

УДК 621.91.01

Р. Чагайна, магістрант

А. Апаракін, канд. техн. наук, ст. викладач

Центральноукраїнський національний технічний університет

МЕТОДИКА ПОРІВНЯЛЬНОЇ ОЦІНКИ СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ПРОДУКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

У роботі представлено методику, за допомогою якої можна здійснювати порівняння методів черв'ячного зубофрезерування. Використання запропонованої методики може спростити проектування та розробку більш прогресивних методів черв'ячного зубофрезерування, які засновані на кардинально інших принципах різання та формоутворення.

зубофрезерування, шестерня, черв'ячна фреза, формоутворення, енергоємність

Постановка проблеми. Черв'ячне зубофрезерування це дуже енергоємний процес, зі складними умовами різання та стружкоутворення, який характеризується нерівномірним навантаженням і зносом окремих зубців фрези. В свою чергу все це впливає на точність обробки та на ресурс зубообробного обладнання. Традиційний метод майже вичерпав свої резерви по підвищенню ефективності, так як має суттєві обмеження по швидкості різання та подачі, зносу інструменту та забезпеченню необхідної якості обробки зубчастих коліс.

Черв'ячні фрези являються дорогим інструментом зі складною геометрією. Вони представлені переважно суцільнометалевими конструкціями, однак існують декілька збірних варіантів, які не набули широкого розповсюдження через дороговизну, низьку жорсткість та надійність.

Перспектива подальшого підвищення ефективності обробки зубчастих коліс відкривається для методів, які реалізуються на основі зміни кінематики різання із використанням відмінних від традиційного методу схем різання. Але перш ніж виконувати розробку таких методів, необхідна проста і доступна методика порівняльної оцінки нових методів черв'ячного зубофрезерування, зокрема по параметрам формоутворення та по показникам продуктивності та силових характеристик методів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження процесів різання при черв'ячному зубофрезеруванні не дуже популярні в останній час. Увага провідних науковців в галузі обробки різанням повернута до нових інструментальних порошкових матеріалів та зносостійких покриттів [1], які значно підвищують експлуатаційні характеристики черв'ячних фрез, зокрема розмірну стійкість (зменшення зносу), жаростійкість а отже збільшують допустимі максимуми подач і швидкості різання. Також розповсюдження набувають дослідження вузькоспеціальних характеристик методу за допомогою комп'ютерного моделювання. Такого роду дослідження проводяться як вітчизняними вченими, такими як Грицай І. Є [2], так і зарубіжними – Antoniadis A. [3], , Hyatt G. [4], Stein S. [5], Karpuschewski B. [6]. Однак у розглянутих дослідженнях відсутні спроби кардинально змінити принцип формоутворення при черв'ячному зубофрезеруванні, який і є головним джерелом негативних факторів при обробці, а лише здійснюється нейтралізація негативних наслідків.

Мета й завдання дослідження. Метою роботи є розробка методики порівняльної оцінки методів черв'ячного зубофрезерування на основі тривимірної моделі кінематики та розрахунку показників продуктивності та силових характеристик методів з використанням показника швидкості знімання матеріалу «material removal rate».

Для досягнення поставленої мети, вирішувались наступні задачі:

1. Розробити методику порівняльного аналізу процесів утворення евольвентного профілю методом черв'ячного зубофрезерування на основі тривимірної комп'ютерної кінематичної моделі.
2. Розробити методику порівняльного аналізу енергоємності процесів зубофрезерування на основі даних та результатів дослідження процесів утворення евольвентного профілю.

Об'єктом дослідження є черв'ячні фрези.

Предметом дослідження є процес утворення евольвентного профілю та вплив його показників на сили різання та енергоємність процесу зубофрезерування, в залежності від прийнятого методу формоутворення.

Виклад основного матеріалу. Показником, який обрано для порівняння ефективності процесів різання при зубофрезеруванні, є енергоємність різання. Розрахунок цього показника можна проводити через визначення сили різання. Енергоємність та сили різання мають ключовий вплив на різальний інструмент, вузли верстата, їх ресурс та працездатність, що у свою чергу позначиться на точності обробленого зубчастого колеса. Задля спрощення розрахунків та по причині циклічності обробки зубчастого вінця, допустимо розглядати обробку однієї міжзубової западини.

Відомі дослідження [7, 8, 9], присвячені вивченню силового портрету при черв'ячному зубофрезеруванні, розглядають процес різання комплексно, із урахуванням значної кількості параметрів, для максимальної достовірності результатів. У розроблюваній методиці здійснено спрощення до рівня, який не враховує постійні параметри, константи, а враховує лише ті параметри, які необхідні для порівняння ефективності методів.

