

Андрій Рудик, Владислав Рудик

## ЕФЕКТИВНЕ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ ТОРЦЕМ КРУГА

**Актуальність теми дослідження.** Ефективність процесу шліфування поверхонь обертання при підвищенні продуктивності, покращенні якості та енергозбереженні є проблемою, актуальною для сучасного машинобудування, яка може бути вирішеною на верстатах з ЧПК при використанні торцевого шліфування заправленим чашковим кругом.

Нові перспективні способи дають можливість керувати геометрією контакту та завантаженням локальних ділянок у межах контакту за рахунок зміни відстані між осями обертання деталі та інструмента.

**Постановка проблеми.** У наукових роботах, присвячених подібній тематиці, вказувалося, що кутове керування орієнтацією інструмента здатне значно підвищити продуктивність та якість обробки. Інструментом простої геометричної форми можна обробляти різноманітні форми поверхні при простих відносних рухах.

Актуальним є вибір параметрів наладки та програмного забезпечення заточувального верстата з метою ефективного впровадження нових способів шліфування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблему ефективного формоутворення поверхонь, у тому числі обертання, при керуванні взаємною орієнтацією, зазвичай кутовою, досліджували багато вітчизняних учених, серед яких П. Р. Родін, Н. С. Равська, В. І. Кальченко та інші. Крім того, спеціалістами фірми ЮНКЕР (Німеччина) було створено спосіб та ефективне обладнання для обробки ступінчастих валів.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Однак на ефективність значною мірою впливають його форма круга та кінематика формоутворення. Ці питання у сучасній літературі мають лише часткове обґрунтування та потребують створення нового обладнання.

**Постановка завдання.** Метою цієї роботи є визначення параметрів обробки при керуванні контактом за рахунок зміни міжосьової відстані. На цій базі теоретично дослідити створені нові високоєфективні способи шліфування поверхонь обертання торцем абразивного інструмента чашкової форми.

**Виклад основного матеріалу.** Для точного формоутворення ділянки поверхні деталі необхідно у точці контакту втримати рівність нахилу дотичних, відповідність діаметральних розмірів та накласти умови на радіуси кривизни деталі в осьовій площині та інструмента. Для обробки впадої ділянки профілю деталі у напрямку осьової подачі такими умовами є менші значення радіуса кривизни інструмента, що наближається до необхідного значення відповідної ділянки заготовки.

Ці вимоги можна забезпечити раціональним вибором діаметральних розмірів, зміною значень кута, що характеризує конус заправленого торця, відносних поздовжньої та поперечної подач. З використанням матриць перетворення координат побудовані математичні моделі поверхні круга, обробки та формоутворення на верстаті деталі з урахуванням значень поздовжньої та поперечної подач.

**Висновки.** Отримана система рівнянь та робочих програм, складених у пакеті програм MathCAD, дозволяють у зручному для практичного використання вигляді з урахуванням усіх кінематичних складових визначати режимні параметри та товщину зрізів з метою навантаження інструмента до граничного рівня, який визначається різальною здатністю.

Матеріали теоретичних досліджень, розрахунків та їх порівняння доводять можливість значного збільшення ефективності обробки шліфуванням поверхонь обертання заправленим на конус торцем круга.

Результати роботи можуть бути впровадженими на існуючому обладнанні після незначної модернізації, а моделювання – для оцінки теплової напруженості даних способів.

**Ключові слова:** формоутворення; лінія контакту; кривизна поверхні; моделювання обробки; точність; продуктивність; якість; ефективність; профіль деталі.

Рис.: 8. Бібл.: 11.

**Постановка проблеми.** Ефективність процесу шліфування поверхонь обертання при підвищенні продуктивності, поліпшенні якості та енергозбереженні є проблемою, актуальною для сучасного машинобудування, яка може бути вирішеною на верстатах з ЧПК при використанні торцевого шліфування заправленим чашковим кругом. Це дає можливість керувати геометрією контакту за рахунок зміни відстані  $H$  між осями обертання деталі та інструмента.

Як відомо [1], підвищення продуктивності шліфування  $Q = \iint_S V_n \cdot dS$  визначається

збільшенням розмірів контакту  $S$  між інструментом та деталлю та швидкістю  $V_n$  відносного руху у напрямку нормалі (у подальшому нормальною швидкістю) на кожній елементарній ділянці у його межах.

Рівняння для нормальної відносної швидкості було отримано авторами та наведено у роботі [8].

Для нових способів доведено [4; 5], що розміри контакту в Ейлєревих перетинах, тобто напрямках площин як обертання деталі, так і осьової подачі, при наближенні відповідних радіусів кривизни, є значно більшими, а підведення припуску є більш раціональним [9].

Крім того, поліпшення якості забезпечується розподіленням функцій вздовж профілю інструменту з виділенням чорнової та захищених чистової та фінішної ділянок в околі базової точки. За рахунок наближення радіусів кривизни у напрямку осьової подачі можливо збільшити кількість проходів. Напрямок швидкості різання вздовж контакту спрямований під різними кутами до осі виробу, що дозволяє отримати шорсткість обробленої поверхні у вигляді сітки.

Динаміка процесу покращується за рахунок зменшення маси інструмента, таким чином збільшуються частота власних коливань та демпфування через зростання розмірів контакту, а самі коливання спрямовані під кутом до поверхні, яку оброблюють. Енергозбереження може бути поясненим зменшенням витрат машинного часу, що викликане збільшенням осьової подачі, кількості проходів при скороченні холостого ходу, та можливим спрощенням приводу верстата для меншого за розмірами інструмента. Крім того, вплив здійснює раціональне завантаження робочої поверхні інструмента до рівня його різальної здатності, що викликане зміною характеру залежності  $V_n$ .

