta_\phi$  – аргументи матриць.

Аналіз функціонального призначення інших модулів показав, що всі вони відповідають математичному опису приведених модулів формоутворення.

Так, модуль інструмента, наприклад, шліфувального круга описується циліндричним модулем  $C_i$ , шліфувального бруска – прямокутним модулем  $P_i$ , сферичного інструмента – сферичним модулем  $S_i$ . Модуль орієнтації, як правило, описується сферичним модулем  $S^o$ , як при обробці одним інструментом однієї деталі, так і при груповій обробці. Транспортно-подавальний модуль при груповій обробці описується циліндричним модулем  $C^m$ , модуль перетворення координат – прямокутним  $P^n$ .

Під модулем розуміють 3D геометричну модель, яка описує переміщення точки чи їх сукупності в трьохвимірному просторі, і має ряд функціональних призначень. Модуль можна представити у вигляді добутку трьох однокоординатних матриць четвертого порядку. При кодуванні модулів в нижньому індексі вказують аргументи цих матриць, в порядку їх розташування в добутку, а верхній індекс вказує функціональне призначення модуля.

При модульному 3D моделюванні оброблюваних поверхонь залежність (1) описує загальну частину рівнянь різних поверхонь деталей. 3D модель конкретної оброблюваної поверхні повинна включати в себе дві незалежні змінні. Для досягнення цього на аргументи в матрицях накладають зв'язки функціональні, огинання чи приховані, і отримують вирази всіх змінних через два аргументи. Число зв'язків визначається із виразу

$$n_s = (b_\phi + c_i) - 2, \quad (7)$$

де  $b_\phi$  – кількість ланок формоутворюючої системи верстата;

$c_i$  - число ланок формоутворюючої системи того ж верстата, які

здійснюють профілювання абразивного інструмента, наприклад, алмазним олівцем на круглошліфувальному верстаті 3M172.

Для повноти 3D моделей додаються нерівності, які обмежують інтервали значень параметрів. Рівень ієрархії загальної 3D моделі визначається числом модулів, які входять в матрицю переходу  $M_{\delta i}$  в рівнянні (1). Це рівняння можна представити в матричному вигляді, замінивши модулі їх математичними виразами із рівнянь (4, 5, 6).

Радіус-вектор оброблюваної поверхні деталі  $\bar{r}_{\delta i}$  описує загальну частину рівнянь різних поверхонь деталей, які обробляються на верстаті без урахування зв'язків в формоутворюючій системі. Сумарна кількість  $N$  схем обробки на верстаті визначається по запропонованій формулі

$$N = \sum_{j=1}^k (n_{j \max} - n_{j_0} - n_{j_3} - n_{j_k}), \quad (8)$$

де  $k$  – кількість різноманітних типів застосованих на верстаті інструментів;

$n_{j \max}$  – максимальне число варіантів зв'язків між рухами формоутворення при обробці  $j$ -им типом інструмента;

$n_{j_0}$  – число зв'язків, які дають однаковий вид поверхні при обробці одним  $j$ -им типом інструмента;

$n_{j_3}$  - число зв'язків, які зупиняють головний рух чи кругову подачу деталі, наприклад, при круглому шліфуванні поверхонь обертання чи один із рухів огинання;

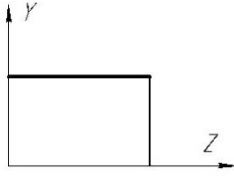
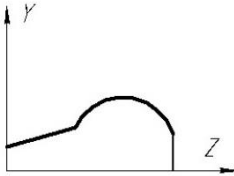
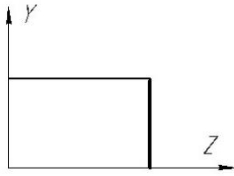
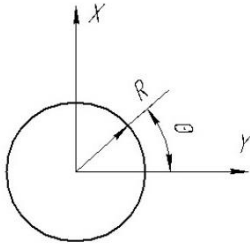
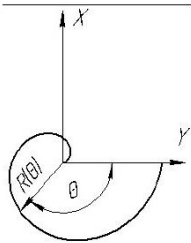
$n_{j_k}$  - число зв'язків, які заборонені спеціалізацією верстата.

