

УДК 621.923

**В. І. Кальченко**, д.т.н., професор,  
e-mail: [kalchenkovi@ukr.net](mailto:kalchenkovi@ukr.net)

**В. В. Кальченко**, д.т.н., професор,  
e-mail: [vykalchenko74@gmail.com](mailto:vykalchenko74@gmail.com)

**О. С. Следнікова**, аспірант,  
e-mail: [sliednikova@gmail.com](mailto:sliednikova@gmail.com)

**Д. В. Кальченко**, магістрант  
e-mail: [vykalchenko74@gmail.com](mailto:vykalchenko74@gmail.com)

Чернігівський національний технологічний університет  
вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ТОРЦІВ ОРІЄНТОВАНИХ ДЕТАЛЕЙ ПРОФІЛЬОВАНИМИ КРУГАМИ

*Стаття присвячена дослідженню процесу двостороннього торцевого шліфування деталей, де обробка торцевих поверхонь здійснюється за один прохід орієнтованими у двох площинах та профільованими шліфувальними кругами. Наведено залежності для визначення локальної, питомої та миттєвої продуктивності обробки, лінійного та об'ємного зносу абразивного інструменту, сил різання, потужності та теплового потоку при шліфуванні, які враховують температуру нагрівання деталі та жорсткість системи по координаті обробки. Побудовано графік коефіцієнта, який враховує вплив температури нагрівання деталі на величину напруги зсуву. Наведено загальну модель твірних інструментальних поверхонь та їх безперервний опис і твірні некруглих деталей, які оброблюються на одно- та двосторонніх торцешліфувальних, плоскошліфувальних та інших верстатах. Представлено тривимірні моделі поверхонь інструментів та деталей з некруглим профілем.*

**Ключові слова:** двостороннє шліфування торців, продуктивність, сили різання, потужність, температура, орієнтація.

**Вступ.** Забезпечення високої точності оброблюваних поверхонь деталей досягається фінішними операціями, однією з яких є шліфування. Так, наприклад, обробку торців деталей здійснюють на двосторонніх торцешліфувальних верстатах, що дозволяє забезпечити високу точність та продуктивність. Розробка нових способів шліфування торців деталей та їх дослідження сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності машинобудівних, автомобілебудівних, інструментальних та інших підприємств України.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У роботах [1–4] наведено розрахунки продуктивності, зносу інструментів, сил різання та потужності при шліфуванні деталей, у [5, 6] наведено розрахунок продуктивності при обробці одним пругом зерна та всією поверхнею шліфувального круга відповідно, в [7] визначаються сили різання при обробці, в [8] – знос інструментів. Але в зазначених роботах не враховано вплив температури та жорсткості системи по координаті обробки.

Вплив температури нагрівання деталей на продуктивність шліфування подано в [4], податливості та динамічних характеристик системи на величину сили різання – в [9, 10]. Але в роботах не наведено залежності для розрахунку продуктивності обробки, зносу шліфувальних кругів, сил різання та потужності, які б одночасно враховували вплив і теплонпруженості процесу, і жорсткості системи по координаті обробки.

У роботах [11, 7] розроблено інструмент, що забезпечує високу продуктивність обробки та необхідну точність оброблюваних деталей.

**Постановка проблеми.** Відсутність загальної моделі твірних інструментальних поверхонь та їх безперервного опису і залежностей для розрахунку продуктивності обробки, зносу інструменту, сил різання та потужності при двосторонньому торцевому шліфуванні, які б одночасно враховували вплив теплонпруженості процесу та жорсткості системи по координаті обробки, що забезпечить отримання необхідної точності оброблених деталей та високої продуктивності шліфування.

**Мета статті** – розробка загальної моделі твірних поверхонь інструментів і деталей, їх безперервний опис та дослідження впливу температури нагрівання деталі й жорсткості системи по координаті обробки на точність та продуктивність обробки.

#### Виклад основного матеріалу.

**Розрахунок продуктивності обробки, зносу, сил різання, потужності та теплового потоку при двосторонньому торцевому шліфуванні.** Дослідження процесу шліфування полягає у визначенні продуктивності обробки, зносу шліфувальних кругів, сил різання, потужності теплового потоку при обробці, що забезпечує можливість оцінювання ефективності процесу.

Обробка деталей при двосторонньому торцевому шліфуванні здійснюється за один прохід орієнтованими у двох площинах шліфувальними кругами, що підвищує продуктивність порівняно з одностороннім і багатопрхідним двостороннім торцешліфуванням [12].

Загальна схема для визначення продуктивності шліфування торцевих поверхонь зі схрещеними осями кругів та деталей наведена в [1].

Загальна модульна модель формоутворення торцевих поверхонь деталей, наведена в роботах [1, 13], дозволяє визначити локальну продуктивність обробки  $Q_L$  за формулою

$$Q_L(\Theta, \Pi_i) = \bar{V}_{in} \cdot dF(\Theta, \Pi_i), \quad (1)$$

де  $\bar{V}_{in}$  – вектор швидкості відносного руху;

$dF(\Theta, \Pi_i)$  – елементарна площадка плями контакту інструмента та деталі, вона залежить від тимчасового опору, що залежить від температури нагрівання деталі  $\Theta$  та коефіцієнта, що враховує жорсткість системи по координаті обробки  $\Pi_i$ .

