

УДК 662.24.051.55

doi:10.20998/2413-4295.2023.03.04

МОДЕЛЮВАННЯ НЕДЕФОРМОВАНОЇ СТРУЖКИ, УТВОРЕНОЇ ПІД ЧАС НАРІЗАННЯ ВНУТРІШНЬОГО ЗУБЧАСТОГО ВІНЦЯ МЕТОДОМ "POWER SKIVING"

А. М. СЛІПЧУК

Кафедра робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА
*e-mail: andsl@ukr.net

АНОТАЦІЯ Сьогодні на провідних світових підприємствах, які займаються виготовленням зубчастих коліс, все частіше можна зустріти нарізання зубчастого вінця на колесі методом Power Skiving. Цей сучасний спосіб дозволяє обробляти колеса із зовнішнім та внутрішнім вінцем, як прямозубого так і косозубого, а також нарізати шліци на валах чи втулках. Така технологія поєднує в собі елементи обточування та фрезерування, забезпечуючи дуже короткий час виготовлення. Проте, з кожним роком такий метод все більше удосконалюється, хоча по своїй кінематиці є дуже складним та потребує прецизійних розрахунків. Визначення точного положення інструменту та заготовки в кожний момент часу потрібні для синхронізації рухів при нарізанні. Показано принцип побудови недеформованої стружки при нарізанні внутрішнього прямозубого вінця методом Power Skiving. Отримано параметри перерізів зрізів стружки, яка утворилася під час роботи різального інструменту. Це служить основою для моделювання та розрахунку величин сил різання, тертя, необхідної роботи, яка потрібна для усунення припуску, теплових потоків, які виникають під час різання, інтенсивності нагрівання інструменту, температури та зношування інструменту, моделювання коливань і динамічних процесів. Повна інформація про розміри та форми зрізаних шарів, їх величини у різних ділянках зубця у кожний момент часу нарізання, а також встановлені закономірності їх неперервної циклічної зміни за оберт різального інструмента, служать основою для всебічного відтворення та опису різноманітних взаємопов'язаних і взаємозалежних деформаційних і контактних процесів, які відбуваються під час процесу нарізання зубчастого вінця. Для такої задачі розроблено комплексну систему графоаналітичного, математичного і комп'ютерного моделювання цього процесу. Враховано його кінематику і достовірно відтворено закономірності процесів різання-формування. Представлено застосування графоаналітичної методики побудови перерізів недеформованої стружки, яка дала можливість встановити її геометрію та основні характеристики, а також отримати 3D модель. Отримано адекватні моделі стружкоутворення та проаналізовано кількісні оцінки параметрів зрізів стружки, яка утворюється при Power Skiving.

Ключові слова: різак; моделювання; недеформована стружка; технологія Power Skiving; переріз зрізу.

SIMULATION OF UNDEFORMED CHIP FORMED DURING CUTTING FOR INTERNAL CROWN TOOTH BY THE "POWER SKIVING" METHOD

A. SLIPCHUK

Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, Lviv Polytechnic National University, L'viv, UKRAINE

ABSTRACT Today, the world's leading enterprises engaged in the manufacture of gear wheels increasingly use the Power Skiving method of cutting the gear crown on the wheel. This modern method allows you to process wheels with an external and internal crown, both spur and helical, as well as cut slots on shafts or hubs. This technology combines elements of turning and milling and ensures a very short production time. However, every year this method is increasingly improved, and in terms of its kinematics it is very complex and requires precise calculations. Determining the exact position of the tool and the workpiece at each moment of time is necessary for synchronizing movements during cutting. The principle of building an undeformed chip when cutting an internal straight-tooth crown by the Power Skiving method is shown. Section parameters for chip sections are obtained. They are the basis for modeling and calculating the values of cutting forces, friction, the necessary work that is needed to eliminate the allowance, heat flows that occur during cutting, the intensity of tool heating, temperature and wear of the tool, simulation of oscillations and dynamic processes. Complete information about the size and shape of the sheared layers, their size in different sections of the tooth at each moment of the cutting time is necessary for the description of various interrelated and interdependent deformation and contact processes. The established regularities of their continuous cyclical change during the revolution of the cutting tool are required for a comprehensive reproduction of the processes that occur during the cutting process of the toothed crown. A complex system of grapho-analytical, mathematical and computer modeling of this process has been developed for such a task. Kinematics is taken into account and the patterns of cutting-forming processes are reliably reproduced. The application of the grapho-analytical method of constructing sections for an undeformed chip is presented, which made it possible to establish its geometry and main characteristics, as well as to obtain a 3D model. Adequate models of chip formation are obtained. Quantitative estimates of parameters for slices in the process of Power Skiving are analyzed.

Keywords: cutter; modeling; undeformed chip; Power Skiving technology; section of slice.