Основні переваги нових способів обробки порівняно до традиційних наведені на рис. 1.



Рис. 1. Переваги нових способів обробки порівняно до традиційних

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблему ефективного формоутворення поверхонь, у тому числі обертання, при керуванні взаємною орієнтацією, зазвичай кутковою, досліджували багато вітчизняних учених, серед яких П. Р. Родин, Н. С. Равська, В. І. Кальченко [2; 3] та інші. Крім того, спеціалістами фірми ЮНКЕР (Німеччина) було створено спосіб та ефективне обладнання для обробки ступінчастих валів [1].

У наукових роботах, присвячених подібній тематиці, вказувалося, що кутове керування орієнтацією інструмента здатне значно підвищити продуктивність та якість обробки, а також дозволяє інструментом простої геометричної форми обробляти різноманітні поверхні. Однак на ефективність обробки значною мірою впливають форма круга та кінематика формоутворення. Ці питання у сучасній науковій літературі мають лише часткове обґрунтування та потребують створення нового (або значного удосконалення існуючого) обладнання.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** У цій статті обґрунтовано новий науковий принцип підвищення ефективності процесу шліфування за рахунок керування міжосьовою відстанню [2; 3], що може бути використаний для обробки поверхонь обертання як із фасонною твірною, так і ступінчастих та запропоновано нові способи, захищені патентами України [6; 7]. Цей принцип є конкурентоспроможний порівняно з існуючими та може бути реалізований на вітчизняному обладнанні при проведенні незначної модернізації.

**Мета дослідження.** Метою цієї роботи є визначення параметрів обробки при керуванні контактом за рахунок зміни міжосьової відстані. На цій базі теоретично дослідити створені нові високоефективні способи шліфування поверхонь обертання торцем абразивного інструмента чашкової форми.

**Виклад основного матеріалу.** Складена [4; 5] модель обробки заправленим конічним торцем на заточувальному верстаті з ЧПК мод. ВЗ 208Ф3 (рис. 2), де забезпечуються обертання деталі та інструмента при відносних поздовжній та поперечній подачах.

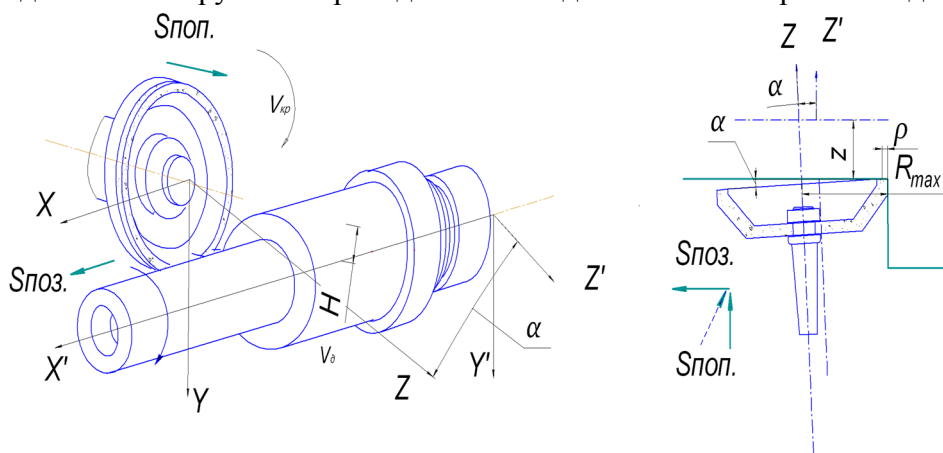


Рис. 2. Схема ефективної обробки ступінчастих валів торцем чашкового круга при керуванні геометрією контакту за рахунок зміни відстані  $H$  між осями

Для точного формоутворення ділянки поверхні деталі необхідно у точці контакту витримати рівність нахилу дотичних, відповідність діаметральних розмірів та накласти умови на радіуси кривизни деталі в осьовій площині та інструмента. Для обробки впапої ділянки профілю деталі у напрямку осьової подачі такими умовами є менші значення радіуса кривизни інструмента, що наближається до необхідного значення відповідної ділянки заготовки.

Ці вимоги можна забезпечити раціональним вибором його діаметральних розмірів, зміною значень кута  $\alpha$ , що характеризує конус заправленого торця, відносних поздовжньої та поперечної подач. За допомогою матриць перетворення систем координат [1] побудовані [4; 5; 6; 8] математичні тривимірні моделі поверхні круга, обробки та формоутворення на верстаті деталі з урахуванням значень поздовжньої та поперечної подач.

Формоутворення фрагмента поверхні на верстаті [1] можна записати матричним рівнянням, враховуючи послідовні переходи між його ланками до СК деталі. Отримане рівняння має вигляд:

$$\vec{r}_{oi}(\phi, z, x, \theta, \rho) = A^4(\phi) \cdot A^3(z) \cdot A^1(x) \cdot A^5(-\alpha) \cdot A^2(H) \cdot \vec{r}(\theta, \rho), \tag{1}$$

де  $\vec{r}(\theta, \rho) = A^6(\theta) \cdot A^1(R_{\max}) \cdot A^5(\alpha) \cdot A^1(-\rho) \cdot \vec{e}^4$  – радіус-вектор торцевої конічної поверхні круга.

