

УДК 621.923

Сіра Н.М.

Чернігівський національний технологічний університет

Кологойда А.В.

Чернігівський національний технологічний університет

Литвин О.О.

Чернігівський національний технологічний університет

Кальченко Д.В.

Чернігівський національний технологічний університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДВОСТОРОННЬОГО ШЛІФУВАННЯ ТОРЦІВ ДЕТАЛЕЙ ІЗ РІЗНИМИ ДІАМЕТРАМИ

Проведено теоретичне та експериментальне дослідження процесу двостороннього шліфування торців деталей із різними діаметрами. Розроблено тривимірну модульну модель інструментальної поверхні та поверхні деталі. Запропоновані методики визначення сил різання та продуктивності при двосторонньому торцевому шліфуванні зі схрещеними осями інструмента та деталі з різними діаметрами.

Ключові слова: двостороннє шліфування, торці, сили різання, продуктивність, правка.

Постановка проблеми. На сучасних машинобудівних, зокрема автомобілебудівних та верстатобудівних, заводах широко використовуються деталі з високоточними торцевими поверхнями, остаточною якістю яких забезпечується операціями шліфування. Подальший розвиток ринкових відносин у галузі машинобудування вимагає розроблення прогресивних способів шліфування та їх впровадження у промисловість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Провідна фірма Saturn (Німеччина) здійснює обробку торцевих поверхонь деталей одного діаметра, які в процесі шліфування не фіксуються в осьовому напрямі. Дослідження точності торцевих поверхонь деталей одного діаметра при двосторонньому торцевому шліфуванні з калібруючими ділянками абразивних кругів проведено у роботах таких науковців, як В.І. Кальченко, В.І. Венжега, О.С. Следнікова, Д.В. Кальченко [1; 2].

В.І. Кальченко, В.В. Кальченко О.С., Следнікова і Д.В. Кальченко запропонували високоефективний спосіб однопрохідного двостороннього шліфування торців деталей однакового діаметру, який забезпечує високі точність та якість обробки [3].

Однак у перелічених вище роботах не розглядається шліфування торців деталей різного діаметра з їх осьовою фіксацією в процесі обробки.

Постановка завдання. Метою статті є порівняння результатів теоретичного та експерименталь-

ного дослідження процесу шліфування торців деталей різного діаметра зі схрещеними осями деталей і кругів із калібруючими ділянками та без них.

Виклад основного матеріалу дослідження. При двосторонньому шліфуванні торців гладких циліндричних (пальці, втулки, ролики підшипників і т.д.) та деталей із різними діаметрами, типу штовхач, клапан та інші, з метою підвищення точності та продуктивності обробки проводимо орієнтування кругів та їх правку. При цьому під час входу деталі в зону обробки та при зрізанні чорного приску деталь нерухомо закріплюється у барабані подачі [4], а при переході у зону калібруючої ділянки круга фіксація припиняється і деталь обертається навколо власної осі. Заради досягнення максимальної точності необхідно забезпечити здійснення не менше одного повного оберту.

Контроль за процесом знімання припуску та зносом абразивного інструменту здійснюється приладом активного контролю [5]. При цьому упродовж зняття припуску постійно вимірюється значення об'єму по координаті обробки та контролюється його зміна, завдяки чому можна розрахувати кількість зрізаного матеріалу та відповідне зношування інструмента.

Обробка торців деталей із різними діаметрами виконувалась на двосторонньому торцешліфувальному верстаті 3342АДО, розрахункова схема якого наведена на рис. 1.

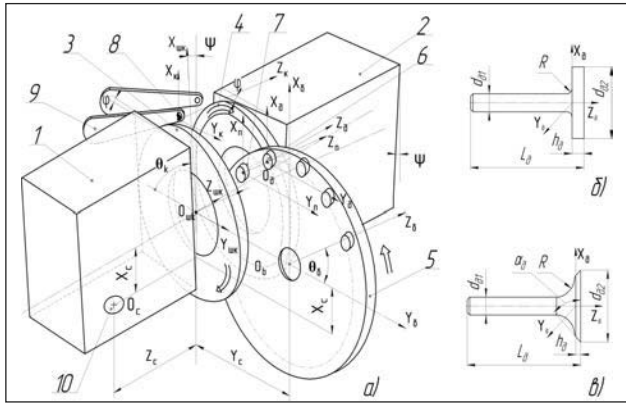


Рис. 1. Розрахункова схема шліфування торців деталей різних діаметрів

Перед початком роботи здійснюється правка шліфувальних кругів. Враховуючі високі вимоги до точності вихідних поверхонь деталі, правку проводимо у два етапи. По-перше, здійснюється попередня правка по площині, яка перпендикулярна осі обертання круга торцевих поверхонь шліфувальних кругів спеціальним пристроєм, яким комплектується верстат (рис. 2а) та закріплений на шліфувальній бабці. По-друге, калібруючі ділянки кругів правляться алмазним олівцем, що встановлюється в барабані подачі (рис. 2б).

На корпусі шліфувальної бабки знаходиться спеціальний важіль 2 (рис. 2а), який, здійснюючи маятниковий рух щодо осі 3, виконує чорнову правку шліфувального круга 1. При правці калібруючої ділянки шліфувального круга 1 (рис. 2б), алмазний олівець 5 закріплюють у барабані подачі 4, який, обертаючись навколо власної осі, вводить олівець у контакт із кругом. При цьому робочий елемент описує траєкторію, яка відповідає руху деталі в процесі шліфування.