Вступ

За останні десять років все більшого застосування у виготовленні зубчастих коліс набуває

метод нарізання зубчастого вінця на колесі - Power Skiving. Цей сучасний спосіб дозволяє обробляти прямозубі та косозубі колеса із зовнішнім та внутрішнім вінцем, а також нарізати шліци на валах

чи втулках. Незважаючи на те, що Power Skiving був вперше описаний ще на початку ХХ століття, процес довго не знаходив застосування і залишався в тіні інших методів нарізання через високі вимоги до жорсткості верстатів, необхідності високих ступенів синхронізації обертальних рухів заготовки та ріжучого інструменту, тяжких умов роботи різачка. На той час не було ні матеріалів, ні технічної можливості виготовити відповідний різальний інструмент, який був би здатний витримувати підвищену температуру. Обладнання мало низьку точність та велике биття, яке виникає під час процесу різання, під час обертання. Все це відкинуло застосування даного методу. Лише зараз, з розвитком верстатобудування та отримання належного інструменту, при сучасному програмному забезпеченні, Power Skiving застосовується на сучасних підприємствах всього світу, хоча поки в Україні звести його можна вкрай рідко.

Переваги даного методу є настільки очевидними, що його поширення серед виробників зубчастих коліс все частіше зустрічається на підприємствах. Висока швидкість різання, а вона може досягати до 300 м/хв., дає можливість говорити про значний прогрес у даній галузі промисловості. Така висока продуктивність процесу досягається головним чином через можливість безперервного видалення стружки. Час виготовлення зубчастого колеса займає лише декілька хвилин, залежно від параметрів зубчастого колеса та різального інструменту, який є набагато універсальнішим та дешевшим за інші продуктивні методи нарізання зубців.

Спеціальний інструмент – різак, який може бути як цільним та виготовленим з твердого сплаву або швидкоріжучої сталі, так і збірним, який буде мати змінні пластини. Такий робочий інструмент можна використовувати для чорнової обробки і для чистових проходів. Його відносна низька вартість у порівнянні з вартістю черв'ячних фрез, чи протяжок, є ще однією перевагою цього методу та зменшує собівартість виготовлення. Щодо можливостей застосування зуботочіння, то як правило, нарізають вінець з модулем від 2 до 9мм. Ще однією перевагою є можливість виконувати обробку поруч із вступом, що дає гнучкість під час проектування деталей.

Технологія Power Skiving є способом обробки зубчастих коліс чи шліців, що виключає необхідність використання спеціалізованого обладнання (зубофрезерних, протягувальних, довбальних), яке призначене виключно для нарізання зубців. Для його застосування достатньо мати універсальний оброблюючий 5-координатний центр, який має високу жорсткість, щоб отримати прийнятну точність зубчастого вінця. Зокрема, щоб отримати зубчастий вінець 7-8 ступенів точності, що повністю задовольняє широкий асортимент зубчастих коліс для різних механізмів, вузлів чи у машинах. Так, таке обладнання є дорогим, але на підприємствах для нього завжди є робота. Враховуючи вартість часу роботи такого обладнання, Power Skiving слід застосовувати лише при великосерійному чи масовому виробництві. Для виготовлення невеликої кількості зубчастих коліс або кількох одиниць можна

цей метод застосувати, як на спеціалізованому напівавтоматичному зубонарізному верстаті, так і на модернізованому верстаті фрезерної чи токарної групи, хоча точність та якість поверхні профіля зуба буде гіршою.

Ця технологія поєднує в собі елементи обточування та фрезерування, забезпечуючи дуже короткий час виготовлення. Проте, з кожним роком такий метод все більше удосконалюється, а над його дослідженням та удосконаленням працює ціла плеяда провідних науковців з Японії, Німеччини, Греції, Великої Британії.

Мета роботи

Метою даного дослідження є встановлення всіх геометричних параметрів недеформованої стружки, яка утворюється під час нарізання внутрішнього прямозубого вінця методом Power Skiving. Базуючись на отриманих результатах, необхідно побудувати модель за допомогою відповідного програмного середовища. Встановити вплив різних технологічних та геометричних параметрів процесу на форму та величину стружки. Серед усього різноманіття можливостей нарізання зубів або шліців методом Power Skiving, саме зуботочіння внутрішнього зубчастого вінця отримало найширше застосування. Перш за все це пов'язано з невеликим арсеналом методів, за допомогою яких можна отримати внутрішнє зубчасте колесо.

Якщо отримати точну та адекватну копію такої стружки, то така інформація стане першим кроком для подальшого дослідження силових, теплових, вібраційних показників процесу зуботочіння. Встановлення величини товщини стружки, її площі у кожний момент часу на кожній кромці леза, дозволить визначити характер зміни сили різання, сили тертя та спрогнозувати найбільш небезпечні зони на різальному інструменті. В подальшому можна також розрахувати теплові потоки, які будуть супроводжувати процес різання, а відповідно інтенсивності нагрівання інструменту та колеса, температури та зношування інструменту. Таким чином, це тільки перший етап фундаментального дослідження, який дозволить встановити закономірності зміни форми стружки від початку врізання інструменту до його виходу із "зацеплення" від різних факторів. Для заданого модуля, кількості зубців та кількості різців на різачку необхідно встановити залежності зміни форми стружки від подачі, кута нахилу. У цих дослідженнях розглянемо випадок, коли процес нарізання здійснюється на повну глибину зубця, тобто за 1 прохід. Для цього очевидно ми розглянемо приклад зубчастого колеса з невеликим модулем. Нам буде достатньо дослідити один оберт різального інструменту при нарізанні кінцевого контура зуба, адже саме формоутворюючий прохід дасть найбільші значення розміру стружки. Отримані результати можна застосувати для вирішення цілого ряду технологічних проблем з підбором ефективних параметрів різання, а саме встановлення ефективної подачі інструменту, його

кута нахилу та встановлення необхідної частоти обертання як заготовки так і різачка.

