

Дослідження впливу силових чинників на структуру технологічної операції зуботочіння

І. Є. Грицай¹ • А.М. Сліпчук¹

Received: 17 October 2023 / Revised: 6 November 2023 / Accepted: 21 November 2023

Проблематика. В технології Power skiving існує проблема призначення робочих параметрів, до яких належать осьова подача та швидкість різання, а також кут нахилу зубців дискового різця та інструментального шпинделя, геометрія різальної частини та глибина різання по проходах.

Мета. Необхідно дослідити процес різання методом Power skiving при нарізанні коліс зовнішнього зачеплення за декілька проходів та розробити рекомендації щодо вибору його раціональних параметрів.

Методика реалізації. Силу різання та її тангенціальну складову, яка діє на різець представлено відповідно до основних положень теорії різання функцією площі поперечного перерізу зрізів, межі міцності матеріалу заготовки на зсув та інтенсивності пластичного деформування стружки. Розрахунки площі зрізів базуються на графоаналітичній 3D модель недеформованої стружки. Коефіцієнт інтенсивності зсуву визначено в залежності від товщини зрізаних шарів з допомогою системи Deform 2D. Дослідження силових чинників на першому етапі виконано для однозубчастого різання, коли приймається до уваги роботу одного зубця інструменту, та для умов багатозубчастого різання, що відповідають реальним умовам різання і формоутворення у даному методі.

Результати. Аналіз гармонічних коливань з різною частотою досліджуваних сил свідчить, що за середнім навантаженням максимальна головна складова сили різання виникає на третьому проході, а тангенціальна сила на осі різця – на першому проході. Зміна частоти цих сигналів пояснюються зміною кута контакту між інструментом та зубчастим колесом у верстатному зачепленні та різною кількістю зубців, які здійснюють різання.

Висновки. Отримані дані дозволили розробити методіку для вибору раціональних режимів - величини осевої подачі, кількості проходів з різною глибиною різання для забезпечення найменших витрат часу і досягнення заданої точності зубчастих коліс. Показано, що для зменшення похибки оброблення найбільш раціонально досягати зменшення сили різання за рахунок збільшення кількості проходів, а не зменшення осевої подачі.

Ключові слова: різак зубчасте колесо, процес Power skiving, моделювання, недеформована стружка, кількість проходів, подача, глибина різання, сили різання, похибка оброблення, раціональні параметри.

Вступ

В сучасному машинобудуванні підвищується рівень автоматизації виробництва. Все більша частка машинобудівної продукції випускається в умовах дрібно- і середньосерійного виробництва, тому основний засіб його автоматизації – це використання обладнання з числовим програмним керуванням. Висока вартість цього

обладнання вимагає підвищеної уваги до технологічної підготовки виробничих процесів для забезпечення їх максимальної продуктивності, безперебійної роботи і максимального завантаження. Всі ці особливості сучасного машинобудівного виробництва повною мірою стосуються процесів виготовлення зубчастих коліс. Вони належать до основних деталей машин і характеризуються підвищеною складністю та високими вимогами до точності та якості їх поверхонь.

З огляду на важливість зубчастих коліс для надійного функціонування приводів та передач машин, їх технології неухильно розвиваються та удосконалюються. Протягом останніх років світовими виробниками цих деталей створено та впроваджено новий метод зубонарізання – Power skiving, відомий раніше як

✉ А.М. Сліпчук
andrii.m.slipchuk@lpnu.ua

¹ Національний університет “Львівська політехніка”,
Львів, Україна

зуботочіння. Його успішний розвиток у наш час став можливим завдяки розробленню високошвидкісних і потужних приводів верстатів, керованих системами ЧПК, які дали змогу синхронізувати робочі рухи, що складають кінематику цього методу, а також створенню конструкцій верстатів значної жорсткості та вібростійкості. До переваг зуботочіння порівняно з традиційними методами оброблення зубчастих коліс – черв'ячним зубофрезеруванням та довбанням, як основними методами виготовлення зубчастих коліс в серійному та дрібносерійному виробництві належить малі втрати часу на допоміжні рухи, підвищена продуктивність та висока якість зубчастих коліс.

На перших етапах зуботочіння використовували лише для нарізання внутрішніх коліс малих і середніх модулів, які до цього обробляли малопродуктивним зубодовбанням. Проте, вагомі переваги Power skiving порівняно з усталеними технологіями зубоброблення призвели до розширення області його використання, створення верстатів для виготовлення коліс зовнішнього зачеплення, а також до поширення цього методу на колеса великих модулів.

