

УДК 621.923.42

DOI: 10.25140/2411-5363-2018-4(14)-18-27

*Володимир Кальченко, Наталія Сіра, Дмитро Кальченко, Ольга Аксьонова***ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ЗІ СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ ІНСТРУМЕНТА ТА ВАЛА**

**Актуальність теми дослідження.** Забезпечення високих показників точності та якості циліндричних поверхонь при забезпеченні високої продуктивності їх обробки є актуальною задачею в машинобудуванні.

**Постановка проблеми.** Точність оброблених деталей залежить від стійкості інструменту. При глибинному фрезеруванні високої точності можливо досягти лише за кілька проходів. Проте, відсутня залежність площі шару металу, який зрізується, від кількості зубців фрези.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відомих способах фрезерування циліндричних поверхонь відсутній рівномірний розподіл припуску вздовж зуба фрези. А чорнове фрезерування за один установ не забезпечує високу точність та якість обробки.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Спосіб фрезерування циліндричних поверхонь орієнтованим інструментом, який забезпечує високі показники точності, якості та продуктивності оброблення валів, не розроблено.

**Постановка завдання.** Розробка нового способу фрезерування циліндричних поверхонь зі схрещеними осями інструмента та вала, коли чорнове фрезерування здійснюється торцем різальної кромки інструмента, а чистове – її периферією. Створення загальних модульних 3D моделей інструмента, процесів зняття припуску та формоутворення з метою дослідження основних характеристик процесу фрезерування орієнтованим інструментом.

**Виклад основного матеріалу.** Розроблено спосіб фрезерування циліндричних поверхонь орієнтованим інструментом, коли чорнове фрезерування здійснюється торцем зуба інструмента, а чистове – його периферією. При цьому величина кута повороту інструмента при чорновій обробці вибирається із умови забезпечення максимального зняття припуску при рівномірному завантаженні торця різальної кромки фрези, а при чистовій – із умови забезпечення повного завантаження периферії інструменту та досягнення необхідної шорсткості. Збільшення продуктивності обробки при чистовому фрезеруванні забезпечується збільшенням частоти обертання деталі. Для нового способу фрезерування розроблені модульні 3D моделі процесу формоутворення та зняття припуску. Отримана залежність площі шару металу, який зрізується різальними кромками, від кількості зубців фрези.

**Висновки і пропозиції.** Запропонований новий спосіб фрезерування циліндричних поверхонь зі схрещеними осями інструмента та деталі. Проведені дослідження запропонованого способу на базі розроблених модульних 3D моделей зняття припуску та формоутворення.

**Ключові слова:** фрезерування, модульне тривимірне геометричне моделювання, орієнтований інструмент, формоутворення, циліндричний вал.

Рис.: 10. Бібл.: 12.

**Актуальність теми дослідження.** Більша частина продукції машинобудівних підприємств належить до групи тіл обертання, зокрема циліндричних поверхонь. Однією із головних тенденцій сучасного машинобудування є забезпечення високих показників точності та якості оброблених поверхонь, що пов'язано з умовами їх експлуатації.

**Постановка проблеми.** Продуктивним способом обробки зовнішніх циліндричних поверхонь є фрезерування, яке використовують при обробці шийок ступінчастих та колінчастих валів, гальмівних колодок тощо. Дослідження, удосконалення наявних та впровадження нових способів фрезерної обробки циліндричних деталей сприятиме забезпеченню високої точності та якості оброблених поверхонь, а також підвищить продуктивність фрезерування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [1] запропонований спосіб обробки поверхонь обертання великого діаметра (наприклад, валків прокатних станів) двома торцевими фрезами, осі яких схрещуються із віссю оброблюваної заготовки. Обробка при цьому здійснюється із поздовжньою подачею фрези вздовж осі заготовки. Однак у наведених дослідженнях висвітлені питання обробки лише відносно довгих поверхонь із поздовжньою подачею інструменту та коротких у разі її відсутності.

У роботах А. О. Етін [2] для окремих випадків наведені залежності, за якими можна визначити похибки обробки в поздовжньому й поперечному перерізах заготовки при фрезеруванні циліндричних деталей. Також дослідження процесів фрезерування тіл обертання описані в роботах [1; 3].

У роботах [4; 5] проведені дослідження фрезерування деталей типу тіл обертання набором дискових фрез (спосіб Rotomille). Перевагою такого способу є можливість отримати поверхню деталі за один установ. Однак цей спосіб не отримав широкого застосування. Істотними недоліками є складність виготовлення й експлуатації інструменту, а також те, що забезпечення високої жорсткості системи супроводжується зменшенням кругових подач, що призводить до зменшення продуктивності обробки.

У роботі [6] наведено геометричний аналіз похибок формоутворення при фрезеруванні поверхонь обертання торцевою фрезою.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Відсутність загальних модульних тривимірних моделей інструмента, процесів зняття припуску та формоутворення при фрезеруванні циліндричних поверхонь зі схрещеними осями деталі та фрези. Не встановлена залежність площі шару металу, який зрізується окремими різальними кромками, від кількості зубців фрези.