Отже, детальне дослідження параметрів перерізу зрізів у кожний момент часу, які можна отримати після зрізання стружки різачком, може слугувати основою всебічного дослідження процесу зуботочіння методом Power Skiving.

Основним завданням даного дослідження є створення адекватних моделей стружкоутворення та отримання кількісної оцінки параметрів зрізів в процесі Power Skiving. Для такої задачі необхідно розробити комплексну систему графоаналітичного, математичного і комп'ютерного моделювання цього процесу, у якій враховано його кінематику і достовірно відтворено закономірності процесів різання-формування. Також важливо встановити необхідні умови різання за допомогою аналізу обробки, оскільки існує велика кількість параметрів налаштування, які використовуються для визначення умов різання, а механізм обробки є складним. У цій статті представлено застосування графоаналітичної методики побудови перерізів недеформованої стружки, яка дасть можливість встановити її геометрію та основні характеристики, а також отримати 3D модель.

Огляд літературних джерел

Деякі тематичні дослідження [1,2] щодо нарізання прямозубих зубчастих коліс розглядаються, щоб продемонструвати практичність запропонованого програмного забезпечення для моделювання процесу Power Skiving, але не заглиблюються в теоретичні розрахунки та в саму кінематику процесу. Усі свої результати вони будують лише на експериментальних дослідженнях.

За останні роки було проведено досить багато досліджень в побудові моделі процесу зуботочіння [3]. Цілий ряд робіт зосереджені на визначенні геометрії недеформованої стружки [1,4], зокрема, товщині та довжині, а також розрахунку складових сили різання [5]. Проаналізовані різні можливі варіанти деформації стружки за допомогою моделювання з підтримкою FEM, де автори розробили алгоритм прогнозування температури, деформації та напруженості під час різання в інструменті [6].

Оскільки існує небагато продуктивних та недорогих методів обробки внутрішнього зубчастого вінця, то в світовій практиці зубонарізання цей прогресивний метод викликав великий інтерес. Зокрема, автори [7] досліджували кінематику процесу та сили, які виникають при різанні. У висновках основну увагу зосередили на проблемах конструкції інструменту при Power Skiving. Bouzakis та ін. [8] досліджували ефективність цього методу обробки циліндричних зубчастих коліс та порівнювали його з іншими методами. Чен та ін. [9,10] запропонували метод для підбору відповідної конструкції інструменту для нарізання косозубих і внутрішніх зубчастих коліс. Автори також представили метод отримання кінцевої поверхні зуба прямозубого колеса. У роботі [11] представлено цікавий метод

конструювання різачка, який має конічні зуби відповідно до кута нахилу спіралі. Штадтфельд [12] дослідив ефективність різання, процес утворення стружки та механізм різання Power Skiving при обробці циліндричних зубчастих коліс і побудував профіль зуба інструменту безпосередньо з перерізів. Гуо та ін. [13] досліджували теоретичні похибки профілів зубів шестерень, оброблених звичайним різальним інструментом, що нагадує зубчасту фрезу.

Основним недоліком робіт [1,2,4-6] є некоректне відтворення кінематики процесу. При розробленні кінематичної схем процесу Power Skiving автори вважають рух різання як поєднанням двох рухів – осьової подачі і швидкості головного руху, який надається інструменту, а не заготовці [14]. Це прийнято у вказаних роботах, як основа, але в результаті вектор швидкості буде скеровано під іншим кутом відносно базових поверхонь і осей. Це має велике значення для правильного визначення сил різання, тертя та геометричних параметрів інструменту.

У літературі описано різні способи моделювання процесу Power Skiving, які дещо спрощено розглядають утворення перехідних поверхонь під час різання. Базуючись на отриманих результатах та врахувавши кут нахилу інструменту, автори спроектували профілю зуба інструменту [7-10]. Однак ці методи не враховують правильне положення робочої кромки різачка в кожний момент часу. У зазначених роботах [7-10] автори не враховують форму та розміри перехідної поверхні, яка утворена у проміжній впадині між зубцями та інструментом в попередньому осьовому положенні інструмента по руху подачі. Саме форма цієї поверхні і визначає внутрішню поверхню усуненої стружки, її форму та розміри.

У роботах [8-13] результати геометричного моделювання і кількісні параметри стружки, зокрема, товщина зрізів, їх площа не належним чином використовуються як основа для подальшого і глибшого дослідження даного процесу. Адже, від їх значень і законів зміни по руху інструменту залежить більшість різноманітних силових, контактних, трибологічних і теплових явищ.

Складна кінематика Power Skiving разом із високими вимогами до спеціалізованих верстатів та інструментів потребує точного моделювання процесу різання в цілому. Коректна інформація про розміри та форму зрізаних шарів із заготовки у кожний момент часу могли б служити основою для створення геометрії моделі недеформованої стружки, яка утворюється під час обробки заготовки. Відповідно, у цій статті застосуємо графоаналітичний метод побудови поперечних перерізів та проаналізуємо вплив різних параметрів зубчастого колеса (модуля, кількості зубців) на характеристики недеформованої стружки, яка утворюється під час нарізання внутрішнього зубчастого вінця.

Виклад основного матеріалу

Використано методику, яка розроблена Грицаєм І.С., для черв'ячного зубофрезерування [14].

