

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

<https://doi.org/10.23939/istcipa2023.59.108>

© Сліпчук А. М., 2025

Постановка проблеми та мета роботи. Наведено методику прогнозування температури твердосплавного інструмента для нарізання зубчастих коліс методом Power Skiving. Таке завдання особливо актуальне для автоматизованого обладнання, до яких належать зубонарізні верстати. **Методика роботи.** За критерій надійності взято тепловий стан зубця скайвінг-інструменту, за якого на його вершинному лезі буде виникати теплова тріщина, що призведе до його ламання і втрати працездатності системи. Визначення теплоти, яка генерується на одному зубці в процесі нарізання зубчастого колеса, виконано на основі розрахунку сумарної роботи різання і подолання тертя на контактних поверхнях різального клину та теплового балансу в зоні різання. **Результати.** Температура на вершині зубця визначалася з величини об'єму, в якому вона генерується: в межах ділянки контакту стружки з передньою поверхнею і допустимої ширини ділянки зношування по задній поверхні. **Наукова новизна та практичне значення.** Розроблена методика дає змогу коректувати початкові дані для забезпечення безвідмовної роботи верстата. Якщо максимальна температура буде перевищувати межу теплостійкості інструментального матеріалу, то треба коректувати матеріал різальних пластин або ж міняти режими різання – швидкість різання, або кількість проходів і глибину різання. Коректування операції і вибір кращого варіанта може базуватися на порівнянні витрат часу щодо кожного з варіантів. **Напрями подальших досліджень за тематикою статті.** У подальших дослідженнях спробуємо провести експеримент та порівняти отримані результати із аналітично розрахованими.

Ключові слова: зубчасте колесо, температура, зношування, багатопрохідне різання, тертя, Power Skiving.

Вступ. Постановка проблеми

Зубообробка вважається одним з пріоритетних напрямів у технології виготовлення деталей [1]. Це стимулює виробників до пошуків усе продуктивніших методів виготовлення точних зубчастих коліс. За останнє десятиліття все частіше можна спостерегти на спеціалізованих світових підприємствах прогресивний метод зуботочіння, відомий у літературі як метод Power Skiving. І хоча цей метод був відомий ще століття тому [2], лише тепер його вдалося реалізувати на виробництві. Серед проблем, з якими стикалися технологи, на той час були:

- недостатня жорсткість верстата та шпинделя інструмента;
- слабка синхронізація руху інструмента та заготовки;
- брак інструмента, який мав достатній період стійкості;
- брак матеріалу, який дає змогу витримувати жорсткі умови роботи скайвера.

З розвитком виробничих технологій та нових покриттів для інструментів сьогодні Power Skiving є одним з найпередовіших та високопродуктивним методом зубонарізання, як внутрішніх, так і зовнішніх зубчастих коліс з модулем від 1 до 10 мм і більше. Порівняно з найпоширенішими методами зубонарізання, такими як зубофрезерування, протягування та зубодовбання, зуботочіння має значні переваги. На відміну від зубофрезерування методом Power Skiving можна нарізати внутрішні зубчасті колеса, водночас він гнучкіший ніж протягування. Хоча зубодовбання є поширеним методом нарізання внутрішніх зубчастих коліс, проте наявність високого відсотка холостих ходів (близько 50 % через зворотний хід) негативно впливає на продуктивність процесу [3]. На відміну від нього, зуботочіння є безперервним процесом, який здійснює багатозубчасте та бага-

толезове різання. Його безперервне зняття матеріалу із заготовки є характерною ознакою високої ефективності зубообробки [3, 4]. Як і в багатьох інших технологіях виготовлення зубчастих коліс, успішне застосування Power Skiving залежить від встановлення оптимального режиму різання, застосування удосконаленої конструкції інструмента, вибору матеріалу покриття різального леза зуба скайвера. Пошук раціональних конструкторських та технологічних рішень становить велике наукове зацікавлення як серед виробників, так і серед науковців.

На сьогодні цей метод має ще великий потенціал у своєму застосуванні, а дослідження проводяться у різних напрямках удосконалення Power Skiving. Однак, незважаючи на нещодавнє використання зуботочіння, лише частину з різноманітних проблем, які ще виникають під час нарізання, було розв'язано.

Особливо гостро стоїть проблема швидкого отримання точного зубчастого колеса (до 8 ступеня точності) та встановлення оптимальних умов різання, які впливають на швидкість зносу інструмента під час роботи. Температура леза інструмента, як визначний фактор, який впливає на руйнування інструмента та його стійкість, є одним з найважливіших параметрів. Причинами такого висновку є те, що якість зубчастого колеса є важливим результатом процесу, проте стійкість інструмента визначає вартість обробки і час різання. Застосування методу Power Skiving треба оцінювати з урахуванням цих двох ключових питань.

Мета та завдання роботи

Найпоширенішим видом виходу інструментів з ладу є викришування леза, що відбувається на обмеженій частині його активної довжини, або ламання, яке охоплює всю ширину леза. Основною причиною цих негативних явищ є надмірне нагрівання різального клину, що призводить до виникнення на лезі мікротріщин. В умовах надвисокого тиску на передній поверхні і зменшення міцності інструментального матеріалу внаслідок його обмеженої теплостійкості тріщина, що починається в мікрооб'ємі, переростає в макротріщину. Крім того, відмова може настати внаслідок пластичної течії леза, але і в цьому разі джерелом втрати працездатності є теплота і температура різання.

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що дослідження теплоти в процесах нарізання зубчастих коліс та закономірностей її утворення на рівні лез багатозубчастих інструментів є важливим чинником для прогнозування ламання інструмента та є основою для встановлення режимів різання, за яких вірогідність цих негативних явищ буде зведена до мінімуму. Це повною мірою стосується процесу нарізання зубчастих коліс методом Power Skiving, оскільки цей сучасний та ефективний метод характеризується високою швидкістю різання без використання охолодження та відбувається при великій кількості проходів. За таких умов відбувається інтенсивне генерування теплоти, значна частина якої переходить у скайвінг-інструмент, що негативно впливає на параметри надійності операції загалом. З огляду на те, що вартість Power Skiving операцій є дуже високою через складність інструмента та високу ціну обладнання, завдання дослідження теплових явищ та їх впливу на стан скайвінг-інструментів є актуальним та важливим. Метою цієї роботи є визначення теплових потоків та температури леза зуба інструмента як одного з ключових факторів, які впливають на стійкість скайвера загалом та його зносостійкість.

