

<https://doi.org/10.23939/istcipa2023.57>.

СИМУЛЯЦІЯ ПРОЦЕСУ POWER SKIVING ДЛЯ НАРІЗАННЯ ВНУТРІШНЬОГО ЗУБЧАСТОГО КОЛЕСА З МОДЕЛЮВАННЯМ НЕДЕФОРМОВАНОЇ СТРУЖКИ

© Сліпчук А. М., 2023

Мета. Метою статті є створення 3D моделі недеформованої стружки, яка утворюється під час нарізання внутрішнього зубчастого вінця. Шляхом моделювання процесу Power Skiving необхідно дослідити вплив різних геометричних та технологічних параметрів на товщину та площу зрізу утвореної стружки. **Методика.** Застосовуючи симуляцію процесу зуботочіння, можна відтворити нарізання зубців колеса і точно визначити геометричні параметри, форму недеформованої стружки у кожен момент часу. У середовищі CAD системи було створено модель заготовки та різального інструменту і з максимально доступною точністю встановлено розташування тіл один відносно іншого. **Результати.** Після проведених симуляцій було створено графічні залежності зміни товщини та площі поперечних зрізів недеформованої стружки від модуля, подачі, позиції інструмента та його нахилу. Визначено характер впливу цих параметрів і на лека чашкового різця. **Наукова новизна та практичне значення.** Проведене дослідження дає змогу проаналізувати динаміку зміни геометричних розмірів недеформованої стружки, створеної від кожного лека різця, та визначити найбільш навантажені зони. В подальшому, знаючи повну інформацію про стружку, можна дослідити силові характеристики процесу різання на лезах, теплові потоки, розрахувати похибки оброблення та спрогнозувати зношування інструмента. Після повного аналізу усіх результатів дослідження процесу Power Skiving можна рекомендувати оптимальні режими роботи наявного обладнання для заданого зубчастого вінця, враховуючи кількість зубців, його модуля, матеріалу заготовки.

Ключові слова: зубчасте колесо, недеформована стружка, моделювання, геометричні параметри, кут нахилу, 3D модель, Power skiving.

Вступ

Процес Power skiving останнім десятиліттям щораз більше привертає до себе увагу науковців та виробників зубчастих коліс. Передусім високою продуктивністю та гнучкістю, що в сучасному світі є пріоритетним напрямом розвитку механообробки. Незважаючи на те, що цей метод зубообробки має столітню історію, його вважають технологією, що розвивається і має значний потенціал для подальшого удосконалення механізму різання та вибору відповідного різального інструменту для наявного обладнання [1].

Вперше цей метод описав та отримав патент Wilhelm von Pittler в 1910 році у Німеччині [2]. Проте застосування у промисловості він так і не знайшов протягом десятиліть, адже не витримував ніякої критики щодо точності та продуктивності. Відсутність необхідного інструменту та прецизійного обладнання, яке володіло б всіма необхідними характеристиками для його реалізації, не давало змоги застосовувати цей метод. І хоча спроби досліджень в цьому напрямі проводилися і далі в різних країнах (Німеччина, Японія), але лише після 2007 року вперше вдалося реалізувати ідею Power skiving на спеціально виготовленому верстаті.

Серед багатьох переваг Power skiving слід назвати такі:

1. Power skiving можна використовувати замість методу зубодовбання для нарізання внутрішнього та зовнішнього зубчастого колеса, але з більшою швидкістю та ефективністю.

2. Залежно від розміру зубчастого колеса, його параметрів та величини виробничої партії економічний ефект буде на стороні Power skiving або точно не дорожче, ніж виготовлення порівняно із протягуванням [1].

3. Для процесу Power skiving є характерним висока швидкість, а тому час нарізання буде найменшим. Крім того, зараз такий метод можна застосовувати не тільки на оброблювальних центрах, але і на токарних верстатах та спеціальних зубонарізних.

5. Такий метод є більш універсальним і дає змогу нарізати колеса не тільки прямозубі евольвентні, але й косозубі, шевронні, шліці.

Як і у кожного методу, різання у Power skiving є свої недоліки, які обмежують його застосування:

1. Оскільки існує лише один ряд ефективних ріжучих кромки, то період стійкості різців для Power skiving є меншим, ніж у різців протяжки.

2. Порівняно з протяжкою технічне обслуговування та підготовка технічне забезпечення точності різання зубчастого колеса є громіздкішим, оскільки багато факторів впливають на точність різання.

Отже, і до тепер тривають дослідження та випробування різних можливостей цього методу, а науковці усього світу намагаються удосконалити процес Power skiving завдяки підбору технологічних параметрів та зміни конструкції інструменту.

Аналіз літературних джерел

Навантаження на ріжучий інструмент є великим під час нарізання зубців колеса, оскільки одночасно працює декілька різців, та ще й безперервно. Отже, важко підвищити точність обробки, довговічність інструменту та шорсткість бічних поверхонь зубів без точного та ретельного дослідження методу Power skiving. Відносний рух ріжучого інструменту та поверхні заготовки є складним під час формування зуба шестерні в цьому процесі. У світовій практиці було проведено багато досліджень щодо кінематики процесу, обробки, точності отриманих зубчастих вінців та стійкості інструменту, підбираючи оптимальні умови роботи [3–6]. Автори [7] шляхом моделювання отримали залежності зміни площі різання від початку врізання і до виходу різика, товщини стружки та спробували проаналізувати вплив переднього кута на сили різання. Інші автори [8–12] намагалися прогнозувати геометрію зони різання та встановити точність обробки при різних технологічних параметрах, за допомогою тривимірного моделювання із застосуванням відповідного автоматизованого проектування.

Як відомо, на точність обробки впливає не тільки технологічні та кінематичні параметри процесу, але й геометрія кромки різця. Для прогнозування сил різання процесу Power skiving були запропоновані деякі методи моделювання [13,14]. Ці дослідження дали змогу спрогнозувати сили різання за моделлю Кінцле. Якщо відомі контури різця, задати глибину різання, швидкість подачі та швидкість різання, то можна спрогнозувати навантаження під різання.

У процесі Power skiving передній кут ріжучої кромки має досить велике від'ємне значенням, а це негативно впливає на процес різання. Він значно підвищує сили різання та змінюється залежно від положення та кута повороту ріжучого інструменту. Такі дослідження проводили автори [15,16], вони визначили залежності сили різання з урахуванням впливу переднього кута. Отримані результати були близькими до експериментально отриманих, але для цього авторам довелося ввести деякі коефіцієнти переднього кута [17].