Довжина елементарної площадки –  $(R_i - I_{in}(\Theta) \cdot \sin \alpha_{in} - \Pi_i) d\theta_k$ , вона вимірюється по дузі кола  $R_i - I_{in}(\Theta) \cdot \sin \alpha_{in} - \Pi_i$ , а ширина елементарної площадки описується

виразом  $\sqrt{\left(\frac{dR_{in}}{di}\right)^2 + \left(\frac{dZ_{in}}{di}\right)^2} di$ . Підставимо

дані у формулу (1):

$$Q_L(\Theta, \Pi_i) = \bar{V}_{in} \cdot (R_i - I_{in}(\Theta) \cdot \sin \alpha_{in} - \Pi_i) d\theta_k \cdot \sqrt{\left(\frac{dR_{in}}{di}\right)^2 + \left(\frac{dZ_{in}}{di}\right)^2} di, \quad (2)$$

де  $R_i$  – радіус координати  $i$ -ї точки профілю круга після правки;

$R_{in}, Z_{in}$  – радіус осевого перерізу круга в  $i$ -й точці профілю шліфувального круга при обробці  $n$ -ї деталі і його осева координата;

$I_{in}(\Theta)$  – знос шліфувального круга, який залежить від тимчасового опору, що залежить від температури нагрівання деталі;

$\alpha_{in}$  – кут нахилу дотичної в  $i$ -й точці профілю, що визначає напрямок зносу  $I_{in}(\Theta)$  круга, який залежить від температури нагрівання деталі  $\Theta$ ;

$\Pi_i$  – коефіцієнт, що враховує сумарну жорсткість системи;

$\theta_k$  – кутовий параметр круга.

Питома продуктивність  $Q_{yin}$ , яка показує об'єм матеріалу, що зрізується ділянкою круга в межах  $i$ -ї точки профілю, визначається з виразу

$$Q_{yin}(\Theta, \Pi_i) = \int_{\theta_{1ki}}^{\theta_{2ki}} \bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot (R_i - I_{in}(\Theta) \cdot \sin \alpha_{in} - \Pi_i) \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t, \theta)}{b_0}\right) \right] \cdot d\theta_k, \quad (3)$$

де  $1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t, \theta)}{b_0}\right)$  – вірогідність видалення матеріалу заготовки, яка розраховується за методикою Ю. К. Новоселова [14, 15];

$\bar{n}_{in}$  – вектор нормалі  $i$ -ї точки профілю круга після обробки  $n$  деталей.

Миттєва продуктивність шліфування  $Q_m$ , що дає можливість розраховувати миттєвий об'єм металу, який зрізується на плямі контакту круга та деталі по координаті обробки, описується подвійним інтегралом по  $i$ -й координаті та кутовій координаті плями контакту:

$$Q_m(\Theta, \Pi_i) = \int_{i_1}^{i_2} \left( \int_{\theta_{1ki}}^{\theta_{2ki}} \bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot (R_i - I_{in}(\Theta) \cdot \sin \alpha_{in} - \Pi_i) \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t, \theta)}{b_0}\right) \right] \cdot d\theta_k \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{dR_{in}}{di}\right)^2 + \left(\frac{dZ_{in}}{di}\right)^2} di, \quad (4)$$

де  $i_1, i_2$  – граничні значення параметра  $i$  осевого перерізу круга в зоні контакту;

$\theta_{1ki}, \theta_{2ki}$  – кутові координати плями контакту на радіусі  $R_i - I_{in}(\Theta) \cdot \sin \alpha_{in} - P_i$ .

Об'ємний знос визначається з формули [1]:

$$q_1(\Theta, \Pi_i) = \frac{Q_a}{Q_{yin}(\Theta, \Pi_i)} = C_q \cdot Q_{yin}(\Theta, \Pi_i)^{m-1}, \quad (5)$$

де  $Q_a$  – об'ємна кількість зношеного абразиву за одиницю часу;

$Q_{yin}(\Theta, \Pi_i)$  – швидкість знятого металу за той же час;

$C_q$  – коефіцієнт, що дорівнює швидкості зносу при  $Q_{yin}(\Theta, \Pi_i) = 1$ .

Лінійний знос  $I_{in}$  в  $i$ -й точці профілю круга в процесі обробки  $n$ -ї деталі визначається з виразу [1]:

$$I_{in}(\Theta, \Pi_i) = \int_0^{T_o} \left( \frac{C_{yin} \cdot Q_{yin}(\Theta, \Pi_i)^{m_1}}{k_\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{in}} + \frac{C_{qin} \cdot Q_{qin}(\Theta, \Pi_i)^{b_1}}{k_\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{in}} \right) dT_o, \quad (6)$$

де  $Q_{yin}(\Theta, \Pi_i)$  – питомий об'єм металу, що знімається  $i$ -ю ділянкою  $n$ -го профілю круга, який залежить від тимчасового опору, що залежить від температури нагрівання деталі  $\Theta$  та податливості в  $i$ -й точці  $\Pi_i$ , визначається з виразу (3) при  $\bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot \tau_i \geq a_{z \min}$ ;

$Q_{qin}(\Theta, \Pi_i)$  – питомий об'єм деформованого металу абразивними зернами  $i$ -ї ділянки  $n$ -го профілю круга, визначається з виразу (3) при  $\bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot \tau_i \leq a_{z \min}$ ;

$a_{z \min}$  – мінімальна товщина шару, що зрізується різальним кругом;

$C_{yin}, C_{qin}$  – коефіцієнти питомого зносу в  $Ri$ -й точці  $n$ -го профілю круга при  $Q_{yin}(\Theta, \Pi_i) = 1$  та  $Q_{qin}(\Theta, \Pi_i) = 1$ , які визначаються експериментально для кожної  $i$ -ї ділянки круга;

$m_1$  – коефіцієнт, що враховує інтенсивність режиму шліфування та стан різальної поверхні пруга;

$b_1$  – коефіцієнт, що враховує інтенсивність режиму деформування металу без його зняття;

$k_\alpha$  – коефіцієнт, що враховує перекриття різальних пругів;

$T_o$  – час обробки деталі за частину її оберту, один оберт чи кількість обертів, необхідних для обробки  $n$ -ї деталі ділянкою круга в межах  $i$ -ї точки його профілю.