Радіус вектор руху вершини алмазного олівця у режимі чорнової правки одного з кругів (рис. 2а)

$$R_{Пм} = C_{\theta_n \phi}^{\Phi n} \cdot P_{Z_n Y_n X_n}^{\Pi} \cdot C_{\theta_n R_n}^{I n} \cdot \bar{e}4, \quad (1)$$

де $C_{\theta_n R_n}^{I n} = M_6(\theta_n) \cdot M_2(R_n)$, – інструментальний циліндричний модуль правки чорнової ділянки інструмента; $P_{Z_n Y_n X_n}^{\Pi} = M_3(Z_n) \cdot M_2(Y_n) \cdot M_1(X_n)$, – прямокутний модуль переносу; $C_{\theta_n \phi}^{\Phi n} = M_6(\theta_\phi)$, – циліндричний модуль формоутворення при правці; $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$ – матриці перетворення систем координат; θ_n – кутовий параметр поверхні шліфувального круга, що відповідає за положення точки робочої поверхні круга; R_n – радіус, на якому розташовується алмазний олівець у пристрої правки; X_n, Y_n, Z_n – координати центру правлячого пристрою у системі координат шліфувального круга; $\theta_n \phi$ – кутовий параметр

формоутворення торцевої поверхні інструмента; $e4 = (0, 0, 0, 1)^T$ – радіус-вектор початку координат.

При правці калібруючої ділянки шліфувального круга радіус-вектор точок траєкторії руху алмазного олівця в системі координат інструмента:

$$\bar{R}_{Пк} = C_{\theta_\phi}^{\Phi nk} \cdot S_{\phi \psi X_c}^O \cdot P_{Z_c Y_c X_c}^{\Pi} \cdot C_{\theta_\phi R_\phi}^{I nk} \cdot \bar{e}4, \quad (2)$$

де $C_{Z_\phi \theta_\phi R_\phi}^{I nk} = M_3(-Z_\phi) \cdot M_6(\theta_\phi) \cdot M_2(R_\phi)$, – циліндричний інструментальний модуль правки калібруючої ділянки; $S_{\phi \psi X_c}^O = M_4(\phi) \cdot M_5(-\psi) \cdot M_1(-X_c)$, – сферичний модуль орієнтації шліфувальних кругів при правці; $P_{Z_c Y_c X_c}^{\Pi} = M_3(Z_c) \cdot M_2(Y_c) \cdot M_1(X_c)$, – прямокутний модуль переносу; $C_{\theta_\phi}^{\Phi nk} = M_6(\theta_\phi)$, – циліндричний модуль формоутворення при правці; θ_ϕ – кутовий параметр поверхні шліфувального круга; R_ϕ – радіус, на якому розташовуються осі заготовок і алмазного олівця в барабані подачі; Z_ϕ – половина довжини заготовки; X_c, Y_c, Z_c – розміри, які визначають положення робочої площини круга щодо сферичного шарніра; ϕ, ψ – кути орієнтації шліфувальної бабки в горизонтальній та вертикальній площинах відповідно; θ_ϕ – кутовий параметр формоутворення калібруючої ділянки шліфувального круга.

Запишемо робочу поверхню шліфувального круга з використанням функції Хевісайда (рис. 3, а, б)

$$Z_{ins}(i) = L \cdot (1 - \Phi(i - i_{12})) + (L + (i - i_{12})) \cdot \sin(\alpha) \cdot (\Phi(i - i_{12}) - \Phi(i - i_{13})), \quad (3)$$

$$R_{ins}(i) = (R_1 + i) \cdot (1 - \Phi(i - i_{12})) + (R_1 + i_{12} + (i - i_{12})) \cdot \cos(\alpha) \cdot (\Phi(i - i_{12}) - \Phi(i - i_{13})), \quad (4)$$

де $R_{ins}(i), Z_{ins}(i)$ – координати профілю шліфувального круга вздовж осей $O_{уш}Y_{уш}$ та $O_{уш}Z_{уш}$ системи координат $X_{уш}Y_{уш}Z_{уш}$ відповідно; Φ – функція Хевісайда; i – i -та координата профілю шліфувального круга (рис. 3а); R_1 – радіус отвору круга; i_{12} – початок калібруючої ділянки шліфувального круга; i_{13} – кінець калібруючої ділянки круга; L – відстань від початку системи координат до торця інструмента; α – кут нахилу калібруючої ділянки.

Радіус-вектор поверхні шліфувального круга для обробки торця деталі з більшим діаметром (рис. 3в)

$$\bar{R}_I = C_{Z_{ins}(i) \theta_{ins} R_{ins}(i)}^{I} \cdot \bar{e}4, \quad (5)$$

де θ_{ins} – кутовий параметр поверхні круга.

$$C_{Z_{ins}(i) \theta_{ins} R_{ins}(i)}^{I} = M_3(Z_{ins}(i)) \cdot M_6(\theta_{ins}) \cdot M_2(R_{ins}(i)), \quad (6)$$

Тривимірний модульний модель другого шліфувального круга для обробки торця з меншим діаметром аналогічна попередній, але з калібруючою ділянкою, меншою за величиною.

Номінальна поверхня деталі описується рівнянням (рис. 1 б, в):