Оскільки товщина недеформованої стружки та передній кут відрізняються для кожної ріжучої кромки, то виникають труднощі із визначенням таких коефіцієнтів. Інші автори запропонували математичний метод для визначення таких коефіцієнтів, але з постійним переднім кутом [18]. У цьому дослідженні запропоновано моделювання сил різання та методи ідентифікації коефіцієнтів сили різання за допомогою моделювання для Power skiving, де розглядається декілька ріжучих кромки. Вони вивчали вплив зміни напрямку різання, товщини стружки та підбирали

оптимальний передній кут, але результати виявилися складними. Спочатку було проведено моделювання та випробування різання інструменту для різання з кількома ріжучими кромками, шляхом зміни радіальної глибини різання та швидкості подачі. Далі коефіцієнти сили різання були оптимізовані таким чином, щоб похибка між прогнозованим і вимірним значенням усереднених за часом сил різання була мінімізована. Нарешті точність прогнозування сил різання за допомогою запропонованої імітаційної моделі була оцінена шляхом порівняння з вимірними значеннями.

Як видно із огляду сучасного стану дослідження, ПС більшість авторів використовують як основний інструмент дослідження моделювання цього процесу, але вдаються до певних спрощень. Складна кінематика процесу, важкість адекватного відтворення траєкторії руху різачка та заготовки в кожний момент часу ускладнюють розуміння процесу, а тому не правильно моделюють процес. Як наслідок, доводиться вводити наближені коефіцієнти, щоб теоретично розраховані результати збігалися з експериментально отриманими. У цій статті на основі математично розрахованого положення різця та зубчастого колеса встановлено параметри недеформованої стружки, яка утворюється під час нарізання внутрішнього зубчастого вінця. Проведено дослідження впливу подачі, модуля зубчастого колеса, положення різців у процесі різання, кута нахилу інструмента на параметри утвореної стружки під час нарізання внутрішнього зубчастого вінця

Проаналізувавши сучасну літературу, присвячену технології зубонарізання Power Skiving, метод розрахунку параметрів різання, таких як форма ріжучої кромки, передній кут різання, кут нахилу, сили різання та товщина стружки, все ще не зрозуміло, яким чином вони взаємопов'язані між собою.

Кінематика процесу Power Skiving

Power Skiving – це процес безперервного зуботочіння, під час якого заготовка та різальний інструмент (різак) встановлюють під певним кутом один до одного. Тобто різальний інструмент або заготовка повертається під кут 20° – 30° , як правило, це різак, а інший елемент залишається у вертикальному чи горизонтальному положенні. Заготовка та різак обертаються синхронно, створюючи швидкість ковзання, а різак або заготовка подаються вздовж осі обертання елемента, тобто в напрямку сліду зуба (рис. 1). Розглянемо випадок кінематичної схеми, яка зображена на рис. 1. Швидкість різання – це векторна сума швидкості різачка, який дотично направлений до кола обертання різця, та допоміжна швидкість, яка направлена вздовж осі обертання колеса. Обробляючі центри CNC повинні мати два обертаючі шпинделі (для заготовки та інструменту) з високим ступенем синхронізації та володіти великою жорсткістю.

Цю концепцію було реалізовано за допомогою CAD системи. Для точного відтворення процесу Power Skiving було розроблено імітаційну модель, яка відтворює переміщення інструменту, де прийняті такі позначення:

- ✦ – кутова швидкість заготовки зубчастого колеса навколо своєї осі;
- ✦ – кутова швидкість інструмента навколо своєї осі;
- S_i – подача інструмента вздовж осі обертання заготовки зубчастого колеса;
- ✦ – кут нахилу інструмента відносно заготовки. Як правило, його величина коливається в межах від 20° до 30° .

Усю траєкторію переміщення різачка під час обробки колеса за один оберт інструмента, від моменту початку врізання чашкового різця в заготовку до його виходу із "зачеплення", було розділено на 11 рівних положень (див. рис. 2). Іншими словами, ми розділили шлях на 5 етапів перед досягненням перпендикуляра (позиції -5, -4, -3, -2, -1), при цьому позиція 0 відповідає положенню, коли інструмент перебуває перпендикулярно до заготовки, а решта позицій 1, 2, 3, 4, 5 утворюють другу половину шляху, яка відповідає виходу різця із заготовки. Кожне наступне положення віддаляло його від перпендикуляра.

За допомогою системи комп'ютерно-автоматизованого проектування (САПР) було створено твердотільні моделі, які беруть участь у процесі "заготовка-різак". У такий спосіб можна досягнути

досить високої точності при відтворенні процесу різання. Для всіх положень встановлено розташування різального інструменту та зубчастого колеса з проміжними зрізами. Взаємне розташування в кожний момент часу таких двох моделей відіграє фундаментальну роль у процесі проектування перерізу зрізу стружки. Симуляція дає змогу наочно відтворити процес різання Power Skiving та полегшити розуміння усієї кінематики взаємопов'язаних переміщень інструменту та заготовки.

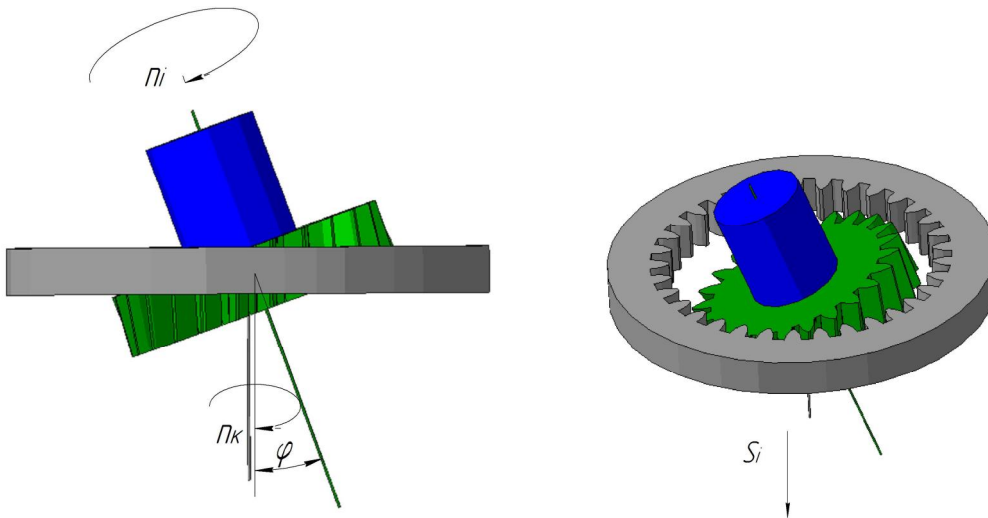


Рис. 1 Схематичне розташування інструменту та заготовки при обробці Power Skiving
 Fig. 1. Schematic arrangement of tool and workpiece during Power Skiving

