

УДК621.914.1

DOI: 10.15587/2312-8372.2020.202793

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФРЕЗЕРУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПОВЕРХНІ ОРІЄНТОВАНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Кальченко В. В., Кальченко В. І., Сіра Н. М., Кужельний Я. В., Винник В. О.

Об'єктом дослідження є процес фрезерування зі схрещеними осями циліндричної поверхні та інструмента. Під час проведення досліджень були застосовані загальні модульні тривимірні моделі інструментальної поверхні, процесів зняття припуску та формоутворення циліндричної поверхні на базі трьох уніфікованих модулів: інструментального, формоутворення та орієнтації. Також використовувалось комп'ютерне моделювання для побудови тривимірної моделі процесу фрезерування циліндричної поверхні орієнтованим інструментом. Створена графічна схема фрезерування циліндричної поверхні орієнтованим інструментом. Розроблені циліндричний модуль формоутворення поверхні інструменту, який описується добутком матриць переміщень вздовж відповідних осей, та поверхня обробленої деталі, представлена добутком радіуса вектора інструмента та модуля її орієнтації в системі координат вала. Отримано графік розподілу питомої продуктивності процесу фрезерування вздовж профілю зуба інструмента при обробці зі схрещеними осями фрези та деталі. Аналіз вказаного графіка показав, що спосіб фрезерування орієнтованим інструментом дає можливість підвищити точність процесу формоутворення за рахунок рівномірного зносу інструмента. Також було визначено кут схрещення циліндричної поверхні та інструмента, величина якого приймається із умови забезпечення максимального зняття шару матеріалу при рівномірному завантаженні торцевої частини фрези. Для цього розроблено тривимірну модель процесу фрезерування циліндричної поверхні зі схрещеними осями інструменту та деталі, при якому чорнове фрезерування здійснюється торцевою частиною інструмента, а чистове – периферійною. В ході проведених досліджень визначено, що при чистовому фрезеруванні величина кута повороту фрези приймається із умови забезпечення повного завантаження периферійної частини фрези. Підвищення ефективності обробки досягається за рахунок схрещення осей інструмента та деталі, що дає можливість програмувати точку схрещення, та рівномірного зносу фрези, що підвищує якість обробленої поверхні. Також для забезпечення підвищення продуктивності обробки можливе застосування високошвидкісного фрезерування.

Ключові слова: фрезерування зі схрещеними осями, орієнтована фреза, модульне тривимірне моделювання, кут схрещення, циліндрична деталь.

1. Вступ

До одних із найпоширеніших деталей, які виготовляють машинобудівні підприємства, відносяться деталі, які мають циліндричні поверхні обертання. Для того, щоб деталі виконували всі технічні умови, їх відповідальні поверхні повинні задовольняти необхідним вимогам щодо якості та точності. До продуктивних способів обробки циліндричних деталей відноситься фрезерування. Дослідження процесу фрезерування циліндричної поверхні дає можливість підвищувати продуктивність обробки зі збереженням необхідної якості та точності поверхонь деталей. Так, у роботі [1] наведені результати дослідження фрезерування деталей із циліндричними поверхнями із використанням набору дискових фрез. А у роботі [2] розглядається спосіб фрезерування циліндричних деталей, які мають великий діаметр. У цьому способі використовуються дві торцеві фрези, осі яких схрещуються з віссю деталі та здійснюється повздовжня подача інструмента вздовж осі деталі. Дослідження процесу фрезерування зі схрещеними осями циліндричних деталей та інструменту було проведено у роботі [3]. Окрім цього, дослідженню процесу фрезерування циліндричних поверхонь були присвячені роботи [4, 5]. У роботах [6, 7] досліджуються тривимірні моделі різних способів фрезерування матеріалів. Отже, дослідження процесу фрезерування циліндричної поверхні орієнтованим інструментом є актуальною задачею. Таким чином, *об'єктом дослідження* є процес фрезерування зі схрещеними осями циліндричної поверхні та інструмента. *Метою дослідження* є розробка тривимірної моделі процесу фрезерування циліндричної поверхні торцем та периферією фрези зі схрещеними осями інструмента та деталі.