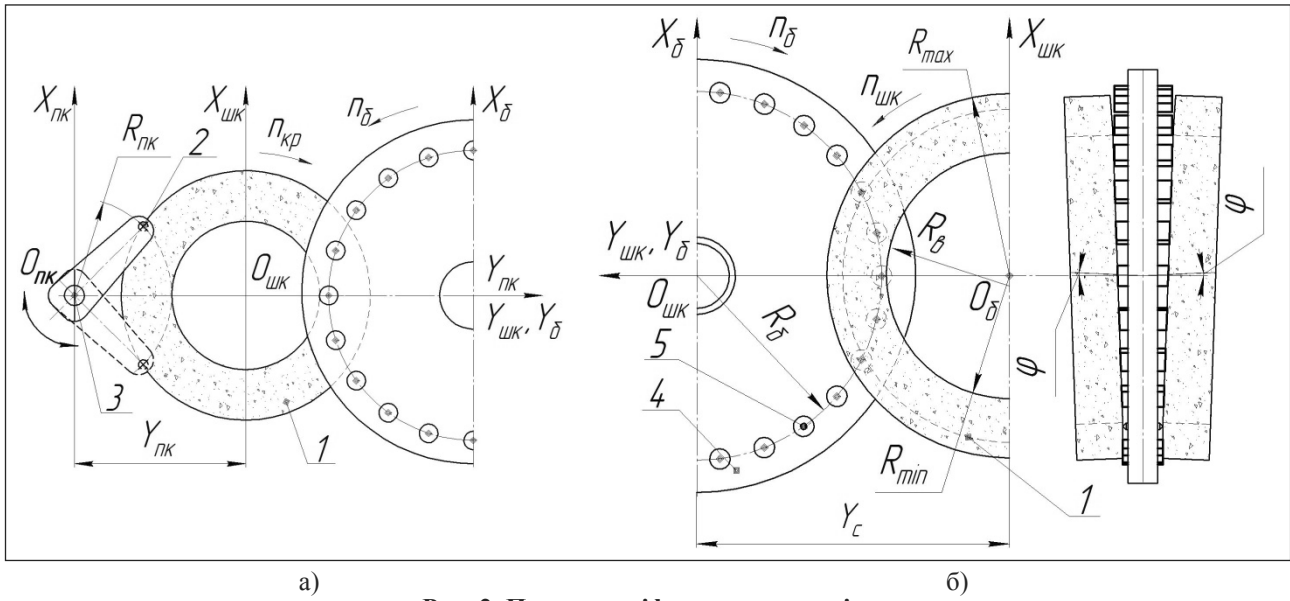


Рис. 2. Правка шліфувальних кругів

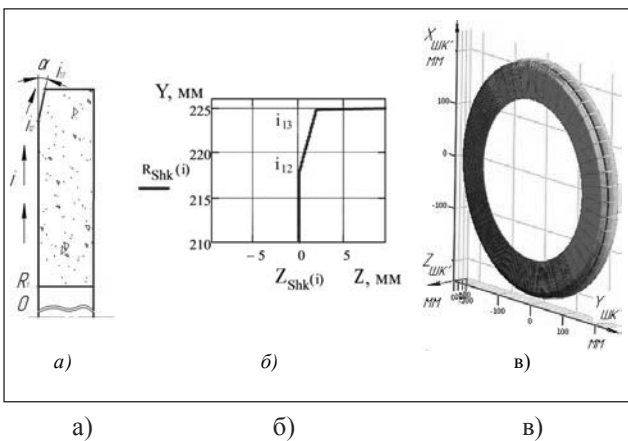


Рис. 3. Профіль шліфувального круга для обробки торця більшого діаметру

$$\bar{R}_D = M_D \cdot \bar{R}_I, \quad (7)$$

де M_D – матриця переходу з системи координат інструмента в систему координат деталі.

Підставивши вираз (5) у (7), отримаємо модульну 3D-модель формоутворення торцевих поверхонь деталей із різним діаметрами, яка описується добутком 5 модулів: циліндричного інструментального $C_{Z_{ins}(i)-\theta_{ins}-R_{ins}(i)}^I$, сферичної орієнтації $S_{\phi-\psi-X_c}^O$, прямокутного переносу $P_{Z_c-Y_c-X_c}^H$, циліндричного транспортування та подачі деталей $C_{Z_{\phi}-\theta_{\phi}-Y_{\phi}}^T$, циліндричного формоутворення $C_{Z_{\phi}-\theta_{\phi}-Y_{\phi}}^{\phi}$ та системою зв'язків

$$X_c, Y_c, Z_c = const, \quad R_{ins} = R_{ins}(i), \quad Z_{ins} = Z_{ins}(i), \quad Y_{\phi} = R_{\phi}, \\ Z_{\phi} = Z_{\phi}(\theta_{\phi}), \quad Z_{\phi} = Z_{\phi}(\theta_{\phi}), \quad \theta_{\phi} = \theta_{\phi}(\theta_{\phi}), \quad \psi, \phi = const, \quad (8)$$

де $Z_{\phi}(\theta_{\phi})$ – координата оброблюваної деталі в системі координат подаючого барабана, яка змі-

нюється в залежності від кута повороту барабана подачі виробів θ_{ϕ} ; $Z_{\phi}(\theta_{\phi})$, $\theta_{\phi}(\theta_{\phi})$ – координати формоутворення поверхні деталі.

Умова формоутворення

$$\frac{\partial \bar{R}_D}{\partial \theta_{ins}} \times \frac{\partial \bar{R}_D}{\partial i} \cdot \frac{\partial \bar{R}_D}{\partial \theta_{\phi}} = 0, \quad (9)$$

Визначним критерієм, що обмежує продуктивність шліфування, є теплонпруженість у зоні обробки. Оскільки температура поверхневого шару деталі головним чином визначає її якість та залежить від режимів різання, теплонпруженість у зоні обробки визначається з рівняння

$$\Theta^0 = \frac{q}{\sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot \tau}} \cdot l^{-\frac{y^2}{4 \cdot a \cdot \tau}}, \quad (10)$$

де q – інтенсивність тепловиділення на одиничній площі; y – поточна координата; l – відстань між шліфувальними зернами; τ – час обробки; λ , c , ρ – коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність матеріалу та густина матеріалу заготовки.

Для визначення теплонпруженості процесу необхідно отримати температуру у зоні обробки:

$$\Theta(y, \tau) = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot e^{-\frac{y^2}{4 \cdot a^2 \cdot \tau}} - \frac{q_0}{\lambda} \cdot y \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau}} \right) \right], \quad (11)$$

де q_0 – щільність теплового потоку, $a = \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho}}$ – коефіцієнт температуропровідності матеріалу заготовки.

Щільність теплового потоку:

$$q(y, \tau) = -\lambda \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial x}(y, \tau) = q_0 \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau}} \right) \right], \quad (12)$$

Щільність теплового потоку визначається в залежності від зміни тимчасового опору зі зміною температури деталі Θ та податливості:

$$q(\Theta, \Pi_i) = \frac{b \cdot N(\Theta, \Pi_i)}{F}, \quad (13)$$

де b – коефіцієнт, що враховує розподіл теплового потоку, $N(\Theta, \Pi_i)$ – потужність шліфування в i -тій точці, F – площа плями контакту інструмента та заготовки.

