

## ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ POWER SKIVING ДЛЯ НАРІЗАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ЗУБЧАСТОГО ВІНЦЯ

А. М. Сліпчук

Національний університет «Львівська політехніка»; 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12,  
e-mail: *andsl@ukr.net*

*Операції зубонарізання є одними з найбільш працемістких. На сьогоднішні прогресивним методом, який все частіше використовується у провідних компаніях світу, що спеціалізуються на виробництві зубчастих коліс, є Power Skiving. Розвиток техніки та нові удосконаленнями процесу нарізання розширюють сферу застосування цього методу. Створено модель заготовки та різального інструменту для процесу Power Skiving та побудовано 3D модель недеформованої стружки для практичного випадку нарізання зовнішнього зубчастого вінця колеса. Описане у цих дослідженнях моделювання може бути застосоване як для внутрішнього, так і для зовнішнього зубчастого вінця. Геометрію отриманого зубця колеса можна проаналізувати та отримати морфологію боків, форми ніжки зуба, а також застосувати для аналізу силових та теплових процесів різання. Результати показали здатність моделі надійно та точно імітувати процес різання Power Skiving. Інформація, отримана з моделі, може покращити розуміння процесу різання та сприяти його оптимізації.*

Ключові слова: моделювання, недеформована стружка, зуботочіння, Power Skiving, чашковий різець, різак, зубчасте колесо.

*Gear cutting operations are among the most labor-intensive processes in any manufacturing facility. Currently, a progressive method that is increasingly employed by leading companies worldwide specializing in gear wheel production is Power Skiving. A Computer-Aided Design (CAD) environment was utilized to model such a process, showcasing gear cutting with the highest available precision. In this article, a solid model of the Power Skiving process is developed, and a 3D model of undeformed chip formation is constructed for the practical case of external gear cutting. The process described in these investigations can be equally applied to both internal and external gear cutting scenarios. To imitate the cutting process, all motions are considered at specified time points and set in precise positions. The geometry of the produced gear tooth can be examined to determine the profile morphology, tooth root shape, and the forces and thermal processes involved in cutting. The modeling findings demonstrate the model's capacity to faithfully and precisely reproduce the Power Skiving cutting process. The model's information can help us understand the cutting process and optimize it.*

Keywords: modeling, undeformed chip, gear cutting, Power Skiving, cup-type cutter, cutter, gear.

### Постановка проблеми

Виготовлення евольвентних зубчастих коліс із внутрішнім чи зовнішнім вінцем є важкою та прецизійною задачею. Така деталь відноситься до середнього класу складності, а тому потребує ретельного підходу до технологічного процесу обробки. Зубонарізання є одними з найбільш працемістких операцій механічної обробки. Особливо це стосується коліс із внутрішнім зубчастим вінцем, де арсенал можливих операцій та інструментів не є великим. Класичні виробничі процеси для виготовлення внутрішніх і зовнішніх шестерень часозатратні, потребують особливих налагоджень, спеціального інструменту, оснащення та мають цілий ряд обмежень на обробку кінцевої геометрії такого колеса. Вагома частина вартості зубчастого колеса пов'язана з операціями нарізання зубів. Враховуючи величезну кількість даної продук-

ції у промисловості, актуальним стає питання продуктивного та економічно вигідного технологічного процесу нарізання зубів.

У сучасній виробничій сфері, де застосовується гнучке виробництво, пошук нових та продуктивних методів зубообробки гостро постає перед технологами підприємств.

На сьогоднішні таким процесом є Power Skiving. За останні десятиліття він застосовується та розвивається все активніше у провідних компаніях світу. Прогрес цього методу нарізання зубців перш за все завдячує винайденню серводвигунів та розвитку верстатів з числовим програмним керуванням.

Правильно підібрані технологічні параметри процесу виготовлення безпосередньо впливають на якість поверхні зуба, на час обробки та ступінь точності зубчастого колеса [1, 2].