Потужність шліфування  $N(\Theta, \Pi_i)$  однієї деталі одним інструментом визначається з виразу [1]:

$$N(\Theta, \Pi_i) = a \cdot Q(\Theta, \Pi_i), \quad (7)$$

де  $Q(\Theta, \Pi_i)$  – продуктивність шліфування, яка визначаються за формулами (2–4), вона залежить від температури нагрівання деталей  $\Theta$  та податливості в  $i$ -й точці  $\Pi_i$ ;

$a$  – питома потужність, що витрачається на зняття одиниці об'єму, визначається експериментально.

Щільність теплового потоку залежить від тимчасового опору, що залежить від температури нагрівання деталей  $\Theta$ , та податливості в  $i$ -й точці  $\Pi_i$  і визначається з виразу [1]:

$$q(\Theta, \Pi_i) = \frac{b \cdot N(\Theta, \Pi_i)}{F}, \quad (8)$$

де  $b$  – коефіцієнт, який враховує розподіл теплового потоку між стружкою, що зрізується, та заготовкою;

$F$  – площа поверхні контакту круга та заготовки.

На рис. 1 зображено графік тимчасового опору [4] від температури для сталі ШХ15.

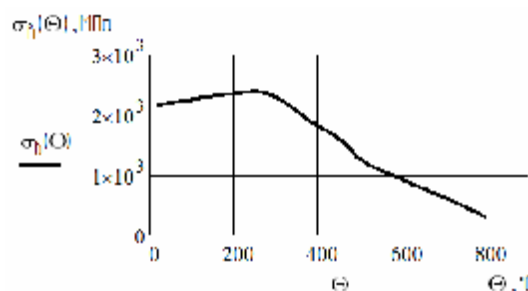


Рис. 1. Графік залежності тимчасового опору  $\sigma_b$  від температури нагрівання деталі

Використовуючи залежності, наведені в роботі [3], визначимо сили різання, які діють на окреме зерно, з урахуванням податливості системи та температури заготовки:

$$P^{\tau}(\Theta) = P_{cd}^{\tau} + P_{mp}^{\tau} + P_{ин}^{\tau} = \tau_s(\Theta) \cdot z \cdot \rho \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{\sin(\beta + \varphi_s)}{\sin \beta \cdot \sin \varphi_s} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} + 2\pi\mu / (3\mu_s) + \dots \\ & + \frac{\rho_m \cdot v \cdot (v - v_c \cdot \sin \gamma)}{\tau_s(\Theta)} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$$P^n(\Theta) = P_{cd}^n + P_{mp}^n + P_{ин}^n = \tau_s(\Theta) \cdot z \cdot \rho \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{\cos(\beta + \varphi_s)}{\sin \beta \cdot \sin \varphi_s} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} + 2\pi / (3\mu_s) + \dots \\ & + \frac{\rho_m \cdot v \cdot v_c \cdot \cos \gamma}{\tau_s(\Theta)} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

де  $P^{\tau}(\Theta)$ ,  $P^n(\Theta)$  – тангенціальна і нормальна складові сили мікрорізання одиничним зерном;  
 $P_{cd}^n$ ,  $P_{mp}^n$ ,  $P_{ин}^n$  – сили зсуву, тертя, інерції;  
 $\tau_s(\Theta)$  – напруги зсуву, які залежать від температури нагрівання матеріалу;

$z$ ,  $\rho$  – глибина проникнення вершини зерна в матеріал заготовки і радіус її округлення;

$\rho_m$  – щільність матеріалу заготовки;

$v$  – швидкість різання;

$v_c = v \sin \beta / \cos(\beta - \gamma)$  – проекція швидкості руху стружки на напрям переміщення зерна відносно матеріалу заготовки;

$\beta = 12^\circ$  – кут зсуву оброблюваного матеріалу;

$\gamma = \arcsin(1 - z / 2\rho)$  – передній кут різального пруга;

$\mu_s$ ,  $\mu$  – коефіцієнти тертя в площині зсуву та на задній поверхні пруга;

$\varphi_s = \arctg \mu_s$  – кут тертя в площині зсуву.

Для описання залежності  $\tau_s$  від температури нагрівання  $\Theta$  сталі ШХ15 побудуємо графік залежності коефіцієнта  $K_{\Theta} = f(\Theta)$  (рис. 2), який враховує зміну міцності оброблюваного матеріалу при зміні температури нагрівання  $\Theta$ . Напругу зсуву визначаємо згідно з [4, 16].

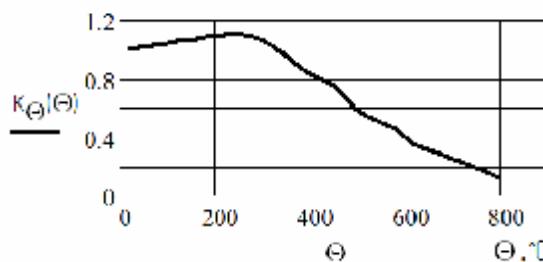


Рис. 2. Графік залежності коефіцієнта  $K_{\Theta}$  від температури нагрівання деталі  $\Theta$

**Загальна модель твірної поверхонь інструментів, деталей та їх безперервний опис.** Забезпечення неперервності загальної моделі твірної інструментальних поверхонь досягається використанням функції Хевісайда у декартовій або полярній системі координат. Також за допомогою функції Хевісайда можна задавати деталі з некруглим профілем: кінцеві міри, багатогранні непереточувані пластини та ін.

Твірна шліфувального круга при обробці розподільчих валів та інших циліндричних поверхонь деталей складається з трьох ділянок (рис. 3) [17]. Також з трьох ділянок складається твірна різця для розточування сідел клапана ДВЗ (рис. 4), де формоутворення здійснюється методом копіювання [18].