**Мета статті.** Головною метою роботи є розробка нового способу фрезерування циліндричних поверхонь орієнтованим інструментом, який забезпечить підвищення продуктивності обробки, точності та якості деталей. Створення загальних модульних 3D-моделей інструмента, процесів зняття припуску та формоутворення. На базі розроблених моделей дослідити основні характеристики процесу фрезерування орієнтованим інструментом.

**Виклад основного матеріалу.** Схема процесу фрезерування зі схрещеними на кут  $\gamma$  осями вала 1 та фрези 2, представлена на рис. 1.

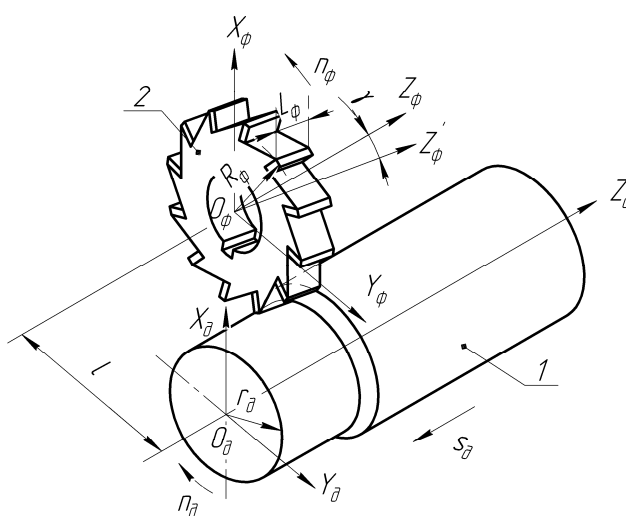


Рис. 1. Схема фрезерування циліндричного вала зі схрещеними осями інструмента та деталі

Задамо 3D модель інструментальної поверхні циліндричним модулем формоутворення з урахуванням зміни положення координати  $Z_f$  вздовж профілю різальної кромки фрези та кутом її повороту  $\alpha_f$  навколо осі  $OZ_f$  (рис. 1):

$$\bar{R}_f = M^{Cf}_{Z_f \cdot \alpha_f \cdot R_f} \cdot \bar{e}_4, \tag{1}$$

де  $\bar{R}_f$  – радіус-вектор точок фрези;  $M^{Cf}_{Z_f \cdot \alpha_f \cdot R_f}$  – циліндричний модуль формоутворення фрези;  $\bar{e}_4$  – радіус-вектор початкової координати.

Циліндричний модуль формоутворення поверхні фрези описується як добуток матриць переміщень  $M_2, M_3$  [7] вздовж осей  $Y_f$  та  $Z_f$  відповідно та матриці повороту  $M_6$  навколо осі  $O_f Z_f$ :

$$M^{Cf}_{Z_f \cdot \alpha_f \cdot R_f} = M_3(Z_f) \cdot M_6(\alpha) \cdot M_2(R_f), \tag{2}$$

де  $Z_f = 0..L_f$  – лінійна координата вздовж периферії різальної кромки фрези, яка змінюється від 0 до значення ширини інструмента  $L_f$ ;  $R_f$  – зовнішній радіус фрези;  $\alpha_f = 0..360^\circ$  – кутова координата вздовж профілю фрези.

Поверхня обробленої деталі представлена добутком радіус-вектора фрези, модуля її орієнтації в системі координат вала та модуля формоутворення деталі [7; 8]:

$$\bar{R}_\partial = M^C_{Z_\partial \cdot \delta \cdot l} \cdot M^S_{\gamma \cdot \chi} \cdot \bar{R}_\phi = M3(Z_\partial) \cdot M6(\beta_\partial) \cdot M2(l) \cdot M4(\gamma) \cdot M5(\chi), \quad (3)$$

де  $M^C_{Z_\partial \cdot \delta \cdot l} = M3(Z_\partial) \cdot M6(\beta_\partial) \cdot M2(l)$  – циліндричний модуль, який описує рух інструмента відносно деталі;  $Z_\partial$  – подача деталі вздовж вісі  $O_\partial Z_\partial$ ;  $\beta_\partial$  – кут повороту деталі;  $l$  – міжосьова відстань вала та фрези;  $M^S_{\gamma \cdot \chi} = M4(\alpha) \cdot M5(\chi)$  – сферичний модуль орієнтації фрези в системі координат деталі;  $\chi$  – кут повороту фрези в системі координат вала;  $\gamma$  – кут схрещення осей інструмента та деталі.

З урахуванням рівнянь (1) та (2) оброблена циліндрична поверхня при фрезеруванні зі схрещеними осями інструмента та деталі матиме вигляд:

$$\bar{R}_\partial = M^C_{Z_\partial \cdot \delta \cdot l} \cdot M^S_{\gamma \cdot \chi} \cdot M^{C\phi}_{Z_\phi \cdot \alpha_\phi} \cdot R_\phi \cdot \bar{e}4. \quad (4)$$

Для визначення профілю обробленого вала використовується умова контакту профілів інструмента і деталі в різні моменти часу [9; 10].

Для визначення лінії контакту 3 (рис. 2) різальної кромки фрези та циліндричного вала використовується методика, приведена в роботі [10]. На рис. 2:  $i$  – лінійна координата вздовж периферії різальної кромки фрези,  $i_{rпоч}$  та  $i_{rкін}$  – відповідно початкова та кінцева координати заокруглення різальної кромки фрези.