Огляд інформаційних джерел

У відомих наукових виданнях за останні роки містяться дослідження методу Power Skiving, які спрямовані на пошук раціональних умов роботи інструмента або шляхи підвищення періоду стійкості [5]. За результатами огляду літератури можна відзначити три основні напрями, на які зосередили свою увагу науковці. Зокрема, перша група досліджувала кінематику та принципи процесу різання і моделювання. Така група охоплює статті, в яких розроблено процедури моделювання для аналізу ключових факторів, що важко виміряти, і має теоретичний характер. Друга група досліджувала та проводила експерименти з новими конструкціями скайвера, кутів різання, вплив матеріалів на ефективність роботи інструмента. До третьої групи можна зарахувати роботи, де розглядалися сили різання, робочі температури, параметри різання і знос інструмента.

Прогнозування впливу умов різання дає змогу оптимізувати процес з погляду довговічності інструменту та якості зубчастого колеса, підвищуючи продуктивність та ефективність виробництва. На жаль, взаємодія між скайвером і заготовкою під час процесу відрізки є дуже складною. Параметри різання, зокрема швидкість різання, миттєвий передній кут і глибина різання, безперервно змінюються вздовж траєкторії руху інструмента. Через цю складність авторам доводиться використовувати програмні середовища, такі як CAD, CAE або комерційне програмне забезпечення для скінченно-елементного аналізу. Однак зазвичай орієнтоване на користувача програмне забезпечення може виконувати лише моделювання, яке обмежене спрощеннями та припущеннями, зробленими для полегшення його використання. У такій новій технології, як метод Power Skiving, бажано враховувати якомога більше параметрів. З цієї причини спеціальне програмне забезпечення та чисельне моделювання дає змогу лише частково імітувати процес зубонарізання.

Автори роботи [6] були одними з перших, хто застосував спеціальне програмне забезпечення для дослідження. Вони спроектували форму зуба інструмента та розрахували значення параметрів різання. У праці [7] було показано 3D-модель процесу за допомогою комерційного програмного забезпечення MCE ABAQUS. Автори провели низку експериментів та порівняли змодельовану деформовану стружку з отриманими внаслідок моделювання, визначили сумарні сили різання і температуру. У роботі [8] було пораховано товщину стружки, швидкість різання і фактичний передній кут за допомогою програми SPARTApro. Враховуючи складність відтворення кінематики процесу Power Skiving, авторам цих робіт доводилося вдаватися до певних спрощень або не враховувати всі рухи, які існують в цьому методі. Зазвичай у цих роботах не враховано рух осьової подачі, або метод зуботочіння ототожнювали з процесом зубофрезерування, що призводило до певних спотворень у результатах.

Ключовим фактором під час дослідження Power Skiving є достовірне відтворення геометрії недеформованої стружки. Ця процедура називається твердотільним моделюванням [9]. Оскільки значення цих параметрів (товщини, ширини, форми) може бути використане для розрахунку фізичних величин, таких як сили різання і робочі температури. Однак у більшій частині робіт представлено наближені форми такої стружки і, як наслідок, авторам доводиться вводити поправні коефіцієнти (для моделі Кінцле під час оцінки сил різання) для узгодження результатів, які були отримані аналітичними розрахунками з експериментально отриманими.

Зокрема, з огляду літератури можна стверджувати, що декілька вчених використовували твердотільне моделювання для обчислення геометрії недеформованої стружки. До таких робіт можна зарахувати [10], де дослідники використовували метод дискретної Z-карти для твердотільного моделювання. У [11] також розрахували стружку за допомогою методу Z-карти і розробили модель косого різання для обчислення параметрів різання. Результати моделювання були використані як вхідні дані для програмного забезпечення MCE, що дало змогу розрахувати температуру і локальні напруження в зоні різання і, в кінцевому підсумку, спрогнозувати знос інструмента і утворення кратера. Експериментальні результати показали, що кореляція між змодельованим і реальним кратером була в межах 5 % похибки. Інші автори [12, 13] використовували потрібний формат Dexcel, який є розширенням методу Z-карти в трьох ортогональних напрямках. Використання потрібного представлення Декселя, яке є обчислювально значно дорожчим, але виправдане точнішим описом зображуваного об'єму. Справді, коли перерізи об'єму проходять паралельно відрізкам ліній моделі Z-карти, може виникнути погане представлення поверхні. Але такі програми є дорогими і складними у користуванні, а тому не знайшли широкого застосування на виробництві.

Інша методика, яка дає змогу обчислювати форму недеформованої стружки, була застосована у праці [14]. Автори використовували метод контуру рівня для ретельного аналізу 3D-стружки за різних умов різання. Цей метод також був використаний для розрахунку форми стружки в роботі [15], з якої були отримані локальні параметри різання, які лише частково були підтверджені експериментально.

Альтернативою проведенню твердотільного моделювання стружки є використання програмного забезпечення САПР для симуляції процесу різання. В роботах [16] представлено моделювання процесу зуботочіння в середовищі САПР. Ці дані були використані в моделі Кінслі під час прогнозування сил різання. Незважаючи на цікаві результати, використання програмного забезпечення на основі САПР зазвичай є складнішим, ніж раніше представлені методи моделювання. Отже, для його ефективного використання потрібні хороші навички програмування. Як показано, одним із способів розрахунку сили різання є використання 2D-перерізів стружки як елементів моделі різання. Для отримання перерізів стружки багато авторів брали зрізи попередньо розрахованої спрощеної 3D-моделі та отримували наближені результати.

Аналогічно в роботі [17] сили різання були змодельовані з урахуванням зміни кінематичного переднього кута під час процесу. Крім того, було запропоновано метод ідентифікації коефіцієнтів сили різання за допомогою інструмента, що має декілька різальних кромок, а потім результати були підтверджені випробуваннями на різання. Модель косоного різання розглядалася на рівні мікрорізів у праці [18]. У цій роботі автори розглянули вплив розрахованої сили і швидкості різання, а також характеристик контакту стружки для розробки моделі та розрахунку температури. Модель була перевірена за допомогою тепловізора і термопар. В іншій роботі [19] автори розробили чисельну модель для динамічного прогнозування термомеханічного зв'язку сил різання та температури різання під час процесу зуботочіння. Модель базується на попередніх дослідженнях, проведених авторським колективом [18, 20]. Зв'язок між параметрами різання, силами різання і температурами був встановлений і частково підтверджений експериментально.

Можна спостерігати деяку тенденцію, наприклад, товщина стружки або геометрія нерозрізаної стружки оцінюються майже всіма авторами. Справді, стружка є репрезентативною для процесу різання, а також необхідна для подальших розрахунків, таких як розрахунок сил різання. Ба більше, сили різання і параметри різання були змодельовані в багатьох роботах, тоді як робоча температура і знос інструмента розглядалися лише в декількох дослідженнях. Справді, процеси, які пов'язані зі зносом інструмента і робочою температурою, взаємозалежні. Оскільки вартість всієї операції залежить від зносу інструмента, то доцільне проведення подальших досліджень на цю тему.