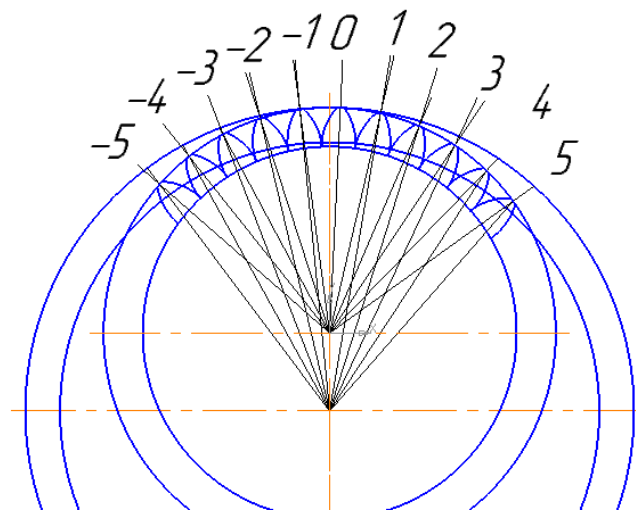


Рис. 2. Розподілення шляху чашкового різця від врізання до його виходу на позиції
 Fig. 2. Path distribution of the cutter from tie-in to its release into position

Кількість вибраних положень впливає на кутовий крок між ними і для нашого випадку становить 6,5 градусів (див. рис. 2). Крім того, це впливатиме на точність результатів тривимірного моделювання недеформованої стружки. Прийнята велика кількість фіксованих розташувань ускладнить розрахунки і процес моделювання. І навпаки, занадто мала кількість призведе до втрати точності процесу різання і надто великих похибок.

У процесі моделювання процесу різання внутрішнього зубчастого вінця є свої особливості. Як видно на рис. 3, інструмент 1 нахилений під певним кутом ψ , який обмежується взаємним

розташуванням моделей. Під час нарізання вінця та великих значеннях кута нахилу інструмента може відбутися удар пристосування на завершальних етапах різання, тому такий кут, як правило, не перевищує 30° . З іншої сторони збільшення цього кута дає змогу зменшити сили різання [19], тому компромісним значенням на практиці між величиною сили та геометрією розташування при нарізанні приймають кут 20° . Враховуючи особливості нарізання внутрішнього вінця зубчастого колеса, кут нахилу ми не можемо змінювати у великому діапазоні. Враховуючи те, що кут нахилу безпосередньо впливає на швидкість різання ($\mathcal{V}_{\text{різ}} = \mathcal{V}_{\text{оберт}} \cdot \sin \varphi$ то зі зростанням кута швидкість різання зростає). Технологи намагаються його збільшити, але лише тільки до певного значення. Причиною обмеження є велика загроза того, що пристосування верстату вдариться із заготовкою. До того ж при зростанні кута втрачається жорсткість верстату, що негативно впливає на кінцеву форму та якість поверхні зубця. Малі кути не дають достатньої швидкості різання (доводиться збільшувати частоту обертання, що для багатьох верстатів є проблемою). Тому для кожного випадку необхідно прорахувати величину цього параметра та налаштувати обладнання, врахувавши його можливості.

У цьому дослідженні розглянуто положення в певний момент часу і фіксуються у відповідному розташуванні. Прийmemo такі позначення:

$V_{\text{різ}}$ – швидкість різання;

$V_{\text{под}}$ – швидкість переміщення інструмента вздовж осі обертання колеса.

Для реалізації процесу різання нам потрібно відтворити траєкторію руху оберту інструмента та заготовки, і як наслідок отримати перехідну поверхню після зрізу чашкового різця на попередньому проході. Наклавши проєкції різця на i -му оберті з перехідною поверхнею, утвореною на $i-1$ оберті, можна отримати проєкції стружки в кожному положенні. Склавши всі проєкції стружки по вказаній траєкторії переміщення, можна отримати 3D модель, що є достатнім результатом для створення.

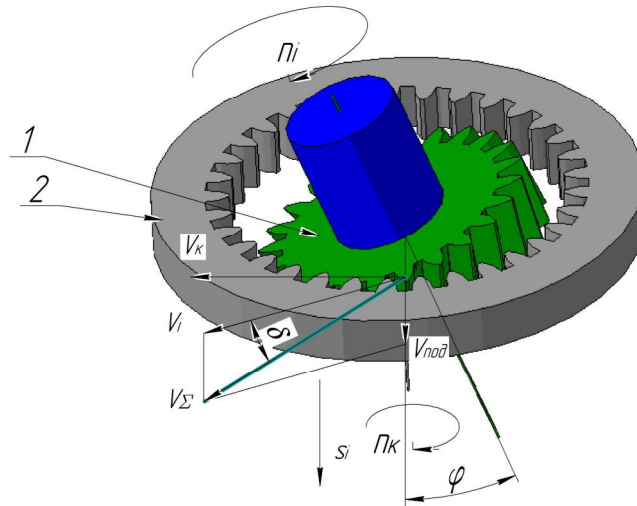


Рис. 3. Кінематична схема методу Power Skiving для внутрішнього вінця
Fig. 3. Kinematic diagram of the Power Skiving method for the inner gear

Фундаментальні дослідження

Коли зубчасті колеса нарізаються методом зубодовбання, то такий процес відбувається при низьких швидкостях різання і стружка утворюється досить дрібна. Для процесу ПС характерним є висока швидкість (вона може сягати до 300м/хв), при цьому утворюється досить довга стружка за один контакт [18]. Power Skiving має високу ефективність різання, але сили різання, які виникають на ріжучих кромках різця, зазвичай більші, ніж для інших методів нарізання зубів, крім того, передній кут у багатьох випадках є від'ємний.

Ось тому різальний інструмент та верстати, які використовують для Power Skiving, повинні бути достатньо жорсткими, щоб витримувати таку силу різання. Отже, для практичного використання зуботочіння необхідно звести до мінімуму похибки різання.