Power Skiving – це технологічна операція, яка поєднує у собі два процеси: точіння та фрезерування. І хоча сам процес був описаний ще на початку ХХ століття, застосування на виробництві він отримав тільки на початку ХХІ століття. Такий метод має цілий ряд особливостей. Основним фактором, який перешкоджав впровадженню Power Skiving, була висока вимога до ступеня синхронізації рухів різального інструменту та заготовки. Крім того, необхідне обладнання має високі вимоги до потужності двигуна та будови різального інструменту, його стійкості. Жорсткі вимоги і до матеріалу чашкових різців. Сам процес відбувається за рахунок різниці напрямів швидкостей ковзання профілів різального інструменту та заготовки, внаслідок схрещення осей колеса та інструменту на певний кут, який під час нарізання прямозубих коліс рівний куту підйому гвинтової лінії різального інструмента. Збільшення кута нахилу інструмента дає змогу збільшити швидкість різання, але водночас обмежує ширину внутрішнього зубчастого вінця.

Як і будь-який метод нарізання, такий спосіб має свою область застосування. Крім високих вимог до обладнання, різальний інструмент повинен розташовуватися під кутом до заготовки, який становить принаймні 20 градусів від вертикальної осі, що є найбільш оптимальним для різання. Менші кути нахилу вимагають високих швидкостей обертання шпинделя, які можуть перевищувати можливості верстата.

Для нарізання зубчастого вінця із певними геометричними параметрами та механічними властивостями необхідно спроектувати та виготовити відповідний різальний інструмент. Таким чином втрачається його універсальність. Все це обмежує застосування Power Skiving лише великосерійним та масовим виробництвом. Останні дослідження впливу геометричних параметрів інструменту на процес різання дає змогу розширювати діапазон застосування та зробити метод більш універсальним. Перевагами даного методу є:

- нарізання зубчастого вінця за один установ та декілька проходів (в залежності від модуля зуба та його точності);
- зменшення кількості операції в технологічному процесі;
- зменшення часу виготовлення, а отже підвищення продуктивності праці щонайменше у 2-3 рази;
- підвищення надійності обробки та достатня точність отриманого зубчастого колеса (до 7 ступеня точності);

- висока ступінь автоматизації процесу та обробка деталей з різними геометричними параметрами (модуль, ширина, діаметри).

Основною метою цієї статті є визначення параметрів недеформованої стружки, яка утворюється під час нарізання зовнішнього зубчастого вінця, шляхом геометричного моделювання. Знаходження усіх геометричних параметрів цієї стружки дозволить дати відповіді стосовно необхідних сили та потужності для нарізання зубців, температурних показників під час обробки як на колесі, так і на різальному лезі інструмента. Базуючись на отриманих результатах дослідження, можна встановити найбільш раціональні технологічні параметри та рекомендувати їх технологу для обробки заданого колеса.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Tomokazu Tachikawa та інші [3] зосередили свою увагу на проектуванні інструменту. На основі аналізу геометрії та кінематики зубчастого колеса автори запропонували спрощену конструкцію різця та рекомендували для нього оптимальні умови різання. Під час експерименту досліджували вібрації, які перешкождали високошвидкісному різанню.

Masatomo Inui та інші [4] запропонували новий метод для точного моделювання процесу Power Skiving – твердотільне моделювання. Вони обчислювали форму зубця шляхом багаторазового віднімання розмірів стружки стрілоподібної форми з твердотільної моделі заготовки.

Thomas Bergs та інші [5] представили чисельний розрахунок врізання в зубчасте колесо та аналітичний підхід до визначення товщини стружки, а також порівняли свої результати з аналогічними дослідженнями.

Автори роботи [6] подали результати досліджень обробки шевронних передач модифікованим методом Power Skiving. Отже, цим методом можна виготовляти не тільки евольвентні прямозубі чи косозубі колеса, але й шевронні. В результаті численних експериментів їм вдалося виготовити геометрично точні шестерні зі значними покращеннями продуктивності за допомогою одного інструменту і однією установою.