Сили різання і температури, а отже, знос інструмента і якість зубчастих коліс залежать від цих параметрів, наведені вище результати можуть слугувати основою для розробки нових інструментів і стратегій різання.

Тож найбільше уваги надається впливу параметрів різання на якість зубчастих коліс. Отже, у цій роботі основною метою є визначення локальної температури та теплових потоків на знос інструмента, що дасть змогу підібрати раціональні параметри режимів різання або рекомендувати відповідний матеріал зубів скайвера. У багатьох процесах різання вирішальну роль відіграє саме локальна температура, яка виникає в зоні різання.

Для методу Power Skiving ця зона дуже мала, тому підвищення температури внаслідок різання є дуже локалізованим. Це явище сильно впливає на відведення стружки, оскільки стружка може приварюватися до поверхні зубців, ставлячи під загрозу якість поверхні заготовки. Однак, як описано в [21, 22], тепло, що виділяється, зменшує опір деформації стружки в зоні зсуву, і цей ефект розм'якшення може зменшити сили різання разом з навантаженням і зносом інструмента.

Роботи [7, 11, 18] досліджували локальну температуру в зоні різання. Незважаючи на отримані цікаві результати, потрібно провести нові дослідження в цьому напрямку. Аналогічно явище зношування інструмента потребує подальшого вивчення. Досі було проведено лише кілька досліджень зносу інструмента, тож можна стверджувати, що є проблема у дослідженнях, які безпосередньо пов'язують параметри конструкції інструмента зі зносом інструмента. Повне розуміння явища підвищення температури і механізму зношування інструмента може допомогти в розробці стратегій, які забезпечать кращу стабільність процесу.

Аналіз робіт показав, що як явище зносу інструмента, так і пов'язані з ним аспекти, такі як робоча температура, потребують подальших досліджень з метою підвищення стабільності процесу. Ця стаття доповнює результати, які подані у літературі, і дає відповіді на взаємозв'язок температури та основними параметрами різання.

Виклад основного матеріалу

1. Основні положення для моделювання

Температура в зоні різання може досягати 800–1000 °С, а тиск може становити від 10 до 70 ГПа [5], що вдвічі й навіть утричі перевищує тиск на поверхнях тертя у з'єднаннях деталей машин. Враховуючи деяку подібність методу Power Skiving та черв'ячне зубофрезерування, інформація про тепловий і температурний режим роботи інструмента може надати повне уявлення про характер зношування лез та розробити стратегію для протидії зношуванню інструмента, а також призначати раціональні умови роботи, проєктувати оптимальні за конструкцією інструменти і підвищити ефективність процесів виготовлення зубчастих коліс.

Усі дані, які необхідні для визначення інтенсивності теплоти, що генерується під час нарізання зубчастих коліс, та її впливу на стабільність і безвідмовність процесу Power Skiving, можна отримати, використовуючи розроблену систему комплексного моделювання цього процесу [23]. Така система базується на послідовному математичному описанні та комп'ютерному симулюванні взаємопов'язаних вторинних процесів і явищ, які супроводять нарізання зубчастих коліс.

Для досягнення поставленої мети будемо виходити з положення теорії різання, що вся робота, яка витрачається на утворення стружки і на подолання опору різанню на контактних поверхнях переходить в теплову енергію. Відповідно вона виконується в ділянках пластичного деформування припуску, який усувається інструментом, а також на його передній та на задній поверхнях. Тоді визначення відповідних складових теплоти в методі Power Skiving полягає в розрахунку сил різання і тертя на поверхнях різального клину окремого зубця та довжини шляху, на якому виконується робота відповідними силами.

2. Сили різання і сили тертя на лезах

Методика розрахунку сили різання, наведена в роботах [24], передбачає розрахунок цієї сили на окремих лезах дискового скайвінг-різця на основі графоаналітичної 3D-моделі недеформованої стружки, величини коефіцієнта осадження стружки залежно від товщини зрізів, та міцності матеріалу колеса на зсув:

$$P_o = [\tau] \times S \times \chi, H, \quad (1)$$

де P_o – фізична сила різання, або головна складова сили різання, напрямком якої збігається з вектором швидкості різання; χ – коефіцієнт осадження стружки; $[\tau]$ – межа міцності матеріалу заготовки на зсув, МПа; S – площа поперечного перерізу стружки (площа зрізу), мм².

Розглянемо випадок нарізання зубчастого колеса з такими початковими даними: колесо евольвентне прямозубе, зовнішнього зачеплення; модуль $m = 2,5$ мм; кількість зубців колеса $Z_k = 33$, кількість зубців різця $Z_p = 24$; швидкість різання – 190 м/хв; подача 0,75 мм/об.; різання на повну висоту профілю; передній кут дорівнює нулю; ширина допустимої ділянки зношування по задній поверхні – 0,15 мм; матеріал змінних пластин – твердий сплав ТТК; зовнішній діаметр різця – 66 мм; ширина зубчастого колеса – 22 мм; кут нахилу зубців різця дорівнює куту установки шпинделя – 20°.

На рис. 1 показано сили різання на лезах по куту повороту інструмента, а на рис. 2 – об'ємна маса ділянки різального клина залежно від положення зуба скайвера. Міжцентрова лінія – пряма, яка слугує віссю симетрії для центральної впадини зубчастого колеса і яка розділяє зону зачеплення на ліву (вхідну) і праву (вихідну) частини. Зона зачеплення поділена на 9 послідовних кутових позицій, позначених $-2, -1, 0, +1, +2, \dots, +5$, нульове положення збігається з міжосьовою лінією.