У роботі використовується за основу відома методика дослідження процесів утворення профілю, яка описана у роботах [7, 8, 9, 10, 11]. Методика створена для точного визначення недеформованих зрізів, які знімає кожен з зубців черв'ячної фрези, який здійснює профілювання міжзубової западини. Реалізація процесу, у роботах, виконується як графоаналітично, так і за допомогою розробленого авторами програмного забезпечення.

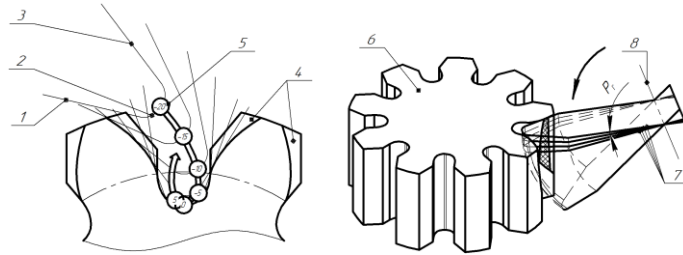
Дослідження процесів утворення профілю починається зі створення тривимірних комп'ютерних моделей заготовки та інструменту у середовищі CAD-системи. Важливою умовою точного відтворення розмірів і форми одиничних зрізів є точне відтворення рухів і кінематики процесу різання. Для цього у методику введено поняття позицій генерації профілю та радіальних позицій по траєкторії руху зубця фрези.

Фактично, позиція генерації профілю відповідає кожному зубцю фрези, який здійснює врізання при обробці міжзубової западини, а радіальні позиції по траєкторії руху – шлях, який проходить обумовлений зубець, від початку врізання у тіло заготовки до його виходу. Такі поняття введені для зручності дослідження методу зубофрезерування, з огляду на його складну кінематику. На рис. 1 приведено схему розташування позицій генерації та радіальних січних площин при черв'ячному зубофрезеруванні.

Визначення форми та розмірів недеформованих площин зрізів, які знімає кожен з зубців черв'ячної фрези, відбувається із фіксацією саме у позиціях генерації у заготовці, яка сформована на попередніх позиціях генерації, у всіх радіальних позиціях траєкторії. Це відбувається шляхом порівняння із накладенням зображення поперечного перерізу деталі перед та після здійснення процесу різання і формоутворення окремим зубцем фрези, а головна умова для отримання коректного зображення геометричної форми розмірів недеформованих зрізів – це послідовна обробка зубцем фрези заготовки, яка сформована на попередніх позиціях генерації, із заданою вісевою подачею.

Нумерація позицій генерації при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні починається з від'ємних значень, при роботі зубця черв'ячної фрези вхідною різальною кромкою, перетинає положення «0», яке відповідає симетричному положенню зубця у западні зубчастого колеса, та продовжується у додатному напрямку при роботі вихідною різальною кромкою.

По отриманим значенням недеформованих площин зрізу та чисельним значенням ширини та товщини одиничних зрізів, для наочності процесу формоутворення можна побудувати графіки у трьох координатах, які враховують номер позиції генерації і номер січної площини та параметр за вибором – ширину, товщину чи площу зрізу.



1 – вхідна різальна кромка; 2 – різальна кромка на вершині зубця; 3 – вихідна різальна кромка; 4 – припуск на обробку; 5 – позиція генерації зубчастого колеса; 6 – заготовка; 7 – радіальні позиції по траєкторії руху зубця; 8 – вісь обертів фрези; P_r – крок радіальних позицій по траєкторії руху зубця.

Рисунок 1 – Схема розташування позицій генерації та радіальних позицій по траєкторії руху зубця фрези

Геометричні розміри одиничних зрізів (глибина та ширина) на кожній позиції генерації, які отримані у результаті дослідження процесів утворення профілю на базі тривимірних комп'ютерних моделей кінематики зубофрезерування, являються вихідними даними для розрахунку параметрів продуктивності, сили різання та енергоємності процесу зубофрезерування.

Оцінка енергоємності процесу виконується по наступним показникам [12, 13]:

- швидкість знімання матеріалу (material removal rate) Q , см³/хв;
- споживана потужність P_c , Вт;
- сила різання F_c , Н;
- відносний модуль енергоємності $|E|$, відн. од. ен.