Її суть полягає в тому, що неперервний процес різання розглядається в послідовних дискретних кутових і лінійних положеннях контура зубця різального інструменту – індекс «i» (рис. 1). Для кожного з цих положень відображаються контури зубців інструменту, які виконували різання перед даним зубцем по куту повороту інструменту і заготовки $(i-1)\varphi$, та в попередньому положенні інструменту в русі осьової подачі $(i-1)s_o$. Накладання цих контурів відображає миттєвий перетин зрізу, який виконує даний зубець в цьому певному робочому положенні. Послідовні дії з визначення цих положень і контури миттєвих перерізів зрізів відтворюють динаміку зміни поперечного перерізу зрізів і дають можливість розрахувати параметри зрізів, або визначити їх величини на основі візуалізації картини на комп'ютері.

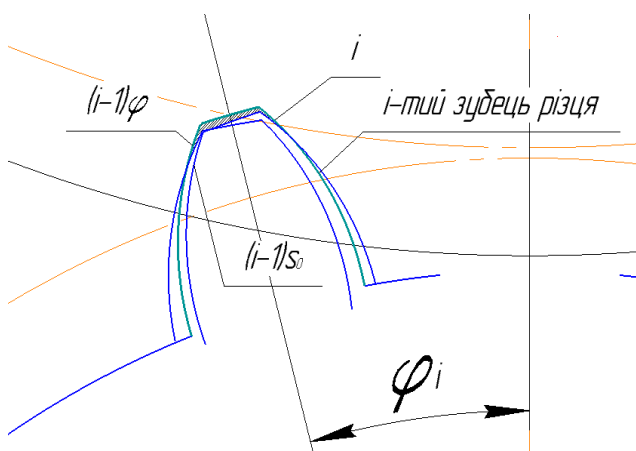


Рис. 1 - Множина контурів зубців та побудова перерізу поверхні різання, утворена цією множиною при зубофрезеруванні черв'ячною фрезою

Будемо аналізувати процес зуботочіння методом Power Skiving, як одного з найбільш продуктивного методу на даний момент.

Побудова миттєвих перерізів зрізів

Головною умовою точного визначення параметрів зрізів є встановлення форми та розмірів поверхні, яка утворюється в процесі усталеного різання в кожній западині зубчастого колеса між обробленими зубцями поверхнями та необробленою поверхнею заготовки на 1 оберт різача. Миттєво оброблена поверхня формується активним зубцем під час "зачеплення" із заготовкою. В кожний момент часу у роботі їх може бути від 2 до 5 - це залежить від параметрів зубчастого колеса, яке нарізається і від параметрів інструмента (модуля, кількості зубців). При наступному обробленні (після 1 оберту) цієї проміжної поверхні, інструмент переміститься вниз на величину подачі вздовж осі обертання зубчастого колеса, і таким чином зріже наступний шар стружки. Процес різання відбувається внаслідок схрещення осей колеса та інструменту на певний кут, який при нарізанні прямозубих

колес на виробництві рівний 20 градусів або більше. В межах цієї перехідної поверхні кожний наступний цикл різання в одній западині продовжується після оберту заготовки і переміщення різача на величину осьової подачі. Ця перехідна поверхня западини визначає дійсну форму і розміри миттєвого перерізу зрізу, які змінюються за кутом повороту зубця, та періодично повторюються в циклі обробки.

Під час осьового переміщення різального інструменту його кожний зуб здійснює рух по однаковій траєкторії, займаючи одне і те ж положення відносно елементарної поверхні нарізаного профілю. Інакше кажучи, внаслідок жорсткого кінематичного зв'язку між робочими рухами різання і формоутворення у процесі зуботочіння, під час кожного різку пляма контакту леза різача із утворюючим профілем змінюється за розмірами та переміщується з лівої сторони леза через вершину на праву. При розрахунку положень різача визначимо координати в кожний момент часу.

$$\begin{cases} x^2 = R_{ок}^2 - y^2 \\ x^2 = R_{ав}^2 - (y - A)^2 \end{cases};$$

$$y = R_{ок} - R_{ав};$$

$$R_{ок}^2 - y^2 = R_{ав}^2 - (y - A)^2 = R_{ав}^2 - y^2 + 2Ay - A^2;$$

$$y = \frac{R_{ок}^2 - R_{ав}^2 + A^2}{2A} = \frac{R_{ок}^2 - R_{ав}^2 + (R_{ак}^2 - 2R_{ак}R_{ок} - R_{ав}^2)}{2(R_{ак} - R_{ав})};$$

$$y = \frac{R_{ок}^2 - R_{ак}^2 + 2R_{ак}R_{ав}}{2(R_{ак} - R_{ав})};$$

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{y}{R_{ок}}\right);$$

$$X = C = R_{ок} \cdot \sin(\varphi_i);$$

$$\varphi_{вм} = \varphi_i / i,$$

де i – кількість розглянутих положень чашкового різача, $\varphi_{вм}$ – кут між вертикаллю та віссю симетрії різача в кожному положенні. Решта позначень зображено на рис. 2.