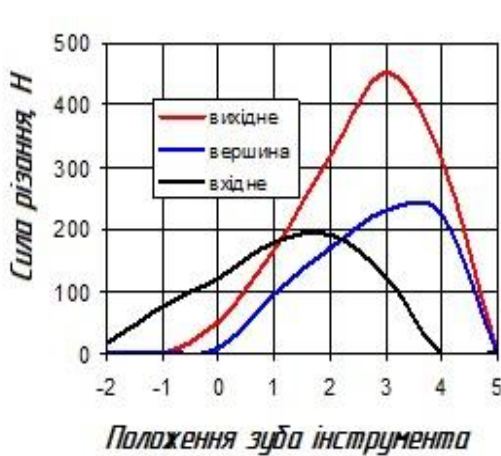


Рис. 1. Сили різання на лезах по куту повороту інструмента

Fig. 1. Cutting forces on the cutting edges versus the tool rotation angle

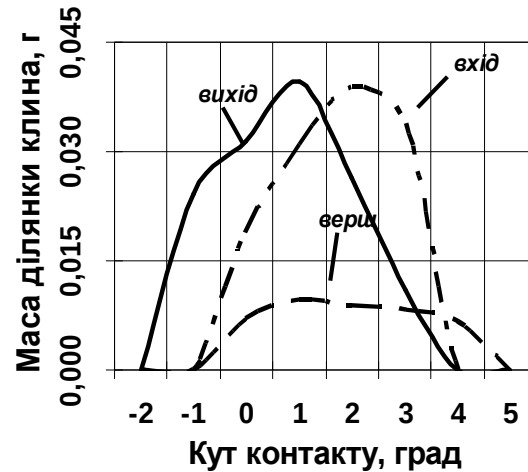
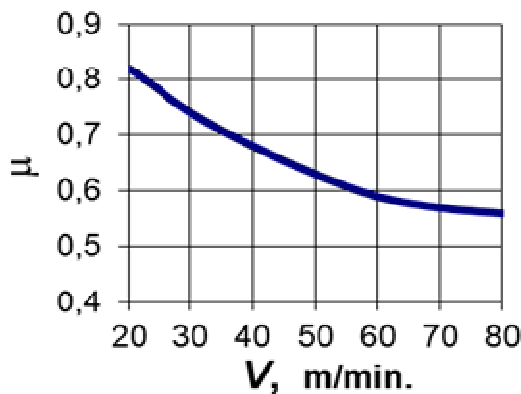


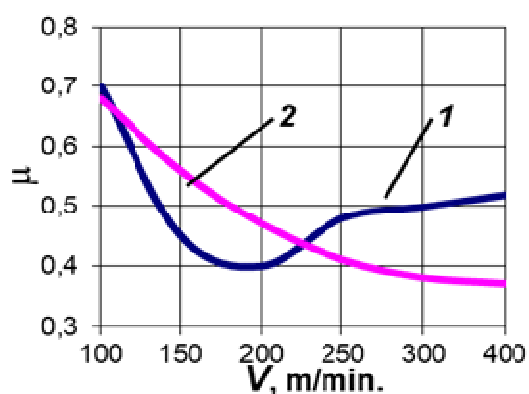
Рис. 2. Зміна маси ділянки різального клина від положення -2 (врізання) до 5 (вихід)

Fig. 2. Variation of the mass of the cutting wedge section from position -2 (entry) to 5 (exit)

Для визначення сил тертя на передній поверхні за допомогою системи DEFORM 2D було встановлено коефіцієнт тертя μ_d як функцію матеріалів інструмента і заготовки (рис. 3). На цій основі для швидкості різання 180–210 м/хв, характерної для Power Skiving, значення коефіцієнта μ_d становить 0,55–0,62. Коефіцієнт μ_a тертя, яке виникає на задній поверхні за умовного контакту “сталі по сталі” прийmemo рівним 0,15.



a



b

Рис. 3. Залежність коефіцієнта тертя від швидкості різання: а – швидкорізальна сталь Р6М5 по сталі 40Х; б – твердий сплав Т15К6 – сталь 45 (1); твердий сплав ВК8 – сірий чавун (2) [25]

Fig. 3. Dependence of the friction coefficient on cutting speed: a – high-speed steel R6M5 cutting 40Kh steel; b – carbide T15K6 cutting 45 steel (1); carbide VK8 cutting grey cast iron (2) [25]

3. Дослідження роботи сил під час багатопрохідного різання

Враховуючи, що метод Power Skiving – це процес зуботочіння, яке потребує багатопрохідного різання, тоді розрахунки роботи можна виконати для кожного переходу. Застосовуючи описану методику і маючи всі числові значення сил і шляху різання для кожного переходу, визначимо роботу від сил зсуву для відповідного переходу (рис. 4–6).

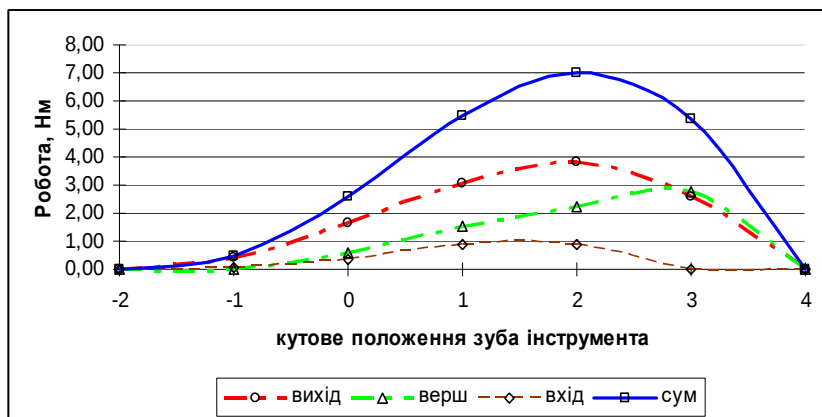


Рис. 4. Робота різання окремих лез та сумарна робота одного зубця за один цикл різання для першого проходу

Fig. 4. Shear work of individual cutting edges and the total work of one tooth per cutting cycle for the first pass

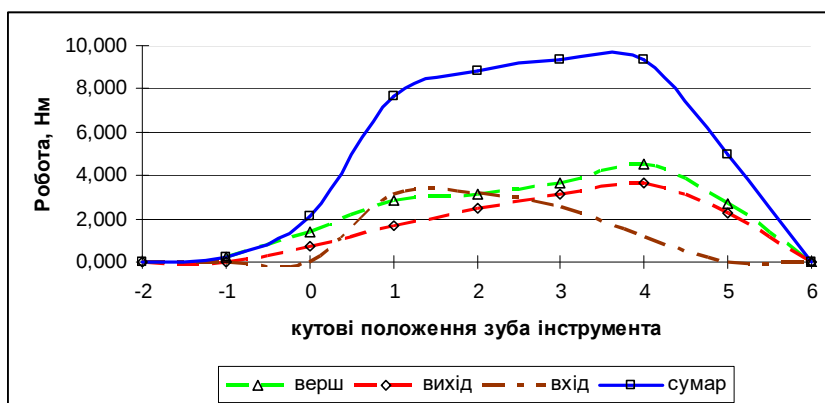


Рис. 5. Робота різання окремих лез та сумарна робота одного зубця за один цикл різання для другого проходу

Fig. 5. Cutting work of individual cutting edges and the total work of one tooth per cutting cycle for the second pass