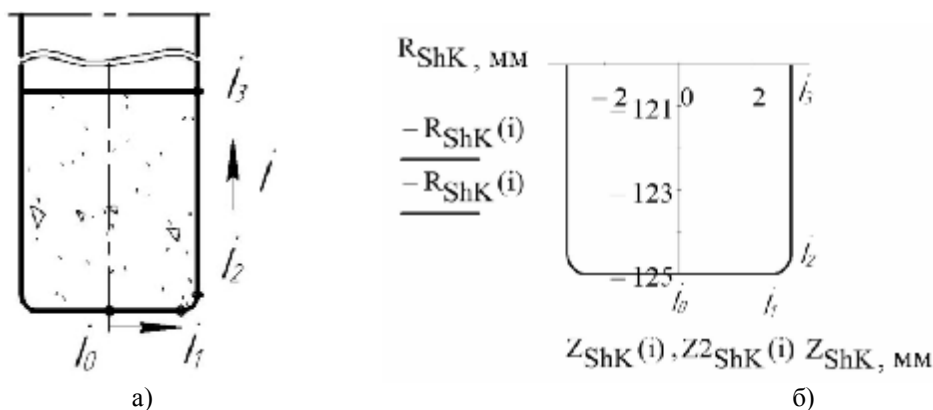


Рис. 3. Профіль шліфувального круга для обробки циліндричних деталей

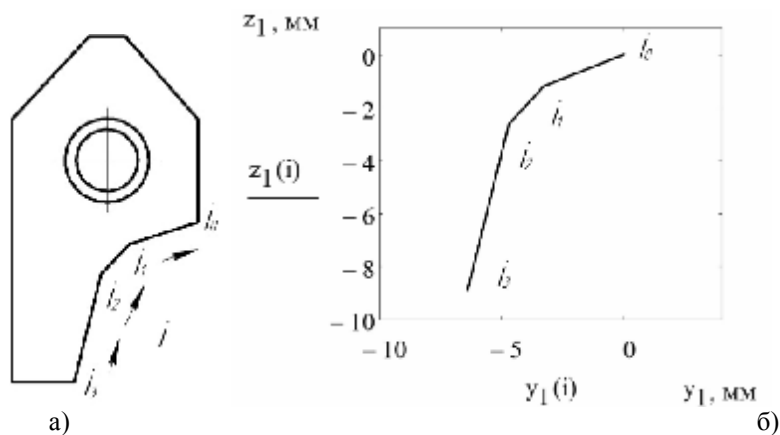


Рис. 4. Різальна пластина

При двосторонньому торцевому шліфуванні твірні круги описуються двома ділянками (торець та калібрувальна ділянка), які беруть участь у знятті припуску, і периферією, що не бере участі в обробці (рис. 5) [13]. При односторонньому шліфуванні торцевих поверхонь деталей круги [19] описуються

трьома ділянками (рис. 6). Профільований шліфувальний круг для обробки торцевих поверхонь також складається з трьох ділянок (рис. 7), при цьому профільна ділянка виконує обробку методом послідовного копіювання, а торці не беруть участі в обробці.

