

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ІНСТРУМЕНТА ПІД ЧАС НАРІЗАННЯ ВНУТРІШНІХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС МЕТОДОМ POWER SKIVING

<https://doi.org/10.23939/istcipa2023.58.047>

© Сліпчук А. М., 2024

Постановка проблеми та мета роботи. Одним з основним факторів, які визначають інтенсивність зношування різального інструменту, є температура, що виникає в процесі різання. Ставимо за мету дослідити закономірності та отримати залежності теплоутворення і теплової передачі між елементами процесу різання, які характеризують температуру зубців інструмента та його лез. Встановити нагрівання і зношування різальних кромek під час нарізання внутрішнього зубчастого колеса методом Power skiving. **Методика роботи.** Використовуючи комплексні взаємопов'язані графоаналітичні та математичні моделі, що включають створення 3D моделі недеформованої стружки, яка побудована на отриманих зрізах, а також симуляції контактних, силових, деформаційних і теплових процесів під час зубонарізання внутрішнього вінця, було досліджено сили тертя та температуру на зубцях Skiving-різців. **Результати.** Запропонована методика дослідження, яка наведена в цій роботі, дозволяє вибирати безпечні умови роботи різального інструмента під час зуботочіння методом Power Skiving. Отримані результати дозволяють забезпечити необхідну стійкість Skiving-різців та уникати теплового перевантаження. **Наукова новизна та практичне значення.** Результати дослідження дають можливість підібрати раціональні значення режимів різання при точінні внутрішнього зубчастого вінця, маючи інформацію про технічні характеристики обладнання та властивості матеріалу інструмента. Підібрана безпечна швидкість різання дозволить максимально продуктивно використовувати вказаний метод і забезпечить необхідний період стійкості Skiving-інструментів. **Напрями подальших досліджень за тематикою статті.** У подальших дослідженнях необхідно встановити залежність періоду стійкості Skiving-інструмента від температури для різних значень глибини різання та під час вривання в заготовку.

Ключові слова: зубчасте колесо, температура, зношування, геометричні параметри, швидкість різання, 3D модель, Power skiving.

Вступ. Постановка проблеми

Power skiving став важливим технологічним проривом у виготовленні зубчастих коліс, спричиняючи підвищення продуктивності та ефективності виробництва. Цей метод зубонарізання базується на безперервному процесі видалення стружки при високих швидкостях різання (до 200 м/хв, а для деяких випадків до 300 м/хв) [1], що робить його щораз більш затребуваним на сучасних підприємствах, які спеціалізуються на виготовленні різних зубчастих коліс.

Попри те, що технологія Power skiving була теоретично описана ще в 1910 році [2], її промислове впровадження стало можливим лише на початку XXI століття. Цей прогресивний метод поєднує в собі процеси точіння та фрезерування, але потребує високих вимог як до інструменту, так і до обладнання. Основними перешкодами для його широкого використання були жорсткі умови до синхронізації обертальних рухів заготовки та інструменту на високих швидкостях, прецизійне узгодження рухів та позиціонування в кожний момент часу, швидке зношення інструменту, високі температури на різальних кромках та відсутність відповідних матеріалів для виготовлення відповідного інструменту.

Впровадження методу Power skiving стало можливим завдяки розвитку серводвигунів і верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), що дозволяють забезпечити високу точність та задовольнити всі вище зазначені вимоги процесу. Сьогодні цей метод зуботочіння активно

використовують для нарізання як зовнішніх, так і внутрішніх зубчастих коліс різних модулів і розмірів, включаючи шевронні колеса та евольвентні шліци [3].

Мета та завдання роботи

Удосконалення процесу зубонарізання і пошук оптимальних умов роботи обладнання та інструменту є предметом наукових і прикладних досліджень, оскільки в технології Power skiving є ще багато невивчених можливостей. Значні переваги методу порівняно з традиційними методами нарізання зубчастих коліс зумовили його ретельне та різнобічне дослідження. Одним з головних напрямків покращення методу є підвищення стійкості інструментів та усунення технологічних проблем, таких як мала стійкість різального інструмента. Дослідники працюють над оптимізацією режимів різання для забезпечення стабільної довготривалої роботи Skiving-інструмента. Отже, Power skiving має великий потенціал для подальшого розвитку, а його ефективне використання відіграє ключову роль у сучасному машинобудуванні.

Дослідження закономірностей та отримання залежностей для оцінки впливу чинників процесу Power skiving на процеси теплоутворення і теплової передачі між елементами процесу різання, які характеризують температуру зубців та лез, їх нагрівання і зношування, є ще одним важливим напрямом вивчення. Відомо, що основним фактором, який впливає на інтенсивність зношування різального інструменту, є теплота, що генерується під час різання. Повну і всебічну інформацію про природу та інтенсивність зношування лез інструменту містять дані про температуру, як кількісну характеристику теплоти, і закономірності її розподілу в робочій зоні. Виходячи з цього, метою роботи є дослідження теплових процесів і температури різання та отримання залежностей для оцінки впливу чинників процесу Power Skiving на зношування різального інструмента.

Огляд інформаційних джерел

У відомих дослідженнях процесу Power skiving підвищену увагу приділяють вивченню зношування різального інструмента, оскільки різання за цим методом зубообробки супроводжується виникненням значних сил. Від періоду стійкості залежатиме точність та продуктивність обробки, його ефективність та собівартість обробки в цілому. Аналіз першоджерел, в яких об'єктом досліджень є температура, як одного з головних факторів, що впливає на зношування, виявив таке.

В низці робіт, що присвячені цій проблемі, наведені результати експериментальних досліджень [4–7]. Але такі дослідження мають обмежене використання, оскільки прив'язані до конкретних умов, тому їх результати можуть слугувати для перевірки теоретичних напрацювань або для покращення процесів, які здійснюються в таких же або близьких умовах.