Знайти вектор відносної швидкості, перенесений до СК деталі, можна диференціюванням рівняння (1) за часом або параметром  $\phi$ :

$$\vec{V}_{oi}(\phi, \theta, \rho) = DA^4(\phi) \cdot A^3(z) \cdot A^1(x) \cdot A^5(-\alpha) \cdot A^2(H) \cdot \vec{r}(\theta, \rho) \cdot \frac{d\phi}{dt} + \vec{i} \cdot S_0; \tag{2}$$

$$\vec{V}_{oi}(\theta, \rho) = \omega \cdot \begin{vmatrix} p \\ -z - \cos\theta \cdot \sin\alpha \cdot (R_{\max} - \rho \cdot \cos\alpha) - \rho \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \\ H + \sin\theta \cdot (R_{\max} - \rho \cdot \cos\alpha) \end{vmatrix},$$

де  $\omega = \frac{d\phi}{dt}$  – кутова швидкість;  $p = \frac{S_0}{2\pi}$  – параметр гвинтового руху.

Вперше в явному функціональному вигляді отримано [5; 8] рівняння для знаходження швидкості підведення припуску по ділянках контакту в напрямку нормалі до поверхні інструмента. Після перетворень це рівняння має вигляд:

$$V_n(\rho, \theta) = \omega \cdot \left\{ \left[ R_{\max} \cdot \cos^2 \alpha - \rho \cdot \cos \alpha - z \cdot \sin \alpha \right] \cdot \sin \theta + \right. \\ \left. + (H \cdot \sin^2 \alpha + \frac{\rho}{2} \cdot \sin 2\alpha) \cdot \cos \theta + H \cdot \cos^2 \alpha - \frac{\rho}{2} \cdot \sin 2\alpha \right\}, \quad (3)$$

де  $\theta, \rho$  – криволінійні координати торцевої конічної поверхні інструмента, які відповідають за зміну радіального розміру відповідно, параметр  $\rho$ , що спрямований вздовж твірної конічної поверхні торця від найбільшого радіуса та кутового положення навколо осі інструмента;

$\alpha$  – кутова орієнтація інструмента, який встановлений на колоні верстата та в такому положенні проходить правку;

$R_{\max}$  – максимальний радіальний розмір круга;

$z$  – координати, які відповідають за вертикальне та поздовжнє переміщення.

Аналіз цього рівняння (рис. 3), проведений для вказаного способу обробки, доводить раціональний характер зміни навантажень вздовж контакту порівняно з відомими та перспективними методами. Крім того, методика дозволяє враховувати вплив подачі  $p$  на значення цього добутку, чим у більшості випадків нехтують.

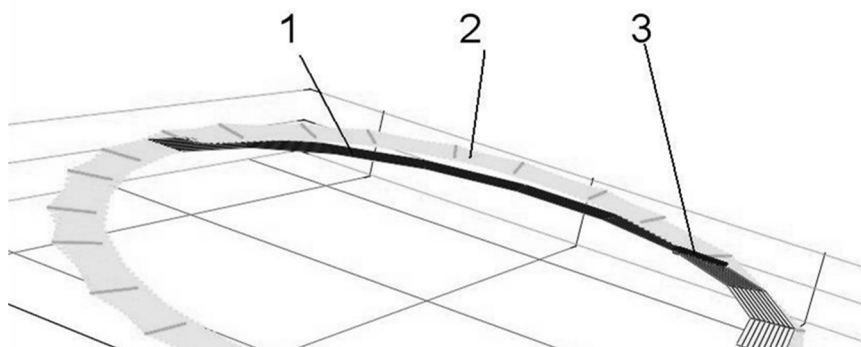


Рис. 3. Етюра зміни навантажень  $V_n$ , викликаних підведенням припуску до торця інструмента: 1 – поверхня відліку, 2 – етюра зміни навантажень по поверхні торця  $V_n$ , 3 – характеристика

Рівняння зв'язку між параметрами  $\theta(\rho, H)$  лінії контакту  $V_n=0$ , та її похідними по параметрах  $\rho, H$  із урахуванням прийнятих позначень можна записати, використовуючи деяку допоміжну функцію  $C(\rho, H)$ , або подати її із достатньою для практики точністю у вигляді лінійного полінома (рис. 4):

$$C(\rho, H) = \frac{R(\rho) \cdot \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cdot \sqrt{R(\rho)^2 - H^2 \cdot \cos 2\alpha}}{(R(\rho)^2 + H^2 \cdot \sin^4 \alpha) \cdot \sqrt{R(\rho)^2 - H^2 \cdot \cos 2\alpha}} \approx Kt_1 \cdot \rho + Kt_2 \cdot H^2 + Kt_3; \quad (4)$$

$$\theta_\rho = \frac{\partial \theta}{\partial \rho} = -H \cdot \cos \alpha \cdot C(\rho, H); \quad \theta_H = \frac{\partial \theta}{\partial H} = -R(\rho) \cdot C(\rho, H);$$

$$\theta(\rho, H) = \Delta X \cdot \left[ (Kt_1 \cdot \rho_0 + Kt_3) \cdot H + Kt_2 \cdot \frac{H^3}{3} \right], \quad (5)$$

де  $\theta_\rho, \theta_H$  – похідні рівняння зв'язку, які залежать від відстані  $H$ , діаметральних розмірів інструмента та кута правки  $R(\rho)$  – радіальне положення базової точки;  $\Delta X$  – проекція відстані між центрами систем координат на ось.

Коефіцієнти  $Kt_1, Kt_2, Kt_3$  знаходять, наприклад, за принципом Лежандра, мінімізуючи похибку заміни лінійним поліномом [5;11]. Розрахунками доведено, що навіть при регулюванні параметра  $H$  у широкому діапазоні така заміна може бути прийнятною.