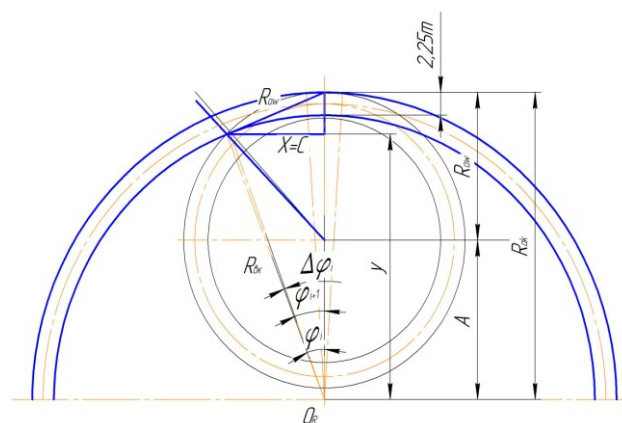


Рис. 2 - Побудова миттєвого положення чашкового різача відносно зубчастого колеса

Періодичний контакт кожного чашкового різця (його лева) із заготовкою поєднується з неперервністю різання і формоутворення в процесі обточування завдяки конструктивному руху різка, рухам обточування та осьовій подачі.

Результати моделювання

Для дослідження параметрів зрізів, які утворюються від двох напрямків – осьової подачі та обертання різка розділимо послідовні положення. Розкладемо траєкторію проходження різка на 11 положень:

- положення -5, -4, -3, -2, -1 буде розташовуватися до перпендикуляра, де -5 – це положення врізання лева зуба різка у заготовку. Наступні положення будуть відповідати поступовому його наближенні до перпендикулярного розміщення - 0 (рис. 3).

- положення 0 – зубець різка розташовується перпендикулярно до колеса і відповідає середині всієї траєкторії.

- положення 1, 2, 3, 4, 5 буде розташовуватися після перпендикуляра, де 5 – це положення виходу лева зуба різка із заготовки. Після проходження середнього розташування (положення 0) зубець поступово буде виходити із зачеплення від положення 1 до 5 (рис. 3).

Наступний різ у цій западині буде відбуватися через повний оберт зубчастого колеса. За цей час різак переміститься в осьовому напрямі на величину осьової подачі. Здійснимо таку ж процедуру розбиття траєкторії “різального шляху” різка (рис. 4).

Якщо накласти ці дві проекції одна на одну, то ми отримаємо зрізи стружки у кожному положенні (рис. 5). Проте, після проходження перпендикуляра (0 положення) різак буде зрізати лише ліву частину западини, тому відкинувши “зайві” площі перерізів стружки, кінцево отримаємо сукупність усіх зрізів, як показано на рис. 6.

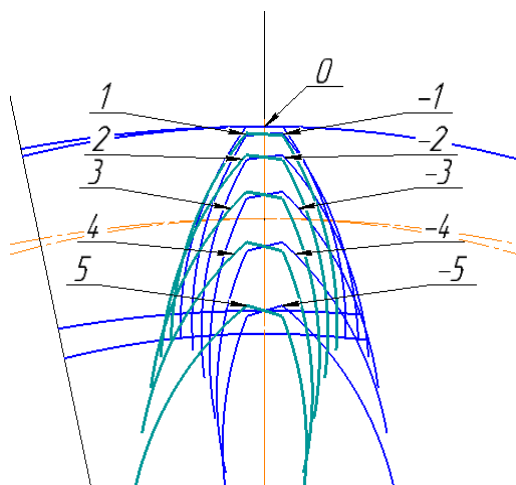


Рис. 3 - Ансамбль контурів зуба різка при врізанні і виході на i -му оберті

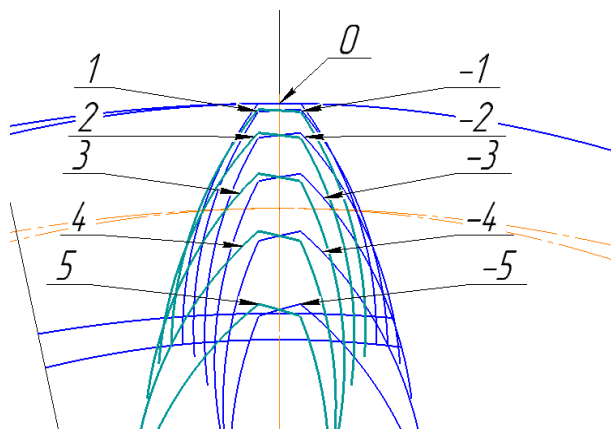


Рис. 4 - Ансамбль контурів зуба різка при врізанні і виході на $i+1$ -му оберті

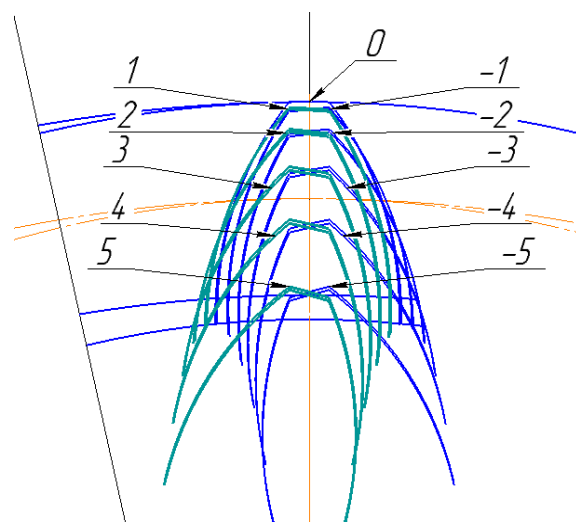


Рис. 5 - Сукупність перерізів стружки отримана під час кожного положення різка

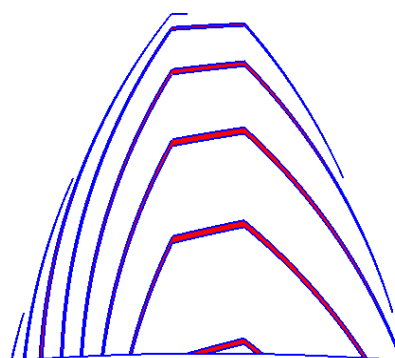


Рис. 6 - Змодельована сукупність перерізів стружки з врахуванням всієї траєкторії переміщення зуба різка

