

УДК 621.833

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-06

¹Громнюк С. І., ²Вергун В. А.¹ТЗОВ СПР Енерго, Львів, Україна²Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС РАДІАЛЬНО-КОЛОВИМ СПОСОБОМ, ЯКИЙ ЗДІЙСНЮЄТЬСЯ З РІЗНИМИ НАПРЯМКАМИ ПОДАЧІ

Наведено результати дослідження процесу нарізання зубчастих коліс радіально-коловим методом, що виконується за двома схемами – з осьовою та радіальною подачею. Дослідження, виконані на основі аналізу параметрів зрізів, осадження стружки, сил різання і основного часу операції показало, що вони значно відрізняються за всіма аналізованими параметрами. У випадку різання з радіальною подачею інтенсивність процесу істотно вища, а основний час на операцію зменшується. Разом з тим, збільшення сили різання загрожує підвищенням пружним деформаціям тонкої дискової фрези як різального інструменту, який у цьому методі здійснює рух різання та формоутворення зубчастих профілів в умовах непевного обкочування, як це є при зубофрезеруванні черв'ячною фрезою. Це може призвести до зниження точності оброблення і зумовити більш інтенсивне зношування інструменту. Крім того, різання з радіальним врізанням обмежується колесами невеликої ширини, але при цьому відсутній додатковий шлях врізання і перебігу. Оптимальною схемою зубонарізання є поєднання двох способів – початок різання з радіальною подачею для усунення шляху врізання з наступним переходом до різання з осьовою подачею на повну ширину вінця колеса.

Ключові слова: зубофрезерування, радіально-коловий метод, радіальна подача, осьова подача, параметри процесу, ефективність

Постановка проблеми. Зубчасті колеса є складовими більшості машин та механізмів, які виготовляють в різних галузях машинобудування. Широке розповсюдження цих деталей та значні обсяги їх промислового виготовлення зумовлюють інтенсивні пошуки ресурсів покращення їх експлуатаційних параметрів і характеристик, а також удосконалення технологій та методів зубооброблення. Дослідження за першим напрямком ведуться шляхом удосконалення існуючих і створення нових видів і систем зубчастих зачеплень. Для підвищення ефективності виробництва зубчастих коліс створюють нові методи і технології їх виготовлення, викінчувального оброблення та зміцнення робочих поверхонь. Серед нових та удосконалених традиційних технологій можна відмітити процес зуботочіння, що відомий в наш час як «Power skiving»; процеси високошвидкісного нарізання гартованих зубчастих коліс лезовим інструментом, оснащеним надтвердими різальними матеріалами, які об'єднані спільною назвою «Hard skidding»; процес InvoMilling, який поєднує індивідуальний поділ з неперервним генеруванням при обробці одної впадини, а також радіально-коловий метод зубонарізання, який розроблений у Львівській політехніці та розвивається, починаючи з 2003 року.

Аналіз останніх досліджень. Кожен з відомих методів має власні особливості та переважні області використання. На сьогодні найбільш прогресивним методом є зуботочіння. Створений початково для виготовлення планетарних коліс внутрішнього зачеплення, він набув широкого розповсюдження і використовується для виготовлення зовнішніх та внутрішніх коліс широкого діапазону модулів і розмірів. Основна перевага цього методу - висока продуктивність завдяки значній швидкості різання - стала можливою завдяки створенню високошвидкісних потужних приводів, верстатів підвищеної жорсткості та вібростійкості з високим рівнем синхронізації робочих рухів, керованих системою ЧПК. Разом з тим, ця технологія базується на спеціальному дороговартісному обладнанні та інструменті і є ефективною лише у великосерійному виробництві [1-4].