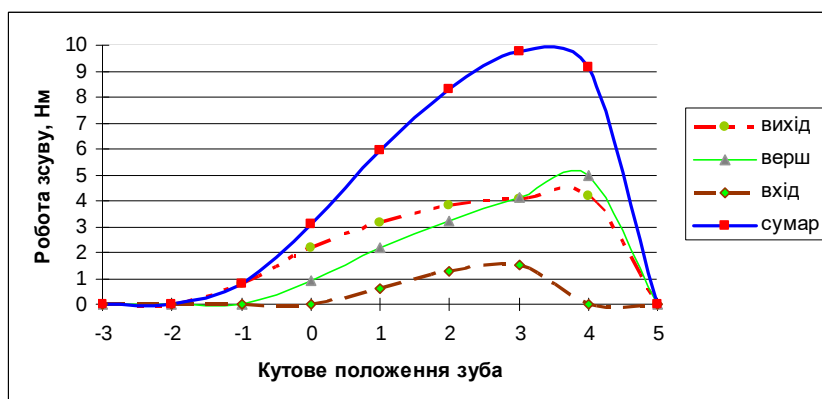


Рис. 6. Робота сил зсуву для окремих лез та сумарна робота одного зубця за один цикл різання для третього проходу

Fig. 6. Shear force work of individual cutting edges and the total work of one tooth per cutting cycle for the third pass

Як і очікувалося, робота при кожному наступному проході буде зростати, адже зростає як сила різання, так довжина різу l_c . Зазначимо, що закономірність зміни величини роботи від положення зуба скайвера не змінюється для різних проходів. Максимальні значення роботи зсуву припадають на завершальні положення зуба скайвера (3–4 положення). Крім того, робота вершинного леза зуба інструмента під час багатопрохідного різання в цих положеннях навіть перевищує роботу вихідного леза, чого не спостерігалось під час стаціонарного повнопрохідного різання [23]. Це можна пояснити тим, що під час різання в декілька проходів бічні леза (вхідне та вихідне) зуба скайвера працюють менше. Площа поперечних зрізів недеформованої стружки (вхідної і вихідної частини) менша на останньому проході ніж при повнопрохідному. Адже після попереднього проходу нижня частина бічної сторони западини вже оброблена.

Робота на усіх ділянках одного зубця – в площині зсуву, на передній і задній поверхнях, визначена на рівні вхідного, вершинного та вихідного лез, наведена на рисунку. Ця елементарна робота перетворюється на теплоту різання, яка виконується на шляху, що визначається кутом і довжиною контакту одного зубця з колесом за один оберт інструмента.

Наведені графіки показують, як змінюється теплоутворення по куту повороту скайвінг-різця, а також сумарну кількість теплоти, яка виділяється за один оберт інструмента. Отже, найбільшу роботу з усунення припуску виконує вихідне лезо, а максимальна робота припадає на середню частину вихідної ділянки.

Вся теплота різання розподіляється між інструментом, стружкою, заготовкою, а також переходить в навколишнє середовище. Оскільки Power Skiving є високошвидкісним процесом, то можна прийняти баланс розподілу теплоти таким, як це є у шліфуванні. Цей процес характеризується значною швидкістю різання, при цьому в інструмент переходить до 10 % теплоти різання.

Для окремого зубця інструмента процес різання є повторюваним з частотою, яка дорівнює частоті обертання. Внаслідок явища теплопередачі теплота з вершини різального клина поширюється в тіло інструмента з певною швидкістю, яка визначається коефіцієнтом теплопровідності (для сталі $58 \text{ Вт/(м} \times ^\circ\text{C)}$), що є першим джерелом відтоку теплоти [26].

Другим джерелом охолодження є контакт з повітрям. Цикли різання чергуються з вільним пробігом, коли зубець контактує з повітрям навколишнього середовища та охолоджується, оскільки для твердих сплавів, як основного інструментального матеріалу в методі Power Skiving для мащення і охолодження, не використовуються рідини. При високих частотах обертання – приблизно $1100\text{--}1800 \text{ хв}^{-1}$ – повітряне охолодження інструмента є високоефективним, а відтік теплової енергії внаслідок сумісної дії вказаних двох чинників буде в межах 90–95 %. Незважаючи на це, в процесі повного прорізання впадини на всю ширину зубчастого вінця і багатократного повторення циклу буде поступово нагромаджуватися теплота в тілі зубця [27].

Встановимо кількість циклів різання для одного зубця, які потрібні для повного формування однієї впадини. Прийmemo ширину зубчастого колеса рівною подвійній висоті зубця колеса, що відповідає усередненим даним для коліс загального призначення. При модулі 2,5 мм висота зубця дорівнює 5,6, а ширину вінця прийmemo рівною 12 мм. При осьовій подачі 0,75 мм на оберт заготовки, що має 33 зубці, кількості зубців інструмента 24 передавальне число верстатного зачеплення становить 1,38, а кількість циклів k (обертів інструмента) буде дорівнювати 22. Для розрахунку кількості теплоти Q , яку отримає зубець за 22 оберти інструмента, якщо в його тіло буде переходити 7,5 % початкової теплоти Q_0 , використаємо формулу складних процентів $Q = Q_0 \times (1 + 0.1)^k$.

Враховуючи наведений вище баланс теплових процесів, на рис. 7 показано графіки надходження теплоти в тіло одного зубця інструмента на останніх 17–22 обертах.

Визначимо температуру на вершинному лезі зубця, використовуючи наведені вище розрахунки. При теплопередачі температура визначається як функція теплоти W , Вт маси тіла m , кг, яка сприймає цю теплоту і питомої теплоємності матеріалу w інструмента:

$$q = \frac{W}{m \times w}, ^\circ\text{C}. \quad (2)$$

Для сталі $w = 452 \text{ Дж}/(\text{кг} \times ^\circ\text{C})$.