Ключовий параметр – споживана потужність, тобто потужність, необхідна для видалення одиниці об'єму матеріалу. Параметр є мірою опору матеріалу різанню, а також вказує на ефективність умов різання. Типові значення для звичайних матеріалів дозволяють зробити оцінку потужності різання та сили різання для заданих показників видалення металу. Ці показники корисні для конструкторів верстатів, технологів та інженерів з планування виробництва.

Швидкість знімання матеріалу Q розраховується за формулою, см³/хв:

$$Q = \frac{t \times b \times V_f}{1000}, \quad (1)$$

де t – глибина різання, мм;

b – ширина різання, мм;

V_f – хвилинна подача, мм/хв.

Споживана потужність P_c визначається з виразу, Вт:

$$P_c = \frac{Q \times K_c}{60}, \quad (2)$$

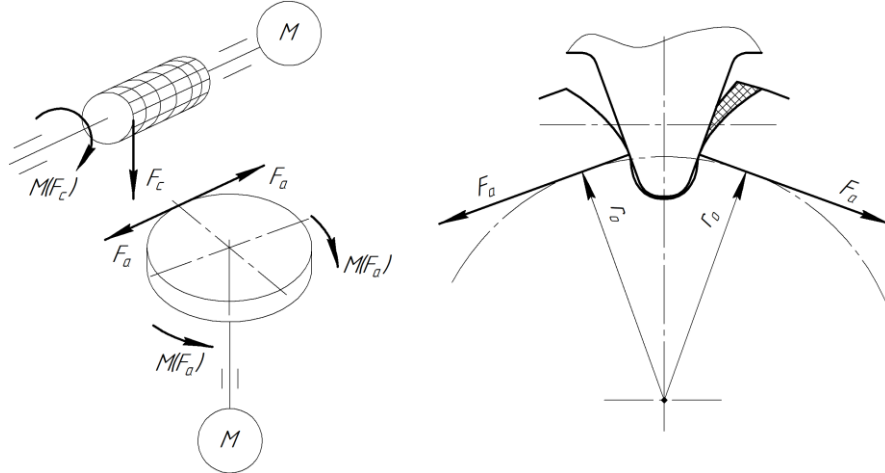
де K_c – питомий тиск різання, параметр який залежить від фізичних властивостей матеріалу та умов різання, приймається за довідковими матеріалами, МПа.

Сила різання F_c визначається з виразу, Н:

$$F_c = \frac{P_c \times 60}{V_f}. \quad (3)$$

З огляду на моделювання обробки однакових заготовок при однакових умовах різання, головну роль для визначення усіх параметрів будуть грати значення ширини та товщини зрізів та характер їх розподілення у межах обробки однієї міжзубової западини.

Схема утворення моментів від сил різання представлена на рис. 2 для традиційного черв'ячного зубофрезерування. На схемах показано вектори сил різання у верстатному зачепленні, та видно, як утворюється зміна напрямку моменту різання $M(F_a)$, яка викликана зміною напрямку вісєвої сили різання F_a у проміжку між обробкою вхідною бічною різальною кромкою черв'ячної фрези та роботою вихідною різальною кромкою.



r_o – радіус основного кола; F_c , F_a – складові сили різання; $M(F_{c,a})$ – моменти сил різання.

Рисунок 2 – Утворення моментів від сил різання при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні.

Визначення моменту від вісєвої сили різання F_a , що діє на столі верстату, для традиційного черв'ячного зубофрезерування відбувається як сила F_a помножена на плече, у даному випадку – радіус основного кола r_o оброблюваної деталі:

$$M(F_a) = F_a \times r_o. \quad (4)$$

У випадку, якщо необхідно визначити інші складові сили різання, методикою допускається використання їх наближеного значення, яке виведене із відношення до значення тангенціальної складової F_c [13]:

$$F_c : F_a : F_r = 4 : 2 : 1. \quad (5)$$

Також у даній методиці теоретичного дослідження, для спрощення розрахунків моменту на інструментальному шпінделі, можна знехтувати геометричними розмірами фрези, зокрема зовнішнім діаметром, тобто прийняти $r_\phi = 1$. Отже момент від тангенціальної сили різання на шпінделі інструменту буде тотожний модулю сили, як показано у виразі:

$$M(F_c) = F_c \times r_\phi \equiv |F_c|. \quad (6)$$

Відносна енергоємність $|E|$ – це визначене через відносне значення сили різання $|F_c|$ значення енергоємності, що має місце у межах обробки однієї міжзубової западини. Визначається відносний модуль енергозатрат через відому формулу фізичної роботи механічної A :

$$A = F \times V \times T, \quad (7)$$

де F – сила, Н;

V – швидкість, м/с;

T – час, с.