Цього недоліку не має радіально-коловий метод (РКМ), який здійснюється тонкою дисковою фрезою при неперервному обкочуванні, так, як це є при зубонарізанні черв'ячною фрезою та скайвінг-інструментом. Однією з істотних переваг РКМ є простота кінематики та можливість його використання на найпростішому за обладнанні, наприклад, на серійному зубофрезерному верстаті, а також на токарно-гвинторізному, або на токарно-затилувальному верстаті, дооснащеними засобами роботроніки, зокрема, серводвигунами для приводу усіх робочих рухів, керованими системою ЧПК, або комп'ютером. Це дає змогу значно покращити

ефективність зубооброблення за рахунок повної автоматизації циклу, підвищити продуктивність зубофрезерування і використовувати його в усіх типах виробництва – від одиничного до масового. Крім того, для коліс усіх видів і типів, які можна виготовити цим методом, потрібна тільки одна дискова фреза, що на порядки зменшує витрати на різальний інструмент [5].

Протягом тривалого часу виконано значний обсяг дослідницьких робіт цього методу, створено спеціалізоване обладнання та оснащення для його впровадження і практичного застосування. Зокрема, у роботі [6] наведено результати порівняння процесів нарізання зубчастих коліс традиційним методом черв'ячного зубофрезерування і радіально-коловим методом. Дослідження показали, що внаслідок особливостей процесу РКМ, його кінематики і простоти інструменту – тонкої дискової фрези цей метод переважає зубофрезерування черв'ячною фрезою за всіма параметрами: об'ємною продуктивністю, силами різання і споживаною енергією, досягнутою шорсткістю зубців, машинним часом та витратами. Попри те, що РКМ поступається зуботочінню за продуктивністю, проте він має значно вищу ефективність за універсальністю, простотою обладнання і оснащення та за собівартістю виготовлення зубчастих коліс.

У всіх порівнюваних методах використовувалися традиційні способи нарізання коліс з осьовою подачею інструменту. Проте, ці процеси, зокрема, РКМ можна здійснювати і з радіальною подачею, а також з комбінуванням подач. Цю різновидність процесу на сьогодні ще не вивчено, тому в даній роботі ставиться задача дослідити особливості зубонарізання радіально-коловим методом з радіальним врізанням з метою отримання висновків про можливість його практичного застосування та підвищення ефективності.

Викладення основного матеріалу. Відмінності двох способів різання зубчастого колеса з різним напрямком подачі представлені на рисунку 1. В обох випадках присутні такі рухи: головний рух різання – обертання дискової фрези навколо кінематичної осі, що збігається з віссю інструментального шпинделя з частотою $n_{фр}$ та відповідною швидкістю різання V ; рух кругової подачі з частотою n_k – обертання заготовки зі столом верстата; конструктивний рух різання і формоутворення – обертання геометричної осі фрези навколо кінематичної осі, зміщених одна відносно іншої на величину ексцентриситету e , а також допоміжний рух різання – подача: осьова, s_o - паралельно осі колеса, або радіальна, s_r – перпендикулярно до осі колеса, з неперервним врізанням, в мм/об.

Для фрезерування зубчастого колеса з радіальною подачею необхідна дискова фреза збільшеного діаметра при обмеженій ширині колеса. На рисунку 1, б показано інструмент – фрезу з ексцентричною оправкою, а на рисунку 1, в – процес нарізання зубчастого колеса. Оброблення ведеться за певної кількості обертів заготовки для прорізання зубця на повну висоту профілю. Якщо ширина колеса більша від допустимої, то на верхньому і нижньому торцях профіль зубців буде недоформований, тому у цьому випадку необхідний додатковий прохід з осьовою подачею від верхнього до нижнього торця колеса.

Нарізання колеса з осьовою подачею переважно здійснюється за кілька проходів із поступовим збільшенням глибини різання до виходу фрези на повну глибину профілю. В таких умовах для вибору раціонального способу зубонарізання необхідно порівняти витрати часу в обох способах.

Параметри зрізів. Найповнішу інформацію про процес нарізання зубчастих коліс містять параметри зрізів інструменту, які дають уявлення про навантаження зубців і лез і використовуються для розрахунку сил різання, пружних деформацій, витрат енергії, точності оброблення, температури різання, стійкості різального інструменту тощо. Моделювання трьохмірної недеформованої стружки та її параметрів проведено на основі методу, описаному в роботі [7]. Його суть полягає в тому, що неперервний процес різання представлено в дискретних послідовних положеннях різального клину інструменту і його передньої поверхні відносно поверхні, яка підлягає обробці.