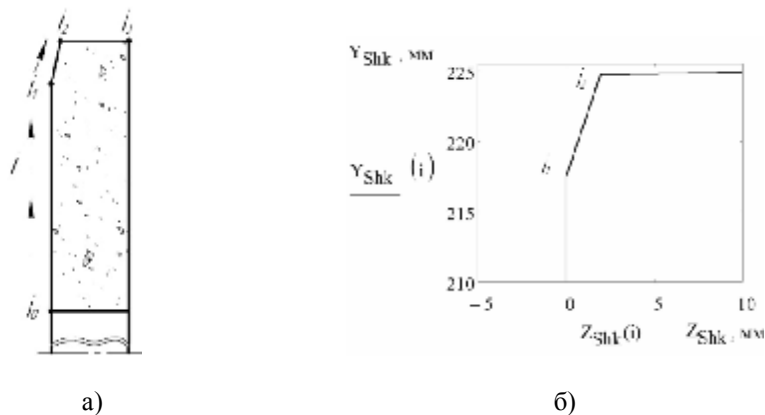


Рис. 5. Профіль шліфувального круга при обробці торців деталей

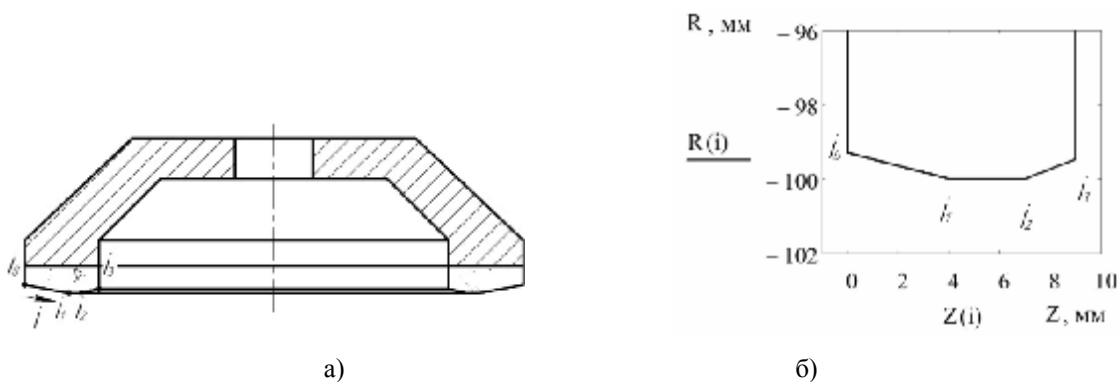


Рис. 6. Чашковий шліфувальний круг

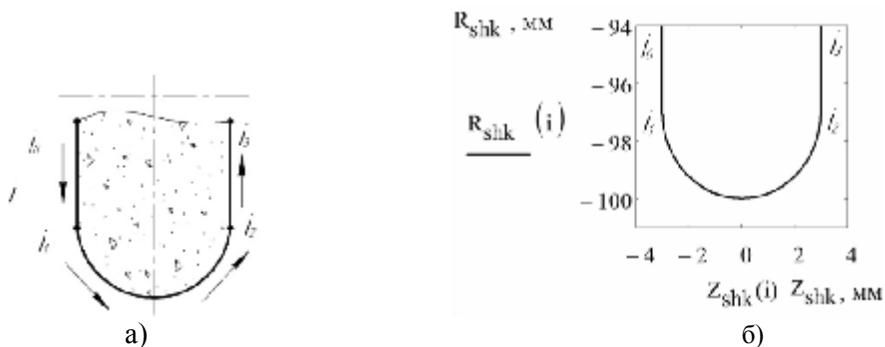


Рис. 7. Інструмент для обробки торової поверхні

Твірні інструментальних поверхонь будуємо в системі автоматизованого проектування Mathcad, при профілюванні шліфувального круга прямого профілю для обробки розподільчого валу [18] вираз буде мати вигляд:

$$Z_u(i) = i \cdot (1 - \Phi(i - i_1)) + \left( i_1 + r \cdot \sin\left(\frac{i - i_1}{r}\right) \right) \cdot (\Phi(i - i_1) - \Phi(i - i_2)) + (i_1 + r) \cdot \Phi(i - i_2), \quad (11)$$

$$R_u(i) = R \cdot (1 - \Phi(i - i_1)) + \left( R + r \cdot \cos\left(\frac{i - i_1}{r}\right) - 1 \right) \cdot (\Phi(i - i_1) - \Phi(i - i_2)) + (R - r - i + i_2) \cdot \Phi(i - i_2), \quad (12)$$

де  $\Phi$  – функція Хевісайда, яка забезпечує безперервний опис профілю круга;

$i_{r\text{поч}}$ ,  $i_{r\text{кін}}$  – координата  $i$  (рис. 4) початку та кінця радіусної ділянки шліфувального круга;

$R$ ,  $r$  – радіус шліфувального круга та заокруглення його пруга.

Аналогічно виглядають рівняння, які описують профілі шліфувальних кругів, зображених на рис. 3–6. Ця методика може бути використана і для інструментів, що складаються з більшої кількості ділянок.

Твірні некруглих деталей складаються з трьох та більше ділянок (рис. 8), вони задаються в полярній системі координат: тригранні непереточувані пластини складаються з трьох ділянок (рис. 8, а), кінцеві міри та чотиригранні – з чотирьох (рис. 8, б, в), п'ятигранні – з п'яти (рис. 8, г), шестигранні – з шести (рис. 8, д), також можна задавати й інші поверхні.

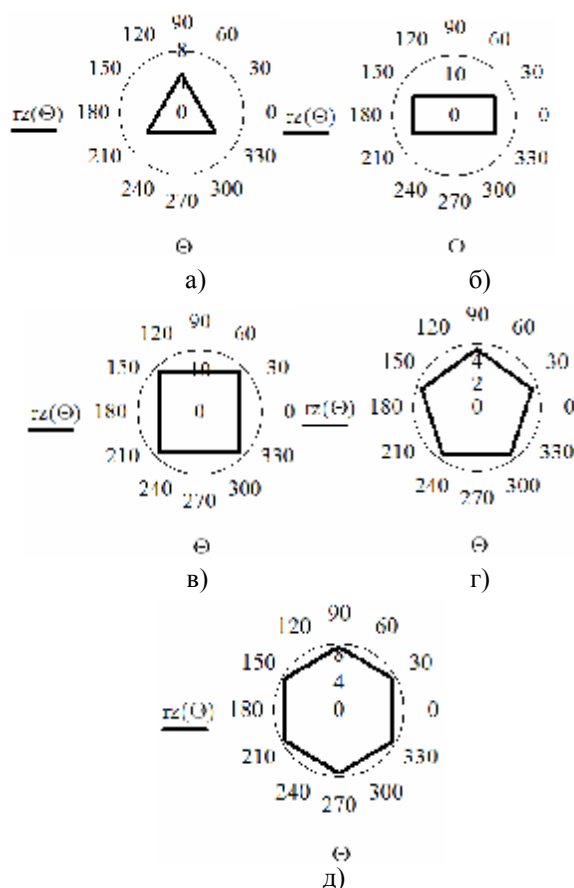


Рис. 8. Оброблювані деталі

Твірні деталей з некруглим профілем задаються в полярній системі координат, при цьому кожна ділянка описується окремою залежністю, для тригранної непереточуваної пластини твірну можна описати рівнянням:

$$rz(\Theta) = rz1(\Theta) \cdot (1 - \Phi(\Theta - \varphi1)) + z2(\Theta) \cdot (\Phi(\Theta - \varphi1) - \Phi(\Theta - \varphi2)) + z3(\Theta) \cdot (\Phi(\Theta - \varphi2)), \quad (13)$$

де  $rz1(\Theta)$ ,  $z2(\Theta)$ ,  $z3(\Theta)$  – рівняння першої, другої та третьої ділянок тригранної непереточуваної пластини.

$\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – кут початку та закінчення ділянок тригранної непереточуваної пластинки.

За цією методикою можна задавати профілі деталей, які складаються з більшої кількості ділянок.

Інструментальні поверхні отримують за допомогою руху твірної по напрямній. Поверхні інструментів шліфувальних кругів прямого профілю (рис. 9, а), для двостороннього, одностороннього торцевого шліфування (рис. 9, в, г), профільного для обробки торцевих поверхонь (рис. 9, д) отримують рухом твірної по круговій напрямній, при описанні лезового інструменту твірну рухають по прямолінійній напрямній (рис. 9, б).