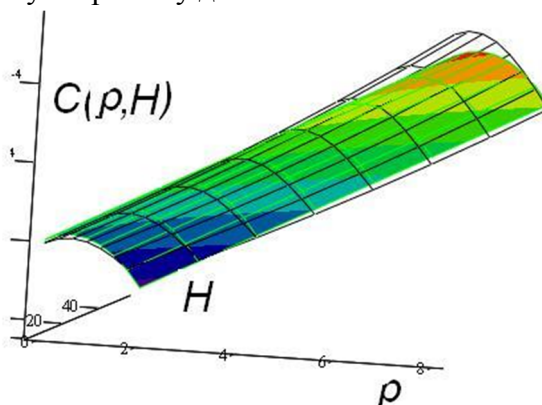


Рис. 4. Порівняльні графіки залежностей функції  $C(\rho, H)$  з апроксимуючим її лінійним поліномом

Порівняння характеру епюр інтенсивності підведення припуску [9] для питомої продуктивності та нормальної швидкості методів поздовжнього шліфування, що використовують на верстаті “Quickpoint 1002”. Erwin Junker [10; 11] та згідно з новими способами наведено на рис. 5.

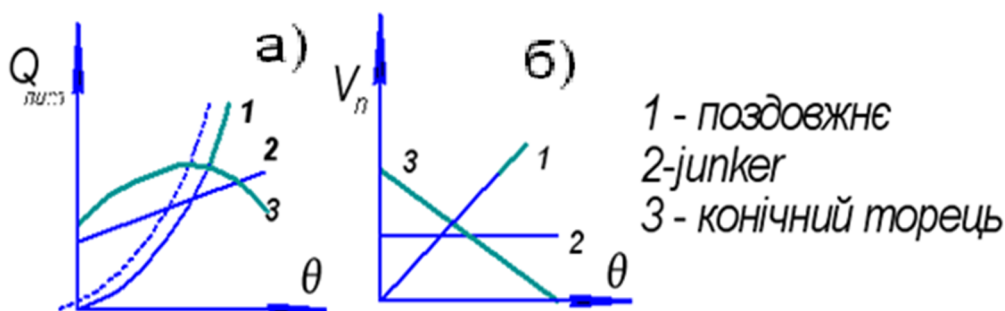


Рис. 5. Графіки питомої продуктивності (а) та нормальної швидкості (б) для відомих та нових методів

Отже, згідно з аналізом графіків, для нових способів обробки у міру наближення до границі контакту відбувається зменшення навантаження ділянок при раціональному підведенні припуску на більшості площі. Разом з тим найбільш навантаженою для відомих способів обробки з поздовжньою подачею є лише вузька смужка на вході кромки до контакту.

Рівняння (1) із урахуванням зв'язку (5) визначають лінію контакту (рис. 6; 7) між інструментом та деталлю. Векторне рівняння формотворних точок лінії контакту поверхні інструмента, перенесених до системи координат деталі, задовольняє векторному рівнянню:

$$\vec{r}_{oi}(\rho) = \begin{bmatrix} X_{oi} \\ Y_{oi} \\ Z_{oi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\rho \cdot \sin^2 \alpha + R(\rho) \cdot \cos \theta(\rho) \cdot \cos \alpha \\ R(\rho) \cdot \sin \theta(\rho) + H \\ Z + R(\rho) \cdot \cos \theta(\rho) \cdot \sin \alpha + \rho \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де  $z$  – відстань між осями систем координат;  $\rho$  – лінійний параметр заправленого конічного торця круга, що вимірюють у напрямку від периферії.

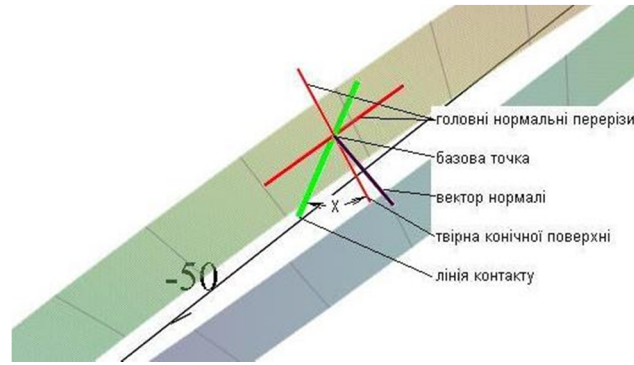


Рис. 6. Локальна геометрія контакту в околі базової точки та схема до визначення кривизни конічної поверхні торця – отримані розрахунком у пакеті програм MathCAD

Диференціювання лінії контакту за радіальним параметром  $\rho$  відповідає вектору  $D_E(\rho_0)$  дотичній до неї, який після спрощень має вигляд (рис.7):

$$\overrightarrow{D_E(\rho_0)} = \frac{\partial \vec{r}(\theta(\rho_0), \rho_0)}{\partial \rho} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \cdot \cos \alpha - \theta'_\rho \cdot R_0 \cdot \sin \theta_0 \\ \theta'_\rho \cdot R_0 \cdot \cos \theta_0 + \sin \theta_0 \cdot \cos \alpha \\ -\sin \alpha \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де  $\theta_0$  – значення кутового параметра  $\theta$  конічної поверхні у базовій точці характеристики  $E$ .