Так як при модулюванні ми розглядаємо обробку із однаковими швидкостями різання та параметром, який можна ототожнити із часом T – обробка западини між двома зубцями, тобто обробка зубчастого колеса з обертом на ϕ град. (тобто $\phi \equiv T$), відносна енергоємність розраховується з виразу:

$$|E| = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\max} \sum |F| d\varphi. \quad (8)$$

Отримані значення швидкості знімання матеріалу (material removal rate) Q , шляхом підстановки значення ширини і товщини різання у формулу (1) та розраховані на її основі споживана потужність P_c (2) та сила різання F_c (3), можна представляти у вигляді графіка. Відносний крутний момент на шпінделі деталі $M(F_a)$, визначений по формулі (4), та крутний момент на інструментальному шпінделі $M(F_c)$, визначений по формулі (6), також можна представляти у вигляді графіку. Порівняльну оцінку енергоємності здійснюємо в умовних одиницях енергоємності.

Висновки. У роботі представлена розроблена методика порівняльної оцінки методів черв'ячного зубофрезерування на основі тривимірної моделі кінематики та розрахунку показників продуктивності та силових характеристик методів з використанням показника швидкості знімання матеріалу «material removal rate». Пропонована методика має практичну цінність для дослідників, які працюють у напрямку створення більш ефективних методів черв'ячного зубофрезерування та вирішення проблем та недоліків традиційного методу.

Список літератури:

1. New Developments in Gear Hobbing / Dr. Oliver Winkel // Gear Technology. – 2010. – March/April. – P. 45–52.
2. Громнюк С. І. Моделювання складових сумарної похибки і точності зубчастих коліс в радіально-коловому способі зубонарізання / С. І. Громнюк, І. Є. Грицай // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Проблеми механічного приводу. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2014. – № 31 (1074). – С. 24-28.
3. Antoniadis A. Gear skiving – CAD simulation approach / A. Antoniadis // Computer-Aided Design journal. – 2012. – Volume 44, Issue 7. – P. 611–616.
4. Hyatt G. A Review of New Strategies for Gear Production / G. Hyatt, M. Piber, N. Chaphalkar, O. Kleinhenz, M. Mori // Procedia CIRP. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting. – 2014. – Volume 14. – P. 72-76.
5. Stein S. Gear hobbing: a contribution to analogy testing and its wear mechanisms / S. Stein, M. Lechthaler, S. Krassnitzer, K. Albrecht, A. Schindler, M. Arndt // Procedia CIRP. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting. – 2012. – Volume 1. – P. 220-225.
6. Karpuschewski B. High Performance Gear Hobbing with powder-metallurgical High-Speed-Steel / B. Karpuschewski, H-J. Knoche, M. Hipke, M. Beutnera // Procedia CIRP. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting. – 2012. – Volume 1. – P. 196-201.
7. Gear hobbing cutting process simulation and tool wear prediction models / K. D. Bouzakis, S. Kombogiannis, A. Antoniadis, N. Vidakis. // Journal of manufacturing science and engineering. – 2002. – Vol. 124. – P. 42–51.
8. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods / K. D. Bouzakis, E. Lili, N. Michailidis, O. Friderikos. // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2008. – №57. – P. 676–696.
9. Schmidhammer A. Die Verschleißerscheinungen an Wälzfräsern und ihre Ursachen / Schmidhammer. // Technische Nachrichten Fette. – 1980. – №270. – S. 211.
10. Cutting performance increasing in gear hobbing by means of HSS hobs, coated with effective PVD films [Електронний ресурс] / K. D. Bouzakis, S. Kombogiannis, O. Friderikos, J. Anastopoulos. – 2003. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/237672470_Cutting_performance_increasing_in_gear_hobbing_by_means_of_HSS_hobs_coated_with_effective_PVD_films.
11. Dimitriou V. Advanced Computer Aided Design Simulation of Gear Hobbing by Means of Three-Dimensional Kinematics Modeling / V. Dimitriou, N. Vidakis, A. Antoniadis. // Journal of manufacturing science and engineering. – 2007. – Vol. 129. – p. 911–918.
12. A.L.M.T. Corp. - Formula to calculate cutting process [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.allied-material.co.jp/en/products/diamond/knowledge/cutting_formula.html.
13. Principles of Engineering Manufacture (Third Edition) / Stewart C. Black, Vic Chiles, A.J. Lissaman, S.J. Martin // Butterworth-Heinemann. - 1996. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-340-63195-9.X5000-7>.