В кожному положенні розраховують або визначають графічно положення контуру зубця, який виконує даний різ, та положення цього зубця в попередніх його положеннях по подачі і зміні інструменту по ексцентриситету, при цьому лінійна і кутова зміна цих положень відповідає кінематиці відповідного методу зубообробки. Накладання цих слідів дає миттєвий переріз зрізуваного шару в даному відносному положенні інструменту і зубчастої поверхні та визначає кількісні параметри поперечного перерізу зрізу: площу, товщину і ширину, а також довжину контакту зубця з заготовкою.

Результати побудови миттєвих перерізів зрізів на основі такого підходу в РКМ з радіальною подачею наведені на рисунку 2.

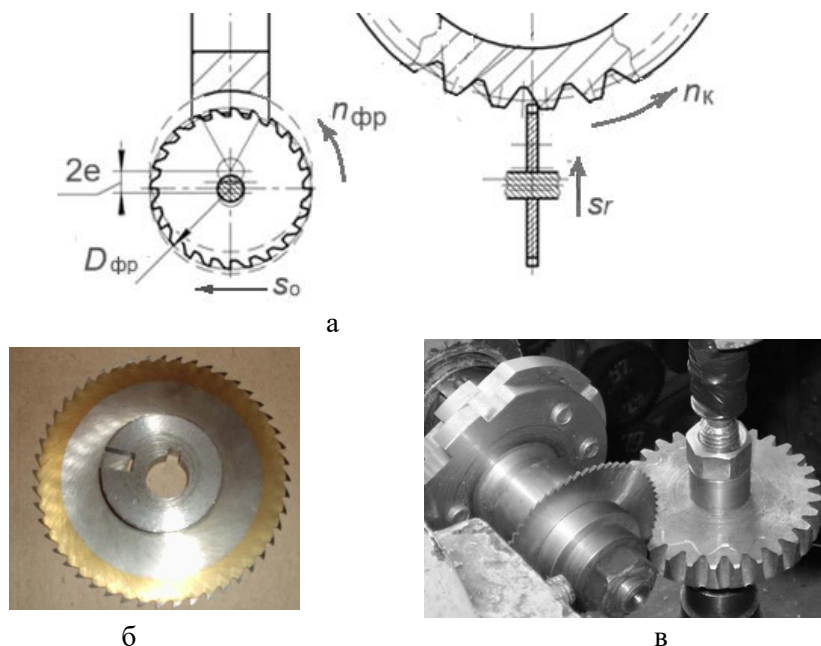


Рисунок 1 – Кінематична схема нарізання зубчастого колеса з різним напрямком подачі (а); дискова фреза з ексцентричною втулкою (б) та процес нарізання зубчастого колеса (в)

На рисунку 2, а показано типовий переріз зрізу в певному довільному взаємному положенні інструменту і заготовки у середині входної частини дискової фрези де ексцентриситет збільшується, а на рисунку 2, б – в середній частині вихідної ділянки фрези, де ексцентриситет зменшується.

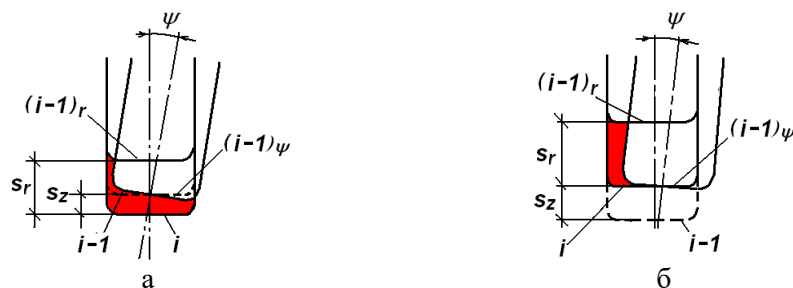


Рисунок 2 – Графічне пояснення алгоритму побудови миттєвих перерізів зрізів

Відмінності двох способів можна простежити, порівнюючи параметри зрізів, які утворюються при різних подачах. Початкові дані, для яких велися дослідження: ексцентриситет синусоїдального колеса 3,46 мм, що відповідає модулю 5 мм; осьова подача 0,75 мм/оберт заготовки; різання на повну висоту профілю колеса; кількість зубців: зубчасте колесо $Z_k = 30$, фреза $Z_{фр} = 45$; зовнішній діаметр фрези 185 мм, матеріал швидкорізальна сталь Р6М5; ширина колеса 16 мм, матеріал - сталь 40Х, межа міцності $\sigma_b = 660$ МПа, межа міцності на зсув (за третьою теорією міцності) $[\tau] = 330$ МПа; швидкість різання 32 м/хв.