2. Методика проведення досліджень

Під час проведення досліджень були застосовані результати робіт [8, 9].

На рис. 1 зображена схема процесу фрезерування зі схрещеними осями фрези 1 та вала 2.

Для отримання тривимірної інструментальної поверхні необхідно задатися циліндричним модулем формоутворення, який враховує зміни положення координати вздовж профілю зуба інструмента та кутом повороту φ інструмента:

$$\bar{R}_{in} = M^{C_{in} Z_{in} \cdot \alpha_{in} \cdot R_{in}} \cdot \bar{e}_4, \quad (1)$$

де \bar{R}_{in} – радіус-вектор точок інструмента; $M^{C_{in} Z_{in} \cdot \alpha_{in} \cdot R_{in}}$ – циліндричний модуль формоутворення інструмента; \bar{e}_4 – радіус-вектор початкової координати [8].

Циліндричний модуль формоутворення поверхні інструмента описується як добуток матриць переміщень M_2 , M_3 вздовж осей Y_{in} та Z_{in} та матриці повороту M_6 навколо вісі $O_{in}Z_{in}$:

$$M^{C_{in} Z_{in} \cdot \alpha_{in} \cdot R_{in}} = M_3(Z_{in}) \cdot M_6(\alpha) \cdot M_2(R_{in}), \quad (2)$$

де $Z_{in}=0..H$ – лінійна координата вздовж периферії зуба інструмента, змінюється від 0 до значення ширини фрези H ; R_{in} – зовнішній радіус інструмента; $\alpha_{in}=0..360^\circ$ – кутова координата вздовж профілю інструмента.

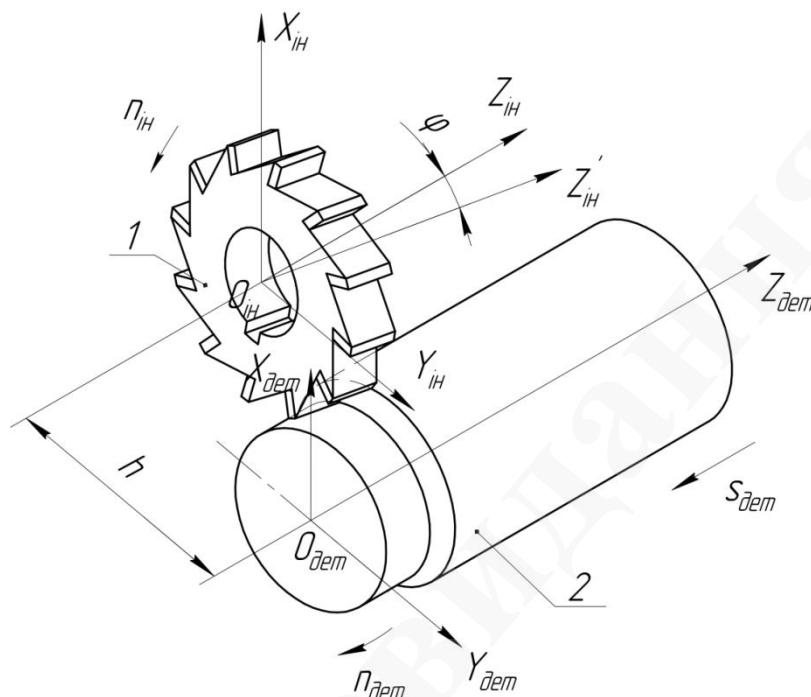


Рис. 1. Схема фрезерування циліндричної поверхні орієнтованим інструментом:
1 – фреза; 2 – вал