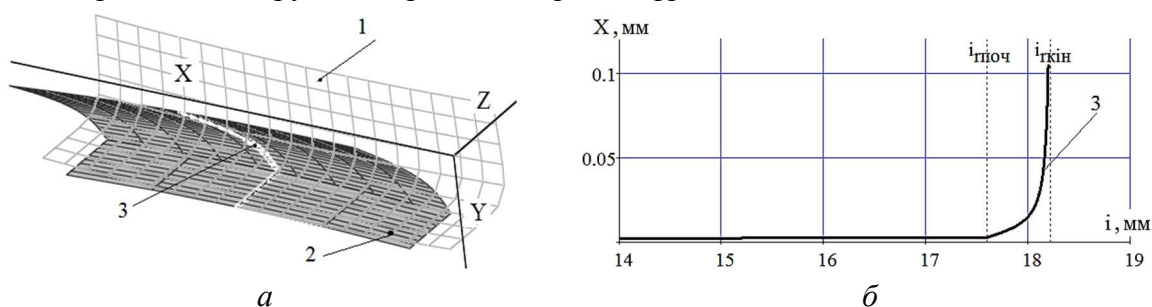


Рис. 2. Лінія контакту різальної кромки фрези та циліндричного вала

Пляма контакту фрези та циліндричного вала при фрезеруванні зі схрещеними осями інструмента й деталі приведена на рис. 3, де 1 – лінія контакту зовнішнього циліндра вала та різальної кромки фрези; 2 – лінія перетину різальної кромки фрези і торцевої поверхні вала; 3 – лінія контакту інструмента та деталі.

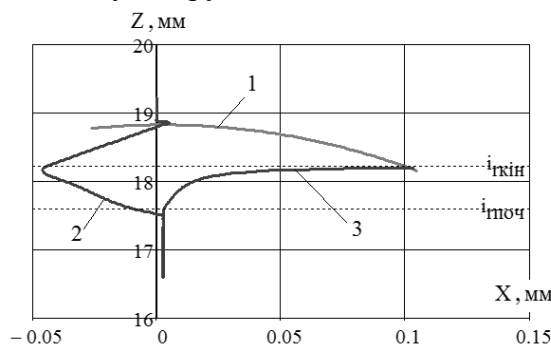


Рис. 3. Пляма контакту фрези і циліндричного вала

Схрещення осей інструмента та деталі спричиняє виникнення геометричної шорсткості  $R_a$ , яку можна визначити із [8] як різницю висот профілей  $Pr_\partial(0)$  та  $Pr_\partial(s_\partial/2)$  деталі в точці повороту круга і точці, яка розташована на відстані половини подачі на оберт деталі  $s_\partial$  відповідно:  $R_a = Pr_\partial(0) - Pr_\partial(s_\partial/2)$ .

На рис. 4 наведені залежності величини геометричної шорсткості  $Ra$  від величини подачі деталі:  $s_d = 0,04$  мм/об (крива 1),  $s_d = 0,08$  мм/об (крива 2). Як видно із графіків, збільшення подачі  $s_d$  деталі приводить до збільшення геометричної шорсткості  $Ra$  обробленої поверхні.

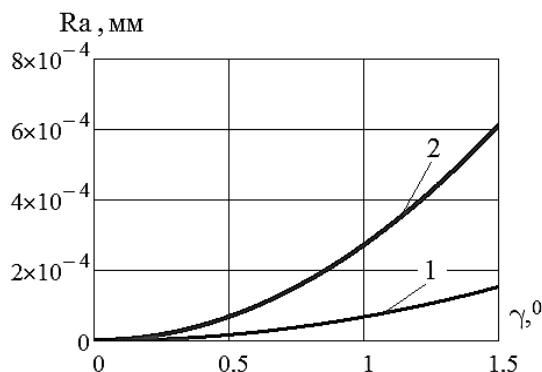


Рис. 4. Залежність геометричної шорсткості  $Ra$  від величини подачі деталі

На рис. 5 зображено графік розподілу питомої продуктивності фрезерування  $Q(i)$  вздовж профілю різальної кромки фрези при обробці зі схрещеними осями інструмента та деталі. Величина питомої продуктивності визначається із (5).

$$Q = \int_{\chi} V_n \cdot R_{\phi} d\chi, \tag{5}$$

де  $V_n$  – проекція вектора відносної швидкості руху інструмента на напрямок нормалі до його поверхні.

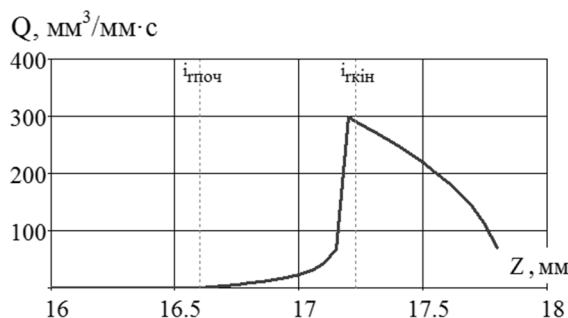


Рис. 5. Розподіл питомої продуктивності фрезерування вздовж профілю різальної кромки фрези

Аналіз графіка розподілу питомої продуктивності вздовж профілю різальної кромки фрези (рис. 5) показав, що фрезерування зі схрещеними осями інструмента та деталі забезпечує підвищення точності формоутворення завдяки рівномірному зносу різальної кромки фрези. Чорновий припуск знімається торцем різальної кромки (від координати  $i_{ркін}$  до  $i_{рпоч}$ ), а чистовий – розвантаженою периферійною ділянкою (до координати  $i_{роч}$ ).