Результати моделювання за вказаними вище параметрами наведено у вигляді таблиць та графічних залежностей: площа перерізу стружки і товщини в залежності від різних осьових подач різка і для різних модулів зубчастого колеса (рис. 7-11).

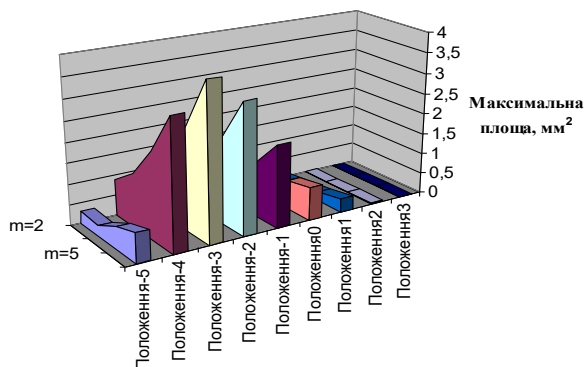


Рис. 7 - Залежність площі перпендикулярного січення стружки від модуля та положення різака при подачі 0,75 мм/об

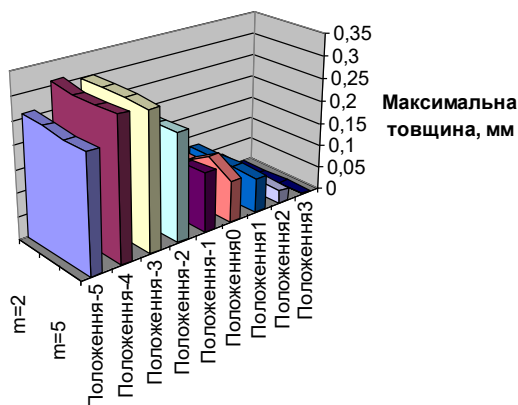


Рис. 8 - Залежність максимальної товщини перпендикулярного січення стружки від модуля та положення різака при подачі 0,75 мм/об

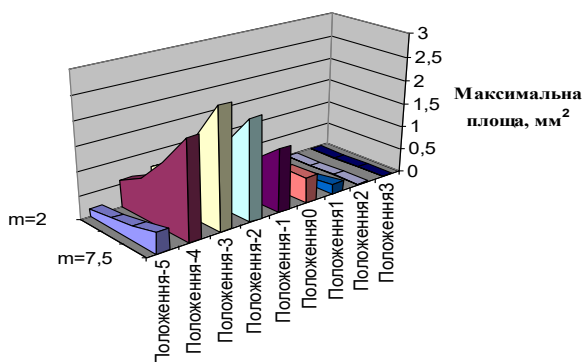


Рис. 9 - Залежність площі перпендикулярного січення стружки від модуля та положення різака при подачі 0,5 мм/об

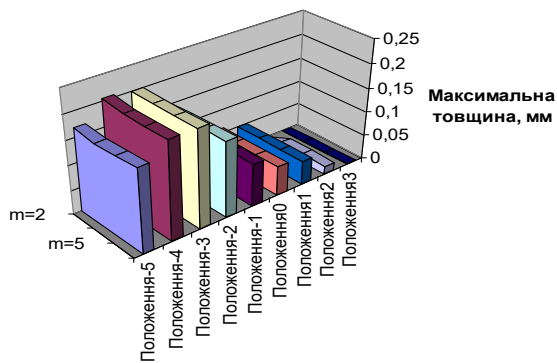


Рис. 10 - Залежність максимальної товщини перпендикулярного січення стружки від модуля та положення різака при подачі 0,5 мм/об

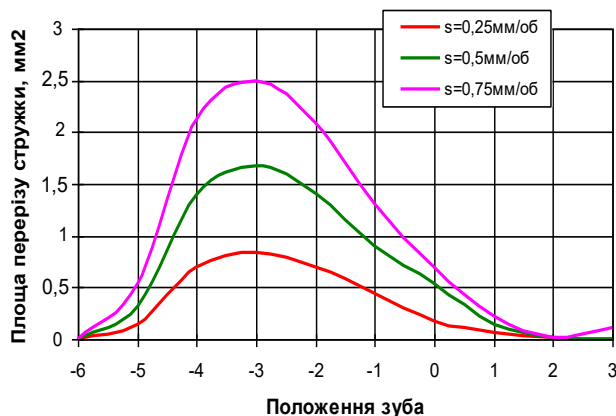


Рис. 11 - Залежність площі перпендикулярного січення стружки від подачі для модуля $t=5$ мм для різних положень різака