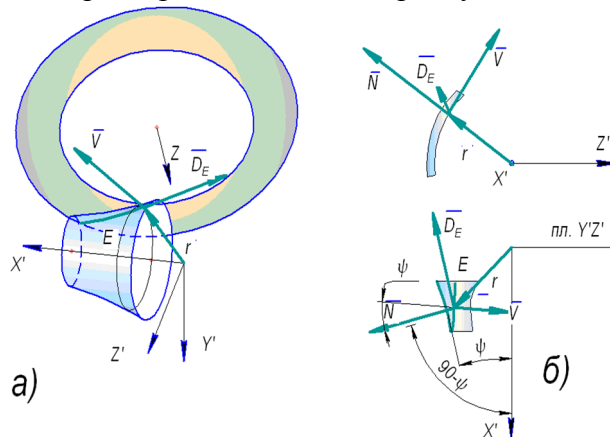


Рис. 7. Схема до знаходження кута нахилу та кривизни ділянки профілю деталі: а – відносно розташування векторів  $\overrightarrow{D_E}, \overrightarrow{V}$  дотичних до характеристики  $E$  та напрямної деталі; б – визначення нормалі  $\overrightarrow{N}$  до поверхні обертання деталі та куту  $\psi$  нахилу ділянки профілю

Знайдемо радіус кривизни фрагмента профілю.

Відомо, що для довільної гладкої поверхні, у околі деякої (базової) точки, кривизну нормального перерізу визначають згідно з теоремою Ейлера:

$$K_\chi = K_1 \cdot \cos^2 \chi + K_2 \cdot \sin^2 \chi, \quad (8)$$

де  $\chi$  – кут орієнтації навколо головної нормалі між ейлеревим та головним перерізами,  $K_\chi, K_1, K_2$  – ейлерева та головні нормальні кривизни, причому для конічної поверхні кру-

га з кутом конуса  $\alpha$  вони відповідно дорівнюють  $K_1 = 0, K_2 = \frac{\sin \alpha}{[R_{\max} - \rho \cdot \cos \alpha]} = \frac{\sin \alpha}{R_0}$ ;

$R_0 = R_{\max} - \rho_0 \cdot \cos \alpha$  – радіус базової точки, де контактують номінальні поверхні інструмента і деталі.

Таким чином, кривизну конічної поверхні торця інструмента у площині контакту визначають:

$$K_\chi = \frac{\sin \alpha}{R_\sigma} \cdot \sin^2 \chi. \quad (9)$$

У наведеному рівнянні невідомим є кут  $\chi$  між характеристикою та твірною конічної поверхні, який відповідає орієнтації навколо головної нормалі. Це підкреслює важливість зручного знаходження характеристики.

Відомо, як визначають косинус кута  $\chi$  між двома додатними напрямками довільних кривих поверхні. Для робочої конічної поверхні інструмента такими напрямками є радіальна твірна (перший) та дотична до характеристики (другий напрям). Використовуючи коефіцієнти квадратичної форми [3], після спрощень знаходять радіус кривизни фрагмента інструмента у нормальній ейлеревій площині дотичній до характеристики, що утворює ділянку профілю деталі.

$$R_\chi = \frac{R_\sigma}{\sin \alpha} + \frac{1}{R_\sigma \cdot \theta_\rho^2 \cdot \sin \alpha}. \quad (10)$$

Епюра зміни вказаних радіусів у функції міжосьової відстані наведена у роботі [5]. Однак цей плоский нормальний переріз поверхонь деталі та інструмента, що проходить через характеристику, є повернутим щодо осьової площини деталі. Тому кривизна ділянки її профілю буде відрізнятися від знайденої за рівнянням (10). Цю залежність, у свою чергу, також можна знайти за теоремою Ейлера [3] з рівняння (8).

$$K_1 = \frac{K_\chi - K_2 \cdot \sin^2 \zeta}{\cos^2 \zeta}. \quad (11)$$

Головні Ейлереві перетини деталі, як поверхні обертання, проходять через її ось та вектор швидкості  $\vec{V}_{oi}(\theta, \rho)$ , що відповідає відносному руху подачі. Тому косинус кута  $\zeta$  між ними визначають через їх скалярний добуток:

$$\cos \zeta = \frac{\vec{D}_E(\rho_\sigma) \cdot \vec{V}_{oi}(\rho_\sigma)}{|\vec{D}_E(\rho_\sigma)| \cdot |\vec{V}_{oi}(\rho_\sigma)|}, \quad (12)$$

де довжину вектора дотичної знаходять, врахувавши залежність (7):

$$|\vec{D}_E(\rho_\sigma)| = \sqrt{1 + (\theta'_\rho \cdot R_\sigma)^2}. \quad (13)$$

Остаточну знаходять кривизну профілю фрагмента деталі, враховуючи залежності (10) та (12), (13).

Радіальні розміри деталі у формотвірній точці згідно з (11) та (6) мають значення:

$$R_\sigma(H, \rho_\sigma) = \frac{1}{K_2} = \sqrt{Y_{oi}^2 + Z_{oi}^2}. \quad (14)$$

Змінюючи параметр  $\rho$  у межах конічної ділянки заправленої торцевої поверхні, отримують рівняння ділянки профілю обробленого рядка.

Визначимо вплив зміни розміру між осями  $H$  на діаметральний.