Для своїх досліджень ми визначимо такі початкові дані: колесо евольвентне прямозубе із внутрішнім вінцем; модуль $m=2,5$ мм; кількість зубців колеса $Z_g = 33$, кількість зубців різця $Z_t = 24$; подача $f_a = 0,75$ мм/об.; різання на повну висоту профіля; матеріал пластин різця – твердий титано-танталовий сплав; швидкість різання – 190 м/хв; кут нахилу інструменту ν розглянемо 20° .

Характеристики цих параметрів складні. Тобто оптимальні значення цих параметрів не можуть бути легко визначені, оскільки між ними існують компроміси та складні зв'язки. Якщо встановити великий кут нахилу інструмента, то більша швидкість різання досягається при меншій швидкості обертання, але може виникнути удар між тримачем різця та робочою кромкою колеса. Крім того, радіальна жорсткість шпинделя інструмента значно менша, ніж осьова, тому при більшому куту нахилу ми отримаємо більші вібрації у процесі різання і меншу точність та гіршу шорсткість нарізаної поверхні зуба.

Це також збільшує довжину подачі, а в результаті і час різання на кожний прохід. Виникають також труднощі із величиною заднього кута, він також зростає зі збільшенням кута нахилу, а передній кут зменшується та може стати від'ємним. Все це погіршує фізичний процес різання і може негативно впливати на ефективність та точність різання.

Позиціонування профілю та створення перехідної поверхні є початком моделювання. Спроекуємо вигляд на площину у вигляді 2D проєкції, для зручності візуального сприйняття. Представлена 3D модель розташування інструменту та заготовки (рис. 3) дає змогу зімітувати процес Power Skiving.

Для прикладу розглянемо третє положення різця (рис. 2). Перехідна поверхня будується таким чином: профіль різця розташуємо у положенні для i -го оберта різача, $i+1$ оберт різача буде проходити за таким самим законом переміщення, але зміститься вниз на $0,75$ мм по осі колеса (величина подачі). На цьому оберті різець залишить зріз, який зміщений на деякий кут $\Delta\varphi_{різ}$ вправо (зелений профіль) (рис. 4). Оскільки колесо обертається з такою самою лінійною швидкістю в точці зрізу, то відповідно повернеться відносно колеса вліво на $\Delta\varphi_{кол}$. Різниця профіля різця (зелений профіль) та профіль перехідної поверхні колеса, який утворений на i -му оберті, дасть нам загальний зріз стружки (червона зона) в цій позиції (рис. 4).

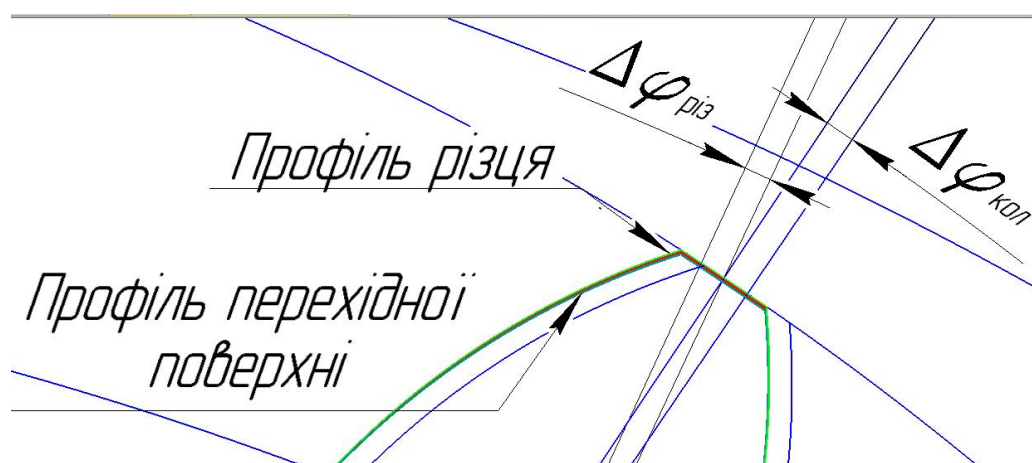


Рис. 4. Розташування профіля різця та перехідної поверхні у 3 положенні
Fig. 4. Position of the cutter profile and transition surface in position 3

Отриманий алгоритм відтворення процесу створення зрізів стружки в кожному положенні дасть змогу провести аналогічні розрахунки для решти та створити усі зрізи.

У масовому та великосерійному виробництві зубчастих коліс, які нарізаються таким методом, потрібно досягнути стабільної високої точності зубчастого вінця, а також знизити вартість нарізання зубців. Для того, щоб ефективніше застосовувати Power Skiving, на підприємстві необхідно дослідити вплив різних технологічних параметрів на кінцеву якість зубчастого вінця. Першим кроком для такого вивчення необхідно розглянути кінематику цього складного процесу та встановити параметри недеформованої стружки. Це дасть змогу в подальшому визначити силові, теплові, вібраційні параметри процесу і як результат визначити характер впливу різних чинників на точність зубчастого колеса при найбільш ефективному використанні наявного обладнання. Сьогодні тривалість підбору та виготовлення відповідного інструменту для обробки зубчастого колеса може тривати кілька місяців, що свідчить про недосконалий та не до кінця вивчений механізм зубонарізання Power skiving.

Побудова 3D моделі стружки

Для того, щоб сформувати 3D моделі стружки, необхідно розташувати проміжні площини. Кожна така площина буде відповідати позиції чашкового різця. Ці площини розташовують за траєкторією проходження чашкового різця. На кожен таку площину буде накладатися свій профіль зрізу стружки (рис. 5).

Склавши усі зрізи відповідно для кожного положення і для кожної площини, можна отримати скелет моделі стружки. Далі за допомогою відповідної операції в САПР середовищі за допомогою послідовного вказання усіх зрізів програма відтворює 3D модель (рис. 6).