На графіках, наведених на рисунку 3 показана середня товщина зрізів і сумарна на лезах дискової фрези площа поперечного перерізу зрізів (S , мм²), тобто перерізів недеформованої стружки, у функції від кута повороту фрези в межах одного повного оберту. З отриманих результатів випливає, що товщина стружки при різанні з врізанням значно менша, ніж при осьовій подачі, проте площа поперечного перерізу зрізів у три рази більша. В обох випадках основна робота різання виконується частиною фрези, яка працює на ділянці збільшенні ексцентриситету, тобто в ділянці дільного діаметру колеса.

Сила різання. Щоб визначити, як впливають параметри зрізів на силу різання, треба встановити коефіцієнт осадження стружки ξ в залежності від товщини зрізу. Використовуючи систему Деформ 2D на рисунку 4, а показана ця залежність для різання за обох напрямків подачі, а на рис.4, б представлені графіки сили різання. Величина сили різання визначена за залежністю $P = S \cdot [\tau] \cdot \xi$.

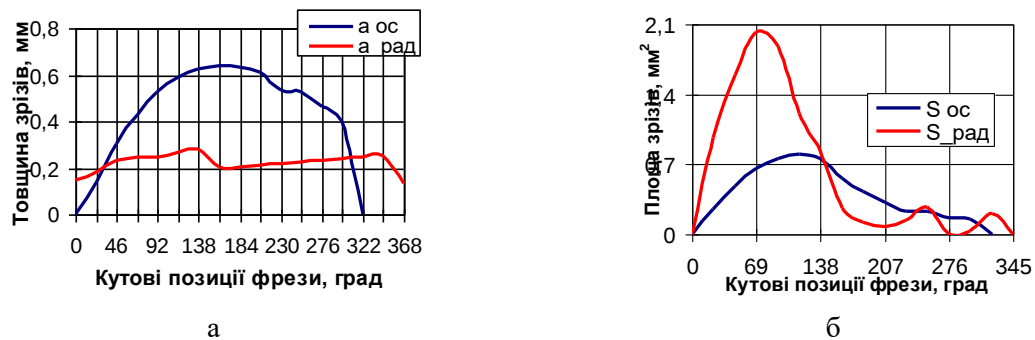


Рисунок 3 – Товщина (а) і площа поперечного перерізу зрізів (б) при осьовій і радіальній подачах

Мала товщина зрізів при різанні з радіальною подачею є причиною значно більшого коефіцієнта осадження стружки, що впливає на величину сили різання. Внаслідок сукупної дії обох параметрів зрізів - інтенсивності зсуву і більшої площі перерізу стружки в операції з радіальною подачею сила різання буде у три рази більша.

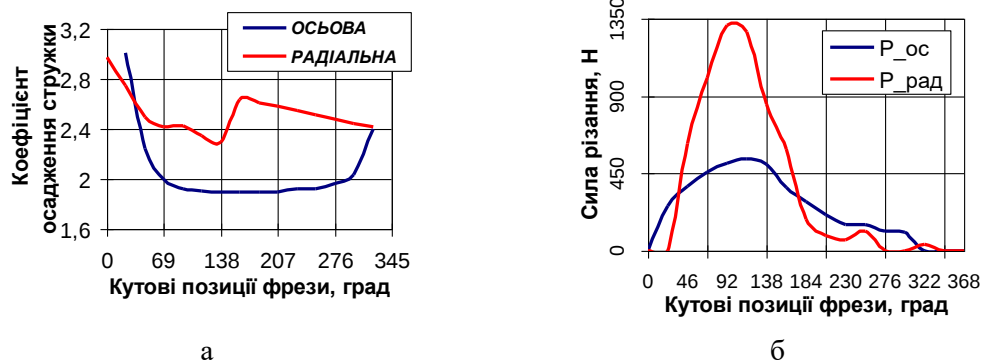


Рисунок 4 – Коефіцієнт осадження стружки (а) і сила різання (б) у двох способах зубофрезерування