Робота [8] також присвячена експериментальним дослідженням процесу зношування скайвінг-інструмента, але для дослідження використані однозубі інструменти, контур яких відповідає зубцю різача, а імітацію зубонарізання здійснюють на багатоосьових верстатах з ЧПК. У цій роботі інструментом є оправка з двома зубцями, ідентичними до зубців скайвінг-інструмента. Такі верстати дають змогу відтворити процес різання окремим зубцем при зміні кутового положення заготовки для кожного різку. Але при цьому порушується циклічність процесу і теплове навантаження, що може мати значний вплив на зношування. Крім того, у таких експериментах також не враховується форма дійсної перехідної поверхні, яка визначає внутрішній контур стружки, її дійсну форму і розміри, що зменшує достовірність результатів досліджень, як було зазначено вище.

У роботі [9] швидкість зношування зубців по кутниках біля вершин виводиться візуально, залежно від форми стружок. Такий підхід враховує, що при одночасному різанні вершинними і боковими лезами буде найбільше зношування кутників зубців внаслідок нашаруванням стружок біля вершин. Проте швидкість зношування зубців скайвінг-інструменту може бути переважаючою не по кутниках, а по задній поверхні, що найчастіше трапляється на практиці, а також за певних

умов – по передній поверхні. При цьому тертя внаслідок нашарування стружок є тільки одним з чинників зношування, поряд з іншими факторами.

Розрахунок навантаження на основі товщини та довжини стружки [9–14] є недосконалим. Збільшення товщини різі одночасно призводить до двох протилежних ефектів:

- збільшення сили різання внаслідок збільшення площі поперечного перерізу зрізу;
- зменшення тиску і тертя на передній поверхні та зменшення сили різання.

Водночас зменшення товщини різі призводить до збільшення тиску на передню площину, відповідно, підвищується тиск по задній поверхні зубця і збільшується сила різання, а з цих двох факторів на силу різання має більший вплив другий фактор.

Інтенсивність пластичної деформації особливо зростає, коли при змінній площі перерізу зрізу в початковий момент врізання зубця товщина зрізу менша від радіуса закруглення леза.

В роботах [15–22] при моделюванні недеформованої стружки описують просторовий шлях зубця різача і кутовий поворот заготовки в різних позиціях різання, проте не беруть до уваги форми та розміри перехідної поверхні у впадині між зубцями, розміри якої та форма неперервно змінюються по куту повороту заготовки під час усунення припуску Skiving-інструмента. Така перехідна поверхня формується неперервно від моменту контакту першого зубця на гвинтовій лінії різального інструмента до виходу зубця на цій поверхні із заготовки. Цей процес циклічно повторяється за кожен оберт заготовки і зміщення різача на величину осьової подачі на кожен цикл повороту заготовки. Так у певному положенні інструмента і заготовки ця перехідна поверхня сформована у впадині між зубцями різача в попередньому осьовому положенні інструменту по руху подачі. Ця поверхня формується періодично для кожного часу різання цього зуба в межах його контакту із зазором, і зуб виходить на цю поверхню після того, як інструмент перемістився на певну величину в напрямку осьової подачі і повного оберт заготовки. Саме форма і розміри цієї перехідної поверхні визначають внутрішню поверхню стружки, її об'єм і фактичні параметри поперечного перерізу передньої поверхні зуба інструменту при будь-якому кутовому положенні фрези під час її обертального руху. Оскільки ця перехідна поверхня, в кінцевому підсумку, визначає форму і розміри внутрішньої поверхні недеформованої стружки, то очевидно, що без врахування цієї поверхні неможливо достовірно змодельовати дійсний розмір і форму стружки.

Ще один вид спрощення полягає в тому, що цю дійсну перехідну поверхню у впадині при зуботочінні замінюють квазіперехідною поверхнею [23]. При цьому слід різання приймається як лінійний рух трапецеїдального контуру зубця інструменту у впадині паралельно осі колеса, а не по сплайну. Автор неправильно трактує траєкторію руху різального інструменту, яка не відповідає процесу різання у Power skiving.

В роботі [11] дослідження базуються на припущенні, що зношування фрези пропорційне значенню коефіцієнта осадження стружки. Це тільки частково правильно, бо критерієм зношування черв'ячної фрези, як і більшості інструментів, є зношування по задній поверхні, яке розвивається як наслідок не тільки процесів зсуву, але й поширення теплоти від різних джерел.

Теплові процеси зуботочіння розглядають в роботі [24]. Проте в їхній тепловій моделі відсутній різальний інструмент, а досліджуються термічні деформації тільки заготовки та верстата.

В роботах [25, 26] розроблено методику розрахунку тертя, теплових потоків і температури різання, яка базується на представленні джерел тертя і теплоти у чотирьох характерних ділянках деформування і тертя: в площині зсуву, в ділянках пружного і пластичного контакту на передній поверхні та в ділянці «застійної зони» – на радіусі заокруглення леза, в якій відбувається зминання частини припуску. Проте такий підхід, виправданий для різання одним лезом і одним різальним клином при незмінній глибині різання, не підходить для Power skiving.

На основі аналізу першоджерел можна зробити висновок, що, незважаючи на їх численність, прогнозування стійкості різальних інструментів для виготовлення зубчастих коліс все ще залишається актуальною і не повною мірою вирішеною проблемою. Результати, які отримують з експериментальних досліджень, мають обмежене використання: з одного боку, через відмінності в

кінематиці при відтворенні процесу зуботочіння на верстатах з ЧПК, а з іншого боку, – через вузький діапазон початкових даних, в яких ці дослідження проводили.

Труднощі, які виникають при дослідженні зношування, зумовлені недосконалістю 3D моделей зрізів стружки. Для повноцінного моделювання температури різача необхідні дані про силу різання і сили тертя на передній і задній поверхнях усіх лез – вершинних і бокових, а також про теплові потоки на цих поверхнях. В свою чергу, ці параметри базуються на параметрах стружки і її поперечних перетинів. Відомі методи моделювання стружки, які використовують для цієї цілі, не в повній мірі адекватно описують ці параметри.

Крім того, відомим теоретичним дослідженням в цій галузі бракує широкого використання наукової основи, що накопичена в теорії різання металів, яку необхідно задіяти для моделювання усього комплексу процесів і явищ під час нарізання коліс відповідним інструментом – деформаційних, силових, контактних, теплових тощо.