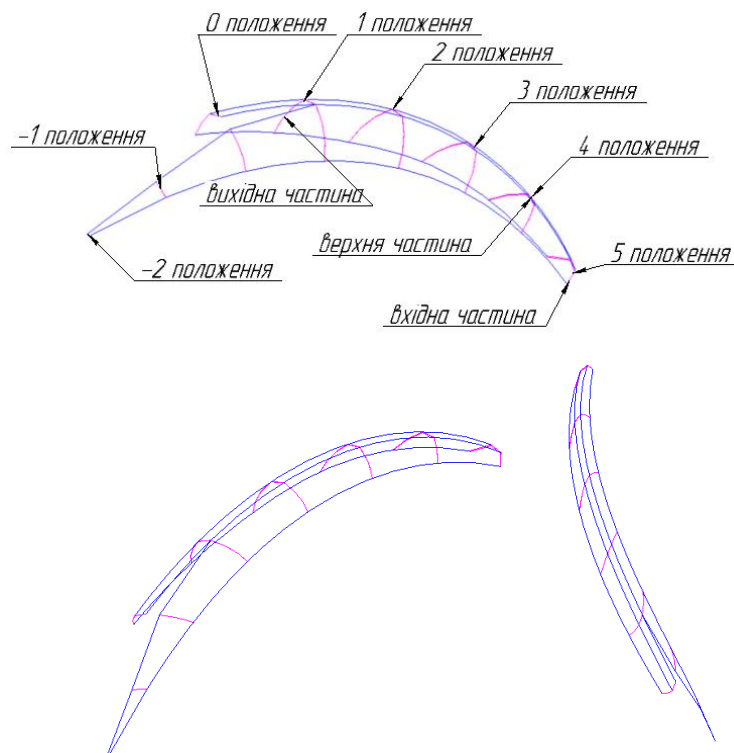


Рис. 5. Розташування зрізів у процесі нарізання внутрішніх зубців методом Power Skiving
Fig. 5. Cut arrangement for cutting internal teeth using the Power Skiving method

Траєкторія руху чашкового різця представляє собою дугу кола, де радіусом є радіус ріжучого інструменту. Побудову проводили перпендикулярно до ріжучої кромки різця через 11 положень, які було запропоновано. Слід зазначити, що початок формування стружки не збігається з початком перекриття інструмента та заготовки, адже на позиції -5 та -4 різання не відбувається. І лише з -2 положення починає формуватися стружка і до виходу різця із "зачеплення" (5 положення).

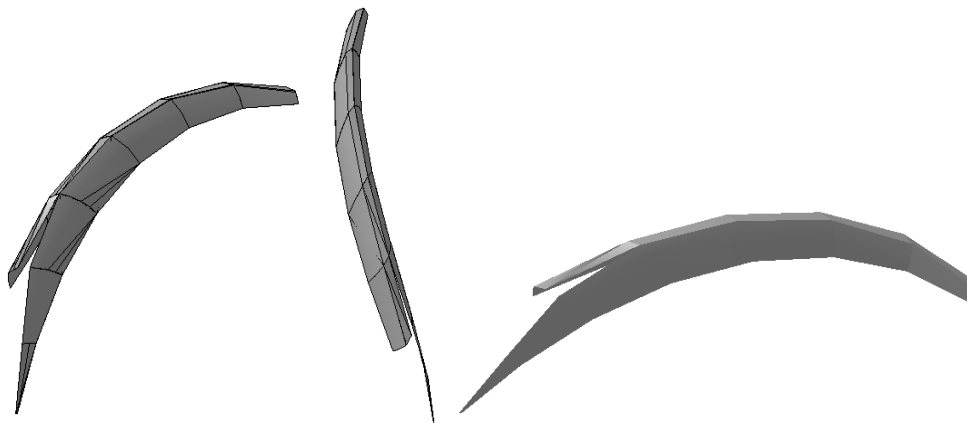


Рис. 6. 3D модель недеформованої стружки
 Fig. 6. 3D model of an undeformed chip

Результати симуляції

Симуляція була проведена для різання внутрішнього зубчастого вінця з описаними раніше вхідними даними:

- модуль $m=2,5$ мм;
- кількість зубців колеса $Z_g = 33$;
- кількість зубців різця $Z_t = 24$;
- подача $f_a = 0,75$ мм/об.;
- різання на повну висоту профіля;
- матеріал пластин різця – твердий титано-танталовий сплав;
- швидкість різання – 190 м/хв;
- кут нахилу інструменту $\alpha = 20^0$.

Числові значення результатів наведено у табл. 1 або у графічному вигляді на рис. 7.

Таблиця 1

Товщина та площа зрізів недеформованої стружки для різних положень різця

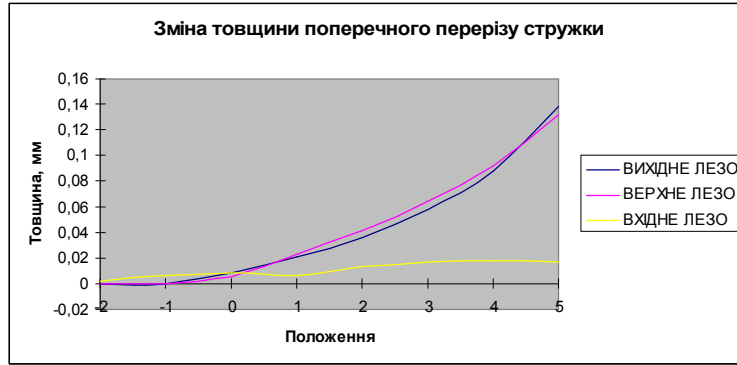
Table 1

Thickness and sliced area of undeformed chips for different cutter positions

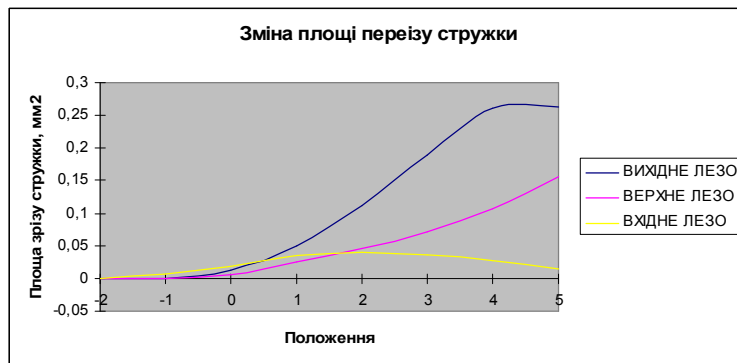
		Положення різця							
		-2	-1	0	1	2	3	4	5
Вхідне лезо	Товщина, мм	0,002	0,007	0,008	0,007	0,013	0,017	0,018	0,017
	Площа, мм ²	0	0,007	0,019	0,035	0,041	0,037	0,027	0,014
Вершина леза	Товщина, мм	0	0,000	0,006	0,023	0,042	0,064	0,092	0,132
	Площа, мм ²	0	0,000	0,006	0,025	0,046	0,072	0,106	0,157
Вихідне лезо	Товщина, мм	0	0,000	0,008	0,021	0,036	0,058	0,088	0,138
	Площа, мм ²	0	0,000	0,012	0,050	0,112	0,189	0,261	0,263

*Положення -5, -4, -3 не наведено в табл. 1, тому що там немає процесу різання.