Добутком радіуса-вектора інструмента та модулем його орієнтації в системі координат вала, а також модулем формоутворення деталі є оброблена поверхня деталі:

$$\bar{R}_{дет} = M_{Z_{дет}\delta_{дет}h}^C \cdot M_{\alpha\beta}^S \cdot \bar{R}_{in} = M_3(Z_{дет}) \cdot M_6(\beta_{дет}) \cdot M_2(h) \cdot M_4(\varphi) \cdot M_5(\psi), \quad (3)$$

де $M_{Z_{дет}\delta_{дет}h}^C = M_3(Z_{дет}) \cdot M_6(\beta_{дет}) \cdot M_2(h)$ – циліндричний модуль, який описує рух інструмента відносно оброблюваної деталі; $Z_{дет}$ – подача деталі вздовж вісі $O_{дет}Z_{дет}$; $\beta_{дет}$ – кут повороту деталі; h – міжосьова відстань вала та інструмента; $M_{\alpha\beta}^S = M_4(\varphi) \cdot M_5(\psi)$ – сферичний модуль орієнтації інструмента в системі координат оброблюваної деталі; φ – кут схрещення осей фрези та деталі; ψ – кут повороту інструмента в системі координат вала [8, 9].

Враховуючи рівняння (1) та (2), циліндрична поверхня при обробці орієнтованим інструментом матиме вигляд:

$$\bar{R}_{дет} = M_{Z_{дет}\delta_{дет}h}^C \cdot M_{\alpha\beta}^S \cdot M_{Z_{in}\alpha_{in}R_{in}}^{C_{in}} \cdot \bar{e}_4. \quad (4)$$

Умова контакту профілів фрези та деталі в різні моменти часу [3] використовується для визначення профілю обробленого вала.

Модульна тривимірна модель інструмента R_{in} (рівняння (1)) була використана для визначення питомої продуктивності Q процесу обробки:

$$Q = \int_{\alpha_{in1}}^{\alpha_{in2}} Vn \cdot R_{in} d\alpha, \quad (5)$$

де Vn – проекція вектора відносної швидкості руху фрези на напрямок нормалі до його поверхні; $\alpha_{in1}, \alpha_{in2}$ – кутові координати вздовж профілю інструмента.

Графік розподілу питомої продуктивності процесу обробки Q вздовж профілю зуба фрези при обробці орієнтованим інструментом зображений на рис. 2.

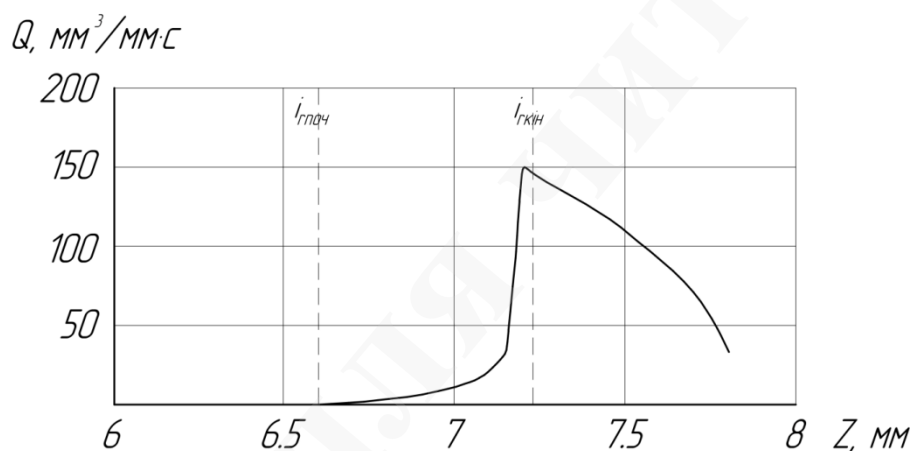


Рис. 2. Розподіл питомої продуктивності процесу обробки вздовж профілю зуба інструмента

На приведеному графіку (рис. 2) ділянка від $ir_{кін}$ до $ir_{поч}$ відповідає торцю фрези, а від $ir_{поч}$ починається периферійна частина інструмента. Отже, зняття чорнового припуску припадає на торець зуба інструмента, а чистового припуску – на периферійну ділянку. При тому, що питома продуктивність обробки Q_u напрямку від $ir_{кін}$ до $ir_{поч}$ зменшується, а після $ir_{поч}$ приймає найменші значення. Отже, процес фрезерування циліндричної поверхні орієнтованим інструментом забезпечує високу точність формоутворення поверхні деталі за рахунок невеликого зносу чистової периферійної ділянки зуба інструмента.