Проведемо диференціювання виразу (14):

$$\frac{\partial R_{\sigma\sigma}(H)}{\partial H} = \frac{2 \cdot \partial Y_{oi} \cdot \frac{\partial Y_{oi}}{\partial H} + 2 \cdot \partial Z_{oi} \cdot \frac{\partial Z_{oi}}{\partial H}}{2 \cdot \sqrt{Y_{oi}^2 + Z_{oi}^2}}, \quad \text{або} \quad (15)$$

$$\partial R_{\sigma\sigma}(H) = \frac{Y_{oi} \cdot [R(\rho_\sigma) \cdot \theta_H \cdot \cos \theta(\rho_\sigma) + 1] - Z_{oi} \cdot R(\rho_\sigma) \cdot \theta_H \cdot \sin \theta(\rho_\sigma) \cdot \sin \alpha}{R_{\sigma\sigma}(H_0, \rho_\sigma)} \cdot \partial H.$$

Після подальшого інтегрування значень під час зміни міжосьової відстані  $H$  у межах  $[H_0, H_1]$  можна визначати кривизну  $K_2$  та характер зміни профілю обробленої поверхні, який коригують за необхідності додаванням поперечної подачі.

$$R_{\sigma\sigma}(H) = \int_{H_0}^{H_1} dR_{\sigma\sigma}(H). \quad (16)$$

Кут нахилу  $\psi$  ділянки профілю, що утворюється відносно осі деталі, визначають:

$$\cos(90^\circ - \psi) = \sin \psi = \vec{n} \cdot \vec{i}. \quad (17)$$

Тут векторний добуток визначає орт нормалі до площини, що дотична до фрагмента поверхні деталі.

$$\vec{n} = \frac{\vec{D}_E(\rho_{\sigma}) \cdot \vec{V}_{di}(\rho_{\sigma})}{|\vec{D}_E(\rho_{\sigma})| \cdot |\vec{V}_{di}(\rho_{\sigma})|}. \quad (18)$$

Ефективну обробку ступінчастих циліндричних поверхонь також можна проводити, використовуючи керування міжосьовою висотою. Отриманий патент України на спосіб шліфування [6].

Керування геометрією контакту викликає перерозподіл навантажень на ділянки профілю інструмента (рис. 8).

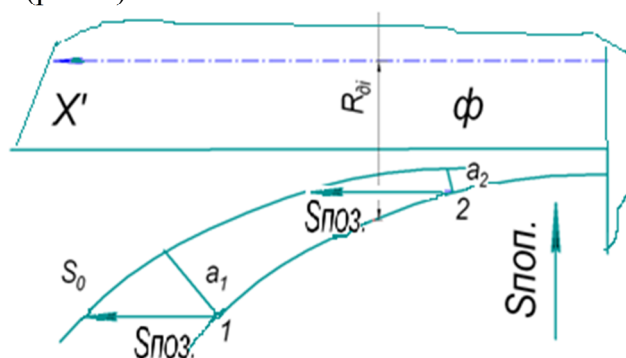


Рис. 8. Зменшення товщини зрізів  $a_1$  та  $a_2$  вздовж профілю круга у бік до формотворної точки  $\Phi$  між сусідніми поверхнями різання при утворення фрагмента деталі

Круг працює у режимі глибинного шліфування, що забезпечує більшу довжину навантаження його профілю та значні розміри контакту. Таким чином, за один робочий хід можна проводити багатопрохідну обробку, як це, наприклад, здійснено на верстаті “Quickpoint 1002”. Erwin Junker [10; 11]. Подібно до цього методу мається виділена розвантажена формотворна ділянка інструмента.

Профіль деталі отримують послідовністю та комбінацією подач: радіальної при обробці фасонного профілю або торця та поздовжньої для циліндричної ступені. Для кожної ступені, торці яких спрямовані в один бік, послідовно проводять урізне та поздовжнє глибинне шліфування.

Під час обробки однієї ступені, в міру наближення до неї, для збільшення радіуса кривизни міжосьову відстань можна зменшувати. Таким чином можна обробляти вали з однаковим напрямком ступенів.

Для обробки протилежно спрямованих торців ступенів вісь шліфувального круга слід дзеркально повернути відносно площини обертання деталі.

Режими шліфування визначають подібно до урізних методів, згідно з методією, яка описана у роботі [9]. Очевидно, доцільно, як це виконують на верстаті «Quickpoint» фірми “Junker maschinen”, проводити швидке обертання деталі з метою збільшення хвилинної подачі. Якість торців ступенів, як і під час шліфування тарілчастими кругами, виходить краще, без припалів, порівняно з обробкою торцем круга.



Опукла форма поверхонь обертання є досить поширеною серед деталей машинобудівної галузі. Це і шківні передачі з плоским пасом, і бомбовані поверхні роликів підшипників та інші.

Часто до таких деталей одночасно надають жорсткі вимоги як по шорсткості, так і по точності профілю поверхні.

Для виготовлення опуклих поверхонь тіл обертання слід використовувати правку під кутом  $\alpha$ , що забезпечує утворення впалої конічної поверхні торця інструмента. Розрахунок профілю проводять за подібним алгоритмом.

**Висновки і пропозиції.** Отримана система рівнянь та робочих програм, складених у пакеті програм MathCAD, дозволяють у зручному для практичного використання вигляді з урахуванням усіх кінематичних складових визначати режимні параметри та товщину зрізів з метою навантаження інструмента до граничного рівня, який визначається різальною здатністю.

Матеріали теоретичних досліджень, розрахунків та їх порівняння доводять можливість значного збільшення ефективності обробки шліфуванням поверхонь обертання заправленим на конус торцем круга.

Результати роботи можуть бути впровадженими на існуючому обладнанні після незначної модернізації.

Програми можуть бути використаними для оцінки теплової напруженості таких способів.