Отже, поставлена у цій статті мета є адекватною і важливою для процесів виготовлення зубчастих коліс.

Виклад основного матеріалу

1. Основні положення для моделювання.

При моделюванні процесу Power Skiving необхідно враховувати такі його особливості:

- процес є багатолезовим і переривчастим, з циклічними навантаженням зубців. Частота різання одним зубцем з пластинами з твердого сплаву, що відповідає швидкості різання 200–240 м/хв, може становити 15 – 20 Гц;

- параметри зрізуваних шарів на кожному лезі різні та змінюються по куту контакту зубця з заготовкою, що призводить до неперервної зміни величини і напрямку сил, які діють на передній поверхні зубця;

- на більшій частині шляху різання одного зубця одночасно ріжуть два або три леза і наявне невільне різання, що збільшує сили різання, тертя та теплоту, яка генерується на передній поверхні.

Такі особливості цього процесу істотно впливають на утворення і розподіл теплоти та нагрівання зубців інструменту, при цьому, на відміну від черв'ячної фрези, усі зубці працюють в однакових умовах за однаковими законами. Для моделювання теплоти і температури треба застосовувати базові засади теорії різання, перевірені та підтверджені експериментально, і результати моделювання цього процесу, виконані на попередніх етапах. Зокрема, принципи і підходи до моделювання 3D недеформованої стружки та розрахунку її параметрів наведені в роботах (рис. 1) [27], а методика визначення сили різання наведена в роботах [28, 29]. Ці дослідження дають можливість для моделювання і розрахунку теплових процесів і температури на рівні окремих лез Skiving-різців.

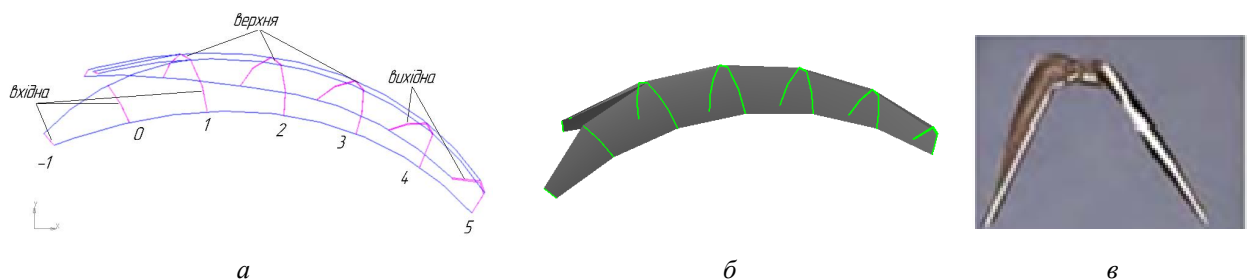


Рис. 1. Недеформована стружка (а – каркас; б – 3D модель; в – реальна стружка, утворена при нарізанні [7])

Fig. 1. Undeformed chip (a – framework; b – 3D model; c – actual chip formed during cutting [7])

2. Сили різання і сили тертя на лезах

Основним джерелом теплоти і нагрівання різального інструменту є тертя на контактних поверхнях інструменту. При роботі загостреним інструментом тертям по задніх поверхнях лез можна знехтувати, тому головні ділянки тертя будуть на передній поверхні лез. В свою чергу, інтенсивність тертя залежить від сили різання. Основні підходи і алгоритми для моделювання сили різання розроблені для черв'ячного зубофрезерування [30] та використані для процесу Power skiving [29].

Сила різання, а саме її головна складова, що збігається за напрямком з швидкістю різання, представлена у вигляді добутку площі поперечного перерізу стружки S , яка змінюється по куту повороту різця, межі міцності матеріалу колеса на зсув $[\tau]$ (МПа) та коефіцієнта осадження стружки ζ (параметра інтенсивності зсуву):

$$P = \zeta \cdot [\tau] \cdot S, \text{ Н.} \quad (1)$$

Треба відмітити, що значення параметра ζ не є статичним (незмінним), а залежить від товщини зрізуваних шарів, що показано в роботі [31]: при зменшенні товщини зрізу інтенсивність осадження зростає.

Добуток $\zeta \cdot [\tau]$ у формулі (1) характеризує питому силу різання. Як це впливає з вищенаведеного, ця величина теж є змінною. Такий підхід до описання сили різання базується на положеннях теорії різання, є універсальним і найбільш ефективним. Єдина умова для його практичного використання полягає в адекватному моделюванні параметрів зрізів та закономірностей їх зміни по шляху різання, тобто по куту повороту різця.

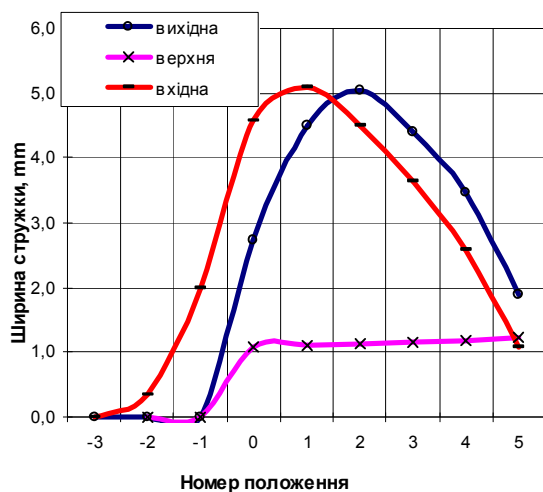
За методикою, розробленою в роботі [29], визначено параметри зрізів процесі Power Skiving, необхідних для розрахунку сили різання відповідно до формули (1) і температури різання на лезах. На рис. 2 показано товщину, ширину і площу поперечного перерізу зрізів Skiving-різця на входному, вершинному та вихідному лезі по куту повороту різця в дискретних кутових положеннях (рух різання – зліва направо). Нульова позиція і нульовий кут відповідають положенню міжцентрової лінії.