При шліфуванні торців деталі з різними діаметрами теплонапруженість на різних ділянках деталі буде різною, а отже, буде змінюватись і напруження зсуву для кожного з торців. Напруження зсуву в залежності від температури різання для Сталі 45Х наведено в роботі таких науковців, як В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, А.М. Єрошенко, Н.М. Сіра [6]: знайшовши за діаграмою реальне значення напруження, можна визначити сили на кожному з торців деталі. Дослідниками запропонована запропонована уточнююча методика визначення сил різання, з урахуванням різальних та деформуючих зерен [1]. На окреме зерно діють сили зсуву, тертя та інерції. При шліфуванні торця більшого діаметру деталі сили різання визначаються:

$$P_b^r(\Theta_b) = P_{c,b}^r + P_{mp,b}^r + P_{un,b}^r = \tau_{s,b}(\Theta_b) \cdot z \cdot \rho \cdot \left\{ \frac{\sin(\beta + \phi_s)}{\sin \beta \cdot \sin \phi_s} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} + 2\pi\mu / (3\mu_s) + \dots + \frac{\rho_m \cdot v \cdot (v - v_c \cdot \sin \gamma)}{\tau_{s,b}(\Theta_b)} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} \right\}, \quad (14)$$

$$P_b^n(\Theta_b) = P_{cd,b}^n + P_{mp,b}^n + P_{un,b}^n = \tau_{s,b}(\Theta_b) \cdot z \cdot \rho \cdot \left\{ \frac{\cos(\beta + \phi_s)}{\sin \beta \cdot \sin \phi_s} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} + 2\pi / (3\mu_s) + \dots + \frac{\rho_m \cdot v \cdot v_c \cdot \cos \gamma}{\tau_{s,b}(\Theta_b)} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} \right\}, \quad (15)$$

При шліфуванні торця з меншим діаметром:

$$P_m^r(\Theta_m) = P_{c,m}^r + P_{mp,m}^r + P_{un,m}^r = \tau_{s,m}(\Theta_m) \cdot z \cdot \rho \cdot \left\{ \frac{\sin(\beta + \phi_s)}{\sin \beta \cdot \sin \phi_s} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} + 2\pi\mu / (3\mu_s) + \dots + \frac{\rho_m \cdot v \cdot (v - v_c \cdot \sin \gamma)}{\tau_{s,m}(\Theta_m)} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} \right\}, \quad (16)$$

$$P_m^n(\Theta_m) = P_{cd,m}^n + P_{mp,m}^n + P_{un,m}^n = \tau_{s,m}(\Theta_m) \cdot z \cdot \rho \cdot \left\{ \frac{\cos(\beta + \phi_s)}{\sin \beta \cdot \sin \phi_s} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} + 2\pi / (3\mu_s) + \dots + \frac{\rho_m \cdot v \cdot v_c \cdot \cos \gamma}{\tau_{s,m}(\Theta_m)} \cdot \sqrt{2 \frac{z}{\rho}} \right\}, \quad (17)$$

де $P_b^r(\Theta_b)$, $P_b^n(\Theta_b)$, $P_m^r(\Theta_m)$, $P_m^n(\Theta_m)$ – тангенціальна та нормальна складові частини сили мікрорізання одиничним зерном для більшого та меншого діаметрів деталі; $P_{cd,b}^n$, $P_{mp,b}^n$, $P_{un,b}^n$, $P_{cd,m}^n$, $P_{mp,m}^n$, $P_{un,m}^n$ – сили зсуву, тертя, інерції, що діють на одиничне зерно для більшого та меншого діаметрів; $\tau_{s,b}(\Theta_b)$, $\tau_{s,m}(\Theta_m)$ – напруга зсуву для більшого

торця деталі та меншого, відповідно, визначається в залежності від температури в зоні різання; z , ρ – глибина проникнення вершини зерна в матеріал заготовки та радіус її округлення; ρ_m – щільність матеріалу заготовки; v – швидкість різання; $v_c = v \sin \beta / \cos(\beta - \gamma)$ – проекція швидкості руху стружки на напрям переміщення зерна щодо матеріалу заготовки; $\beta = 12^\circ$ – кут зсуву оброблюваного матеріалу; $\gamma = \arcsin(1 - z / 2\rho)$ – передній кут ріжучої кромки; α_s , α – коефіцієнти тертя в площині зсуву та на задній поверхні кромки; $\phi_s = \arctg \mu_s$ – кут тертя в площині зсуву.

Значення сили різання, що діє на одиничне абразивне зерно при шліфуванні торців, є змінним уздовж профілю різальної кромки. З метою виявлення закономірності розподілу величини сили було проведено моделювання процесу різання одиничним зерном із використанням методу скінченних елементів у програмному пакеті ABAQUS. Результати моделювання наведені на рис. 4. Розподіл сили було визначено в осьовій площині зерна, орієнтованій уздовж напрямку руху (рис. 4а) та перпендикулярній їй (рис. 4б).

Сумарна сила різання визначається інтегруванням по площі плями контакту. При шліфуванні більшого та меншого торців:

$$P_{\Sigma,b}^r(\Theta_b, \Pi) = \iint_{S_b} P_b^r(\Theta_b) \cdot n(z, \rho) ds; \quad (18)$$

$$P_{\Sigma,b}^n(\Theta_b, \Pi) = \iint_{S_b} P_b^n(\Theta_b) \cdot n(z, \rho) ds;$$

$$P_{\Sigma,m}^r(\Theta_m, \Pi) = \iint_{S_m} P_m^r(\Theta_m) \cdot n(z, \rho) ds;$$

$$P_{\Sigma,m}^n(\Theta_m, \Pi) = \iint_{S_m} P_m^n(\Theta_m) \cdot n(z, \rho) ds; \quad (19)$$

P_b^r , P_b^n , P_m^r , P_m^n – сили мікрорізання в тангенціальному та нормальному напрямках для більшого та меншого торців; $n(z, \rho)$ – кількість абразивних зерен; S_b , S_m – величина плями контакту при шліфуванні торців.