Продуктивність оброблення. Відмінності значень параметрів зрізів викликають питання щодо продуктивності порівнюваних способів зубонарізання, яку можна оцінити як об'єм припуску, що усувається фрезою із впадин між зубцями колеса, який припадає на один зубець фрези. Цю величину можна розрахувати як добуток площі поперечного перерізу зрізів на довжину шляху різання кожного зубця по куту повороту фрези, тобто на довжину дуги контакту відповідного зубця з заготовкою. При кутовому кроці фрези 8° на ширині колеса 16 мм в зачепленні одночасно перебуває два зубці при радіальній подачі та чотири зубці при осьовій подачі. Враховую це, для наведених вище початкових даних та результатів моделювання отримуємо залежності для об'ємної продуктивності обох способів оброблення, що показані на рис.5.

Розрахунки та графіки вказують, що середні значення припуску в обох способах приблизно рівні, але вони відрізняються розподіленням навантаження - у випадку радіальної подачі основний припуск усувається в ділянці заходу фрези, де ексцентриситет зростає, а при обробці з осьовою подачею - на вихідній частині фрези.

Основний час оброблення. Для вибору того чи іншого способу нарізання зубчастого колеса необхідно розрахувати витрати часу. Головною складовою штучного часу на операцію, який є кількісною мірою праці, є основний час оброблення. Для вказаних вище початкових даних, зокрема, швидкості різання (32 м/хв.) і діаметра фрези (185 мм) частота обертання фрези рівна 55 хв.^{-1} , осьова подача 0,75 мм/об. час обробки однієї впадини можна визначити з формули:

$$t_o = \frac{L_{pi3}}{s \cdot n_{фр}}, \text{ хв.},$$

де $L_{\text{різ}}$ – довжина шляху різання s – величина подачі, 0,75 мм/об. В різанні з радіальною подачею ця довжина відповідає висоті зубця, тобто подвійному ексцентриситету – 6,86 мм, а при різанні з осьовою подачею – довжині колеса з врахуванням врізання і перебігу, тобто, 20 мм. Отже, час оброблення одної впадини дорівнює 0,174 хв. для врізання і 0,254 хв. – для руху з осьовою подачею. Для нарізання усього колеса необхідно витратити 5,75 хв. та 11,7 хв. відповідно, для різання з радіальною та осьовою подачею.

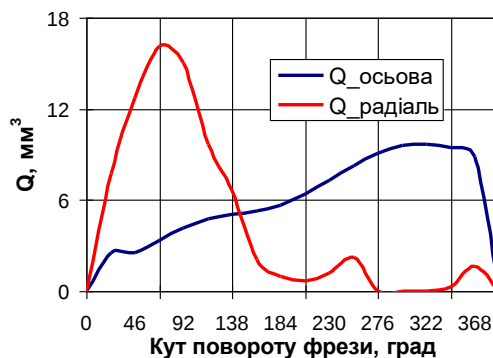


Рисунок 5 – Об'єм припуску, який усувається одним зубцем фрези під час різання з осьовою і радіальною подачею

Необхідно відмітити, що в цій роботі розглядається найпростіший варіант радіально-колового способу, коли дискова фреза встановлюється з ексцентриситетом і зберігається кінематика черв'ячного зубофрезерування, коли одному оберту фрези відповідає поворот колеса на один кутовий крок. Разом з тим, при використанні мультиплікатора на осі фрези цей кінематичний зв'язок розривається, відпадає необхідність дотримуватися вказаної закономірності, а швидкість різання можна збільшити в декілька разів. Одночасно за рахунок збільшення кількості зубців фрези можна збільшити подачу на зуб s_z та збільшити осьову подачу, яка рівна добутку s_z на кількість зубців фрези, що дає змогу багатократно зменшити витрати основного і штучного часу на операцію.