Початкові дані: *колесо евольвентне внутрішнє прямозубе; модуль $m = 2,5$ мм; кількість зубців колеса $Z_k = 33$, кількість зубців різця $Z_r = 24$; осьова подача $s = 0,75$ мм/об; різання на повну висоту профіля; кут установки шпинделя 30° ; зовнішній діаметр різця 100 мм $D_{a_h} = 100$ мм.*

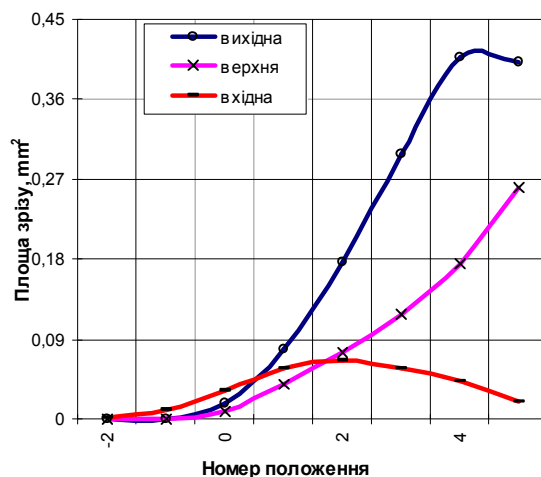
аналізу цих параметрів стружки видно, що входне і вихідне леза зрізають майже однакові по довжині частини припуску, а вихідне лезо знімає основний припуск (на нього припадає найбільша площа зрізу). Коефіцієнт осадження стружки залежить від товщини зрізів на лезах, такі дослідження виконані в системі Deform 2D [29]. Внаслідок малої товщини стружки на входному лезі зубця інструменту інтенсивність зсуву тут найбільша.

Сила тертя F стружки на передній поверхні зубця визначається нормальною до цієї поверхні силою N і коефіцієнтом тертя μ : $F = N \cdot \mu$. Коефіцієнт тертя характеризує умови контакту стружки з передньою поверхнею в ділянці вторинної пластичної деформації стружки. Як відомо, за інтенсивністю ці деформації співмірні і навіть перевищують інтенсивність деформацій зсуву, а тертя в цій зоні є некулоновим. Виходячи з цього, величина коефіцієнта μ не може бути меншою від одиниці. Оскільки встановити його дійсне значення можливо лише експериментально, то приймемо мінімальне з можливих значень: $\mu = 1$.

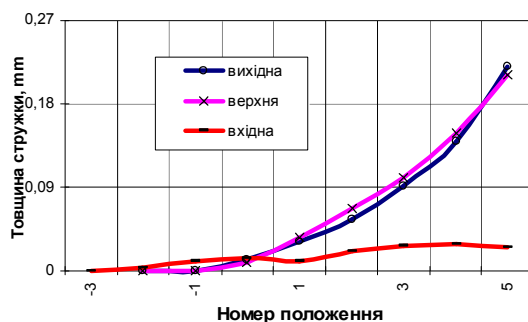
На основі зазначеного вище на рис. 3 наведено графіки сили різання для швидкості різання 100 м/хв.



а



б



в

Рис. 2. Залежність геометричних параметрів недеформованої стружки залежно від положення зуба інструмента (а – ширина зрізів; б – площа поперечного перерізу; в – товщина зрізів на вхідному, верхньому і вихідному лезах різця)

Fig. 2. Dependence of geometric parameters of undeformed chip on the tool tooth position (a – cut width; б – cross-sectional area; в – cut thickness at the leading, upper, and trailing blades of the cutter)

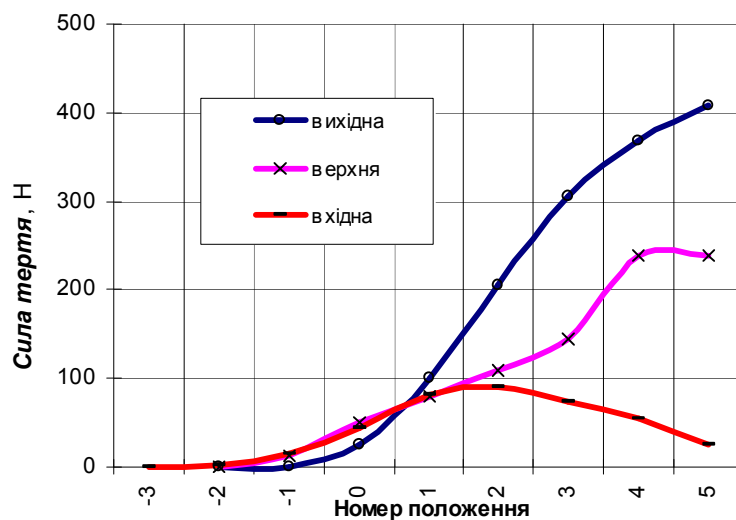


Рис. 3. Залежність сили тертя N на лезах від положення зуба інструмента

Fig. 3. Dependence of friction force N at the blades on the tool tooth position

3. Теплові потоки на передній поверхні. Температура зубців і лез

Інтенсивність теплових потоків на передній поверхні описують формулою:

$$q_{\gamma} = \frac{F \cdot V}{60 \cdot C \cdot b} \cdot \frac{1}{\xi}, \text{ Вт/мм}^2, \quad (2)$$

де $V / \xi = V_{ch}$ – швидкість переміщення стружки на передній поверхні в ділянці вторинного пластичного деформування, м/хв; F – сила тертя на передній поверхні, Н; C – довжина ділянки пластичного контакту, мм, b – ширина зрізу, мм.