#### Список використаних джерел

1. Решетов Д. Н. Точность металлорежущих станков / Д. Н. Решетов, В. Т. Портман. – М. : Машиностроение, 1986. – 336 с.
2. Кальченко В. И. Шлифование криволинейных поверхностей крупногабаритных деталей / В. И. Кальченко. – М. : Машиностроение, 1979. – 160 с.
3. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці : навч. посіб. / Н. С. Равська, П. Р. Родін, Т. П. Ніколаєнко, П. П. Мельничук. – Житомир : ЖІТІ, 2000. – 332 с.
4. Рудик А. В. Шліфування впалих поверхонь обертання конічною поверхнею абразивного інструмента / А. В. Рудик, В. А. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2013. – Вип. 1 (63). – С. 54–59.
5. Рудик А. В. Формоутворення поверхонь обертання торцем круга чашкової форми / А. В. Рудик, В. А. Рудик // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2016. – Вип. 1 (56). – С. 77–83.
6. Пат. 117066 Україна МПК (2017) В 24 В 5/04 Рудик А. В., Рудик В. А. Спосіб шліфування ступінчастих поверхонь обертання конічними поверхнями абразивного інструмента – заявл. на патент України №u201700546 В24В 5/04, пріоритет от 20.01.2017 ; власник патенту ЧНТУ.
7. Пат. №92147 Україна МПК (2014) В24В 5/04 Спосіб шліфування впалих поверхонь обертання конічною поверхнею торця абразивного інструмента / А. В. Рудик, В. А. Рудик. – заявл. на патент України №u201310754 В24В 5/04, пріоритет від 06.09.2013 ; власники патенту Рудик А. В., Рудик В. А.
8. Рудик А. В. Продуктивність високоефективного поздовжнього та глибинного шліфування поверхонь обертання периферією та торцем орієнтованим абразивним інструментом / А. В. Рудик, В. І. Венжега // Вісник Чернігівського національного технологічного університету. – 2014. – Вип. 72. – С. 76–80.
9. Вибір режимів ефективного шліфування поверхонь обертання / А. В. Рудик, О. С. Следнікова, А. П. Подзолкіна, О. Л. Куций // Технічні науки та технології. – 2016. – № 4 (6). – С. 62–70.
10. Круглое шлифование с ЧПУ / Проспект фирмы “Junker maschinen” на станке “Quickpoint 1001” и “Quickpoint 1002”. Erwin Junker. Maschinen fabrik GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 7618 Nordrach. Germany, 1991. – 16 с.
11. Ефективне шліфування ступінчастих поверхонь на верстаті з ЧПК моделі В3208Ф3 / А. В. Рудик, Г. В. Пасов, В. І. Венжега, В. А. Рудик // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (24-26 квітня, 2017, м. Чернігів). – Чернігів : ЧНТУ, 2017. – С. 60–62.

## References

1. Reshetov, D. N., Portman, V. T. (1986). *Tochnost metallovezhushchikh stankov [Precision of machine tools]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
2. Kalchenko, V. I. (1979). Shlifovaniye krivolinyeynykh poverkhnostey krupnogabaritnykh detaley. [Grinding of curved surfaces of large-sized parts]. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
3. Ravska, N. S., Rodin, P. R., Nikolaienko, T. P., Melnychuk, P. P. (2000). *Osnovy formoutvorenniya poverkhon' pry mekhanichniy obrobsi [Fundamentals of surface shaping under machining]*. Zhytomyr: ZhITI (in Ukrainian).
4. Rudyk, A. V., Rudyk, V. A. (2013). Shlifuvannya vpalykh poverkhon obertannia konichnoiu poverkhneiu abrazyvnoho instrumenta [Grinding of fallen surfaces of rotation with a conical surface of abrasive tool]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu – Bulletin of Chernihiv State Technological University*, issue 1 (63), pp. 54–59 (in Ukrainian).
5. Rudyk, A. V., Rudyk, V. A. (2016). Formoutvorennia poverkhon obertannia tortsem kruha chashkovoi formy [Formation of surfaces of rotation by the end of a circle of cup shape]. *Visnyk Kherzonskoho natsional'noho tekhnichnoho universytetu universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, issue 1 (56), pp. 77–83 (in Ukrainian).
6. Rudyk, A. V., Rudyk, V. A. (2017). *Sposib shlifuvannya stupinchastykh poverkhon obertannia konichnyimi poverkhniami abrazyvnoho instrumenta [Method of grinding of stepped surfaces of rotation with conical surfaces of abrasive tool]*. Patent UA No. 117066.
7. Rudyk, A. V., Rudyk, V. A. (2014). *Sposib shlifuvannya vpalykh poverkhon obertannia konichnoiu poverkhneiu tortsia abrazyvnoho instrumenta [Method fallen grinding surfaces of revolution conical end surface of the abrasive tool]*. Patent UA No. 92147.
8. Rudyk, A. V., Venzheha, V. I. (2015). Produktyvnist vysokoefektyvnoho pozdovzhnoho ta hlybynnoho shlifuvannya poverkhon obertannia peryferiieiu ta tortsem oriientovanyim abrazyvnym instrumentom [Performance is highly length and depth grinding surfaces of revolution periphery and end face oriented abrasive]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu – Bulletin of Chernihiv State Technological University*, issue 1 (77), pp. 59–64 (in Ukrainian).
9. Rudyk, A. V., Sliednikova, O. S., Podzolkina, A. P., Kutsiy, O. L. (2016). Vybir rezhymiv efektyvnoho shlifuvannya poverkhon' obertannia [Selection modes for effective grinding surface rotation]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu – Bulletin of Chernihiv State Technological University*, issue 4 (6), pp. 62–70 (in Ukrainian).
10. *Krugloe shlifovanie s CHPU/Prospekt firmy Junker maschinen na stanke Quickpoint 1001 i Quickpoint 1002 Erwin Junker Maschinen fabric GmbH Junkerstra e 2 Postfach 25 D 7618 Nordrach (1991)[Cylindrical grinding CNC “Junker maschinen” company prospectus on the machine “Quickpoint, 1001” and “Quickpoint, 1002”]. Erwin Junker. Maschinen fabric GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 7618 Nordrach]. Germany (in Russian).*
11. Rudyk, A.V., Pasov, H.V., Venzheha, V.I., Rudyk, V.A. (2017). Efektyvne shlifuvannya stupinchastykh poverkhon na verstati z CHPK modeli VZ208F3 [Effective grinding of stepped surfaces on a CNC machine tools model B3208Φ3]. Proceeding from VI Mizhnarodna naukoivo-praktychna konferentsiia «Kompleksne zabezpechennya yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system» – The 6th International scientific and practical conference “Integrated quality assurance of technological processes and systems” (April 24-26, 2017). Chernihiv: ChNTU, pp. 60–62 (in Ukrainian).