При обробці точковим інструментом чи при геометричному моделюванні поверхонь, коли радіус-вектор  $\bar{e}^4 = (0, 0, 0, 1)^T$  початку координат (початкової точки) співпадає з оброблюваною поверхнею в виразі (7), кількість рухів формоутворення при профілюванні інструмента  $c_i=0$ . Циліндричний модуль формоутворення (4) включає три рухи формоутворення, тоді у виразі (7)  $b_\phi=3$ . Число необхідних зв'язків для описання поверхонь буде дорівнювати  $n_3 = 3+0-2 = 1$ .

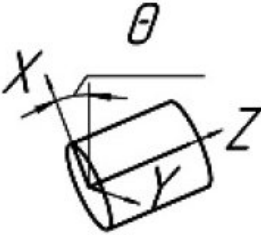
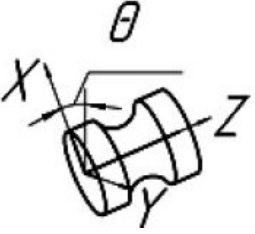
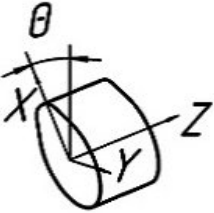
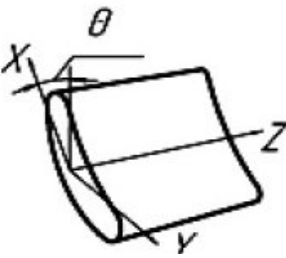
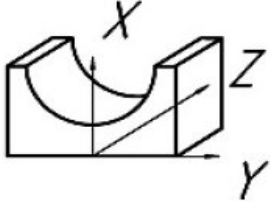
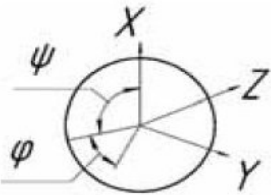
Таким чином, на три рухи формоутворення накладається один зв'язок. Для цього випадку максимальне число варіантів зв'язків (1)  $n_{j \max} = 7$ , тобто отримуємо сім 3D моделей поверхонь, шість із яких аналогічні геометричному моделюванню поверхонь при обробці точковим інструментом. Функціональний зв'язок  $\theta = 0$  при обробці точковим інструментом заборонений, тому що забороняється зупинити головний обертальний рух деталі.

Перший рівень загальних моделей забезпечує геометричне моделювання ліній (табл.1) та поверхонь (табл. 2). Другий рівень загальних моделей формоутворюючих систем визначається добутком двох моделей і описує поверхні, які обробляються відомими методами при паралельних осях інструмента і деталі (табл. 3).

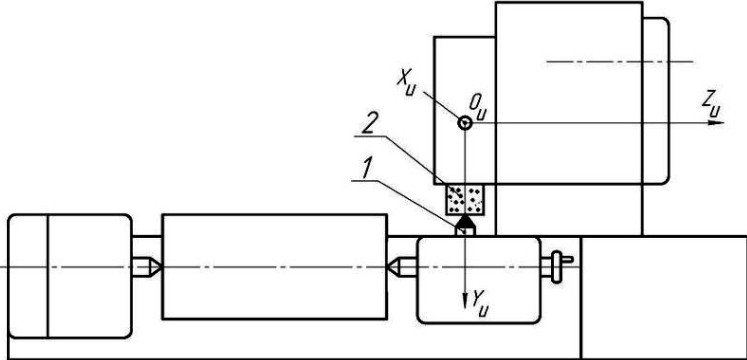
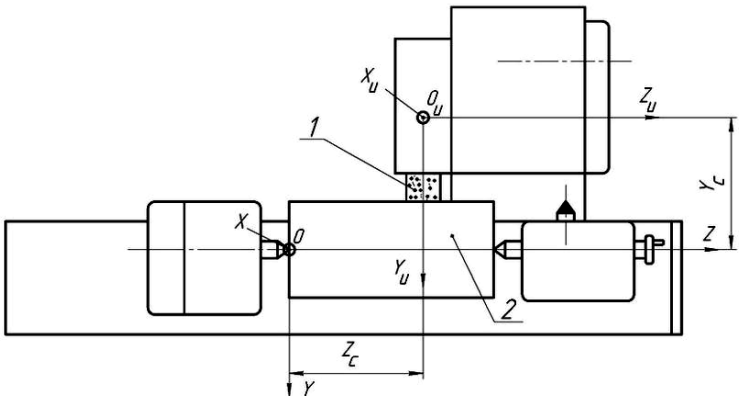
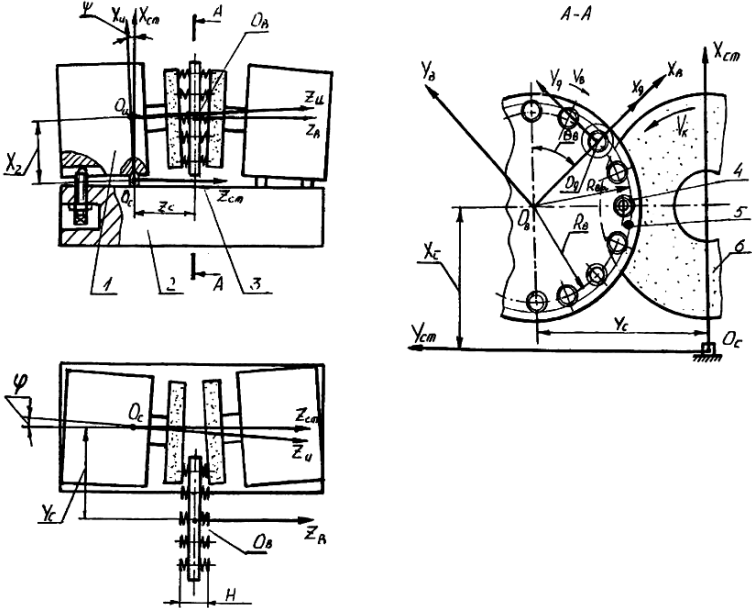
Таблиця 1 – 2D моделі твірних і направляючих ліній