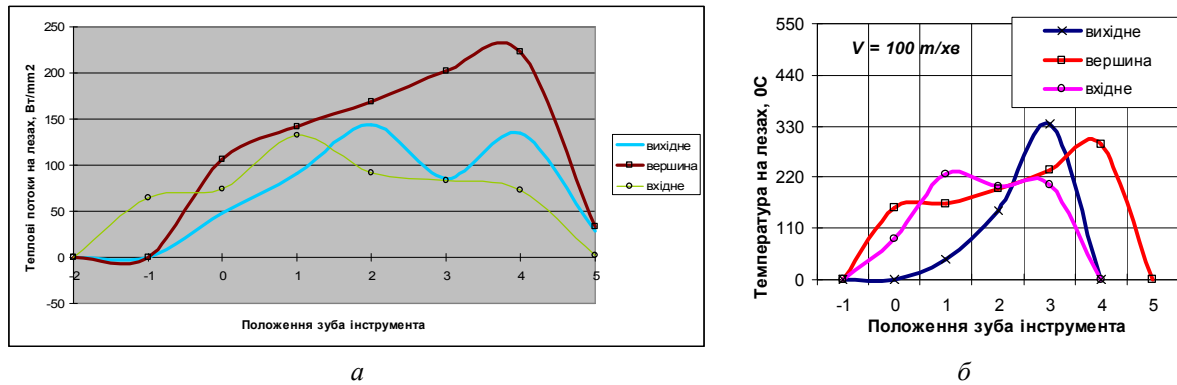


Рис. 4. Теплові потоки (а) і температура на лезах зубця інструменту (б)
Fig. 4. Thermal flows (a) and temperature on the blades of the tool (b)

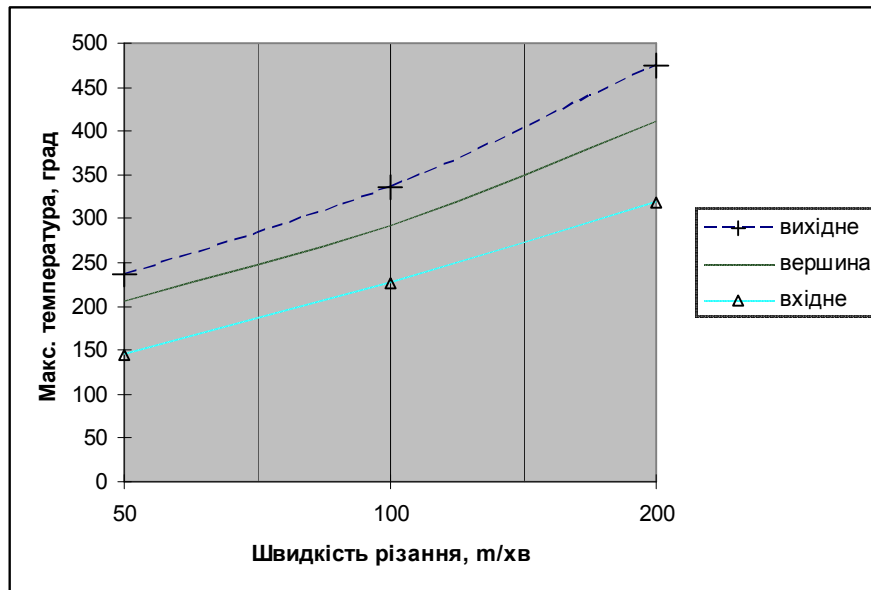


Рис. 5. Залежність температури лез від швидкості різання
Fig. 5. Dependence of blade temperature on cutting speed

За величиною теплових потоків на поверхнях зубців визначимо середню і максимальну температуру лез. В загальному випадку для стрічкового швидкорухомого рівномірно розподіленого джерела теплоти залежність для максимальної температури на поверхні контакту по поверхні тіла має такий вигляд:

$$\theta_{\max}^* = \frac{2 \cdot q^*}{\lambda_0} \cdot \sqrt{\frac{b \cdot \chi \cdot 60}{\pi \cdot V \cdot 1000}} \cdot K_{sh}, ^\circ\text{C}, \quad (3)$$

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності інструментального матеріалу, Дж / см·с·°C; χ – коефіцієнт температуропровідності інструментального матеріалу, см² / с; q – інтенсивність джерела тепла, Дж / см²·с; b – лінійна довжина джерела, рівна активній ширині леза, мм; V – швидкість різання у мм / с; K_{sh} – коефіцієнт форми швидкорухомого джерела.

Прийmemo теплофізичні властивості інструментального і оброблюваного матеріалів однаковими:

$\lambda = 0,04$ Дж/мм·с °C; температуропровідність швидкорізальної сталі $\chi = 6,6 - 7,2$ мм²/с; $K_{sh} = 1$.

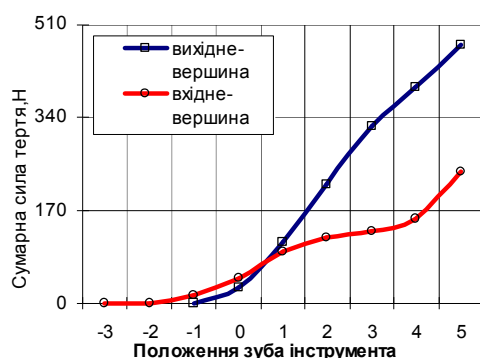
Графіки температури на лезах чашкового різця наведено на рис. 4, а. На рис. 4, б показано залежність максимальної температури на лезах від швидкості.

Оскільки теплостійкість твердого сплаву вища від отриманих значень (залежно від хімічного складу температура може досягати до 1000°C), то при роботі таким інструментом температура в такому діапазоні не буде впливати на його стійкість та інтенсивність зношування.

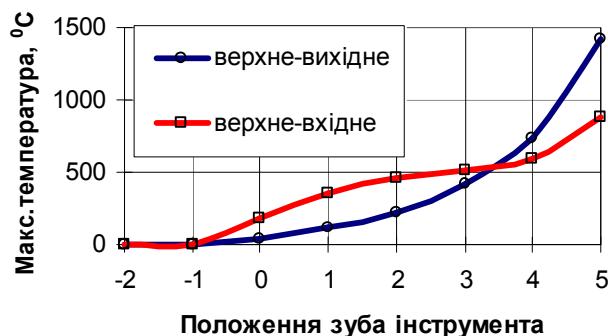
4. Вплив невірнього різання на силу різання і температуру

Одночасна робота різання зубця усіма лезами приводить до нашарування стружок біля вершин зубців, збільшення тертя в цих ділянках та збільшення сили різання. Інформацію про ділянки, в яких працюють усі леза, дають графіки площі перерізу зрізів і товщини зрізів (див. рис. 2). З наведених даних видно, що на всій вихідній частині шляху різання зубця і на вхідній, і на вихідній вершинах наявне невірне різання. Напрямки сходження стружок біля вершин відрізняються від вільного різання і кожний з векторів скерований під кутом до бокового і вершинного леза, який не дорівнює 90°. В результаті цього сумарну результуючу силу, що діє на передню поверхню біля правої (вхідної) і лівої (вихідної) вершин зубця, можна визначити як векторні суми: сил на вершинному і вхідному лезах та сил на вершинному і вихідному лезах відповідно. Графік цих результуючих сил, які змінюються по куту повороту різця, показаний на рис. 6, а.