Загальна модель інструментальної поверхні шліфувального круга (рис. 9, а) має вигляд:

$$\bar{r}_u = C_{Z_u(i)\theta_u}^u \cdot R_u(i) \cdot \bar{e}_4, \quad (14)$$

де  $\bar{r}_u$  – радіус-вектор точок шліфувального круга;

$Z_u(i)$  –  $i$ -та осьова координата шліфувального круга (11);

$\theta_u$  – кут повороту інструмента навколо власної осі;

$R_u(i)$  –  $i$ -та координата радіуса шліфувального круга (12).

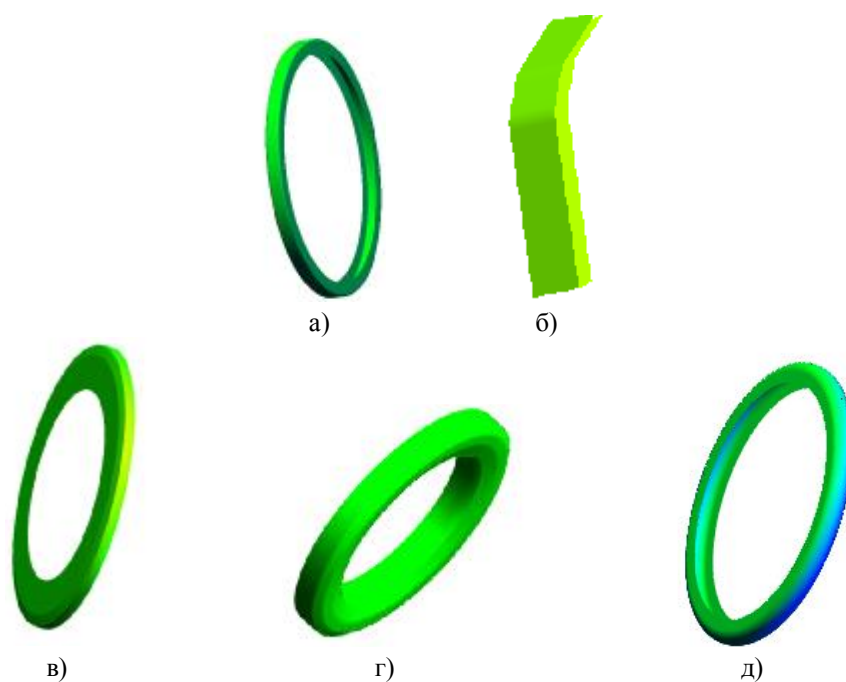


Рис. 9. Інструментальні поверхні

Циліндричний модуль, який описує інструментальну поверхню,

$$C_{\theta_u \cdot i}^u = M_3(Z_u(i)) \cdot M_6(\theta_u) \cdot M_2(R_u(i)). \quad (15)$$

У модульних 3D-моделях використовуються однокоординатні матриці  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$ ,  $M_5$ ,  $M_6$ , які описують переміщення вздовж осей та повороти навколо них.

Аналогічно будуються поверхні шліфувальних кругів (рис. 9, в-д).

При описанні пластинки для розточування сідла клапана ДВЗ використовуємо прямокутний модуль:

$$\bar{r}_{instr} = P_{Z_u(i)B \cdot X_u(i)}^u \cdot \bar{e}_4, \quad (16)$$

де  $\bar{r}_{instr}$  – радіус-вектор точок пластинки;

$Z_u(i)$  –  $i$ -та осьова координата пластинки;

$B$  – ширина пластинки;

$X_u(i)$  –  $i$ -та координата профілю пластинки.

Поверхні деталей з некруглим профілем: тригранні (рис. 10, а) та чотиригранні (рис. 10, б) непереточувані пластинки, кінцеві міри (рис. 10, в), п'ятигранні (рис. 10, г) та шестигранні (рис. 10, д) непереточувані пластинки описують рухом твірної вздовж їх осей.

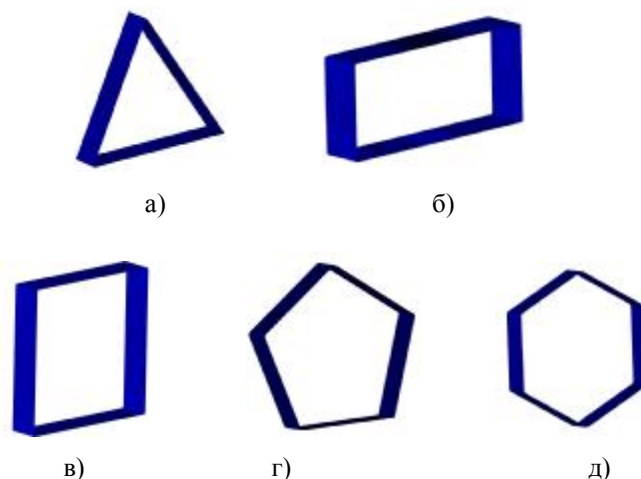


Рис. 10. Поверхні деталей

Прямокутний модуль, який описує інструментальну поверхню пластинки,

$$P_{B_u}^u = M3(Z_u(i)) \cdot M2(B_u) \cdot M1(X_u(i)). \quad (17)$$

Загальна модель поверхні деталей (рис. 10) має вигляд

$$\bar{r}_\partial = C_{Z_\partial \cdot \theta_\partial \cdot rz(\theta_\partial)}^\partial \cdot \bar{e}4, \quad (18)$$

де  $\bar{r}_\partial$  – радіус-вектор точок деталі;

$Z_\partial$  – довжина деталі;

$\theta_\partial$  – кутова координата профілю деталі відносно власної осі;

$rz(\theta_\partial)$  – координата профілю деталі, яка

залежить від кута  $\theta_\partial$ .