Отже, торцем та периферією інструмента доцільно проводити чорнове глибинне фрезерування нежорстких циліндричних деталей, а чистову обробку здійснювати тільки периферією інструменту, що забезпечить високу точність формоутворення.

При чорновому фрезеруванні циліндричної поверхні вала 1 (рис. 1) фрезу 2 повертають на кут  $\gamma$ , який вибирають із умови забезпечення максимального зняття припуску при рівномірному завантаженні торця різальної кромки інструмента [8]:

$$\gamma = 2s_d \sqrt{\frac{(R_{\phi} + r_3)^2}{4(r_3 + t)^2 \cdot R_{\phi}^2 - [2r_3(R_{\phi} - t) - t^2]^2}}, \tag{6}$$

де  $t$  – припуск під фрезерування;  $r_3$  – радіус заготовки,  $r_3 = r_d + t$ ,  $r_d$  – радіус деталі.

Чистове фрезерування здійснюється при куті схрещення  $\gamma$  осей фрези та деталі, який забезпечує повне завантаження периферії різальної кромки інструмента. Отже, інструмент 2 (рис. 6) необхідно перемістити так, щоб кінцева точка  $i_{r\text{кін}}$  заокруглення периферії різальної кромки фрези знаходилася на радіусі  $r_3$  заготовки 1.

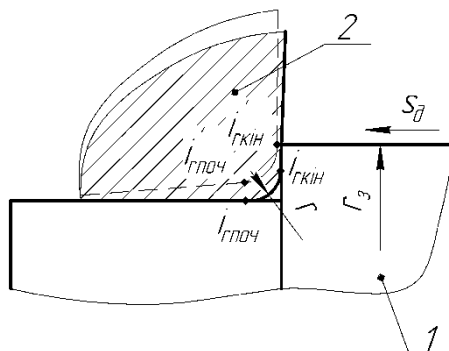


Рис. 6. Схема для визначення кута схрещення осей інструмента та деталі

Аналіз отриманих ліній контакту різальної кромки фрези та циліндричного вала при кутах схрещування їх осей  $\gamma = 0,3^\circ$  (рис. 7, а),  $\gamma = 0,5^\circ$  (рис. 7, б) та  $\gamma = 1^\circ$  (рис. 2, б) показав, що переміщення точки  $i_{r\text{кін}}$  в положення  $i'_{r\text{кін}}$  (рис. 6) досягається збільшенням кута повороту інструмента.

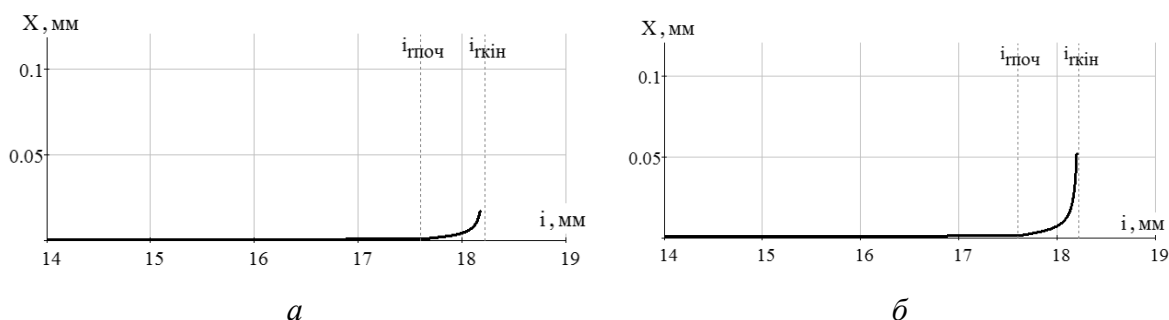


Рис. 7. Лінія контакту інструмента та деталі при різних кутах схрещування їх осей

При збільшенні кута повороту інструмента необхідно зменшувати подачу на оберт деталі, що, у свою чергу, зменшує продуктивність обробки. Тому з метою отримання високої продуктивності обробки при чистовому фрезеруванні циліндричного вала збільшують число його обертів. Висока стійкість різального інструменту при чистовій обробці забезпечується використанням фрез, оснащених пластинками з надтвердого матеріалу на основі кубічного нітриду бору, запропонованого в роботах [11; 12].

З метою визначення залежності площі шару металу, який зрізується різальними кромками фрези при заданій їх кількості, наведена схема фрезерування деталі 1 радіусом  $r_d$  циліндричною фрезою 2 радіусом  $R_\phi$  з припуском на обробку  $t$  (рис. 8).