Разом з тим, в технології Power skiving існує проблема призначення робочих параметрів, до яких належать осьова подача та швидкість різання, а також кут нахилу зубців дискового різця та інструментального шпинделя, геометрія різальної частини та глибина різання по проходах. Остання задача виникла з можливості формування зубчастих профілів шляхом швидких багатократних переходів інструменту, при цьому потрібно забезпечити оптимальне співвідношення між глибиною різання, кількістю проходів та сумарним часом операції. Зменшення кількості переходів сприяє скороченню основного часу оброблення, але призводить до збільшення сили різання і крутного моменту у точках дотику заготовки та різця. Це підвищує рівень пружних деформацій та вібрацій і погіршує якість поверхонь, при цьому також виникає загроза руйнування зубців інструменту, тобто, відмови технологічної системи. Для уникнення цієї небезпеки необхідно зменшувати величину подачі, що знизить ефективність процесу.

Приймаючи до уваги швидкий розвиток методу Power skiving вирішення проблем, описаних вище, є **актуальним**. Виходячи з такого стану, **ставиться задача** дослідити процес різання методом Power skiving при нарізанні коліс зовнішнього зачеплення за декілька проходів та розробити рекомендації щодо вибору його раціональних параметрів.

Огляд літературних джерел

Найефективніше вирішення поставленої задачі полягає в моделюванні цього процесу та використання комп'ютерних засобів для його вивчення. Розроблення моделі повинно охоплювати низку послідовних стадій, які включають моделювання зрізаних шарів та розрахунок їх параметрів, методику розрахунку силових

чинників процесу та їх впливу на параметри ефективності та надійного його функціонування. Аналіз публікацій, присвячених цій темі показав наступне.

Внаслідок складності досліджуваного процесу при моделюванні геометрії стружки дослідники вдаються до певних спрощень, коли не враховують той чи інший елемент кінематики. Так, в працях [1]–[3] не приймають до уваги допоміжний рух – обертання заготовки. Проте, Power skiving відтворює кінематику зубчастого зачеплення колеса і шестерні, в якому відбувається одночасне обертання обох елементів, а різання і генерування профілю здійснюється при неперервному обкочуванні. Таке спрощення спотворює дійсну форму стружки та її розміри.

В роботі [4] силу різання описано на основі її середніх значень, отриманих шляхом вимірювання, а уточнення величини цієї сили в залежності від товщини стружки та переднього кута різця пропонується на основі відповідних коефіцієнтів. Такий підхід не забезпечує необхідної гнучкості при дослідженні сили різання, яка є функцією багатьох початкових даних та умов оброблення.

В статті [5] параметри стружки в методі Power skiving отримують на основні розгляду положення передньої поверхні зубця інструменту під час послідовних переходів зі зміною глибини різання, проте не описано, як враховано зміну цих параметрів в процесі неперервного обкочування різця з заготовкою.

В низці робіт, зокрема, [6]–[9] сила різання в методі Power skiving представлена, як функція лише товщини стружки. Разом з тим, хоча товщина стружки є важливим параметром різання, проте, вона визначає лише інтенсивність деформування припуску при перетворенні його в стружку. Проте, додатковим і більш повним параметром різання є поперечний переріз стружки, від якого кінцево залежить величина сили різання. Тому такий підхід для розрахунків сили різання є обмеженим і не дає повного уявлення про цей параметр.

В публікації [10], а також у роботі [11] силу різання розглядають на основі питомої сили різання. Проте, як відомо, питома сила різання є функцією коефіцієнта осадження стружки, величина якого непотійна та змінюється залежно від режимів різання і товщини зрізу. Оскільки в різанні методом Power skiving товщина перерізу зрізів змінюється за кутом повороту зубця інструменту, то розрахунки сили різання на основі питомої сили мають лише приблизний і оціночний характер.

Подібний підхід для моделювання параметрів зрізів міститься в статті [12]. З аналізу графіків площі перерізу і товщини зрізів в цій роботі, які отримані на основі вказаного підходу впливає, що максимальні параметри зрізів і робота різання припадає на впадину між зубцями в центральній позиції, проте, це не відповідає дійсності, про що свідчать кадри високочастотної зйомки процесу утворення стружки в методі Power skiving [13].

В праці [3] представлено результати експериментального дослідження сили різання в процесі нестационарного різання під час врізання. Ці результати також використано для визначення поправних коефіцієнтів для розрахунку сили різання в методі Power skiving на основі питомої сили різання.

Подібне вирішення задачі моделювання в методі Power skiving, коли поєднують розрахунки параметрів зрізів і сили різання з експериментально отриманими результатами пропонують автори статті [14], де складові сили різання в зуботочінні розраховують на основі експериментальних коефіцієнтів, які прив'язують до параметрів зрізів. Тут теж присутній істотний недолік подібних методів, в яких результати досліджень жорстко прив'язані до умов, в яких проводили експериментальні дослідження.