Дослідження були проведені і для різних технологічних та геометричних параметрів. Зображено залежності зміни товщини та площі поперечного перерізу стружки від модуля нарізаних зубців (рис. 8). Отримано графічну залежність для різних кутів нахилу, який змінювався від 20^0 до 35^0 , що відповідає практичному застосуванню, зображено на рис. 9 для кожного положення. На рис. 10 показано вплив подачі інструмента на значення товщини та площі зрізів стружки, коли чашковий різець розташований у 3 положенні.

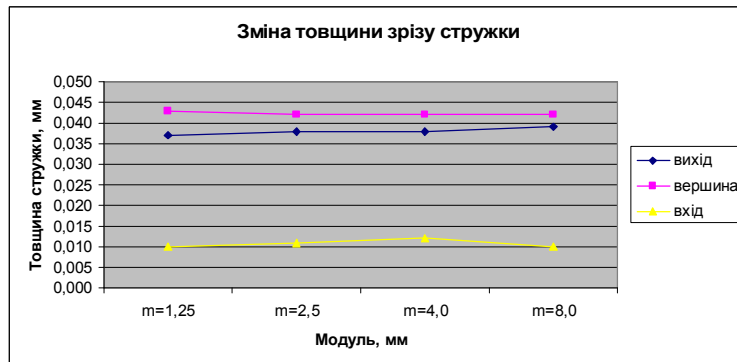


а

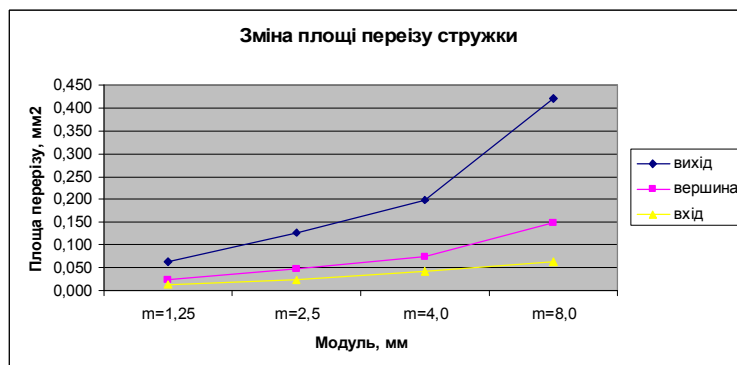


б

Рис. 7. Зміна товщини (а) та площі (б) зрізів недеформованої стружки для різних положень різця
 Fig. 7. Variation of thickness (a) and area (b) of undeformed chip sections for different cutter positions



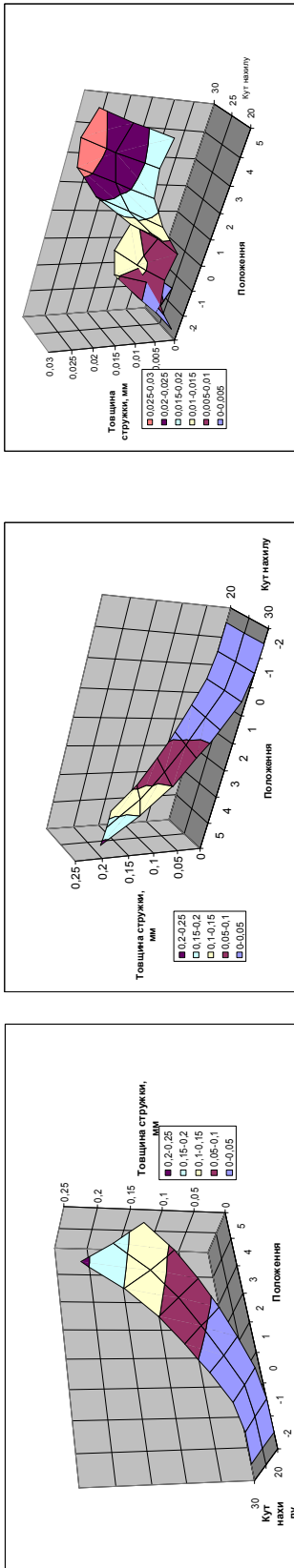
а



б

Рис. 8. Зміна товщини (а) та площі (б) зрізів недеформованої стружки для різних модулів зубчастого колеса
 Fig. 8. Variation of thickness (a) and area (b) of undeformed chip sections for different gear modules

Зміна товщини стружки в залежності від кута та положення



ВІХІДНЕ ЛІЗО

ВЕРХНЕ ЛІЗО

ВІХІДНЕ ЛІЗО

Рис. 9. Зміна товщини та площі зрізів недеформованої стружки для різних кутів нахилу інструмента
Fig. 9. Variation of the thickness and cut area of undeformed chips at different shaft angles

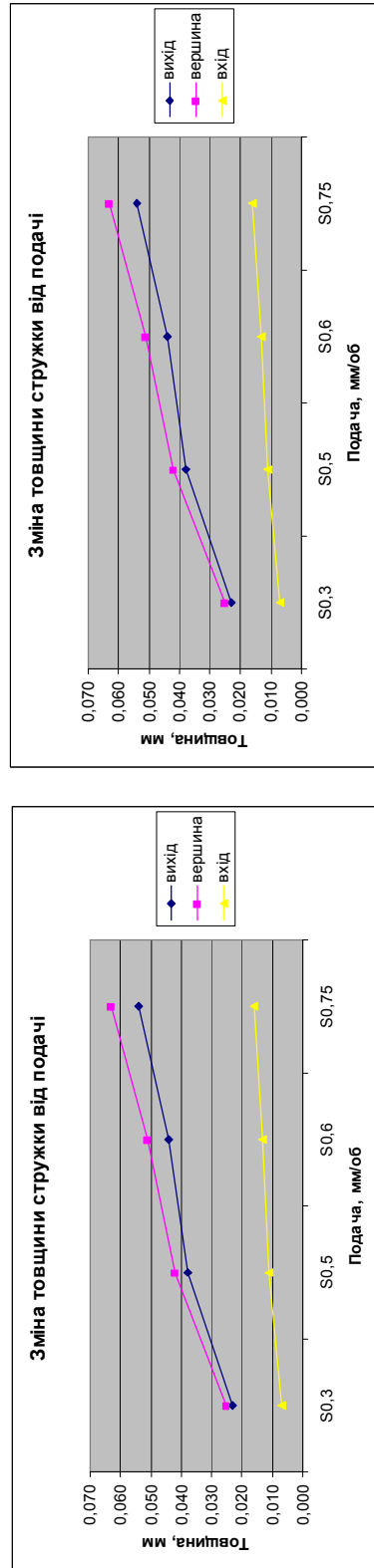


Рис. 10. Зміна товщини та площі зрізів недеформованої стружки для різних подач інструмента
Fig. 10. Variation of the thickness and cut area of undeformed chips for different tool feeds