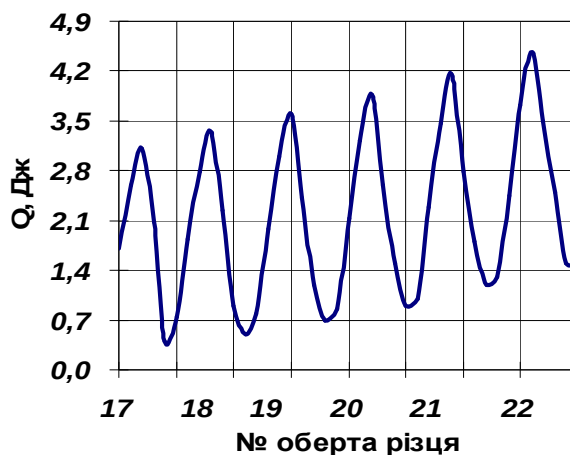


Рис. 7. Нагромадження тепла в зубі скайвера під час зубонарізання
Fig. 7. Heat accumulation in the skiving cutter tooth during gear cutting

Будемо розглядати масу об'єму вершинного леза як утворену ділянкою контакту стружки з передньою поверхнею інструмента та ділянкою зношування вершинного леза по задній поверхні. Першу величину можна визначити, використовуючи формулу Лоладзе [5], яка ставить залежність ширини цієї ділянки від переднього кута та товщини зрізаного шару. Другу складову задамо, виходячи з максимально допустимого зношування, що регламентує період стійкості інструмента, рівною 0,25 мм. На основі даних, отриманих з моделювання цього процесу, зокрема, недеформованої стружки і параметрів перерізу зрізів [28], на рис. 8 показано товщину, ділянку контакту стружки на передній поверхні зубця та об'єм прилеглої до вершини леза ділянки, який не є сталим.

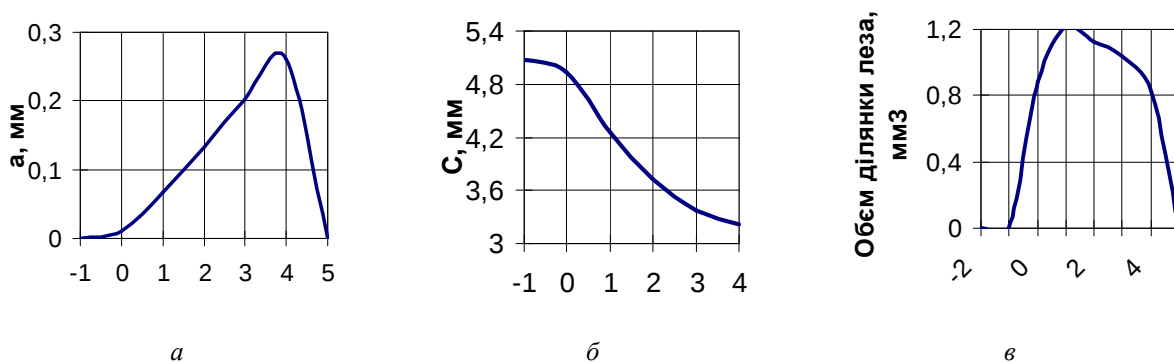


Рис. 8. Залежність товщини недеформованої стружки (а), ширини ділянки пластичного контакту стружки (б) та об'ємної ділянки лез зуба скайвера (в) від положення інструмента
Fig. 8. Dependence of the undeformed chip thickness (a), the width of the chip plastic contact zone (b), and the volumetric section of the skiving cutter edge (c) on the tool position

На основі отриманих результатів розрахунків на рис. 9 показано графік температури різання, що встановиться на вершинному лезі на останньому оберті інструмента, на якому завершиться прорізання впадини для заданих вище умов.

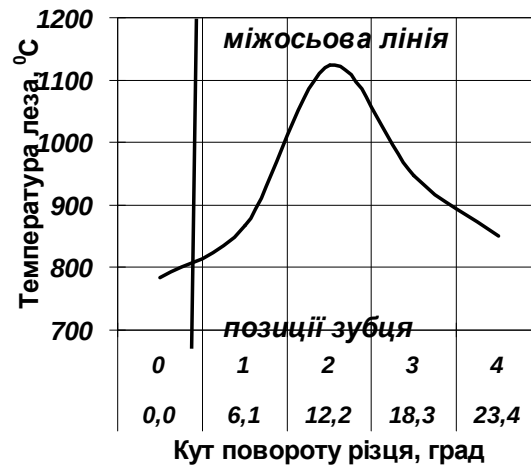


Рис. 9. Температура на вершинному лезі зубця скайвінг-інструмента, яка встановиться на останньому оберті

Fig. 9. Temperature at the tip edge of the skiving tool tooth established at the final revolution

Висновки

Отримані дані показують, що при прийнятих для моделювання початкових параметрах гранична температура на вершині твердосплавного зубця скайвінг-інструмента становить 1135 °C. Така температура перевищує межу теплостійкості для цього матеріалу, яка становить 1000–1050 °C, а після встановлення теплової рівноваги інструмент буде піддаватися тепловій дії, що перевищує його можливості. Як було зазначено, надмірне нагрівання з великою вірогідністю стане причиною виникнення тріщин і в кінцевому підсумку спричинить ламання зубців. Отже, для забезпечення надійності процесу зубонарізання потрібно коректувати початкові дані. Для цього можна використовувати різні шляхи:

- вибрати інструмент з вищими різальними властивостями, наприклад, оснащений пластинами з мінералокераміки, яка має температуростійкість до 1500 °C;
- знизити режими різання.

Розглянемо детальніше можливі варіанти цього рішення.

1. Зміна величини швидкості різання. Як відомо, під час зростання швидкості різання спершу збільшується інтенсивність виділення теплоти, що призводить до зниження межі міцності оброблюваного матеріалу. Внаслідок цього зменшується сила різання та буде зменшуватися робота різання і нагрівання інструмента. З другого боку, одночасно зростає частка теплоти, яка переходить в інструмент, тому це не розв'яже проблеми.

2. Зменшення глибини різання через збільшення кількості проходів зумовить зменшення шляху різання, ширини різання на бокових лезах, та, як наслідок – зменшення роботи різання під час другого, і особливо, першого проходів. Водночас кількість циклів навантаження для одного зубця теж кратно збільшиться. Це означає, що відповідно до графіка, наведеного на рис. 9, буде зростати кількість теплоти, яка акумулюється в інструменті, що без ефективного охолодження призведе до підвищення його температури. Попри те загальноприйнята практика багатопрохідного зубонарізання в методі Power Skiving є вимушеною для зменшення ударних навантажень, які виникають під час врзання на кожному проході.

3. З наведеного вище випливає, що єдиним обґрунтованим способом зменшення теплоти і температури в цьому методі є зменшення осьової подачі за умови однопрохідного нарізання зубчастих коліс на повну висоту профілю. При цьому навантаження на вершинне лезо залишається близьким до умов багатопрохідного різання, а сумарна кількість теплоти за мінімального в тілі інструмента буде значно меншою. Наприклад, моделюванням можна показати, що під час граничної осьової подачі 0,63 мм/об. максимальна температура різання на вершинному лезі зубця інстру-

мента буде становити 1090–1100 °С, що є межею допустимого значення для твердосплавних різальних пластин. Водночас на ділянці врізання цю подачу потрібно зменшити удвічі для уникнення значних ударних навантажень, це можна забезпечити системою числового керування верстатом. Щоб зменшити негативний вплив стадії врізання на продуктивність операції, достатньо обробляти зубчасті колеса пакетом з кількох деталей.