Спільним для більшості статей, про які йшлося вище, є те, що при моделюванні зрізаних шарів та розрахунку їх параметрів допускаються помилок в підході до опису кінематики. Більшість авторів ототожнюють, або приймають кінематику зуботочіння як близьку до черв'ячного зубофрезерування. Це стосується робіт [5], [6], [12], [14], [15], [16].

Разом з тим, осі схрещення інструменту і заготовки при обробленні прямокутних коліс під час зуботочіння складають $20\text{--}25^\circ$, в той час, як при зубофрезеруванні черв'ячною фрезою – 70° . Іншими словами, обидва процеси різання є косокутними, проте, для черв'ячної фрези кут між передньою поверхнею і вектором швидкості становить 20° , а для різця – $65\text{--}70^\circ$. Очевидно, що результати моделювання параметрів процесу Power skiving в цьому випадку не будуть відповідати реальним величинам.

Виклад основного матеріалу

Виходячи із завдання цієї статті та аналізу відомих праць, були розроблені геометричні тривимірні моделі недеформованих стружок, які утворюються в процесі нарізання зубчастих поверхонь методом Power skiving [17], [18]. Початкові дані: колесо евольвентне прямозубе; модуль 2,5 мм; кількість зубців: колеса 33, різця 24; осьова подача 0,75 мм/об.; швидкість різання 190 м/хв.; кількість проходів - 3, глибина по проходах: перший прохід рівний 2,5 мм, другий прохід рівний 1,5 мм, а третій прохід рівний 1 мм; матеріал пластини різця – твердий титано-танталовий сплав; зовнішній діаметр різця 66 мм; висота вінця коліс 22 мм; кут нахилу зубців різця і кут схрещення осей 25° ; коефіцієнт тертя на передній поверхні для даної швидкості рівний 0,63.

Суть розробленого методу моделювання полягає в тому, що на основі аналізу того чи іншого методу зубонарізання з урахуванням усіх особливостей його кінематики відтворено миттєві поперечні перерізи зрізів в дискретних кутових положеннях заготовки зубчастого колеса та різального інструменту. Послідовні пе-

рерізи по куту повороту інструменту формують “каркас” стружки, на основі чого відтворюється її тривимірна модель. Каркаси недеформованих стружок у трьох проходах зуботочіння, знайдені цим методом для вказаних вище початкових даних показані на рис. 1.

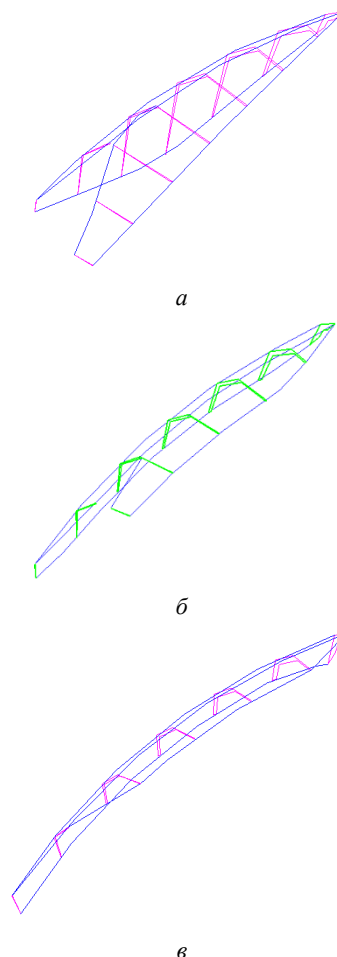


Рис. 1. Каркасні моделі стружок у трьох проходах зубонарізання методом Power skiving. В першому (а), в другому (б) і третьому (в) проходах

На рис. 2 наведено просторові геометричні моделі стружок, а параметрів зрізів для другого проходу наведені на рис. 3. Зона зачеплення інструменту з заготовкою зубчастого колеса поділена на 13 послідовних кутових позицій, позначених $-6, -5, \dots, 0, +1, +2, \dots, +6$, нульове положення співпадає з міжосьовою лінією.

Графіки (рис. 3) відповідають закономірностям різання на усіх проходах, а також різанню на повну глибину профілю зубця. Найбільшу роботу з усунення припуску у впадині між зубцями колеса виконує верхннє лезо, найменшу – вхідне лезо. Відмінності між проходами полягають у зміні активного кута зачеплення інструменту з заготовкою зубчастого колеса у площині торця заготовки. Величина цього кута становить по першому, другому і третьому проходах, відповідно: 17° 21° і 24° .