UDC 621.923.42

Andriy Rudik, Vlad Rudik

## EFFECTIVE SHAPE FORMATION OF ROTATION SURFACES WITH THE BUTT END OF WHEEL

**Urgency of the research.** The grinding surface effectiveness of the rotation surfaces with increasing productivity, improvement quality and energy conservation is a problem of relevance to modern mechanical engineering, which can be solved on CNC machine tools using face finishes with a refilled cup circle.

New promising methods make it possible to control the geometry of contact and the loading of local areas within the contact due to a change in the distance between the rotation axes of the detail and tool.

**Target setting.** In the advanced studies sanctified to the similar subjects, specified, that an angular management the orientation of instrument is able considerably to promote the productivity and quality of treatment; it is possible to process the various forms of surface the instrument of geometrical simply-shaped at simple relative motions.

The actual selection parameters are debugging of software grinding machines for the effective implementation of new methods.

**Actual scientific researches and issues analysis.** The problem of effectively forming surfaces, including rotation, while driving a mutual orientation, usually angular, engaged in a number of local scientists, including Rodyn P.R., Ravska N.S., Kalchenko V.I., and other. In addition, the specialists of UNKER (Germany) created a way and efficient equipment for the processing of stepped shafts.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** However on efficiency his form and sharpening kinematics influence largely. These questions in modern literature have only a partial ground and need creation new equipments.

**The research objective.** The purpose of this work is to determine the processing parameters when managing the contact by changing the axial distance. On this basis, theoretically explore the new highly effective methods of grinding surfaces of rotation by the end of the abrasive tool of the cup shape.

**The statement of basic materials.** For precise shaping of the surface of the part, it is necessary at the contact point to maintain the equality of the inclination of the tangent, the conformity of the diametric dimensions and to impose conditions on the radii of curvature of the component in the axial plane and the tool. For processing the fallen section of the profile of the part in the direction of the axial feed, such conditions are lower values of the radius of curvature of the tool, approaching the required value of the corresponding section of the workpiece.

These requirements can be ensured by rational choice of diametric sizes, by changing the values of the angle, which characterizes the cone of the tight end, relative longitudinal and transverse feeds. Using matrices of coordinate transformations, mathematical 3D models of the circle surface, machining and forming on the machine tool are constructed taking into account the values of longitudinal and transverse feeds.

**Conclusions.** The resulting system of equations and work programs, compiled in the MathCAD program package, allows us to determine the mode parameters and the thickness of the sections in a convenient for practical use, taking into account all kinematic components, in order to load the tool to the marginal level determined by the cutting power.

The materials of theoretical studies, calculations and their comparison prove the possibility of a significant increase in the efficiency of the treatment by grinding the surfaces of the rotation, filled to the cone by the end of the circle.

The results of the work can be implemented on existing equipment after a minor upgrade, and simulation - to assess the thermal tension of these methods.

**Key words:** shape formation; contact line; the curvature of the surface; the simulation of processing; accuracy; productivity; quality and efficiency; details profile.

Fig.: 8. Bibl.: 11.

УДК 621.923.42

Андрей Рудик, Владислав Рудик

## ЭФФЕКТИВНОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ТОРЦОМ КРУГА

Рассмотрены предложенные новые способы шлифования как фасонных, так и ступенчатых поверхностей вращения заправленным на конус торцом абразивного инструмента чашечной формы. Способы позволяют повысить производительность и качество обработанных поверхностей при рациональной загрузке рабочей поверхности круга вдоль пятна контакта. Рост эффективности можно достигнуть за счет управления межосевым расстоянием, выбором угла правки торца. Это позволяет увеличить размеры контакта и возможную подачу на строку. Улучшение качества обусловлено выделением защищенной базовой формообразующей точки и появлением шероховатости в виде сетки. Новые способы имеют лучшую динамику и позволяют экономить энергию вследствие меньшего времени машинной обработки и использования менее габаритного станка.

**Ключевые слова:** формообразование; линия контакта; кривизна поверхности; моделирование обработки; точность; производительность, качество; эффективность; профиль детали.

Рис.: 8. Библ.: 11.

**Рудик Андрій Васильович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Рудик Андрей Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Rudik Andriy** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Road Transport Industry and Mechanical Engineering, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** andrei.rudik@gmail.com

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3582-9279>

**ResearcherID:** H-7173-2014

**Рудик Владислав Андрійович** – інженер

**Рудик Владислав Андреевич** – инженер

**Rudik Vlad** – engineer

**E-mail:** andrei.rudik@gmail.com