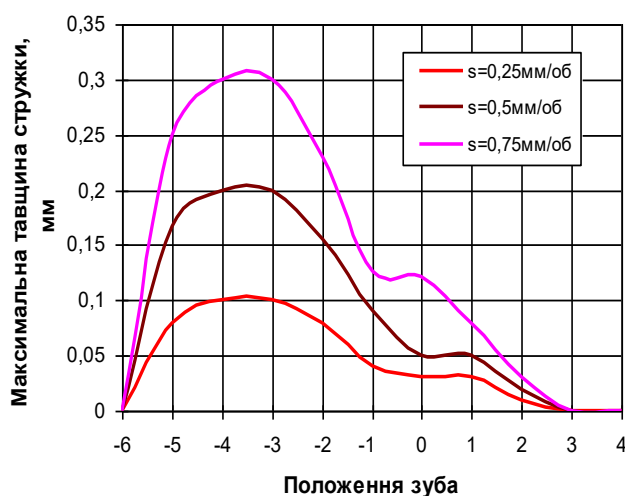


Рис. 12 - Залежність перпендикулярного січення максимальної товщини стружки від подачі для модуля $t=5$ мм для різних положень різака

Обговорення результатів

Серед зображеного графічного представлення залежностей товщини та площі поперечних перерізів стружки від подачі та модуля зубчастого колеса можна побачити наступні особливості:

- найцікавішою виявилася залежність товщини стружки від нарізаючого модуля! Як видно з рис. 8 та рис. 10 величина модуля не впливає на товщину недеформованої стружки, а лише на площу поперечного зрізу. В межах заданої подачі товщина є константою. Таким чином бачимо, що змінюється лише висота зрізу, яка є пропорційна модулю (рис. 7 та рис. 9);

- характерною ознакою для всіх випадків вибраних подач (від 0,25мм/об до 0,75мм/об) та модулів (від 2мм до 7мм) є те, що максимальні значення товщини зрізу та площі поперечних зрізів знаходяться на початковій положення, а пікові значення припадають на -3 положення. Якщо всю

траєкторію зачеплення різачка та заготовки розділити на 11 ділянок (рис. 3), як в нашому випадку, то пройшовши третину цього шляху різець досягає максимального навантаження. В подальшому різанні значення товщини та площі зрізу спадає, а при проходженні вертикального положення різця ці величини незначні. В останній третині шляху чашкового різця процес різання не відбувається (положення 4 та 5);

- на основі отриманих результатів щодо впливу подачі на площу перерізу та максимальну товщину стружки (рис. 11 та 12), можна сказати, що зміна відбувається пропорційно до зміни подачі. При зростанні подачі з 0,25 мм/об до 0,5 мм/об площа зростає в 2 рази. Така сама поведінка спостерігається і для зміни максимальної товщини. Найбільші площі та товщини перерізу стружки спостерігаються в -3 положенні;

- як і слід було очікувати при зростанні подачі від 0,25мм/об до 0,75 мм/об товщина недеформованої стружки зростає (рис. 12). Отримавши таку залежність можна підібрати оптимальне значення подачі для заданого модуля та врахувати можливості наявного обладнання.

Висновки

Застосувавши розроблений аналітичний метод та змодельовані положення перехідної поверхні та чашкового різця під час нарізання зуба методом Power Skiving у програмному середовищі, отримано усі числові значення геометричних параметрів недеформованої стружки. На відміну від раніше отриманих результатів інших авторів, цей метод є значно простішим у використанні і не потребує складних дороговартісних програмних продуктів для аналізу процесу різання. Ефективність запропонованої методики також полягає і в отриманні точніших результатів моделі стружки, яка дуже близька до реально нарізаної під час експерименту [12].

Особливістю отриманого результату є можливість підібрати оптимальне значення подачі інструменту для відповідного модуля зубчастого колеса. Маючи всі геометричні параметри стружки, можна спрогнозувати сили різання та виявити небезпечні зони на різальній кромці різця. Таким чином, можна також дати рекомендації по зміцненню небезпечних ділянок на кромці різця та попередню зміцнити відповідну поверхню.

Отже, отримавши залежності зміни геометричних характеристик (товщини, довжини, площі, форми) недеформованої стружки від положення різачка, у подальших дослідженнях ми можемо встановити цілий ряд інших фізичних величин (сили різання, теплові характеристики, коливання) та їх взаємозалежність під час нарізання зубчастого колеса методом Power Skiving.