Циліндричний модуль, який описує поверхню деталі,

$$C_{\theta_\partial \cdot Z_\partial}^\partial = M3(Z_\partial) \cdot M6(\theta_\partial) \cdot M2(rz(\theta_\partial)). \quad (19)$$

#### Висновки:

1. Уточнено формули розрахунку продуктивності обробки, зносу шліфувальних кругів, сил різання, потужності й теплового потоку за допомогою коефіцієнтів, що враховують температуру нагрівання деталі та жорсткість системи.

2. Наведено загальну модель твірних інструментальних поверхонь, оброблюваних деталей та їх безперервний опис, на базі якої описуються тривимірні геометричні моделі.

#### Список літератури

1. Грабченко А. И. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : монография / Грабченко А. И.,

Кальченко В. И., Кальченко В. В. – [изд. 2-е, доп.]. – Чернигов: ЧНТУ, 2015. – 504 с.

2. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л. : Машиностроение, 1979. – 248 с.

3. Филимонов Л. Н. Плоское шлифование / Л. Н. Филимонов – Л. : Машиностроение, 1985. – 109 с.

4. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак – М. : Машиностроение, 1974. – 280 с.

5. Рудик А. В. Визначення граничної товщини зрізу, що забезпечує ефективне шліфування / А. В. Рудик, В. А. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : наук. зб. – 2012. – № 1 (55). – С. 96–101. – (Серія «Технічні науки»).

6. Рудик А. В. Продуктивність обробки торців на торцево-шліфувальних верстатах / А. В. Рудик, В. А. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2010. – № 45. – С. 57–67.

7. Польшаков В. І. Теоретичні і практичні основи високопродуктивного торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук / В. І. Польшаков. – Київ, 1998. – 27 с.

8. Вайнер Л. Г. Модель износа шлифовальных кругов при двустороннем торцевом шлифовании с прямолинейной подачей заготовок / Л. Г. Вайнер, В. А. Носенко // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – № 3 (48). – С. 88–91.



9. Вайнер Л. Г. Моделирование сил резания и характеристик съема припуска при двустороннем шлифовании торцов одиночной заготовки / Л. Г. Вайнер // Новые материалы и технологии в машиностроении (ФГБОУ ВПО Брянская гос. инж.-технол. акад.). – 2011. – № 14. – С. 14–17.
10. Петраков Ю. В. Моделирование отклонения формы при круглом шлифовании / Ю. В. Петраков // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві : зб. наук. праць. – Вип. 1 (2). – Одеса : ОНПУ, 2013. – С. 63–71.
11. Лавриненко В. И. Технология финишного двустороннего шлифования опорных поверхностей многогранных пластин / В. И. Лавриненко, И. В. Лещук // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві : зб. наук. праць. – Одеса : ОНПУ, 2014. – Вип. 2 (7). – С. 93–96.
12. Saturn. Торцевое шлифование спаренными шлифовальными кругами: [Журнал для клиентов фирмы «Junkermaschinen»] / ErwinJunker: Maschinenfabric GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787. – Nordrash, Germany, 2005 – 8 с.
13. Следникова О. С. Модульне моделювання профілів кругів, зняття припуску та формоутворення при двосторонньому шліфуванні торців некруглих деталей / О. С. Следникова // Технічні науки та технології : наук. журн. – Чернігів : Черніг. нац. технол. ун-т, 2016. – № 3 (5). – С. 76–84.
14. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 232 с.
15. Гусев В. В. Математическое моделирование взаимодействия шлифовального круга и материала заготовки при обработке / В. В. Гусев // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – Вип. 11. – С. 68–71.
16. Носенко В. А. Шлифование адгезионно-активных металлов / В. А. Носенко. – М. : Машиностроение, 2000. – 262 с.
17. Кальченко В. І. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесу зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями розподільного вала і круга / Кальченко В. І., Кальченко Д. В., Следникова О. С. // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2015 – Вып. 85. – С. 98–106.
18. Модульное 3D-моделирование инструментов, процесса съема припуска и формообразования при растачивании седел клапанов ориентированной пластинкой / В. И. Кальченко, В. В. Кальченко, Г. А. Веремей, Е. С. Следникова // Вісник Чернігівського державного технологічного університету : наук. зб. – 2015. – № 2 (78). – С. 51–60. – (Серія «Технічні науки»).
19. Музичка Д. Г. Підвищення ефективності шліфування твердих сплавів спрямованим обмеженням формозміни різальної поверхні шліфувальних кругів: : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Д. Г. Музичка. – Чернігів, 2015. – 20 с.

#### References

1. Grabchenko, A. I., Kal'chenko, V. I. and Kal'chenko, V. V. (2015) Grinding with crossed axes of tool and workpiece. Chernigov: ChNTU, 504 p. [in Russian].
2. Filimonov, L. N. (1979) High-speed grinding. L.: Mashinostroenie, 248 p. [in Russian].
3. Filimonov, L. N. (1985) Surface grinding. L.: Mashinostroenie, 109 p. [in Russian].
4. Korchak, S. N. (1974) Performance of the process of steel parts grinding. Moscow: Mashinostroenie, 280 p. [in Russian].
5. Rudyk, A. V. and Rudyk, V. A. (2012) Determining the marginal slice thickness, providing efficient grinding. *Visnyk Chernigivskoho derzhavnoho tehnologichnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky»*, No. 1 (55), pp. 96–101 [in Ukrainian].
6. Rudyk, A. V. and Rudyk, V. A. (2010) Productivity of ends processing in face-grinding machines. *Visnyk CHDTU. – Journal of CHSTU*, no. 45, pp. 57-67 (in Ukrainian). *Visnyk Chernigivskoho derzhavnoho tehnologichnoho universytetu*, No. 45, pp. 57–67 [in Ukrainian].
7. Polshakov, V. I. (1998) Theoretical and practical bases of high-performance mechanical grinding of hard materials: author's abstract of thesis for D.Sc. in Engineering. Kyiv, 27 p. [in Ukrainian].
8. Vainer, L. G. and Nosenko, V. A. (2013) The model of grinding wheels wear at bilateral face grinding with a straight blanks