Тому чорнове фрезерування циліндричної поверхні орієнтованим інструментом можливо проводити торцевою частиною фрези, а чистову обробку – периферійною. Такий метод обробки забезпечить необхідну якість та точність оброблених поверхонь деталей.

Для забезпечення зняття максимальної величини припуску із збереженням умови рівномірного завантаження торця фрези при чорновій обробці циліндричної поверхні інструмент повертають на кут φ відносно деталі:

$$\varphi = 2s_{Aem} \sqrt{\frac{(R_{in} + r_z)^2}{4(r_z + m)^2 \cdot R_{in}^2 - [2r_z(R_{in} - m) - m^2]^2}}, \quad (6)$$

де m – припуск на обробку [9]; s_{Aem} – повздовжня подача деталі; r_z – радіус заготовки.

При чистовій обробці фрезу 1 потрібно орієнтувати відносно заготовки 2 під кутом, при якому кінцева точка i_{rkin} радіусу заокруглення r зуба фрези буде розміщуватись на радіусі заготовки r_z (рис. 3).

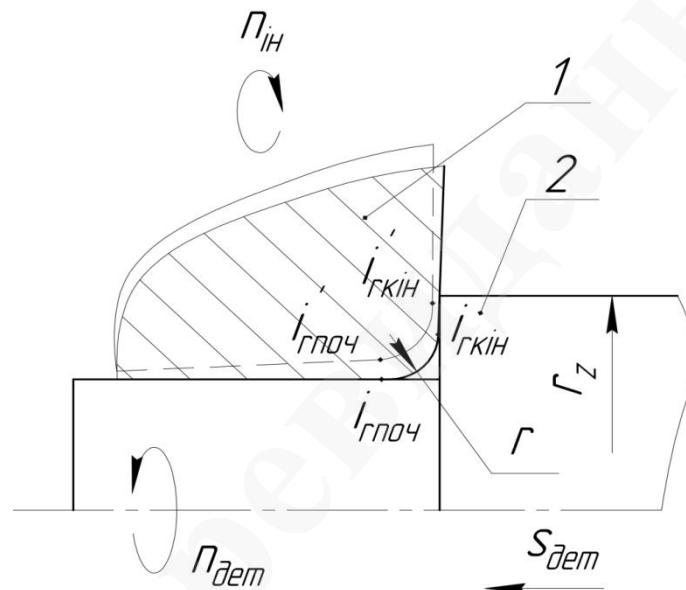


Рис. 3. Схема для визначення кута орієнтації інструмента відносно деталі:
1 – фреза; 2 – заготовка

Таке розміщення інструменту забезпечить умову повного завантаження периферійної ділянки фрези при чистовій обробці деталей. Це сприятиме рівномірному розподілу сил та зносу зубів фрези.

3. Результати досліджень та обговорення

Використовуючи результати досліджень роботи [10] було створено тривимірну модель процесу фрезерування циліндричної поверхні 2 (рис. 4) орієнтованим зубом фрези 1 у вигляді чотиригранної пластини. Для створення цієї моделі було застосовано універсальне програмне забезпечення ABAQUS. Скінчено-елементна сітка наносилась із використанням модуля Mesh. Форма елементів була обрана hexahedral.