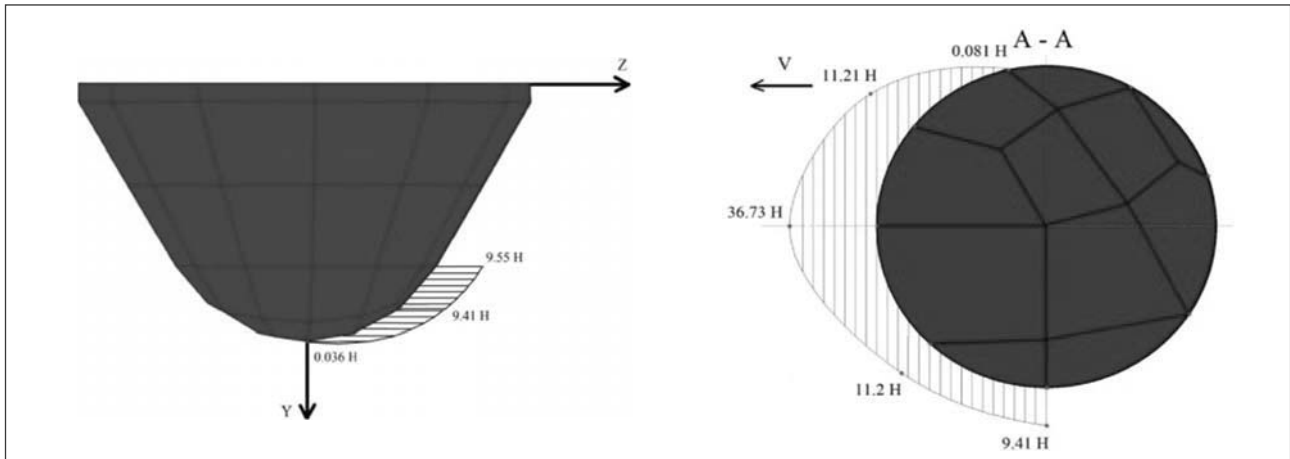
Локальну продуктивність обробки більшого та меншого торців можна визначити, знаючи загальну модульну модель формування торцевих поверхонь

$$Q_{a,b}(\Theta_b, \Pi_{i,b}) = \vec{V}_{in} \cdot dF(\Theta_b, \Pi_{i,b}), \quad (20)$$

$$Q_{a,m}(\Theta_m, \Pi_{i,m}) = \vec{V}_{in} \cdot dF(\Theta_m, \Pi_{i,m}), \quad (21)$$

де \vec{V}_{in} – вектор швидкості порівняного руху; $dF(\Theta_b, \Pi_{i,b})$, $dF(\Theta_m, \Pi_{i,m})$, – елементарна площадка плями контакту деталі та круга для обробки більшого та меншого торців деталі, залежить від тимчасового опору, який, своєю чергою, визначається в залежності від температури нагрівання деталі Θ .

Об'єм, що зрізується деякою ділянкою шліфувального круга в межах i -тої точки профілю, визначає питому продуктивність Q_n



а) б)
Рис. 4. Розподіл сили різання вздовж профілю абразивного зерна

$$Q_{n_b}(\Theta_b, \Pi_{i_b}) = \int_{\theta_{1ki}}^{\theta_{2ki}} \bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot (R_i - I_{in_b}(\Theta_b) \sin \alpha_{in} - \Pi_{i_b}) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t, \theta_b)}{b_0}\right) \right] \cdot d\theta_{k_b}, \quad (22)$$

$$Q_{n_m}(\Theta_m, \Pi_{i_m}) = \int_{\theta_{1ki}}^{\theta_{2ki}} \bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot (R_i - I_{in_m}(\Theta_m) \sin \alpha_{in} - \Pi_{i_m}) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t, \theta_m)}{b_0}\right) \right] \cdot d\theta_{k_b}, \quad (23)$$

де \bar{n}_{in} – вектор нормалі і-тої точки круга після обробки п деталей; R_i , – радіус координати і-тої точки профілю круга після правки; $I_{in_b}(\Theta_b)$, $I_{in_m}(\Theta_m)$ – знос шліфувального круга, що оброблює більший та менший торці. Величина зносу визначається в залежності від тимчасового опору та температури деталі; α_{in} – кут нахилу дотичної в і-тій точці профілю, який визначає напрям зносу шліфувального круга, що оброблює більший торець $I_{in_b}(\Theta_b)$ та менший $I_{in_m}(\Theta_m)$, залежить від температури нагрівання деталі в зоні більшого торця Θ_b та меншого Θ_m ; Π_{i_b} , Π_{i_m} – коефіцієнт, що враховує сумарну податливість системи; θ_{1ki} , θ_{2ki} – кутові координати плями контакту на радіусі

$$\frac{R_i - I_{in_b}(\Theta_b) \cdot \sin \alpha_{in} - \Pi_{i_b},}{R_i - I_{in_m}(\Theta_m) \cdot \sin \alpha_{in} - \Pi_{i_m}}; \quad 1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t, \theta_b)}{b_0}\right), \quad 1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t, \theta_m)}{b_0}\right)$$

– вірогідність видалення матеріалу заготовки для більшого та меншого торців, яка розраховується за методикою Ю.К. Новоселова; θ_{k_b} , θ_{k_m} – кутовий параметр для кожного з кругів.