Висновки. Порівняння двох варіантів нарізання зубастих коліс радіально-коловим методом, які відрізняються напрямком подачі показало, що при радіальній подачі істотно менша товщина зрізів, в результаті чого вища інтенсивність осадження стружки. Одночасно при цій подачі збільшується площа поперечного перерізу зрізів, що призводить до інтенсивного зростання сили різання. З іншого боку у варіанті з врізанням будуть менші витрати основного часу на обробку порівняно з різанням з осьовою подачею. Побічним ефектом зростання сили різання є вищий рівень пружних деформацій тонкої дискової фрези, а також підвищення інтенсивності її зношування.

Ще одною особливістю зубонарізання з радіальною подачею є те, що цей спосіб придатний лише для коліс з обмеженої шириною вінця, а якщо ця умова не витримується, то необхідний додатковий прохід з осьовою подачею фрези для усунення похибок профілю, як виникають при цьому, а час обробки в обох випадках вирівнюється. Для подолання недоліку роботи з осьовою подачею, що полягає в необхідності витримувати шлях врізання і перебігу рекомендуємо поєднувати обидва способи – починати процес з радіального врізання і продовжувати різати з осьовою подачею, що дасть змогу скоротити витрати часу на операцію.

Інформаційні джерела

1. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., Krömer M. "Technological and Simulative Analysis of Power Skiving." *Procedia CIRP*. 2016. Volume 50. P. 773–778.
2. Tapoglou N. "Calculation of non-deformed chip and gear geometry in power skiving using a CAD-based simulation", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 100 (5-8), pp. 1779–1785. 2019.
3. Guo, E., Hong, R., Huang, X., Fang, C. "A novel power skiving method using the common shaper cutter", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83, P. 157–165, 2016.
4. Peng Wang, Jingcai Li, Lin Han. "Research on the Cutting Principle and Tool Design of Gear Skiving Based on the Theory of Conjugate Surface", *Mathematical Problems in Engineering*. 2021, P. 1–13.

5. I Hrytsay I., Herus D. Study of the gear cutting process by the radial-circular method. Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2024. Vol. 9, № 4. P. 20–27.
6. Hrytsay I., Herus D., Hromniuk S. Comparative analysis of methods for cutting spur gears based on technical and economic parameters // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. 2024. Vol. 10, № 2. P. 15–24.
7. E. Hrytsay, “Sinusoidal Gears and Alternative Method of Tooth Generation” in Advances in Gear Theory and Gear Cutting Tool Design, S. P. Radzevich, M. Storchak, Eds. Cham, Switzerland: Springer Publ., 2022. P. 233-254.

Hromniuk S.¹, Verhun V.²

¹SPREnergo, Lviv, Ukraine

²¹National University «Lviv Polytechnic», Lviv, Ukraine

STUDY OF THE RADIAL-CIRCULAR GEAR CUTTING PROCESS, WHICH IS PERFORMED WITH DIFFERENT FEED DIRECTION

The results of the study of the process of gear cutting by the radial-circular method, carried out according to two schemes - with axial and radial feed. The studies, based on the analysis of the parameters of the cuts, chip deposition, cutting forces and the cutting time of the operation, showed that they differ significantly in all the analysed parameters. In the case of cutting with radial feed, the intensity of the process is significantly higher and the main machining time is reduced. At the same time, an increase in the cutting force threatens to increase the elastic deformation of the thin disc cutter as a cutting tool, which in this method performs the cutting movement and gear profile formation under conditions of continuous tooth generation, as is the case in hobbing and pover skving. This can lead to a reduction in machining accuracy and increased tool wear. In addition, radial cutting is limited to gears of small width, but there is no additional cutting path and runout, and the machining time is reduced. The optimum gear cutting scheme is a combination of two methods - starting cutting with radial feed to eliminate the cutting path, followed by a transition to cutting with axial feed over the full width of the gear.

Keywords: *gear cutting, radial-circular method, radial feed, axial feed, process parameters, efficiency*