Концентрація сил в ділянках вершин зубців призводить до підвищеного тиску, локальної деформації, структурних змін поверхневого шару зубців скайвінг-інструмента, тертя і нагрівання цих ділянок. Наслідком такої дії є розміщення і пришвидшений знос вершин порівняно з усією активною шириною лез. Максимальна розрахункова температура має місце на вихідній вершині зубця всередині вихідної ділянки зони різання (поз. 5) і становить 1425 °C, в той час, як максимальна температура на вихідному лезі становить 478 °C, при цьому різниця температур становить близько 1000 °C. Це значення температури біля кутників зубців перевищує граничну теплостійкість багатьох твердосплавних інструментів, в результаті чого буде відбуватися їх прискорений знос по кутниках зубців. Для усунення цього необхідно буде зменшувати швидкість різання чи подачу або використати ще більш теплостійкий інструментальний матеріал.



а



б

Рис. 6. Залежність загальної сила тертя N на всіх лезах (а) і температури на кутах зубця інструмента (б) від положення зуба інструменту

Fig. 6. Dependence of the total friction force N on all blades (a) and temperature at the corners of the tool's cutting edge (b) on the position of the too's tooth

Висновки

1. Наведено результати моделювання температури лез зубців інструменту в процесі Power Skiving. Підхід до вирішення цієї задачі базується на комплексних взаємозв'язаних моделях, які включають відтворення 3D геометрії зрізуваних шарів, розрахунок сил різання і тертя, теплових потоків і температури на зубцях Skiving-різців.

2. Отримані результати показують, що залежність температури від параметрів процесу різання є складною і неоднозначною. В ланцюжку *параметри стружки – інтенсивність зсуву – сили різання і тертя – ділянка контакту стружки з передньою поверхнею – інтенсивність теплових потоків на лезах – температура лез* кожен з параметрів по-різному впливає на кінцевий результат та змінює картину впливу на температуру. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що лише врахування усіх цих факторів при моделюванні теплових явищ процесу Power Skiving може забезпечити необхідну точність розрахунків температури інструменту для прогнозування інтенсивності його зношування.

3. Температура, що виникає на лезах при швидкостях різання, які використовують для твердосплавних інструментів, є гранично нижчою від температури фазових перетворень вставок з твердого сплаву. Водночас в локальних ділянках кутників зубців, близьких до вершин зубців, де наявне невідне різання, виникає висока температура (понад 1300 °C), яка може бути більшою від теплостійкості твердих сплавів. Причиною високої температури є мала площа контакту між стружкою і передньою поверхнею зубців, яка створює інтенсивні теплові потоки на таких ділянках, що може призводити до пластичного температурного деформування зубців у ділянках вхідного і вихідного кутників.

4. Методика дослідження, наведеного в цій роботі, дає можливість вибирати умови процесу Power Skiving, які дозволять уникнути теплового перевантаження і забезпечити необхідну стійкість Skiving-різців.

Інформаційні джерела

1. <https://www.youtube.com/watch?v=EefFxEGVbWo>
2. Pittler V. Verfahren zum Schneiden von Zahnrädern mittels eines zahnradartiges, an den Stirnflächen der Zähne mit Schneidekanten versehenen Schneidwerkzeugs. Deutsche Patentschrift. – N 243514, W. (1910).
3. Bauer R., Dix M. Novel method for manufacturing herringbone gears by power skiving. *Procedia CIRP*. – 2022. – Vol. 112. – P. 310–315. DOI:10.1016/j.procir.2022.09.003
4. Sugimoto T., Ishibashi A., Yonekura M. Performance of skiving hobs in finishing induction hardened and carburized gears. *Gear Technology*. – 2003. – Vol. 20. – N 3. – P. 34–41.
5. Guo Z., Mao S., Huyan L., Duan D. Research and improvement of the cutting performance of skiving tool. *Mech Mach Theory*. – 2018. – Vol. 120. – P. 302–313. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2017.08.004
6. Arndt T., Klose J., Gerstenmeyer M., Schulze V. Tool wear development in gear skiving process of quenched and tempered internal gears. Entwicklung des Werkzeugverschleißes beim Wälzschälen von vergüteten Innenverzahnungen. *Forschung im Ingenieurwesen*. – Vol. 86. – P. 587. DOI:10.1007/s10010-021-00544-0
7. Stadtfeld H. J. Power skiving of cylindrical gears on different machine platforms. *Gear technology*. – 2014 – Vol. 31. – N 1. – P. 52–62. DOI:10.1016/S0007-8506(07)61473-5
8. Kühlewein C. Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation: 3D-FEM Kinematik-und Spanbildungssimulation. – 2013.
9. Janßen C., Brimmers J., Bergs T. Validation of the plane-based penetration calculation for gear skiving. *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 99 – P. 220–225. DOI:10.1016/j.procir.2021.03.034
10. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., Krömer M. Technological and simulative analysis of power skiving. *Procedia Cirp*. – 2016. – Vol. 50. – P. 773–778. DOI:10.1016/j.procir.2016.05.052
11. Bouzakis K. D., Lili E., Michailidis N., Friderikos O. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. *CIRP annals*. – 2008. – Vol. 57. – N 2. – P. 676–696. DOI:10.1016/j.cirp.2008.09.001
12. Bergs T., Georgoussis A., Löpenhaus C. Development of a numerical simulation method for gear skiving. *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 88. – P. 352–357. DOI:10.1016/j.procir.2020.05.061