Миттєвий об’єм металу, що зрізується на плямі контакту круга та деталі по координаті обробки, описується подвійним інтегралом по і-тій та куто-

вій координаті плями контакту та визначає миттєву продуктивність Q_m :

$$Q_{m_b}(\Theta_b, \Pi_{i_b}) = \int_{i_1}^{i_2} \int_{\theta_{1ki}}^{\theta_{2ki}} \bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot (R_i - I_{in_b}(\Theta_b) \cdot \sin \alpha_{in} - \Pi_{i_b}) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t, \theta_b)}{b_0}\right) \right] \cdot d\theta_k \cdot \sqrt{\left(\frac{dR_{in}}{di}\right)^2 + \left(\frac{dZ_{in}}{di}\right)^2} di, \quad (24)$$

$$Q_{m_m}(\Theta_m, \Pi_{i_m}) = \int_{i_1}^{i_2} \int_{\theta_{1ki}}^{\theta_{2ki}} \bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot (R_i - I_{in_m}(\Theta_m) \cdot \sin \alpha_{in} - \Pi_{i_m}) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t, \theta_m)}{b_0}\right) \right] \cdot d\theta_k \cdot \sqrt{\left(\frac{dR_{in}}{di}\right)^2 + \left(\frac{dZ_{in}}{di}\right)^2} di, \quad (25)$$

де i_1 , i_2 – граничні значення параметра і осьового перерізу круга в зоні контакту; R_{in} , Z_{in} – радіус осьового перерізу круга в і-тій точці профілю шліфувального круга при обробці n-ної деталі і його осьова координата, мм.

Отже, при двосторонньому торцешліфуванні продуктивність залежить від припуску на обробку, розмірів деталі, швидкості подачі виробів та податливості технологічної системи. При цьому податливість системи змінюється за координатою обробки в залежності від температури деталі.

Знос шліфувального інструмента значним чином впливає на точність обробки, він характеризується об’ємним та питомим зносом і також залежить від температури в зоні обробки та податливості системи. Об’ємний знос визначається

$$q_{1_b}(\Theta_b, \Pi_{i_b}) = \frac{Q_{a_b}}{Q_{n_b}(\Theta_b, \Pi_{i_b})} = C_q \cdot Q_{n_b}(\Theta_b, \Pi_{i_b})^{m-1}, \quad (26)$$

$$q_{1_m}(\Theta_m, \Pi_{i_m}) = \frac{Q_{a_m}}{Q_{n_m}(\Theta_m, \Pi_{i_m})} = C_q \cdot Q_{n_m}(\Theta_m, \Pi_{i_m})^{m-1}, \quad (27)$$

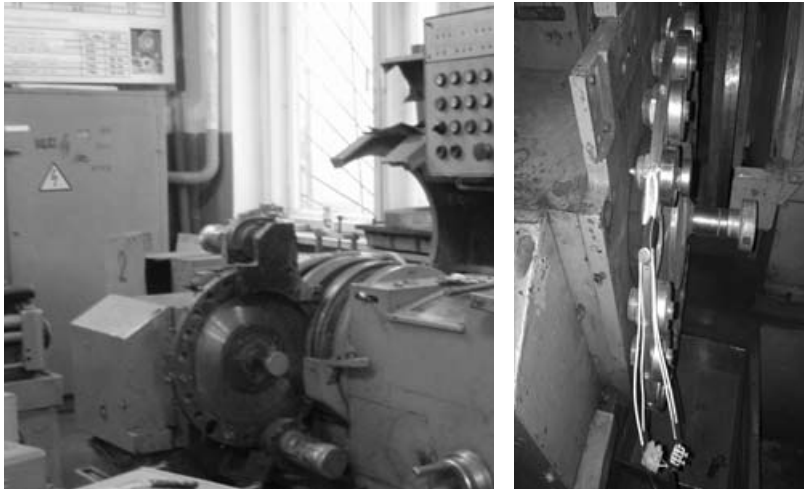


Рис. 4. Експериментально установка

де $Q_{a,b}$, $Q_{a,m}$ – об’ємна кількість зношеного абразиву за одиницю часу для шліфувального круга, що оброблює більший торець та менший відповідно; $Q_{n,b(\Theta_b, \Pi_{i,b})}$, $Q_{n,m(\Theta_m, \Pi_{i,m})}$ – швидкість знятого металу за той самий час; C_q – коефіцієнт, що дорівнює швидкості зносу при $Q_{n,b(\Theta_b, \Pi_{i,b})} = Q_{n,m(\Theta_m, \Pi_{i,m})} = 1$.

Питомий знос $I_{in,b}$, $I_{in,m}$ в i -тій точці профілю кругів, що оброблюють більший та менший торці у процесі обробки n -ної деталі, визначається за формулою

$$I_{in,b}(\Theta_b, \Pi_{i,b}) = \int_0^{T_o} \left(\frac{C_n \cdot Q_{n,b}(\Theta_b, \Pi_{i,b})^{m_1}}{k_\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{in}} + \frac{C_{qin} \cdot Q_{qin,b}(\Theta_b, \Pi_{i,b})^{b_1}}{k_\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{in}} \right) dT_o, \quad (28)$$

$$I_{in,m}(\Theta_m, \Pi_{i,m}) = \int_0^{T_o} \left(\frac{C_n \cdot Q_{n,m}(\Theta_m, \Pi_{i,m})^{m_1}}{k_\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{in}} + \frac{C_{qin} \cdot Q_{qin,m}(\Theta_m, \Pi_{i,m})^{b_1}}{k_\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{in}} \right) dT_o, \quad (29)$$

де $Q_{n,b}(\Theta_b, \Pi_{i,b})$, $Q_{n,m}(\Theta_m, \Pi_{i,m})$ – питомий об’єм металу, що знімається i -тою ділянкою n -ного профілю круга, який залежить від тимчасового опору, що залежить від температури нагрівання деталі Θ_b , Θ_m та піддатливості в i -тій точці $\Pi_{i,b}$, $\Pi_{i,m}$; $Q_{qin,b}(\Theta_b, \Pi_{i,b})$, $Q_{qin,m}(\Theta_m, \Pi_{i,m})$ – питомий об’єм деформованого металу абразивними зернами i -тої ділянки n -го профілю кругів, що оброблюють більший та менший торці деталі; $a_{z,min}$ – мінімальна товщина шару, що зрізується ріжучою кромкою; C_{yin} , C_{qin} – коефіцієнти питомого зносу в i -тій 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 -тої ділянки круга; m_1 – кое-

фіцієнт, що враховує інтенсивність режиму шліфування та стан ріжучої поверхні круга; b_1 – коефіцієнт, що враховує інтенсивність режиму деформування металу без його зняття; k_α – коефіцієнт, що враховує перекриття ріжучих кромки; $T_{o,b}$, $T_{o,m}$ – час обробки для кожного з торців деталі за частину її оберту, один оберт чи число обертів, необхідних для обробки n -ної деталі ділянкою круга в межах i -тої точки його профілю, с.