Початковий кут  $\theta_\phi$  контакту інструмента та заготовки радіусом  $r_3$  можна визначити з такої залежності:

$$\theta_\phi = \arccos \left[ \frac{R_\phi^2 + (R_\phi + r_d)^2 - r_3^2}{2 \cdot R_\phi + (R_\phi + r_d)} \right], \quad (7)$$

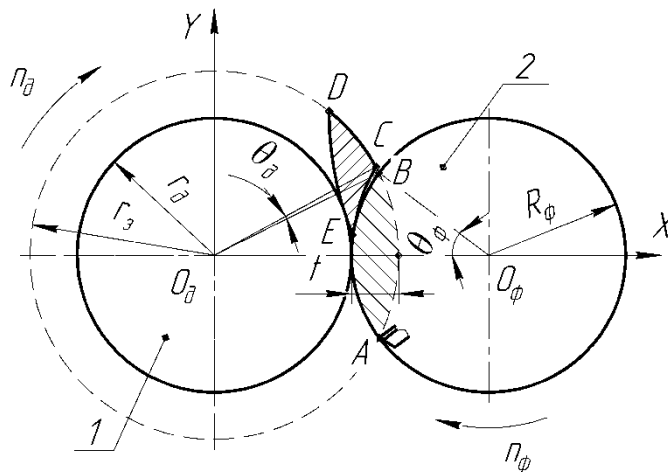


Рис. 8. Фрезерування циліндричного вала

У результаті одночасного обертального руху деталі та фрези за час повороту інструмента на кут  $\theta_\phi$ , деталь повернеться на кут  $\theta_d$ . Унаслідок чого вершина  $A$  першого зуба фрези 2 вийде із припуску не в точці  $B$ , а в точці  $C$  [2].

Визначимо поточний радіус точки контакту інструмента та заготовки в системі координат деталі :

$$r(\theta_\phi) = \sqrt{R_\phi^2 + (R_\phi + r_d)^2 - 2 \cdot \cos(\theta) \cdot R_\phi \cdot (R_\phi + r_d)} \quad (8)$$

Опишемо залежність кута повороту деталі  $\theta_{1d}$  від кута повороту першого зуба фрези в процесі обробки:

$$\theta_{1d}(\theta_\phi) = a \cos \left[ \frac{r(\theta_\phi)^2 + (R_\phi + r_d)^2 - R_\phi^2}{2 \cdot r(\theta_\phi) \cdot (R_\phi + r_d)} \right] + \frac{\theta_\phi}{k_\omega} \quad (9)$$

де  $k_\omega$  – швидкісний коефіцієнт, який являє собою відношення кутових швидкостей обертання  $\omega_\phi$  і  $\omega_d$  відповідно інструмента та оброблюваної деталі.

Поточні координати  $(x1(\theta_\phi); y1(\theta_\phi))$  точки контакту першого зуба фрези та заготовки з урахуванням відносного обертання деталі та інструмента можна визначити з таких залежностей:

$$x1(\theta_\phi) = r(\theta_\phi) \cdot \cos(\theta_{1d}(\theta_\phi)), \quad y1(\theta_\phi) = r(\theta_\phi) \cdot \sin(\theta_{1d}(\theta_\phi)) \quad (10)$$

Інтерполюючи отримані залежності (10) знайдемо рівняння лінії  $f_{z1}(x)$  контакту першого зуба фрези та оброблюваної деталі:

$$f_{z1}(x) = \text{interp}(x, [x1(\theta_\phi), y1(\theta_\phi)], [x1(\theta_\phi), y1(\theta_\phi)], x) \quad (11)$$

Відповідно поточні координати  $(x2(\theta_\phi); y2(\theta_\phi))$  точки контакту наступного зуба фрези та заготовки:

$$x2(\theta_\phi) = r(\theta_\phi) \cdot \cos(\theta_{2d}(\theta_\phi)), \quad y2(\theta_\phi) = r(\theta_\phi) \cdot \sin(\theta_{2d}(\theta_\phi)) \quad (12)$$

Залежність кута  $\theta_{2d}$  повороту деталі від кута повороту наступного зуба фрези визначається із рівняння:

$$\theta_{2d}(\theta_\phi) = \theta_{2d}(\theta_\phi) + \theta_{z0} \quad (13)$$

$$\theta_{z\partial} = \frac{\phi}{k_{\omega}} = \frac{2 \cdot \pi}{z \cdot k_{\omega}}, \quad (14)$$

де  $\theta_{z\partial}$  – кут повороту деталі при повороті фрези, коли в роботу вступає наступний зуб інструменту;  $\phi$  – кут між сусідніми різальними кромками (вершинами зубців) фрези;  $z$  – кількість зубців фрези.

За описаною вище методикою отримане рівняння лінії  $f_{z2}(x)$  контакту другого зуба фрези та оброблюваної деталі:

$$f_{z2}(x) = \text{interp}\left(\text{cspline}\left(x2(\theta_{\phi}), y2(\theta_{\phi})\right), x2(\theta_{\phi}), y2(\theta_{\phi}), x\right). \quad (15)$$

На рис. 9 отримані лінії контакту 1 і 2 відповідно першого та другого зубців фрези. Дослідження проводились для фрези діаметром 63 мм з кількістю зубців  $z = 20$  та вала діаметром 52 мм, кутові швидкості обертання фрези  $\omega_{\phi} = 115 \text{ c}^{-1}$ , вала –  $\omega_{\partial} = 30 \text{ c}^{-1}$ .