Інформаційні джерела

1. Nishikawa T., Shimada S., Kobayashi G., et al. Using power skiving to increase the efficiency and precision of internal gear cutting. *Komatsu technical report* 64(171):1–7, 2018.
2. Pittler V. Verfahren zum Schneiden von Zahnrädern mittels eines zahnradartigen, an den Stirnflächen der Zähne mit Schneidekanten versehenen Schneidwerkzeugs, *Deutsche Patentschrift* No. 243514, W. (1910).
3. Yanase Y., Usude J., Ishizu K., Kikuchi T., Ochi M. (2018). The latest gear manufacturing technology for high accuracy and efficiency. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 55(3), 1.
4. Sugimoto T., Ishibashi A., Yonekura M. Performance of skiving hobs in finishing induction hardened and carburized gears. *Gear Technology*, 2003, Vol. 20, No. 3, P. 34–41.
5. Внуков Ю. М., Залогов В. О. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : навч. посіб. 2-ге вид., стер. Суми: Сумський державний університет, 2024. 273 с. ISBN 978-966-657-148-2
6. Spath D., Hühsam A. Skiving for high-performance machining of periodic structures, *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 51. (2002). 91–94. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61473-5
7. Schulze V., Kühlewein C., Autenrieth H. 3D-FEM modeling of gear skiving to investigate kinematics and chip formation mechanisms, *Adv. Mater. Res.* 223. (2011). 46–55. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.46
8. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., Krömer M. Technological and simulative analysis of power skiving, *Procedia CIRP*. (2016). 773–778. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.052
9. Wang W. P., Wang K. K. Geometric modelling for swept volume of moving solids, *IEEE Computer Graphics and Applications*. (1986). 8–17.
10. Nishikawa T., Shimada S., Kobayashi G., Zongwei R., Sugita N. Using Power Skiving to Increase the Efficiency and Precision of Internal Gear Cutting, *Komatsu Tech. Rep.* 64 (2018), 1–7.
11. Ren Z., Fang Z., Arakane T., Kizaki T., Nishikawa T., Feng Y., Kugo J., Nabata E., Sugita N. Parametric modeling of uncut chip geometry for predicting crater wear in gear skiving, *J. Mater. Process. Technol.* (2021). 290. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116973
12. McCloskey P., Katz A., Berglind L., Erkorkmaz K., Ozturk E., Ismail F. Chip geometry and cutting forces in gear power skiving, *CIRP Ann.* 68 (2019). 109–112. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.085
13. Inui M., Huang Y., Onozuka H., Umezu, Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation, *Procedia Manuf.* 48 (2020). 520–527. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.078
14. 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, *Precis. Eng.* 73 (2021). 93–103. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.08.013
15. Ren Z., Fang Z., Kizaki T., Feng Y., Nagata T. Understanding local cutting features affecting surface integrity of gear flank in gear skiving, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* (2022). 172.
16. Antoniadis. Gear skiving – CAD simulation approach, *CAD Comput. Aided Des.* 44. (2012). 611–616. DOI: 10.1016/j.cad.2012.02.003
17. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. Cutting force model for power skiving of internal gear, *J. Manuf. Process.* 56 (2020) 1277–1285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.022>
18. 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, *Mech. Syst. Signal Process.* 143. (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106793>
19. Zhang L., Liu J., Wu X., Zhuang C. Digital twin-based dynamic prediction of thermomechanical coupling for skiving process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2022). DOI: 10.1007/s00170-022-08908-8
20. Li J., Wang P., Jin Y. Q., Hu Q. Chen/ Cutting force calculation for gear slicing with energy method, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 83. (2016). 887–896. DOI: 10.1007/s00170-015-7630-0
21. Stadtfeld H. J. Power skiving of cylindrical gears on different machine platforms, *Gear Technology*. 31 (1). (2014). 52–62.
22. Arndt T., Klose J., Gerstenmeyer M., Schulze V. Tool wear development in gear skiving process of quenched and tempered internal gears, *Forsch. Ing. Eng. Res.* (2021). DOI: 10.1007/s10010-021-00544-0

23. Сліпчук А. М. Дослідження температури інструмента під час нарізання внутрішніх зубчастих коліс методом Power Skiving. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Український міжвідомчий науково-технічний збірник, 2024, № 58, с. 47–59. DOI: 10.23939/istcipa2023.58.047
24. 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, No. 2. P. 213–226. DOI: 10.24425/ame.2024.149636
25. Hrytsay I., Stupnytskyi V. (2023). Hob wear prediction based on simulation of friction, heat fluxes, and cutting temperature. Archive of Mechanical Engineering. 2023. Vol. 70, No. 2. P. 271–286. DOI: 10.24425/ame.2023.145582
26. Hrytsay I., Slipchuk A., Bosansky M. Prediction of cutting tool stability based on temperature modelling in power skiving gear cutting process. Strojnický časopis – Journal of Mechanical Engineering. 2025. Vol. 75, No. 1. P. 39–48. DOI: 10.2478/scjme-2025-0005
27. 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. Article ID: 106793. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.106793
28. Сліпчук А. М. Симуляція процесу Power Skiving для нарізання внутрішнього зубчастого колеса з моделюванням недеформованої стружки. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Український міжвідомчий науково-технічний збірник. 2023. Вип. 57. С. 46–58. DOI: 10.23939/istcipa2023.57.046

Andrii Slipchuk

Lviv Polytechnic National University

RESEARCH ON THE TEMPERATURE OF THE TOOL FOR MULTI-PASS CUTTING OF GEARS BY THE POWER SKIVING METHOD

Problem statement and the research purpose. Problem statement and purpose of the work: This paper presents a method for predicting the temperature of carbide tools used for cutting gear wheels with the Power Skiving method. This task is particularly relevant for automated equipment, including gear-cutting machines. **Methodology.** Reliability is defined by the thermal state of the cutter tooth at which a thermal crack will occur on its top blade, leading to breakage and loss of system performance. The heat generated by a single tooth when cutting a gear wheel is determined by calculating the total cutting work and overcoming friction on the contact surfaces of the cutting wedge, as well as the heat balance in the cutting zone. **Results.** The temperature at the top of the tooth is determined by the volume in which it is generated, i. e. within the area of contact between the chip and the front surface, as well as the permissible width of the wear area on the rear surface. **Scientific novelty and practical significance.** The developed methodology enables the initial data to be adjusted to ensure the machine operates without issue. If the maximum temperature exceeds the heat resistance limit of the tool material, the material of the cutting plates must be adjusted or the cutting modes (cutting speed, number of passes and cutting depth) must be changed. Adjusting the operation and selecting the best option can be based on comparing the time required for each option. **Scopes of further investigations on the subject of the paper.** Further research will involve conducting an experiment and comparing the results obtained with those calculated analytically.