Коди	Радіус-вектор $\vec{r}_{\text{дн}} = M_{\text{дн}} \cdot \vec{e}_4$	Система зв'язків	Схема формоутворення	Твірна і направляюча лінії
Геометричне моделювання				
$C_{z,y}^{\phi} \cdot \Pi$	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{z,y}^{\phi} \cdot \vec{e}_4$	$y = \text{const}$		Прямолінійна твірна
$C_{z,y}^{\phi} \cdot K$	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{z,y}^{\phi} \cdot \vec{e}_4$	$y = y(z)$		Криволінійна твірна
$C_{z,y}^{\phi} \cdot T$	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{z,y}^{\phi} \cdot \vec{e}_4$	$z = \text{const}$		Прямолінійна твірна на торці
$C_{y,x}^{\phi} \cdot O$	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y,x}^{\phi} \cdot \vec{e}_4$	$y = R$		Кругова напрямна
$C_{y,x}^{\phi} \cdot K$	$\vec{r}_{\text{дн}} = C_{y,x}^{\phi} \cdot \vec{e}_4$	$y = y(\theta)$		Криволінійна напрямна

Таблиця 2 – Модульні 3D моделі поверхонь

Коди	Радіус-вектор $\vec{r}_{\partial i} = M_{\partial i} \cdot M_i \cdot \vec{e}^4$	Схема зв'язків	Схема формоутворення	Поверхня
$C^{\phi C}$	$\vec{r}_{\partial i} = C_{z-\theta-y}^{\phi} \cdot \vec{e}^4$	$y=const$		Циліндрична
$C^{\phi T}$		$z=const$		Торцева
$C^{\phi B}$		$z=z(\theta)$		Гвинтова
$C^{\phi K}$	$\vec{r}_{\partial i} = C_{z-\theta-y}^{\phi} \cdot \vec{e}^4$	$y=y(z)$		Криволінійна поверхня
$C^{\phi H}$	$\vec{r}_{\partial i} = C_{z-\theta-y}^{\phi} \cdot \vec{e}^4$	$y=y(\theta)$		Некругла циліндрична
$C^{\phi Д}$	$\vec{r}_{\partial i} = C_{z-\theta-y}^{\phi} \cdot \vec{e}^4$	$y=y(z, \theta)$		Подвійної кривизни
$P^{\phi K}$	$\vec{r}_{\partial i} = P_{z-y-x}^{\phi} \cdot \vec{e}^4$	$x=x(y)$		Неповна циліндрична
$S^{\phi C}$	$\vec{r}_{\partial i} = S_{\varphi-\psi-x}^{\phi} \cdot \vec{e}^4$	$x=const$		Сферична