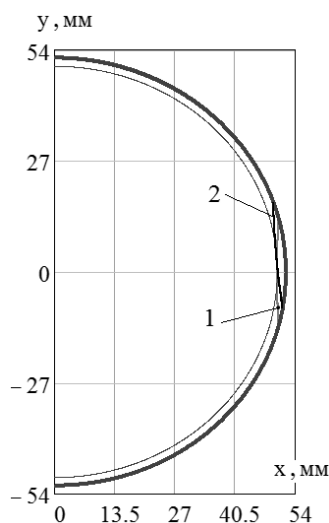


Рис. 9. Лінії контактів зубців фрези та оброблюваної деталі

Площу зрізу матеріалу із заготовки першим зубом фрези знаходимо як площу фігури, обмеженої кривою AC та дугою кола з радіусом  $r_3$  (рис. 8):

$$S_1 = \int_x f_{z1}(x) dx + \int_x \sqrt{r_3^2 - x^2} dx. \quad (16)$$

Площу зрізу матеріалу із заготовки другим зубом фрези знаходимо як площу фігури, обмеженої кривими DE, EC та дугою кола з радіусом  $r_3$  (рис. 8):

$$S_2 = \int_x \sqrt{r_3^2 - x^2} dx - \int_x f_{z2}(x) dx - \int_x f_{z1}(x) dx. \quad (17)$$

З метою визначення точності фрезерування знайдемо величину відхилення від круглості обробленої поверхні. Визначимо її як різницю радіуса деталі в точці E (перетину ліній контакту першого і наступного зубців фрези) та радіуса обробленого вала (рис. 8):

$$\delta = r(\theta_{\phi E}) - r_{\partial}. \quad (18)$$

У результаті проведених досліджень отримані графіки залежності величини відхилення від круглості  $\delta$  при фрезеруванні циліндричної поверхні від діаметра фрези  $D_{\phi}$  (рис. 10, а), кількості зубців  $z$  (рис. 10, б) та від частоти обертання інструменту  $\omega_{\phi}$  (рис. 10, в).

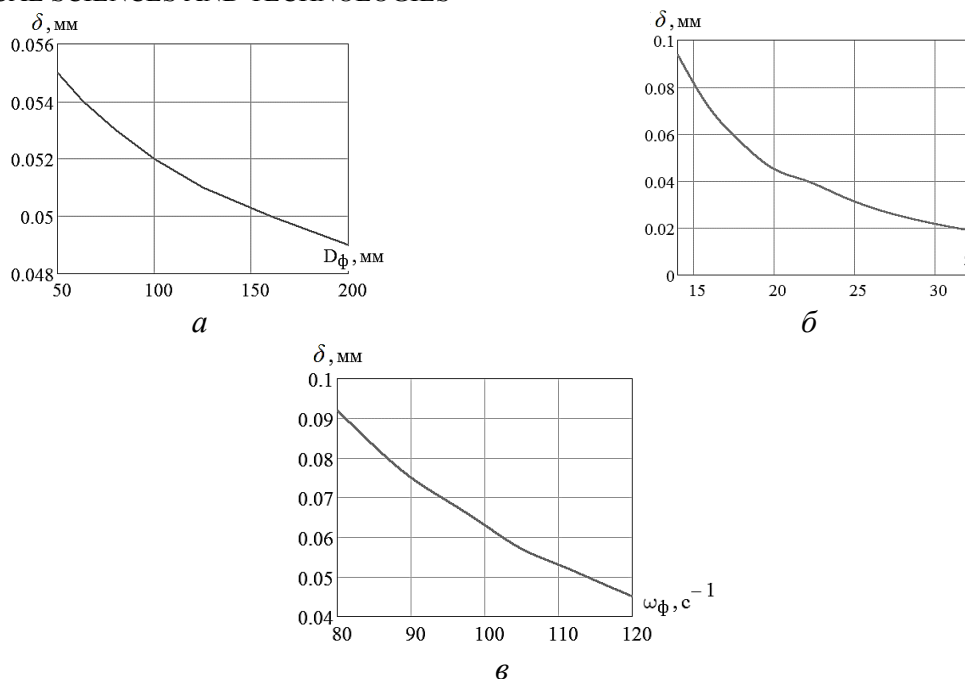


Рис. 10. Залежність відхилення від круглості  $\delta$  вала від діаметра фрези  $D_{\phi}$ , кількості зубців  $z$  та від частоти обертання  $\omega_{\phi}$

**Висновки відповідно до статті.** Запропонований новий спосіб фрезерування циліндричних поверхонь орієнтованим інструментом, де чорнова обробка здійснюється торцем та периферією зуба інструмента, а чистове – тільки периферією. Розроблені модульні 3D моделі процесів формоутворення та зняття припуску при фрезеруванні орієнтованим інструментом. На основі отриманих моделей отримані рекомендації вибору кута орієнтації фрези. При чорновій обробці величина кута повороту інструмента вибирається із умови забезпечення максимального зняття припуску при рівномірному завантаженні торця різальної кромки фрези, а при чистовій – із умови забезпечення повного завантаження периферії різальної кромки та необхідної шорсткості. Збільшення продуктивності обробки при чистовому фрезеруванні забезпечується збільшенням числа обертів деталі. Отримана залежність визначення площі шару металу, який зрізується різальними кромками, від кількості зубців фрези.