Перевірка теоретичних розрахунків здійснювалась із використанням стенду, створеного на базі двостороннього торцешліфувального верстату 3342 АДО (рис. 4).

Як експериментальний зразок було використано товкач, виготовлений зі сталі 45Х, загартований до твердості HRC 40...45. Обробка проводилась шліфувальними кругами 1-450×305×63-25А40СТ1Б8 зі швидкістю різання 35 м/с. Круги правились за вище описаною методикою, проводилась їх орієнтація за допомогою спеціального механізму. При цьому кути орієнтації у горизонтальній та вертикальній площинах вибирались таким чином, щоб при вході деталі в зону обробки вона спочатку не торкалась калібруючих ділянок кругів, а переходила в зону чорнового різання. Після зняття чорнового припуску, точність та шорсткість штовхача забезпечувалась калібруючими ділянками інструментів.

Під час експерименту було визначено зміну активної потужності по координаті обробки для правого та лівого шліфувальних кругів, за визначеними значеннями побудовано ряд графіків (рис. 5) залежності потужності обробки від часу шліфування. На рис. 5 зображено криву зміни потужності для правого шліфувального круга, який оброблює торець більшого діаметру, та для лівого, що обробляє торець меншого діаметру. Як видно з рисунків, потужність на правому крузі дещо більша, ніж на лівому, це пояснюється різними значеннями діаметра оброблюваної частини деталі.

За отриманими значеннями потужності на приводі головного руху визначимо сили різання, використовуючи загальновідому формулу:

$$N = P_z \cdot V, \quad (30)$$

де N – активна потужність різання; P_z – складова частина сили різання; V – швидкість обертання круга.

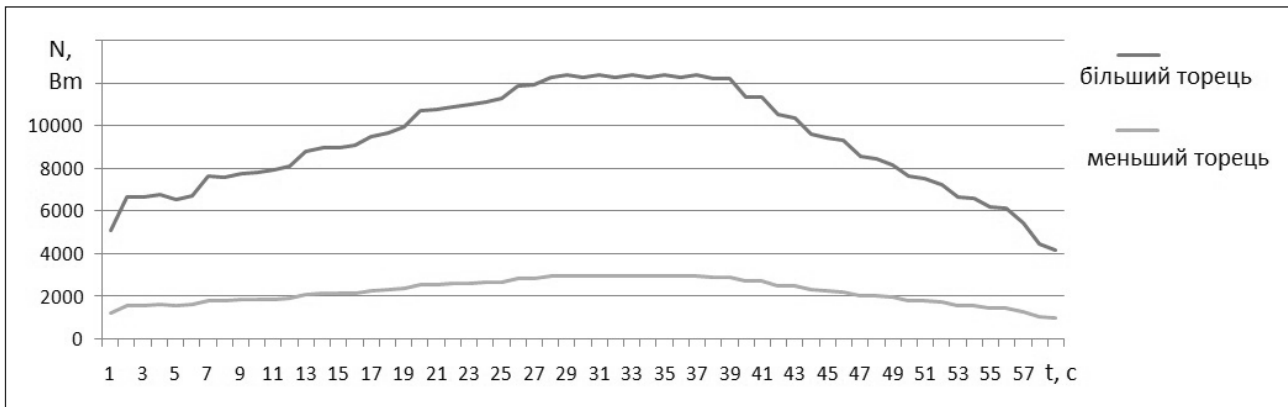


Рис. 5. Графіки зміни активної потужності шліфування від часу обробки на правому та лівому шліфувальних кругах

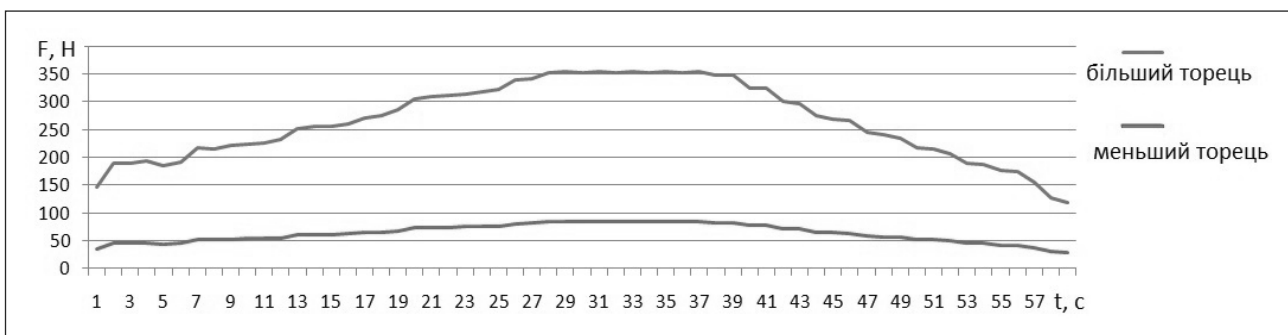


Рис. 6. Графіки зміни сили різання від часу обробки на правому та лівому шліфувальних кругах