Висновки

Проаналізувавши усі графічні зображення (рис. 8–11), можна зробити такі висновки:

- товщина стружки на вершинному лезі чашкового різця, як правило, є найбільшою серед інших лез різця (за всіх однакових умов роботи інструмента);
- а от площа поперечного перерізу стружки найбільша на вихідному лезі. Це можна пояснити тим, що хоч і товщина більша на вершинному лезі, проте завдяки довжині площа припадає на вихідне лезо. Вхідне лезо майже не ріже, на нього припадає і найменша площа, і найменша товщина;
- якщо проаналізувати характер зміни товщини та площі зрізу стружки (рис. 7), то можна стверджувати, що їх величина збільшується від положення -2 до 5, де вже на виході різального інструмента вони будуть максимальними. Процес різання у всіх випадках починається від вхідного леза, а далі під час наближення до вертикалі починає працювати верхнє та вихідне леза. Після проходження перпендикуляра процес різання здійснюється усіма лезами: вхідне, вихідне та верхнє, тобто після кількох перших поворотних положень інструмент повністю задіяний у різанні. Ближче до завершення процесу різання товщина та площі зрізів від всіх лез зростає (найменшого впливу від положення різця зазнає вхідне лезо);
- при розгляді впливу подачі інструмента (рис. 10) можна підтвердити очікування, що при зростанні подачі від 0,3 до 0,75мм/об товщина, як і площа, будуть зростати для кожного з лез. Якщо для вхідного леза такий вплив не суттєвий (різниця товщини становить до 0,04 мм), то для верхнього і вихідного леза спостерігається лінійна залежність зростання;
- кут нахилу інструмента також впливає на геометрію стружки. Так зі зростанням кута з 20 до 30 товщина та площа зрізу стружки зростає, особливо це помітно на завершальних положеннях чашкового різця (рис. 9);
- найцікавіші результати були отримані для графічних залежностей зміни товщини стружки від модуля (рис. 8 а). Виявляється, величина модуля не впливає на товщину недеформованої стружки. Для всіх модулів товщина – це константа. Площа зрізу буде зростати пропорційно до величини модуля, але лише завдяки геометричним параметрам зубчастого колеса (рис. 8б).

Теоретично отримані результати узгоджуються з експериментально отриманими іншими авторів [1], які проводили на відповідних верстатах.

Результати моделювання дають змогу отримати первинну інформацію про процес різання Power skiving та використовувати її для подальших досліджень. Інформація про вплив різних технологічних та геометричних параметрів на розмір недеформованої стружки може удосконалити цей процес зубонарізання, а за певних умов підібрати оптимальніші режими різання. Отримана інформація дасть змогу в подальшому фундаментально дослідити сили різання, динамічні процеси та визначити значення температур, які виникають під час різання .

Список літератури

1. [1] Nagata E., Tachikawa T., Nakahara Y., Kurita N., Nakamura M., Iba D., Moriwaki I. Gear skiving for mass production. In The Proceedings of the JSME international conference on motion and power transmissions. – 2017. P. 02-13. The Japan Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1299/jsmeimpt.2017.02-13>
2. [2] Pittler W. V. Verfahren zum Schneiden von Zahnrädern mittels eines zahnradartigen, an den Stirnflächen der Zähne mit Schneidkanten versehenen Schneidwerkzeugs. Deutsche Patentschrift, (243514). 1910.
3. 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 №2. P. 676-696. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.001>
4. 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. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.052>
5. Bergs T., Georgoussis A., Löpenhaus C. Development of a numerical simulation method for gear skiving. Procedia CIRP, -2020. Vol. 88, P. 352-357. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.061>
6. Spath D., Hühsam A. Skiving for high-performance machining of periodic structures. CIRP Annals, - 2002. Vol. 51(1), P.91-94. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61473-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61473-5)
7. Vargas B., Schulze V. Three-dimensional modeling of gear skiving kinematics for comprehensive process design in practical applications. CIRP Annals, 2021. Vol. 70(1), P.99-102. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.04.075>

8. Janßen, C., Brimmers, J., & Bergs, T. Validation of the plane-based penetration calculation for gear skiving. *Procedia CIRP*, 2021. Vol. 99, P.220-225. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.034>
9. 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(1), P.109-112. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.085>
10. Antoniadis A. (2012). Gear skiving–CAD simulation approach. *Computer-Aided Design*, Vol. 44(7), P.611-616. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2012.02.003>
11. Inui M., Huang Y., Onozuka H., Umezu N. (2020). Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation. *Procedia Manufacturing*, 48, 520-527. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.078>
12. Antoniadis A., Vidakis N., Bilalis N. A simulation model of gear skiving. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004. Vol.146(2), P.213-220. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.019>
13. Vargas, B., Zapf, M., Klose, J., Zanger, F., & Schulze, V. Numerical modelling of cutting forces in gear skiving. *Procedia CIRP*, 2019. Vol. 82, P.455-460. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.039>
14. Guo Z., Mao S. M., Huyan L., Duan D. S. Research and improvement of the cutting performance of skiving tool. *Mechanism and Machine Theory*.2018.Vol. 120.P.302-313. doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.08.004
15. Li X. Q., Li J., Wang P., Zou Y. Calculation and Analysis of the Interference Amount in Gear Slicing. *Applied Mechanics and Materials*.2014.Vol.687. P.7-12.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.687-691.7
16. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.022>
17. 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.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.03.021
18. Guo Z., Mao S. M., Li X. E., Ren Z. Y. (2016). Research on the theoretical tooth profile errors of gears machined by skiving. *Mechanism and machine theory*, 97, P.1-11. doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.11.001
19. Guo, E., Hong, R., Huang, X., & Fang, C. Research on the cutting mechanism of cylindrical gear power skiving. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, - 2015. Vol. 79, P.541-550. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6816-9>
20. [20]. Hrytsay, I., Stupnytskyy, V., Slipchuk A. Simulation of a Power Skiving Gear Cutting Process. *Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering*, 2023. Vol. 73(1), P.103-116. DOI:10.2478/scjme-2023-0008
21. [21]. Грицай І.С., Сліпчук А. М. Power Skiving як сучасний спосіб нарізання зубчастих коліс та особливості його моделювання. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Український міжвідомчий науково-технічний збірник. Львів, 2022, №56 с. 11-18.* [https://doi.org /DOI 10.23939/istcipa2022.56.011](https://doi.org/DOI%2010.23939/istcipa2022.56.011)