- supply. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstven-nogo universiteta*, No. 3 (48), pp. 88–91 [in Russian].
9. Vainer, L. G. (2011) Simulation of cutting forces and stock removal performance at bilateral grinding of a single blank ends. *Novye materialy i tekhnologiyi v mashinostroeniyi (Briansk)*, No. 14, pp. 14–17 [in Russian].
  10. Petrakov, Yu. V. (2013) Modeling of form deviation at round grinding. *Informatsiini tekhnologii v osviti, nauksi ta vyrobnytstvi*, Odesa: ONPU, No. 1 (2), pp. 63–71 [in Russian].
  11. Lavrinenko, V. I. and Leshchuk, I. V. (2014) The technology of finishing bilateral grinding of support surfaces of polyhedral plates. *Informatsiini tekhnologii v osviti, nauksi ta vyrobnytstvi.*, Odesa: ONPU, No. 2 (7), pp. 93–96 [in Russian].
  12. Saturn. Mechanical grinding by paired grinding wheels [Journal for customers of «Junkermaschinen» company] (2005), ErwinJunker: Maschinenfabric GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 77787, Nordrash, Germany, 8 p [in Russian].
  13. Sliednikova, O. S. (2016) Modular simulation of wheel profiles, removal of allowance and forming at bilateral grinding of noncircular parts ends, *Tekhnichni nauky ta tekhnologiyi*, Chernigov, No. 3 (5), pp. 76–84 [in Ukrainian].
  14. Novoselov, Yu. K. (1979) Trends of surfaces shaping at grind process. Saratov: Izd-vo Sarat un-ta, 232 p. [in Russian].
  15. Gusev, V. V. (2001) Computer simulation of the interaction of grinding wheel and workpiece material during processing. *Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnologichnykh system*, Kramatorsk: DDMA, No. 11, pp. 68–71 [in Russian].
  16. Nosenko, V. A. (2000) Grinding of adhesively active metals. Moscow: Mashinostroenie, 262 p. [in Russian].
  17. Kalchenko, V. I., Kalchenko, D. V. and Sliednikova, O. S. (2015) Modular 3D-modeling of tools, the process of allowance removal and forming in grinding with crossed axes of camshaft and disk. *Rezaniye i instrument v tehnologichnyh sistemah*, Kharkov: NTU «KhPI», No. 85, pp. 98–106 [in Ukrainian].
  18. Kalchenko, V. I., Kalchenko, V. V., Veremei, G. A. and Sliednikova, Ye. S. (2015) Modular 3D-modeling of tools, the process of allowance removal and forming in boring of valve seats by oriented plate. *Visnyk Chernigivskoho derzhavnoho tehnologichnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky»*, No. 2 (78), pp. 51–60 [in Russian].
  19. Muzychka, D. H. (2015) The increase of efficiency of hard alloys grinding by directed limitation of forming of cutting surface of grinding wheels. author's abstract of thesis for Ph.D. in Engineering. Chernihiv [in Ukrainian], 20 p.

**V. I. Kalchenko**, *Dr.Tech.Sc., professor*,  
e-mail: [kalchenkovi@ukr.net](mailto:kalchenkovi@ukr.net)

**V. V. Kalchenko**, *Dr.Tech.Sc., professor*,  
e-mail: [vvkalchenko@rambler.ru](mailto:vvkalchenko@rambler.ru)

**O. S. Sliednikova**, *graduate student*,  
e-mail: [sliednikova@gmail.com](mailto:sliednikova@gmail.com)

**D. V. Kalchenko**, *undergraduate*  
e-mail: [vvkalchenko@rambler.ru](mailto:vvkalchenko@rambler.ru)

Chernigiv National University of Technology,  
Shevchenko str., 95, Chernigiv, 14027, Ukraine

## THE STUDY OF THE PROCESS OF GRINDING OF ORIENTED PART ENDS BY PROFILED DISKS

*Providing of high accuracy and performance of end surfaces processing is achieved through bilateral face grinding machines. The development of new methods of grinding the ends of parts and*

*their research will help to improve the competitiveness of engineering, automaking, toolmaking and other enterprises of Ukraine.*

*At present there is no general model of tool surface and components generatrix, as well as their continuous description. In addition, there are no processing capacity calculations, tool wear, cutting force and power at bilateral face grinding, which would at the same time take into account the effect of thermal stress of the process and the rigidity of coordinate processing system.*

*The article shows dependences for calculating processing performance, wear of grinding wheels, cutting forces, power and heat flux with coefficients that take into account heat strength and rigidity to coordinate processing system. Coefficient graph that takes into account the effect of detail heating temperature on the value of shear stress and is introduced into the dependence for calculating cutting forces during grinding is built. General model of generatrix of tool surfaces and nonround parts, which are described by means of continuous Heaviside function, is shown. Three-dimensional models of tool surfaces and parts with nonround profile are presented.*

*The above calculation formulas specified processing performance, wear of grinding wheels, cutting forces, capacity and heat flow allow to make the calculation more precise. And given general model generatrix of tool surfaces, workpieces and its continuous description, allows to describe their three-dimensional geometric model.*

**Keywords:** *bilateral ends grinding, performance, cutting forces, power, temperature, orientation.*

*Статтю представляє В. І. Кальченко, д.т.н., професор, Чернігівський національний технологічний університет.*