Рис. 2. Геометричні моделі недеформованих стружок в першому (а), другому (б) і третьому (в) проходах

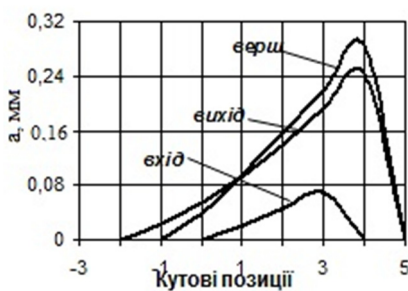
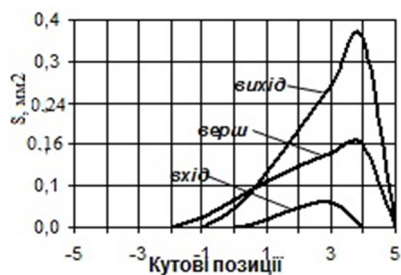


Рис. 3. Площа поперечного перерізу (а) і товщина зрізів (б) на вхідному, вершинному і вихідному лезах різця у другому проході

Сила різання

Методика моделювання і розрахунки сили різання в зуботочінні наведені в роботі [19]. Відповідно до цієї методики визначено головну складову силу рі-

зання P_o , яка збігається з напрямком осьової подачі і вектором пластичного деформування при різанні, ця сила різання представлена залежністю:

$$P_o = [\tau] \cdot S \cdot \xi, \text{ Н}, \quad (1)$$

де S – площа поперечного перерізу стружки, mm^2 ; $[\tau]$ – межа міцності матеріалу заготовки на зсув, МПа; ξ – коефіцієнт осадження стружки.

Схема сил, які діють на різець та зубчасте колесо в процесі Power skiving наведена на рис. 4. Тут позначено: P_{zk} , P_{zp} , P_x – відповідно, тангенційні (окружні) сили, які діють на колесо і різець та осьова складова сили різання, яка за напрямком і величиною збігається з головною складовою сили різання.

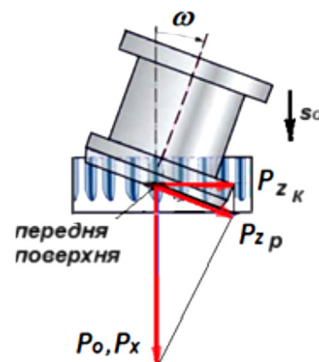


Рис. 4. Схема сил, які діють на різець та зубчасте колесо в процесі Power skiving

Значення коефіцієнта осадження стружки в залежності від товщини зрізів для відповідного матеріалу заготовки та інструменту можна встановити з допомогою системи Deform 2D, методика досліджень описана в роботі [19].

Графіки залежності цього параметра для умов, які відповідають даній статті, від товщини стружки на лезах для другого проходу показані на рис. 4а. Добуток $[\tau] \cdot \xi$ у формулі (1) характеризує питому силу різання, яка, відповідно до графіків (рис. 3а) є непостійною величиною і має різні значення навіть на окремих лезах при різанні одним зубцем. Це підтверджує тезу, висловлену вище, що використання питомої сили у розрахунках сили різання за її певним усередненим значенням призводить до суттєвих похибок.

На рис. 5б показано закономірності зміни сили P_o на лезах і сумарної сили на зубці інструменту в його послідовних кутових позиціях. З порівняння отриманих на основі розрахунків параметрів зрізів та сили різання випливає, що основний об'єм припуску із впадини між зубцями колеса різець усуває на вихідній частині активного кута контакту, після міжосьової лінії. Максимальні значення сил припадають на третій прохід з глибиною різання, рівною повній глибині: площа зрізів на вершинному лезі $0,274 \text{ mm}^2$, сумарна сила різання на лезах 549 Н .



Рис. 5. Залежність коефіцієнта осадження стружки від товщини зрізів на лезах у другому проході (а) та сила P_o на лезах під час другого проходу (б)

Для визначення впливу сили різання на процес зубонарізання необхідно встановити силу, яка діє на різець. Розглянемо тангенційну силу, яка створює крутний момент на осі інструменту і викликає його періодичні крутильні деформації.

Для цього необхідно врахувати сили, які діють на передній поверхні зубця інструменту, тобто, сили тертя (рис. 6). Тут показано зубець інструменту та переріз стружки в i -ому кутовому положенні зубця, яке характеризується кутом φ_p , та колеса – кутом φ_k .