13. Vargas B., Schulze V. Three-dimensional modeling of gear skiving kinematics for comprehensive process design in practical applications. *CIRP Annals*. – 2021. – Vol. 70. – N 1. – P. 99–102. DOI:10.1016/j.cirp.2021.04.075
14. Spath D., Hühsam A. Skiving for high-performance machining of periodic structures. *CIRP Annals*. – 2002. – Vol. 51. – N 1. – P. 91–94. DOI:10.1016/S0007-8506(07)61473-5
15. Tsai C. Y. Mathematical model for design and analysis of power skiving tool for involute gear cutting. *Mechanism and Machine Theory*. – 2016. – Vol. 101. – P. 195–208. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2016.03.021
16. Tapoglou N. Calculation of non-deformed chip and gear geometry in power skiving using a CAD-based simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 100. – N 5. – P. 1779–1785. DOI:10.1007/s00170-018-2790-3
17. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., Krömer M. Technological and simulative analysis of power skiving. *Procedia Cirp*. – 2016. – Vol. 50. – P. 773–778. DOI:10.1016/j.procir.2016.05.052
18. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. Cutting force model for power skiving of internal gear. *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 56. – P. 1277–1285. DOI:10.1016/j.jmapro.2020.04.022
19. Inui M., Huang Y., Onozuka H., Umezu N. Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation. *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 48. – P. 520–527. DOI:10.1016/j.promfg.2020.05.078
20. McCloskey P., Katz A., Berglind L., Erkorkmaz K., Ozturk E., Ismail F. Chip geometry and cutting forces in gear power skiving. *CIRP Annals*. – 2019. – Vol. 68. – N 1. – P. 109–112. DOI:10.1016/j.cirp.2019.04.085
21. Bergs T., Georgoussis A., & Löpenhaus C. Development of a numerical simulation method for gear skiving. *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 88. – P. 352–357. DOI:10.1016/j.procir.2020.05.061
22. Fang Z., Ren Z., Kizaki T., Feng Y., Kugo J., Komatsu Y., Sugita N. Construction of uncut chip geometry in gear skiving using level contours. *Precision Engineering*. – 2022. – Vol. 73. – P. 93–103. DOI:10.1016/j.precisioneng.2021.08.013
23. Yoshikoto Yanase/ The Latest Gear Manufacturing Technology for High Accuracy and Efficiency. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. – 2018. – Vol. 55. – N 3.
24. Wu X., Li J., Jin Y., Zheng S. Temperature calculation of the tool and chip in slicing process with equal-rake angle arc-tooth slice tool. *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2020. – Vol. 143, 106793. DOI:10.1016/j.ymssp.2020.106793
25. Storchak M., Kushner V., Möhring HC. et al. Refinement of temperature determination in cutting zones. *J Mech Sci Technol*. – 2021. – Vol. 35. – P. 3659–3673. DOI:10.1007/s12206-021-0736-4
26. Storchak M., Möhring H.-C., Steh T. Improving the friction model for the simulation of cutting processes. *Tribology International*. – 2022. – Vol. 167, 107376. DOI:10.1016/j.triboint.2021.107376
27. Slipchuk A., Novitskyi M. Definition Of The Geometric Parameters Of The Undeformed Chip At The Cut-In Stage When Machining An External Gear Using The Power Skiving Method. *Ukrainian Journal Of Mechanical Engineering And Materials Science UJMEMS*. – 2023. – Vol. 9. – N 4. – P. 49–56. DOI:10.23939/ujmems2023.04.049
28. Hrytsay I., Slipchuk A. Features of using the power skiving method for multi-pass cutting of internal gears. *Archive of Mechanical Engineering*. – 2024. – Vol. 71. – N 2. – P. 189–211. DOI: 10.24425/ame.2024.149636
29. Hrytsay I., Slipchuk A., Bosansky M. Justification of the choice of parameters for the gear power skiving operation based on computer simulation. *Journal of Mechanical Engineering – Strojnický Casopis*. – 2023. – Vol. 73. – N 2. – P. 33–44. DOI:10.2478/scjme-2023-0020.

Andrii Slipchuk

Lviv Polytechnic National University

INVESTIGATION OF TOOL TEMPERATURE DURING THE CUTTING OF INTERNAL GEARS USING THE POWER SKIVING METHOD

Problem statement and the research purpose. One of the main factors determining the intensity of tool wear is the temperature that arises during the cutting process. Thus, the objective is to investigate the patterns and obtain dependencies of heat generation and heat transfer between the elements of the cutting process that characterize the temperature of the tool's teeth and blades. The aim is to establish heating and wear of the cutting edges during the

machining of internal gears using the Power Skiving method. **Methodology.** Using a comprehensive interrelated graphical-analytical and mathematical modeling approach, including the creation of a 3D model of the undeformed chip built on the obtained sections, as well as simulations of contact, force, deformation, and thermal processes during the gear cutting of the internal ring, the friction forces and temperature on the teeth of the skiving cutters were investigated. **Results.** The proposed research methodology outlined in this work allows for selecting safe operating conditions for the cutting tool during the gear shaping process using the Power Skiving method. The obtained results ensure the necessary stability of skiving cutters and help avoid thermal overload. **Scientific novelty and practical significance.** The results of the study enable the selection of optimal cutting mode values when machining internal gears, considering the technical specifications of the equipment and the properties of the tool material. The selected safe cutting speed will maximize the productivity of this method and provide the necessary durability of skiving tools. **Scopes of further investigations on the subject of the paper.** In further studies, it is necessary to establish the relationship between the durability period of the skiving tool and temperature for various cutting depth values and during the engagement with the workpiece.

Keywords: gear, temperature, wear, geometric parameters, cutting speed, 3D model, Power Skiving.