Отримана модель розподілу напружень дає можливість аналізувати стан поверхневого шару оброблюваної деталі під час процесу фрезерування орієнтованим інструментом. Так, згідно з рис. 4, найбільші значення напружень (4390 МПа) припадають на зону врізання різальної пластинки у деталь, а при наближенні до периферії інструмента – зменшуються (295 МПа).

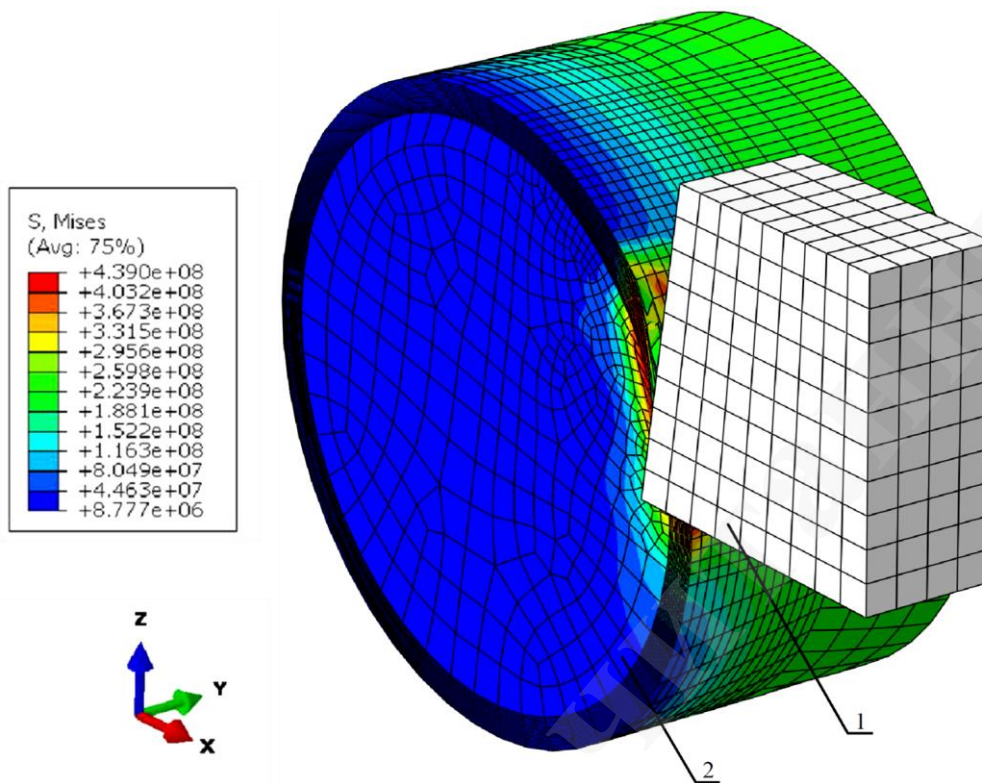


Рис. 4. Тривимірний моделювання процесу фрезерування циліндричної поверхні орієнтованим інструментом: 1 – орієнтований зуб фрези; 2 – оброблюваний вал

При фрезеруванні циліндричної поверхні зі схрещеними осями інструмента торцем зуба фрези відбувається зняття чорнового припуску, а периферія відповідає за зняття чистового припуску та остаточне формоутворення оброблювальної поверхні деталі.

Такий розподіл припуску забезпечує підвищення продуктивності обробки та точності формоутворення за рахунок рівномірного мінімального зносу чистової ділянки інструмента (рис. 2). На продуктивність процесу фрезерування орієнтованим інструментом впливає ширина інструменту, кількість різальних пластин та їх матеріал.

При цьому чорнова обробка здійснюється із кутом орієнтації фрези (рівняння (6)), який забезпечує рівномірне завантаження торця інструмента та зняття максимальної величини припуску. А чистове фрезерування – із кутом повороту інструмента, який забезпечує умову повного завантаження периферії інструмента (рис. 3).