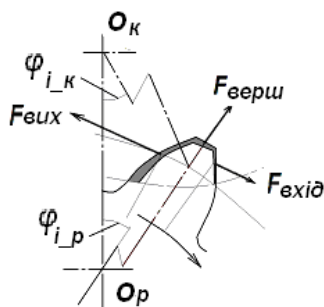


Рис. 6. Сили, які діють на передній поверхні зубця інструменту

Напрямок сил тертя F_i на бокових лезах протилежний напрямку сходження стружок. Відповідно, сили тертя на вихідному і вхідному лезах протилежно скеровані: сила тертя на вихідному лезі діє у напрямку, протилежному до обертання різця, а на вхідному лезі – співпадає з цим напрямком. Це призводить до збільшен-

ня сили різання на вихідному лезі і до зменшення сили різання на вхідному лезі. З даної схеми можна вивести залежність для розрахунку тангенційних (окружних) сил P_z , які діють на різальний на інструмент на зовнішньому діаметрі і які створюють обертовий момент на його осі. Величина такої сили, яка формується на окремий зубець рівна:

$$P_z = (F_{вх\ddot{u}d} - F_{вих\ddot{u}d}) \cdot \cos \omega + F_{верш} \cdot \cos \varphi_{i_p} + P_{o_сумар} \cdot \sin \omega \tag{2}$$

Представимо сили тертя на передній поверхні через нормальну до передньої поверхні силу і коефіцієнт тертя μ на цій поверхні, після чого отримаємо таку формулу для розрахунку тангенціальної сили P_z на окремому зубці чашкового різця:

$$P_z = (P_{o_вх\ddot{u}d} - P_{o_вих\ddot{u}d}) \cdot \mu \cdot \cos \omega + P_{o_верш} \cdot \mu \cdot \cos \varphi_{i_p} + P_{o_сумар} \cdot \sin \omega \tag{3}$$

Сили F_i на бокових лезах діють в точці центра маси відповідного перерізу зрізу нормально до радіус-вектора цієї точки. Приймаючи до уваги реальне співвідношення між розміром зубця і радіусами інструменту та заготовки, в розрахунках ці сили приведені до вершинного леза на зовнішньому радіусі зубця різця.

На основі залежностей (1) і (3) побудовані графіки сил P_o та P_z , які показані на рис. 7. Ці графіки характеризують сили однозубчастого різання, тобто, відповідають умові, в верстатному зачепленні з колесом перебуває один зубець інструменту. Насправді при різанні з колесом контактує більше, ніж один зубець чашкового інструменту. З урахуванням цього на графіках (рис. 8) представлено сили P_o сумарного різання, а на рис. 9 – тангенційні сили, які діють на чашковий різець на 1–3 проходах у неперервному різанні.

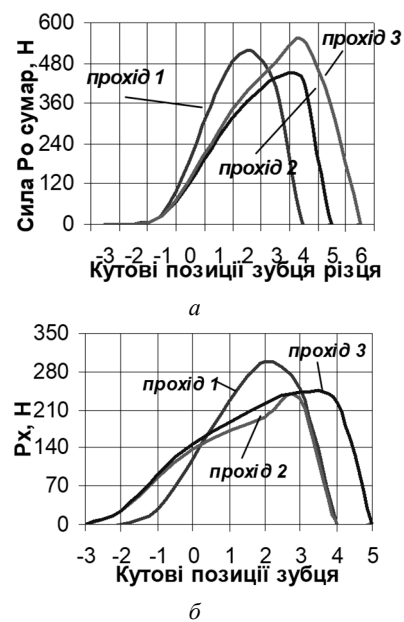


Рис. 7. Сили P_o та тангенційні сили P_z , які діють на різець в однозубчастому різанні

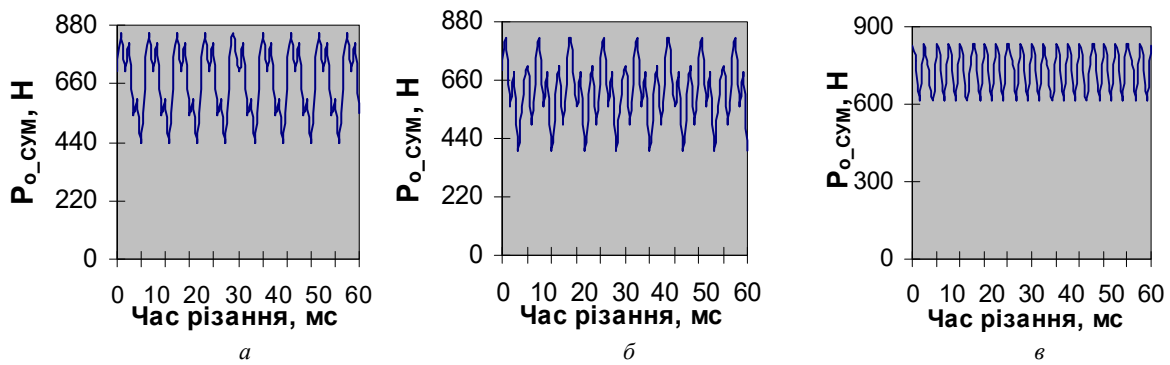


Рис. 8. Сили P_o неперервного (багатозубчастого) різання на першому (а), другому (б) і третьому (в) проходах