References

1. <https://www.youtube.com/watch?v=EefFxEGVbWo>
2. Pittler V. Verfahren zum Schneiden von Zahnrädern mittels eines zahnradartiges, an den Stirnflächen der Zähne mit Schneidekanten versehenen Schneidwerkzeugs. Deutsche Patentschrift. – N 243514, W. (1910).
3. Bauer R., Dix M.. Novel method for manufacturing herringbone gears by power skiving. *Procedia CIRP*. – 2022. – Vol. 112. – P. 310–315. DOI:10.1016/j.procir.2022.09.003
4. Sugimoto T., Ishibashi A., Yonekura M. Performance of skiving hobs in finishing induction hardened and carburized gears. *Gear Technology*. – 2003. – Vol. 20. – N 3. – P. 34–41.
5. Guo Z., Mao S., Huyan L., Duan D. Research and improvement of the cutting performance of skiving tool. *Mech Mach Theory*. – 2018. – Vol. 120. – P. 302–313. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2017.08.004
6. Arndt T., Klose J., Gerstenmeyer M., Schulze V. Tool wear development in gear skiving process of quenched and tempered internal gears. Entwicklung des Werkzeugverschleißes beim Wälzschälen von vergüteten Innenverzahnungen. *Forschung im Ingenieurwesen*. – Vol. 86. – P. 587. DOI:10.1007/s10010-021-00544-0
7. Stadtfeld H. J. Power skiving of cylindrical gears on different machine platforms. *Gear technology*. – 2014. – Vol. 31. – N 1. – P. 52–62. DOI:10.1016/S0007-8506(07)61473-5
8. Kühlewein C. Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation: 3D-FEM Kinematik-und Spanbildungssimulation. – 2013.
9. Janßen C., Brimmers J., Bergs T. Validation of the plane-based penetration calculation for gear skiving. *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 99. – P. 220–225. DOI:10.1016/j.procir.2021.03.034
10. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., Krömer M. Technological and simulative analysis of power skiving. *Procedia Cirp*. – 2016. – Vol. 50. – P. 773–778. DOI:10.1016/j.procir.2016.05.052
11. Bouzakis K. D., Lili E., Michailidis N., Friderikos O. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. *CIRP annals*. – 2008. – Vol. 57. – N 2. – P. 676–696. DOI:10.1016/j.cirp.2008.09.001
12. Bergs T., Georgoussis A., Löpenhaus C. Development of a numerical simulation method for gear skiving. *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 88. – P. 352–357. DOI:10.1016/j.procir.2020.05.061
13. Vargas B., Schulze V. Three-dimensional modeling of gear skiving kinematics for comprehensive process design in practical applications. *CIRP Annals*. – 2021. – Vol. 70. – N 1. – P. 99–102. DOI:10.1016/j.cirp.2021.04.075
14. Spath D., Hühsam A. Skiving for high-performance machining of periodic structures. *CIRP Annals*. – 2002. – Vol. 51. – N 1. – P. 91–94. DOI:10.1016/S0007-8506(07)61473-5
15. Tsai C. Y. Mathematical model for design and analysis of power skiving tool for involute gear cutting. *Mechanism and Machine Theory*. – 2016. – Vol. 101. – P. 195–208. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2016.03.021
16. Tapoglou N. Calculation of non-deformed chip and gear geometry in power skiving using a CAD-based simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 100. – N 5. – P. 1779–1785. DOI:10.1007/s00170-018-2790-3
17. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., Krömer M. Technological and simulative analysis of power skiving. *Procedia Cirp*. – 2016. – Vol. 50. – P. 773–778. DOI:10.1016/j.procir.2016.05.052

18. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. Cutting force model for power skiving of internal gear. *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 56. – P. 1277–1285. DOI:10.1016/j.jmapro.2020.04.022
19. Inui M., Huang Y., Onozuka H., Umezu N. Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation. *Procedia Manufacturing*. – 2020. – Vol. 48. – P. 520–527. DOI:10.1016/j.promfg.2020.05.078
20. McCloskey P., Katz A., Berglind L., Erkorkmaz K., Ozturk E., Ismail F. Chip geometry and cutting forces in gear power skiving. *CIRP Annals*. – 2019. – Vol. 68. – N 1. – P. 109–112. DOI:10.1016/j.cirp.2019.04.085
21. Bergs T., Georgoussis A., & Löpenhaus C. Development of a numerical simulation method for gear skiving. *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 88. – P. 352–357. DOI:10.1016/j.procir.2020.05.061
22. Fang Z., Ren Z., Kizaki T., Feng Y., Kugo J., Komatsu Y., Sugita N. Construction of uncut chip geometry in gear skiving using level contours. *Precision Engineering*. – 2022. – Vol. 73. – P. 93–103. DOI:10.1016/j.precisioneng.2021.08.013
23. Yoshikoto Yanase/ The Latest Gear Manufacturing Technology for High Accuracy and Efficiency. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. – 2018. – Vol. 55. – N 3.
24. Wu X., Li J., Jin Y., Zheng S. Temperature calculation of the tool and chip in slicing process with equal-rake angle arc-tooth slice tool. *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2020. – Vol. 143, 106793. DOI:10.1016/j.ymssp.2020.106793
25. Storchak M., Kushner V., Möhring HC. et al. Refinement of temperature determination in cutting zones. *J Mech Sci Technol*. – 2021. – Vol. 35. – P. 3659–3673. DOI:10.1007/s12206-021-0736-4
26. Storchak M., Mohring H.-C., Steh T. Improving the friction model for the simulation of cutting processes. *Tribology International*. – 2022. – Vol. 167, 107376. DOI:10.1016/j.triboint.2021.107376
27. Slipchuk A., Novitskyi M. Definition Of The Geometric Parameters Of The Undeformed Chip At The Cut-In Stage When Machining An External Gear Using The Power Skiving Method. *Ukrainian Journal Of Mechanical Engineering And Materials Science UJMEMS*. – 2023. – Vol. 9. – N 4. – P. 49–56. DOI:10.23939/ujmems2023.04.049
28. Hrytsay I., Slipchuk A. Features of using the power skiving method for multi-pass cutting of internal gears. *Archive of Mechanical Engineering*. – 2024. – Vol. 71. – N 2. – P. 189–211. DOI: 10.24425/ame.2024.149636
29. Hrytsay I., Slipchuk A., Bosansky M. Justification of the choice of parameters for the gear power skiving operation based on computer simulation. *Journal of Mechanical Engineering – Strojnický Casopis*. – 2023. – Vol. 73. – N 2. – P. 33–44. DOI:10.2478/scjme-2023-0020.