Таблиця 3 – Модульні 3D моделі формуючих систем верстатів

Коди	Загальна матриця $M = M_{oi} \cdot M_{ia}$	Формуюча система верстата при правці круга і шліфуванні деталі	Оброблюєма поверхня
Правка абразивних інструментів алмазним олівцем			
C <sup>ф</sup>	$M_{ia} = C_{z_i, \theta_i, y_i}^{\phi}$		Круглошліфувальний 3М172
Шліфування поверхонь при паралельних осях інструмента і деталі			
C <sup>ф</sup> C <sup>i</sup>	$M = C_{z_c, \theta_y}^{\phi} \cdot C_{z_i, \theta_i, y_i}^{\phi}$		Круглошліфувальний 3М172
Групова обробка зі схрещеними осями інструментів і деталей			
C <sup>ф</sup> C <sup>m</sup> P <sup>n</sup> S <sup>o</sup> C <sup>i</sup>	$M = C_{z_c, \theta_y}^{\phi} \cdot C_{z_b, \theta_b, y_b}^m \cdot P_{z_c, y_c, x_c}^n \cdot S_{\phi, \psi, \alpha}^o \cdot C_{z_i, \theta_i, y_i}^i$		Двохсторонній торцешліфувальний верстат 3342АД0

Найбільш перспективним при обробці однієї зафіксованої деталі одним інструментом є третій рівень, який визначається добутком трьох модулів. В порівнянні із другим рівнем добавляється модуль орієнтації інструмента відносно деталі  $S^o$ .

Групова обробка із круговою подачею деталей представляється модульними 3D моделями четвертого і п'ятого рівней ієрархії. Четвертим рівнем описується обробка при паралельних осях деталі та інструмента.

П'ятим рівнем описують обробку з орієнтацією інструмента відносно оброблюваної деталі (групова обробка деталей зі схрещеними осями інструмента і деталі на верстаті 3342 АДО (табл. 3), код  $C^f C^m P^n S^o C^i$ . За допомогою модуля орієнтації  $S^o$  визначають оптимальні кути схрещення осей і форми кругів, які забезпечують підвищення продуктивності і точності при обробці торців.

### **Висновки**

Розроблені модульні 2D і 3D геометричні моделі твірних та напрямних ліній, інструментальних і оброблюваних поверхонь, а також формоутворюючих систем шліфувальних верстатів, Моделювання виконується на базі трьох уніфікованих модулів із постійним математичним описанням кожного, що спрощує процес моделювання. Ієрархія загальних моделей дає можливість спростити розрахунки в порівнянні з відомими моделями для груп деталей. Модульне моделювання дає можливість не тільки аналізу 3D моделей, але і їх синтезу.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. *Кальченко В.И.* Научные основы шлифования криволинейных поверхностей с управляемой ориентацией абразивного инструмента //Диссертация докт. техн. наук. Харьков:ХГПУ.-1994.-329с.
2. *Грабченко А.И., Кондусова Е.Б., Кривошея А.В., Равская Н.С., Родин П.Р.* 3D-моделирование инструментов, формообразования и съема припуска при обработке резанием. Харьков, 2001, 302 с.
3. *Перепелица Б.А.* Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием.- Харьков: Вища школа – 1991.- 512 с.
4. *Решетов Д.Н., Портман В.Т.* Точность металлорежущих станков.-М.: Машиностроение, 1986, 336 с.
5. *Кальченко В. В.* Общая трехмерная (3D) модель поверхностей кругов при шлифовании со скрещивающимися осями инструмента и детали// Вестник Национального технического университета „ХПИ”.- Харьков: НТУ „ХПИ”. – 200, №6, С. 114 – 118.
6. *Кальченко В.В.* Общая (3D) модель формообразующих систем станков при шлифовании поверхностей со скрещивающимися осями кругов и детали// Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. научн - техн. Сборник. –Харьков. НТУ «ХПИ». – 2001.- Вып. 59, С.118 – 123.
7. *Кальченко В.В.* Модульне 3D моделювання формоутворюючих систем шліфувальних верстатів та оброблюваних поверхонь// Вісник Тернопільського державного технічного університету, 2005.- Том 12.- №2.- С.68 - 79