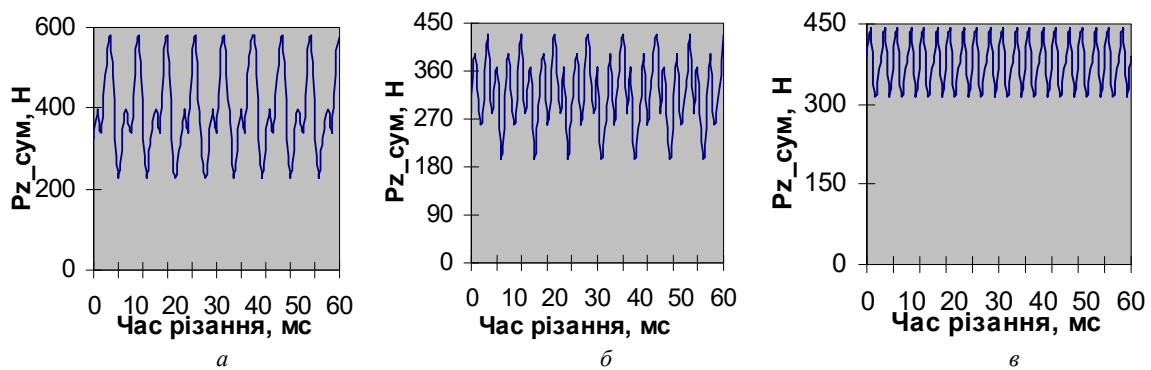


Рис. 9. Тангенційні сили P_z неперервного (багатозубчастого) різання на зовнішньому діаметрі різця у першому (а), другому (б) і третьому (в) проходах

Кількість зубців різця, які перебувають у верстатному зачепленні з заготовкою зубчастого колеса визначає коефіцієнт торцевого перекриття ε_t , рівний відношенню кута контакту до кутового кроку ψ чашкового різця. В наших умовах $\psi = 15^\circ$, а на основі моделювання встановлено, що кути контакту на проходах становлять 17° , 21° і 24° , тобто, на першому, другому і третьому проходах коефіцієнти торцевого перекриття будуть рівні, відповідно, 1,13; 1,4 та 1,6. Це означає, що частота сили різання P_o і окружної сили P_z і моменту на осі різця, які виникають у при різанні на окремих проходах буде відрізнятися від зубцевої частоти, кратної кількості зубців різця (24). Для наведених вище початкових умов зубцева частота рівна 931 хв.^{-1} , тобто колова частота інструменту становить 15,5 Гц. Відповідно, частоти сили різання на проходах будуть становити 17,8 Гц, 21,7 Гц та 24,8 Гц, що відображають графіки на рис. 7. та рис. 8. Це низькочастотні коливання, спектральна частота яких є значною.

Циклічні сила і момент, які діють на чашковий різець, є зовнішніми збудниками коливань стосовно пружної системи верстата і процесу різання. Їх негативний вплив буде виникати, коли у пружній системі верстата буде присутня маса (компонент), власна частота якої буде рівна, або близька до цих частот, а коливання в системі верстата на цих частотах будуть нести значну

енергію. В такому випадку ці сили зумовлять істотний негативний вплив на точність зубчастих коліс.

Разом з тим, самі ці сили через їх середні (квазістатичні) значення теж погіршують точність оброблення, викликаючи пружні деформації на осі інструменту. Розглянемо, як вплине ця сила і момент на точність та ефективність операції зубонарізання. Нехай, згідно технічних умов, допуск на кутове відхилення профіля зубчастого колеса повинен бути 4,5 кутові сек, тобто, 0,075 град. При середньому значенні сили P_z на третьому проході 734 Н її максимальне значення досягає 826 Н, що відповідає крутному моменту на осі різця 26,1 Н·м. Тоді, якщо крутильна жорсткість інструментального шпинделя середнього верстата Power skiving буде становити 300 Н/град, то кутова похибка профілю зубчастого колеса винесе 5,22 сек, або 0,087 град, що перевищує допуск.