Andrii Slipchuk

Lviv Polytechnical National University

SIMULATION OF THE POWER SKIVING PROCESS FOR CUTTING AN INTERNAL GEAR WITH MODELLING OF UNDEFORMED CHIPS

Aim. The aim of this paper is to create a 3D model of the undeformed chips produced during the cutting of an internal gear ring. By modelling the power skiving process, it is necessary to investigate the influence of various geometric and technological parameters on the thickness and cut area of the chips produced. **Method.** By simulating the gear turning process, it is possible to reproduce the cutting of the gear teeth and accurately determine the geometric parameters and the shape of the undeformed chip at each moment. A model of the workpiece and cutting tool was created in the CAD system environment and the position of the bodies relative to each other was determined with the highest possible accuracy. **Results.** Following the simulations, graphical dependencies of the change in thickness and area of the undeformed chip cross-sections on module, feed, tool position and tilt were produced. The nature of the influence of these parameters on the cup cutter blades was also determined. **The scientific novelty and practical significance.** The study makes it possible to analyse the dynamics of changes in the geometric dimensions of undeformed chips produced by each cutter blade and to identify the most stressed zones. Furthermore, knowing the complete chip information, it is possible to study the force characteristics of the cutting process on the blades, heat flows, calculate machining errors and predict tool wear. After a complete analysis of all the results of the Power Skiving process study, it is possible to recommend the optimum operating modes of the available equipment for a given gear, taking into account the number of teeth, their module and the workpiece material.

Key words: gear, undeformed chip, modelling, geometrical parameters, shaft angle, 3D model, Power skiving.

References

1. [1] Nagata E., Tachikawa T., Nakahara Y., Kurita N., Nakamura M., Iba D., Moriwaki I. Gear skiving for mass production. In The Proceedings of the JSME international conference on motion and power transmissions. – 2017. P. 02-13. The Japan Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1299/jsmeimpt.2017.02-13>
2. [2] Pittler W. V. Verfahren zum Schneiden von Zahnrädern mittels eines zahnradartigen, an den Stirnflächen der Zähne mit Schneidkanten versehenen Schneidwerkzeugs. Deutsche Patentschrift, (243514). 1910.
3. 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 №2. P. 676-696. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.001>
4. 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. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.052>
5. Bergs T., Georgoussis A., Löpenhaus C. Development of a numerical simulation method for gear skiving. Procedia CIRP, -2020. Vol. 88, P. 352-357. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.061>
6. Spath D., Hühsam A. Skiving for high-performance machining of periodic structures. CIRP Annals, - 2002. Vol. 51(1), P.91-94. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61473-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61473-5)
7. Vargas B., Schulze V. Three-dimensional modeling of gear skiving kinematics for comprehensive process design in practical applications. CIRP Annals, 2021. Vol. 70(1), P.99-102. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.04.075>
8. Janßen, C., Brimmers, J., & Bergs, T. Validation of the plane-based penetration calculation for gear skiving. Procedia CIRP, 2021. Vol. 99, P.220-225. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.034>
9. 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(1), P.109-112. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.085>
10. Antoniadis A. (2012). Gear skiving–CAD simulation approach. Computer-Aided Design, Vol. 44(7), P.611-616. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2012.02.003>
11. Inui M., Huang Y., Onozuka H., Umezu N. (2020). Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation. Procedia Manufacturing, 48, 520-527. doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.078
12. Antoniadis A., Vidakis N., Bilalis N. A simulation model of gear skiving. Journal of Materials Processing Technology, 2004. Vol.146(2), P.213-220. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.10.019>
13. Vargas, B., Zapf, M., Klose, J., Zanger, F., & Schulze, V. Numerical modelling of cutting forces in gear skiving. Procedia CIRP, 2019. Vol. 82, P.455-460. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.039>
14. Guo Z., Mao S. M., Huyan L., Duan D. S. Research and improvement of the cutting performance of skiving tool. Mechanism and Machine Theory, 2018. Vol. 120, P.302-313
15. doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.08.004
16. Li X. Q., Li J., Wang P., Zou Y. Calculation and Analysis of the Interference Amount in Gear Slicing. Applied Mechanics and Materials, -2014. Vol. 687, P.7-12.
17. doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.687-691.7
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. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.022>
19. 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.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.03.021
20. Guo Z., Mao S. M., Li X. E., Ren Z. Y. (2016). Research on the theoretical tooth profile errors of gears machined by skiving. Mechanism and machine theory, 97, P.1-11. doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2015.11.001
21. Guo, E., Hong, R., Huang, X., & Fang, C. Research on the cutting mechanism of cylindrical gear power skiving. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, - 2015. Vol. 79, P.541-550. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6816-9>
22. Hrytsay, I., Stupnytskyy, V., Slipchuk A. Simulation of a Power Skiving Gear Cutting Process. Strojnický časopis-Journal of Mechanical Engineering, 2023. Vol. 73(1), P.103-116. DOI:10.2478/scjme-2023-0008
23. Hrytsay I.YE., Slipchuk A. M. [Power Skiving as a modern method of gear cutting and features of its modeling]. Avtomatyzatsiya vyrobnychkh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni. Ukrayinskyy mizhvidomchyy naukovy-tekhnichnyy zbirnyk. [Automation of production processes in mechanical engineering and instrument engineering. Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection.] Lviv 2022, №56, p. 11-18. [in Ukrainian]. [doi.org /DOI 10.23939/istcipa2022.56.011](https://doi.org/10.23939/istcipa2022.56.011)