#### Список використаних джерел

1. Полетаев В. А. Особенности стружкообразования при фрезеровании и фрезоточении тел вращения / В. А. Полетаев, Д. И. Волков // Инженерный журнал. – 2001. – № 7. – С. 18–21.
2. Этин А. О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием / А. О. Этин. – М. : Машиностроение, 1964. – 324 с.
3. Полетаев В. А. Конструктивные особенности приводов подачи станков для кругового фрезерования / В. А. Полетаев // Инженерный журнал. – 2001. – № 8. – С. 63–64.
4. Технология механической обработки артиллерийских снарядов. – М. : Оборонгиз, 1948. – 658 с.
5. Грязев М. В. Перспективные технологии обработки поверхностей вращения фрезерованием / М. В. Грязев, А. В. Степаненко // Известия ТулГУ. Серия Технические науки. – 2010. – Вып. 2, ч. 1. – С. 130–136.
6. Грязев М. В. Фрезерование наружных цилиндрических поверхностей торцевой фрезой / М. В. Грязев, А. В. Степаненко // Известия ТулГУ. Серия Технические науки, 2010. – Вып. 2, ч. 1. – С. 140–148.
7. Грабченко А. И. Шлифование со скрещивающимися осями инструмента и детали : Монография / А. И. Грабченко, В. И. Кальченко, В. В. Кальченко. – Чернигов : ЧДТУ, 2009. – 256 с.



8. Кальченко В. І. Модульне 3D-моделювання інструментів, процесів зняття припуску та формоутворення при шліфуванні зі схрещеними осями циліндричного та ступінчастого вала і ельборового круга / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, Н.М. Сіра // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – Вып. 86. – С. 36–48.

9. Родин П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П. Р. Родин. – К. : Вища школа, 1977. – 192 с.

10. Кальченко В. І. Повышение производительности и точности шлифования со скрещивающимися осями эльборового круга и ступенчатого валика / В. І. Кальченко, Н. Н. Погиба, Д. В. Кальченко // Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.- техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 80. – С. 131–140.

11. Разработка ПСТМ на основе КНБ для оснащения высокоэффективных режущих инструментов / С. А. Клименко [и др.] // Резание и инструмент в технологических системах – Cutting & tool in technological system : междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – Вып. 79. – С. 93–101.

12. Концепция повышения работоспособности режущих инструментов из поликристаллических композитов на основе кубического нитрида бора / С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина, С. Ан. Клименко, А. С. Манохин // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. – 2016. – Вип. 2(13). – С. 108–114.

### References

1. Poletaev, V. A., Volkov, D. I. (2001). Osobennosti struzhkoobrazovaniia pri frezerovani i frezotochenii tel vrascheniia [Features of chip formation during milling and milling rotation bodies]. *Inzhenernyi zhurnal – Engineering magazine*, 7, 18–21 [in Russian].

2. Etin, A. O. (1964). *Kinematicheskii analiz metodov obrabotki metallov rezaniem [Kinematic analysis of metal cutting methods]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

3. Poletaev, V. A. (2001). Konstruktivnyie osobennosti privodov podach stankov dlya krugovogo frezerovaniya [Design features of feed drives for circular milling machines]. *Inzhenernyi zhurnal – Engineering magazine*, 8, 63–64 [in Russian].

4. *Tehnologiya mehanicheskoy obrabotki artilleriyskikh snaryadov [Technology of mechanical processing of artillery shells]*. (1948). Moscow: Oborongiz [in Russian].

5. Gryazev, M. V., Stepanenko, A. V. (2010). Perspektivnye tehnologii obrabotki poverkhnostei vrascheniia frezerovaniem [Promising technologies for surface treatment of milling]. *Izvestiya TulGU. Seriya Tehnicheskie nauki – News of TulSU. Series Engineering*, 2, part 1, 130–136 [in Russian].

6. Gryazev, M. V., Stepanenko, A. V. (2010). Frezerovanie naruzhnyih tsilindricheskikh poverkhnostey tortsovoy frezoy [Milling of external cylindrical surfaces with face milling cutter]. *Izvestiya TulGU. Seriya Tehnicheskie nauki – News of TulSU. Series Engineering*, 2, part 1, 140–148 [in Russian].

7. Grabchenko, A. I., Kalchenko, V. I. & Kalchenko, V. V. (2009). *Shlifovanie so skreshhivaiushhimisia osiami instrumenta i detail [Grinding with crossed axes of tool and workpiece]*. Chernigov: ChDTU [in Russian].