Кутова похибка профілю викликає коливання осьового кроку та нерівномірність швидкості в передачі, що призводить до збільшення навантаження та шуму при роботі передачі. Зменшення сили різання та похибки зубчастого колеса можливе двома шляхами: зменшенням осьової подачі або збільшенням кількості проходів при одночасному зменшенні глибини різання. Моделювання нових умов показує, що при зменшенні осьової подачі до 0,47 мм/об. сила P_z в розмаху може

бути зменшена до 684 Н, відповідно, момент буде становити 23,8 Нм, а похибка колеса – 4,31 сек, або 0,072 град. При збільшенні кількості проходів до чотирьох, з глибиною різання по проходах, яка рівна 0,5 м на останньому проході сила P_z буде рівна 713 Н, момент 22,5 Н·м, а кутова похибка – 0,075 град. Обидві зміни задовольняють умову досягнення необхідної точності за вказаним параметром. Проте, зміна режимів різання впливає на час оброблення. Визначимо оперативний час, необхідний для нарізання одного зубчастого колеса.

Основний час обробки, рівний відношенню шляху різання до хвилинної подачі в мм/с при ширині вінця колеса 22 мм і з врахуванням шляху на врізання і перебіг для одного проходу при подачі 0,75 мм/об. становить 1,45 с, для чотирьох проходів – 5,8 с. Якщо допоміжний час на прохід становить 3 с, то оперативний час для цього варіанту операції складе 18 с.

Для подачі 0,47 мм/об. і трьох проходів час одного проходу становить 4,12 с, трьох проходів – 12,3 с, а оперативний час буде рівний 21 с.

Якщо розмір партії деталей становить, наприклад, 100 од., то економія оперативного часу за першим варіантом технології буде 5 хв. Отже, для забезпечення необхідної точності зубчастого колеса раціональним рішенням є збільшення кількості проходів при більшій осьовій подачі.

Висновки

1. За допомогою комп'ютерної системи Deform 2D досліджено залежність коефіцієнта осадження стружки від товщини зрізаних шарів. Показано, що питома

сила різання, як функція цього параметра, змінюється в широких межах навіть на окремих лезах одного зубця та є непостійною по шляху різання і кути контакту інструменту з заготовкою. З цього випливає, що використання усереднених значень питомої сили різання, отриманих експериментальним шляхом в певних початкових умовах для розрахунків сили різання є помилковим.

2. На основі попередньо розробленої графоаналітичної моделі недеформованих стружок та параметрів стружки досліджено сили різання в процесі трьохпрохідного нарізання зубчастих коліс за методом Power skiving. Встановлено, що для прийнятих в цій технології співвідношеннях між глибиною різання на проходах максимальна головна складова сили різання виникає на третьому проході, а тангенціальна (окружна) сила на осі різця – на першому проході.

3. З отриманих результатів випливає, що основне навантаження з усунення припуску припадає на вершинні леза, а найменше – на вхідні леза. Це зумовлює необхідність додаткових заходів для зміцнення цих лез, наприклад, вибором відповідних покриттів. Разом з тим, внаслідок малої товщини зрізів на вхідних лезах, вони будуть піддаватися підвищеному зношуванню, що вимагає спеціальних заходів для збільшення їх протидії зношуванню.

4. Встановлено, що для підвищення точності оброблення зубчастих коліс в методі Power skiving кращим варіантом структури операції є збільшення кількості робочих проходів із збереженням більшої подачі, ніж зменшення величини осьової подачі при меншому числі проходів.

References

- [1] F. Klocke *et al.*, “Technological and Simulative Analysis of Power Skiving,” *Procedia CIRP*, Vol. 50, pp. 773–778, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.05.052.
- [2] H. J. Stadtfeld, “Power Skiving of Cylindrical Gears on Different Machine Platforms,” *Gear Technology*, Vol. 1, pp. 52–62, 2014, [online]. Available at: <https://www.geartechology.com/ext/resources/issues/0114x/power-skiving.pdf> [Accessed: January/February 2014].
- [3] B. Vargas *et al.*, “Numerical modelling of cutting forces in gear skiving,” *Procedia CIRP*, Vol. 82, pp. 455–460, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.039.
- [4] H. Onozukaa, F. Tayamaa, Y. Huangb and M. Inuib, “Cutting force model for power skiving of internal gear,” *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 56, Part B, pp. 1277–1285, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.022.
- [5] M. Inuia, Y. Huang, H. Onozuka and N. Umezu, “Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation,” *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, pp. 520–527, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.078.
- [6] B. Vargas *et al.*, “Numerical modelling of cutting forces in gear skiving,” *Procedia CIRP*, Vol. 82, pp. 455–460, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.039.
- [7] P. McCloskey *et al.*, “Chip geometry and cutting forces in gear power skiving,” *CIRP Annals*, Vol. 68, No1, pp. 109–112, 2019, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.085.
- [8] A. Antoniadis, “Gear skiving—CAD simulation approach,” *Computer-Aided Design*, Vol. 44, No7, pp. 611–616, 2012, doi: 10.1016/j.cad.2012.02.003.
- [9] A. Antoniadis, N. Vidakis and N. Bilalis, “A simulation model of gear skiving,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 2, pp. 213–220, 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.019.