4. Висновки

Розроблена тривимірний моделювання фрезерування дає можливість досліджувати процеси зняття припуску та формоутворення оброблювальної поверхні деталі. Запропонований спосіб підвищує продуктивність обробки за рахунок схрещення осей інструмента та деталі, а також точність формоутворення за рахунок можливості програмування точки перетину осей фрези та циліндричної деталі. Чорнова обробка торцем інструмента, а чистова – його периферією забезпечують рівномірний знос інструмента. При цьому для ефективної чорнової обробки кут повороту фрези приймається із умови рівномірного

завантаження та максимального зняття припуску торцем інструмента. А при чистовій обробці – із умови повного завантаження периферійної частини фрези. Отримана модель розподілу напружень дає можливість аналізувати стан поверхневого шару оброблюваної деталі під час процесу фрезерування орієнтованим інструментом.

Література

1. Gryazev, M. V., Stepanenko, A. V. (2010). Perspektivnye tekhnologii obrabotki poverhnostey vrashcheniya frezerovaniem. *Izvestiya TulGU. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2 (1), 130–136. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-tehnologii-obrabotki-poverhnostey-vrascheniya-frezerovaniem>
2. Poletaev, V. A., Volkov, D. I. (2001). Osobennosti struzhkoobrazovaniya pri frezerovanii i frezotochenii tel vrashcheniya. *Inzhenernyi zhurnal*, 7, 18–21.
3. Kalchenko, V., Sira, N., Kalchenko, D., Aksonova, O. (2018). Investigation of the milling cylindrical surfaces process with tool and shaft crossed axes. *Technical sciences and technologies*, 4 (14), 18–27. doi: [http://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-4\(14\)-18-27](http://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-4(14)-18-27)
4. Sliednikova, O., Vynnyk, V., Sklyar, V., Aksonova, O. (2019). Modular 3D modeling of tools, process of adaptation removal and forming at milling the cams with crossing tools and details. *Technical sciences and technologies*, 1 (15), 53–62. doi: [http://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1\(15\)-53-62](http://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1(15)-53-62)
5. Gryazev, M. V., Stepanenko, A. V. (2010). Frezerovanie naruzhnyh cilindricheskikh poverhnostei torcovymi frezami. *Izvestiya TulGU. Seriya Tekhnicheskie nauki*, 2 (1), 140–148. doi: <https://cyberleninka.ru/article/n/frezerovanie-naruzhnyh-tsilindricheskikh-poverhnostey-tortsovymi-frezami>
6. Rubeo, M. A., Schmitz, T. L. (2016). Milling Force Modeling: A Comparison of Two Approaches. *Procedia Manufacturing*, 5, 90–105. doi: <http://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.010>
7. Tang, D. W., Wang, C. Y., Hu, Y. N., Song, Y. X. (2009). Finite-Element Simulation of Conventional and High-Speed Peripheral Milling of Hardened Mold Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40 (13), 3245–3257. doi: <http://doi.org/10.1007/s11661-009-9983-1>
8. Grabchenko, A. I., Kal'chenko, V. I., Kal'chenko, V. V. (2009). *Shlifovanie so skreshchivayushchimisya osyami instrumenta i detali*. Chernigov: CHDTU, 356.
9. Kalchenko, V. I., Kalchenko, V. V., Sira, N. M., Kalchenko, D. V. (2016). Modulne 3D-modeliuvannia instrumentiv, protsesiv zniattia pryusku ta formoutvorennia pry shlifuvanni zi skhreshchenymy osiamy tsylindrychnoho ta stupinchastoho vala i elborovoho kruha. *Rezanye y ynstrument v tekhnolohycheskykh systemakh*, 86, 36–48. Available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/24131/1/RITS_2016_%2086_Kalchenko_Modulne.pdf
10. Krivoruchko, D. V., Zaloga V. A. (2012). *Modelirovanie processov rezaniya metodom konechnykh elementov: metodologicheskie osnovy*. Sumy: Universitetskaya kniga, 496. doi: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/36676>