8. Kalchenko, V. I., Kalchenko, V. V. & Sira, N. M. (2016). Modulne 3D-modelyuvannya instrumentiv, procesiv znyattya prypusku ta formoutvorennya pry shlifuvanni zi shreshhenymy osyamy cylindrychnogo ta stupinchastogo vala i elborovogo kruga [Modular 3D-modeling tools, processes of removal allowance and shaping in grinding with crossed axes stepped cylindrical shaft and CBN wheel]. *Rezanie i instrument v texnologicheskikh sistemah – Cutting and tool in technological systems*, 86, 36–48 [in Ukrainian].

9. Rodin, P. R. (1977). *Osnovy formoobrazovaniia poverkhnostei rezaniem [Fundamentals of forming surfaces with cutting]*. Kiev: Vyshha shkola [in Russian].

10. Kalchenko, V. V. (2011). Modulne 3D modeliuвання formoutvoriuiuchykh system shlifovalnykh verstativ, instrumentiv ta obroblivanykh poverkhon [Modular 3D modeling formative systems of grinding machines, tools and machined surfaces]. *Visnyk Ternopilskoho derzhavnogo tehnolohichnoho universytetu – Journal of Ternopil State Technological University*, 12, 68–79 [in Ukrainian].

11. Klimenko, S. A. (2011). Razrabotka PSTM na osnove KNB dlya osnascheniya vyisokoeffektivnyih rezhushchih instrumentov [Development of PSTM based on CBN for equipping high-performance cutting tools]. *Rezanie i instrument v texnologicheskikh sistemah – Cutting and tool in technological systems*, 79, 93–101 [in Russian].

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

12. Klimenko, S. A., Kopeykina, M. Yu., Klimenko, S. An., Manohin, A. S. (2016). Kontseptsia povysheniia rabotosposobnosti rezhuschikh instrumentov iz polikristallicheskikh kompozitov na osnove kubicheskogo nitrida bora [The concept of improving the performance of cutting tools from polycrystalline composites based on cubic boron nitride]. *Informatsiyni tehnologiyi v osviti, nautsi ta virobnitstvi – Information technology in education, science and production*, 2 (13), 108–114 [in Russian].

UDC 621.923.42

*Volodymyr Kalchenko, Natalia Sira, Dmytro Kalchenko, Olga Aksonova*

## INVESTIGATION OF THE MILLING CYLINDRICAL SURFACES PROCESS WITH TOOL AND SHAFT CROSSED AXES

**Urgency of the research.** Ensuring high levels of accuracy and quality cylindrical surfaces, while ensuring high performance processing is an actual problem in mechanical engineering.

**Target setting.** The accuracy of the machined parts is ensured by high tool life. With deep milling, high accuracy can be achieved in just a few passes. However, there is no dependence of the area of the metal layer, which is cut off, on the number of teeth of the mill.

**Actual scientific researches and issues analysis.** In the known methods of milling cylindrical surfaces there is no uniform distribution of allowance along the cutter tooth. A rough milling for one set does not provide high accuracy and quality of processing.

**Uninvestigated parts of general matters defining.** The method of milling cylindrical surfaces with an oriented tool that provides high rates of accuracy, quality and productivity of shaft processing has not been developed.

**The research objective.** The development of a new method of milling cylindrical surfaces with crossed axes of the tool and the shaft, when rough milling is carried out by the end of the cutting edge of the tool, and finishing milling is carried out by its periphery.

Creation of common modular 3D models of tools, stock removal and shaping processes in order to study the main characteristics of the milling process with an oriented tool.

**The statement of basic materials.** A method of milling cylindrical surfaces with an oriented tool has been developed, when rough milling is carried out by the end of the cutting edge of the tool, and finishing milling is carried out by its periphery. In this case, the angle of rotation of the tool during roughing is selected from the condition of ensuring maximum removal of the allowance with a uniform load on the end of the cutter edge, and when finishing, from the condition of ensuring full loading of the tool periphery and achieving the required roughness. The increase in processing performance during finishing milling is provided by increasing the frequency of rotation of the part. For a new method of milling, modular 3D models of the process of shaping and removing the stock have been developed. The dependence of the area of the metal layer, which is cut off by cutting edges, on the number of teeth of the mill is obtained.

**Conclusions.** A new method of milling cylindrical surfaces with intersecting axes of tools and parts is proposed. Studies have been carried out on the proposed method based on the developed modular 3D models for removing the allowance and shaping.

**Keywords:** milling, modular three-dimensional geometric modeling, oriented tool, shaping, cylindrical shaft.

Fig.: 10. References: 12.

**Кальченко Володимир Віталійович** – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Kalchenko Volodymyr** – Doctor in Technical Sciences, Professor of Road Transport and Industrial Engineering Department, Vice-rector of scientific and pedagogical work, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** vvkalchenko74@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9072-2976>

**ResearcherID:** G-6752-2014

**Сіра Наталія Миколаївна** – доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Sira Natalia** – PhD in Technical Sciences, Associated Professor of Road Transport Industry and Mechanical Engineering, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** nnserraya@gmail.com

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3248-0593>

**ResearcherID:** K-2658-2017

**Кальченко Дмитро Володимирович** – аспірант Чернігівського національного технологічного університету (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Kalchenko Dmytro** – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** itmia@ukr.net

**Аксьонова Ольга Олегівна** – асистент, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

**Aksonova Olga** – assistant, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14035, Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** itmia@ukr.net