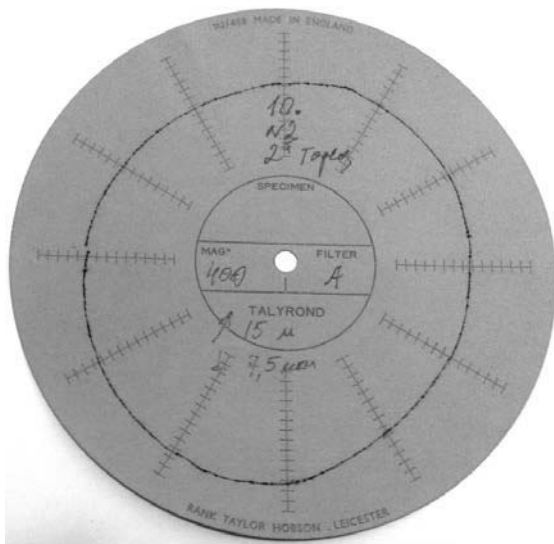


Рис. 8. Круглограма торцевої поверхні штовхача

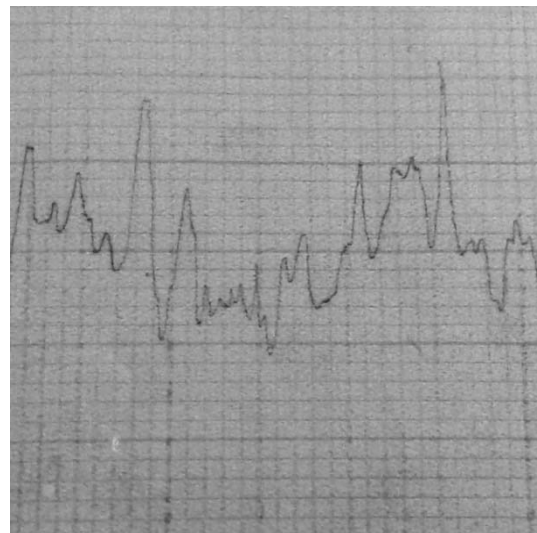


Рис. 9. Профілограма торцевої поверхні штовхача

Аналіз графіків зміни потужності (рис. 5) та сили різання (рис. 6) на шліфувальних кругах показує, що в процесі обробки відбувається незначне коливання сил різання та потужності завдяки зміні величини припуску по координаті обробки. При цьому сила різання та потужність, що витрачається на обробку лівим шліфувальним кругом,

значно менші, ніж правим, це пояснюється різними діаметрами оброблюваних деталей.

Після обробки деталей були перевірені радіальне биття на приладі «TALYROUND» (рис. 8) та шорсткість обробленої торцевої поверхні штовхача з використанням профілографа-профілометра моделі 201 (рис. 9).

Висновки. У роботі проведено теоретичне та експериментальне дослідження процесу двостороннього торцевого шліфування зі схрещеними осями інструмента та деталі з різними діаметрами. Запропоновано подвійну схему правки шліфувальних кругів із використанням вбудованого приладу правки на верстаті та встановленням алмазного олівця у барабан подачі. Визначені загальні модульні 3D-моделі для процесу чорнової та чистової правки, інструментальної поверхні та торцевої поверхні деталі. Запропоновано методику визначення сил різання при двосторонньому шліфуванні торців деталі з різними

діаметрами. При цьому враховується вплив температури у зоні шліфування. Побудовані діаграми розподілення сил різання, що діють на одиничне абразивне зерно вздовж його профілю. Уточнені формули визначення продуктивності обробки та зносу інструмента з урахуванням теплонапруженості процесу для кожного з кругів. Наведені результати експериментального дослідження, на прикладі обробки товкача зі Сталь 45, шліфувальними кругами 1-450×305×63-25A40СТ1Б8. Під час експерименту отримані діаграми зміни активної потужності та визначені експериментальні значення сил різання по координаті обробки.

Список літератури:

1. Кальченко В.І., Венжега В.І., Следнікова О.С., Кальченко Д.В. Теоретичне та експериментальне дослідження процесів зняття припуску, зносу кругів, точності формоутворення та теплонапруженості під час шліфування торців деталей. Технічні науки та технології: науковий журнал. 2016. №4 (6). С. 25–34.
2. Следнікова О.С. Модульне моделювання профілів кругів, зняття припуску та формоутворення при двосторонньому шліфуванні торців некруглих деталей. Технічні науки та технології: науковий журнал. 2016. № 3 (5). С. 76–84.
3. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Следнікова О.С., Кальченко Д.В. Модульне 3D моделювання процесу двостороннього шліфування торців кругами з конічними калібруючими ділянками. Вісник ТНТУ. 2016. Вип. № 4(84). С. 82–92.
4. Прилад для фіксації циліндричних деталей при двосторонній обробці торців: пат. 39969 Україна: МПК51 В24В7/00; 200809761; заявл. 25.07.08; опубл. 25.03.09, Бюл. № 6. 4 с.
5. Прилад активного контролю довжини циліндричних деталей в процесі шліфування торців: пат. 39968 Україна: МПК51 G01В7/02; 200809759; заявл. 25.07.08; опубл. 25.03.09, Бюл. № 6. 4 с.
6. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Єрошенко А.М., Сіра Н.М. Дослідження способу шліфування валків стрічкопрокатних станів зі схрещеними осями інструмента та деталі. Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2016. № 4. С. 80–87.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВУХСТОРОННЕГО ШЛИФОВАНИЯ ТОРЦОВ ДЕТАЛИ С РАЗНЫМИ ДИАМЕТРАМИ

Проведено теоретичне та експериментальне дослідження процесу двохстороннього шліфування торців деталей з різними діаметрами. Розроблена трьохмерна модульна модель інструментальної поверхності та поверхності деталі. Предложено методику определения сил резания и производительности при двустороннем торцевом шлифовании со скрещивающимися осями инструмента и детали с разными диаметрами.

Ключевые слова: *двухстороннее шлифование, торцы, силы резания, производительность, правка.*

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TWO-SIDE SILIFFING PROCESS OF THE BURNS OF DIFFERENT DYNAMIC PARTS

A theoretical and experimental study of the process of bilateral sanding of the ends of parts with different diameters has been carried out. A three-dimensional modular model of instrumental surface and part surface has been developed. The proposed methods for determining the cutting forces and productivity for double-faceted grinding with crossed axes of the tool and parts with different diameters have been proposed.

Key words: *two-sided grinding, ends, cutting forces, productivity, editing.*