Keywords: gear, temperature, wears, multi-pass cutting, friction, Power Skiving.

References

1. Nishikawa, T., Shimada, S., Kobayashi, G., et al. Using power skiving to increase the efficiency and precision of internal gear cutting. Komatsu technical report 64(171):1–7, 2018.
2. Pittler, V. Verfahren zum Schneiden von Zahnradern mittels eines zahnradartiges, an den Stirnflächen der Zähne mit Schneidekanten versehenen Schneidwerkzeugs, Deutsche Patentschrift No. 243514, W. (1910).
3. Yanase, Y., Usude, J., Ishizu, K., Kikuchi, T., Ochi, M. (2018). The latest gear manufacturing technology for high accuracy and efficiency. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 55(3), 1.
4. Sugimoto, T., Ishibashi, A., Yonekura, M. Performance of skiving hobs in finishing induction hardened and carburized gears. Gear Technology, 2003. Vol. 20, No. 3. P. 34–41.
5. Vnukov, Yu. M., Zaloga, V. O. Znoshuvannya i stiykist' rizal'nykh lezovykh instrumentiv : navch. posib. [Wear and durability of cutting blade tools]: a textbook. 2-edition. Sumy: Sumy State University, 2024. 273 p. ISBN 978-966-657-148-2 [In Ukrainian].
6. Spath, D., Hühsam, A. Skiving for high-performance machining of periodic structures, CIRP Ann. Manuf. Technol. 51. (2002). 91–94. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61473-5

7. Schulze, V., Kühlewein, C., Autenrieth, H. 3D-FEM modeling of gear skiving to investigate kinematics and chip formation mechanisms, *Adv. Mater. Res.* 223. (2011). 46–55. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.46
8. Klocke, F., Brecher, C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt, J., Krömer, M. Technological and simulative analysis of power skiving, *Procedia CIRP.* (2016). 773–778. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.052
9. Wang, W. P., Wang, K. K. Geometric modelling for swept volume of moving solids, *IEEE Computer Graphics and Applications.* (1986). 8–17.
10. Nishikawa, T., Shimada, S., Kobayashi, G., Zongwei, R., Sugita, N. Using Power Skiving to Increase the Efficiency and Precision of Internal Gear Cutting, *Komatsu Tech. Rep.* 64. (2018). 1–7.
11. Ren, Z., Fang, Z., Arakane, T., Kizaki, T., Nishikawa, T., Feng, Y., Kugo, J., Nabata, E., Sugita, N. Parametric modeling of uncut chip geometry for predicting crater wear in gear skiving, *J. Mater. Process. Technol.* (2021). 290. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116973
12. McCloskey, P., Katz, A., Berglind, L., Erkorkmaz, K., Ozturk, E., Ismail, F. Chip geometry and cutting forces in gear power skiving, *CIRP Ann.* 68. (2019). 109–112. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.085
13. Inui, M., Huang, Y., Onozuka, H., Umezu, N. Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation, *Procedia Manuf.* 48. (2020). 520–527. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.078
14. 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, *Precis. Eng.* 73. (2021). 93–103, DOI: 10.1016/j.precisioneng.2021.08.013
15. Ren, Z., Fang Z., Kizaki, T., Feng, Y., Nagata. Understanding local cutting features affecting surface integrity of gear flank in gear skiving, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* (2022). 172.
16. Antoniadis, Gear skiving – CAD simulation approach, *CAD Comput. Aided Des.* 44. (2012). 611–616. DOI: 10.1016/j.cad.2012.02.003
17. Onozuka, H., Tayama, F., Huang, Y., Inui, M. Cutting force model for power skiving of internal gear, *J. Manuf. Process.* 56. (2020). 1277–1285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.022>
18. 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, *Mech. Syst. Signal Process.* 143. (2020). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106793>
19. Zhang, L., Liu, J., Wu, X., Zhuang, C. Digital twin-based dynamic prediction of thermomechanical coupling for skiving process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (2022). DOI: 10.1007/s00170-022-08908-8
20. Li, J., Wang, P., Jin, Y. Q., Hu, Q., Chen, X. C. Cutting force calculation for gear slicing with energy method, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 83. (2016). 887–896. DOI: 10.1007/s00170-015-7630-0
21. Stadtfeld, H. J. Power skiving of cylindrical gears on different machine platforms, *Gear Technology* 31 (1). (2014). 52–62.
22. Arndt, T., Klose, J., Gerstenmeyer, M., Schulze, V. Tool wear development in gear skiving process of quenched and tempered internal gears, *Forsch. Ing. Eng. Res.* (2021). DOI: 10.1007/s10010-021-00544-0
23. Slipchuk, A. M. Doslidzhennya temperatury instrumenta pid chas narizannya vnutrishnikh zubchastykh kolis metodom Power Skiving. [Research on tool temperature during power skiving of internal gears]. Automation of production processes in mechanical engineering and instrument engineering. Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection. L'viv 2024. No. 58, p. 47–59. DOI: 10.23939/istcipa2023.58.047 [In Ukrainian].
24. 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, No. 2. P. 213–226. DOI: 10.24425/ame.2024.149636
25. Hrytsay, I., Stupnytskyy, V. Hob wear prediction based on simulation of friction, heat fluxes, and cutting temperature. *Archive of Mechanical Engineering.* 2023. Vol. 70, No. 2. P. 271–286. DOI: 10.24425/ame.2023.145582
26. Hrytsay, I., Slipchuk, A., Bosansky, M. Prediction of cutting tool stability based on temperature modelling in power skiving gear cutting process. *Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering.* 2025. Vol. 75, No. 1. P. 39–48. DOI: 10.2478/scjme-2025-0005
27. 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. Article ID: 106793. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.106793
28. Slipchuk, A. M. Symulyatsiya protsesu Power Skiving dlya narizannya vnutrishn'oho zubchastoho kola z modelyuvannyam nedeforovanoyi struzhky [Simulation of the Power Skiving process for internal gear cutting with undeformed chip simulation]. Automation of production processes in mechanical engineering and instrument engineering. Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection. L'viv 2023. No. 57. P. 46–58. DOI: 10.23939/istcipa2023.57.046 [In Ukrainian].