- [10] M. Inuia, Y. Huang, H. Onozuka and N. Umezu, "Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation," *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, pp. 520–527, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.078.
- [11] B. Vargas *et al.*, "Numerical modelling of cutting forces in gear skiving," *Procedia CIRP*, Vol. 82, pp. 455–460, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.039.
- [12] T. Bergs, A. Georgoussis and C. Löpenhaus, "Development of a numerical simulation method for gear skiving," *Procedia CIRP*, Vol. 88, pp. 352–357, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.061.
- [13] DMG MORI, Animation of the technology integration gear skiving for mill-turn and turn-mill machining centers. Accessed Oct. 16, 2023. [Online.] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=0C4hFSeGryM>.
- [14] P. McCloskey *et al.*, "Chip geometry and cutting forces in gear power skiving," *CIRP Annals*, Vol. 68, No1, pp. 109–112, 2019, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.085.
- [15] T. Nishikawa *et al.*, "Using Power Skiving to Increase the Efficiency and Precision of Internal Gear Cutting," *Komatsu Tech. Rep.*, Vol. 64, pp. 1–7, 2018.
- [16] C. Janßen, J. Brimmers and T. Bergs, "Validation of the plane-based penetration calculation for gear skiving," *Procedia CIRP*, Vol. 99, pp. 220–225, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.03.034.
- [17] I. Hrytsay, V. Stupnytskyy, A. Slipchuk and J. Ziobro, "Load Parameters of the Gear Machining by Power Skiving and Their Influence on the Machining System," V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, I. Pavlenko eds., in *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-031-42778-7_15.
- [18] I. Je. Grycaj and A. M. Slipchuk, "Power Skiving jak suchasnyj sposib narizannja zubchastyh kolis ta osoblyvosti jogo modeljuvannja," *Avtomatyzacija vyrobnych procesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni. Ukrai'ns'kyj mizhvidomchyy naukovko-tehnichnyj zbirnyk*, No. 56, pp. 11–18, 2022, doi: 10.23939/istcipa2022.56.011.
- [19] V. Stupnytskyy, "Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 2 Issue 9, pp.1181–1186, 2013.

Features of using the over-skiving method for multi-pass cutting of external gears

I. Hrytsay¹ • A. Slipchuk¹

¹ Lviv Polytechnical National University, Lviv, Ukraine

Problem. There is a problem of determining the working parameters, including axial feed and cutting speed, as well as the helix angle of the teeth of the disc cutter and the tool spindle, the geometry of the cutting part, and the cutting depth per pass in Power skiving technology.

Objective. It is necessary to investigate the cutting process using the Power Skiving method for generating external gears over multiple passes and develop recommendations for selecting its optimal parameters.

Implementation methodology. The cutting force and its tangential component acting on the cutter are presented based on the fundamental principles of cutting theory, using the function of the cross-sectional area of the cut, the material strength limits of the workpiece for shear, and the intensity of plastic deformation of the chip. Calculations of the cut area are based on a graphoanalytical 3D model of the undeformed chip. The coefficient of shear intensity is determined depending on the thickness of the cut layers using the Deform 2D system. The study of the force factors is conducted in the initial stage for single-tooth cutting, considering the operation of a single tooth of the tool, and for multi-tooth cutting conditions, corresponding to real cutting and forming conditions in this method.

Results. Analysis of harmonic vibrations with different frequencies of the investigated forces indicates that, under average loading, the maximum principal component of the cutting force occurs on the third pass, and the tangential force on the tool axis occurs on the first pass. The variation in the frequency of these signals is explained by changes in the contact angle between the tool and the gear wheel in the machine engagement and the different number of teeth involved in cutting.

Conclusions. The obtained data allowed the development of a methodology for selecting rational parameters - axial feed values, the number of passes with different cutting depths to minimize time consumption, and achieve the desired accuracy of gears. It has been demonstrated that to reduce processing errors, it is most rational to decrease cutting force by increasing the number of passes, rather than reducing the axial feed.

Keywords: gear, power skiving, modelling, undeformed chips, number of passes, feed, depth of cut, cutting forces, machining error, rational parameters.