Список літератури

1. 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. doi: 10.1016/j.procir.2019.04.039.
2. Bouzakis K. D., Friderikos O., Tsiafis I. Fem-supported simulation of chip formation and flow in gear hobbing of helical gears. *Proceedings of DET2007 4th International Conference on Digital Enterprise Technology Bath, United Kingdom*. 2007. P. 34-43. doi: 10.1016/j.cirpj.2008.06.004.
3. Грицай І. Є., 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. doi: 10.23939/istcipa2022.56.011.
4. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. Cutting force model for power Skiving of internal gear. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 56. P. 1277-1285. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.022.
5. Inui M., Huang Y., Onozuka H., Umezumi N. Geometric simulation of power Skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 48. P. 520-527. doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.078.
6. 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. doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.085.
7. Spath D., Hühsamet A. Skiving for high-performance machining of periodic structures. *CIRP Annals*. 2002. Vol. 51. №1. P. 91-94. doi: 10.1016/S0007-8506(07)61473-5.
8. 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. doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.001.
9. Chen X. C., Li J., Lou B. C. A study on the design of error-free spur slice cutter. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 68. P. 727-738. doi: 10.1007/s00170-013-4794-3.
10. Zhengyang H., Chuang J., Xiaozhong D. Research on the profile modification of power Skiving tool for internal gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 121. № 5-6. P. 3463-3475. doi: 10.1007/s00170-022-09318-6.
11. Tsai C. Y. Integrated mathematical approach for design and manufacturing of power-Skiving tool for interference-free involute internal gear cutting. *Mechanism and Machine Theory*. 2023. Vol. 180. P. 105172. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105172.
12. Stadtfeld H. J. Power Skiving of cylindrical gears on different machine platforms. *Gear Technology*. 2014. Vol. 31. № 1. P. 52-62.
13. Guo E., Shi Z., Hu L., Zhang E., Ren X. Design method of a multi-blade Skiving tool for gear Skiving. *Mechanism and Machine Theory*. 2022. Vol. 173. P. 104848. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104848.
14. Грицай І. Є. *Теоретико-прикладні основи комплексних наукових досліджень процесу нарізання зубчастих коліс*. Львів. Сполум, 2009. 254 с.

References (transliterated)

1. Vargas B., Zapf M., Klose J., Zanger F., Schulze V. Numerical modelling of cutting forces in gear Skiving.

- Procedia CIRP*, 2019, Vol. 82, pp. 455-460, doi: 10.1016/j.procir.2019.04.039.
2. Bouzakis K. D., Friderikos O., Tsiafis I. Fem-supported simulation of chip formation and flow in gear hobbing of helical gears. *Proceedings of DET2007 4th International Conference on Digital Enterprise Technology Bath*, United Kingdom. 19-21 September 2007, pp. 34-43, doi: 10.1016/j.cirpj.2008.06.004.
 3. Hrytsay I. Ye., Slipchuk A. M. Power Skiving as a modern method of gear cutting and features of its modeling. *Avtomatyzatsiya vyrobnychyykh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni. Ukrayins'kyi mizhvidomchyy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk*. [Automation of production processes in mechanical engineering and instrument engineering. Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection.]. L'viv, 2022, 56, p. 11-18, doi: 10.23939/istcipa2022.56.011.
 4. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. Cutting force model for power Skiving of internal gear. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, Vol. 56, pp. 1277-1285, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.04.022.
 5. Inui M., Huang Y., Onozuka H., Umezu N. Geometric simulation of power Skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation. *Procedia Manufacturing*, 2020, Vol. 48, pp. 520-527, doi: 10.1016/j.promfg.2020.05.078.
 6. 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, pp. 109-112, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.085.
 7. Spath D., Hühsamet A. Skiving for high-performance machining of periodic structures. *CIRP Annals*, 2002, Vol. 51, 1, pp. 91-94, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61473-5.
 8. 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, pp. 676-696, doi: 10.1016/j.cirp.2008.09.001.
 9. Chen X. C., Li J., Lou B. C. A study on the design of error-free spur slice cutter. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, Vol. 68, pp. 727-738, doi: 10.1007/s00170-013-4794-3.
 10. Zhengyang H., Chuang J., Xiaozhong D. Research on the profile modification of power Skiving tool for internal gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, Vol. 121, 5-6, pp. 3463-3475, doi: 10.1007/s00170-022-09318-6.
 11. Tsai C. Y. Integrated mathematical approach for design and manufacturing of power-Skiving tool for interference-free involute internal gear cutting. *Mechanism and Machine Theory*, 2023, Vol. 180, pp. 105172, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.105172.
 12. Stadtfeld H. J. Power Skiving of cylindrical gears on different machine platforms. *Gear Technology*, 2014, Vol. 31, 1, pp. 52-62.
 13. Guo E., Shi Z., Hu L., Zhang E., Ren X. Design method of a multi-blade Skiving tool for gear Skiving. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, Vol. 173, pp. 104848, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104848.
 14. Hrytsay I. Ye. *Teoretyko-prykladni osnovy kompleksnykh naukovykh doslidzhen' protsesu narizannya zubchastykh kolis*. [Theoretical and applied foundations of complex scientific studies of the gear cutting process], L'viv, Spolom, 2009. p. 254.

Відомості про авторів (About authors)

Сліпчук Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, м. Львів, Україна; ORCID: 0000-0003-0584-6104, e-mail: andsl@ukr.net

Slipchuk Andrii – Candidate of Technical Sciences, PhD, Lviv Polytechnic National University, Docent of the Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, c. Lviv, Ukraine, ORCID: orcid.org/0000-0003-0584-6104, e-mail: andsl@ukr.net

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сліпчук А. М. Моделювання недеформованої стружки утвореної під час нарізання внутрішнього зубчастого вінця методом " POWER SKIVING ". *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2023. № 3 (17). С. 26-33. doi:10.20998/2413-4295.2023.03.04.

Please cite this article as:

Slipchuk A. Simulation of undeformed chip formed during cutting for internal crown tooth by the " POWER SKIVING " method. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023, no. 3(17), pp. 26–33, doi:10.20998/2413-4295.2023.03.04.

*Надійшла (received) 01.08.2023
Прийнята (accepted) 10.09.2023*