Автори [7] досліджували вплив переднього кута різання, який має значний вплив на силу різання. Проведені експерименти показали непогані результати збіжності для різних значень кута, та, базуючись на отриманих значеннях, підвищили точність моделі.

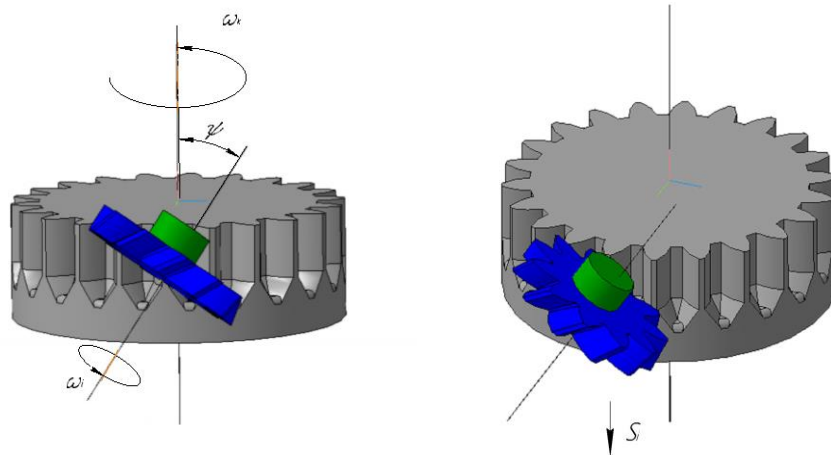


Рисунок 1 – Схематичне розташування інструменту та заготовки під час обробки Power Skiving

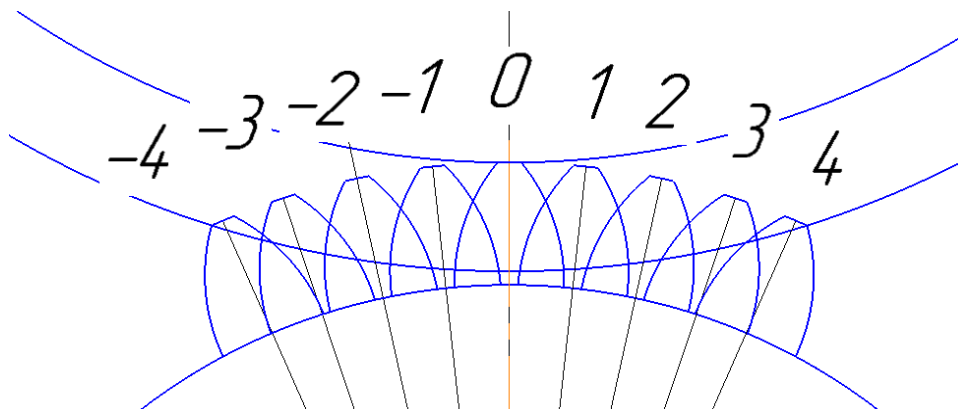


Рисунок 2 – Позиції чашкового різця від врізання до його виходу

Як бачимо, різні автори досліджували процес Power Skiving для різних випадків нарізання зубчастого вінця. Основна їх увага була зосереджена на удосконаленні інструменту [8] або визначенні оптимальних показників режиму різання [9, 10]. Остаточні висновки своїх досліджень автори [11-14] формували, базуючись на експериментальних даних, або на геометричному моделюванні процесу. Проте сама кінематика процесу Power Skiving досить складна, тож відтворити адекватну модель цього технологічного процесу досить важко. Як правило, автори вдаються до деяких спрощень і не вірно моделюють процес. Зокрема, вони розглядають зубофрезерування черв'ячною фрезою або задають профіль різальної кромки як прямолінійний і, як наслідок, отримують наближені результати недеформованої стружки, яка слугує вихідним матеріалом для подальших досліджень.

У цій статті створено твердотільну модель процесу Power Skiving та побудовано 3D модель недеформованої стружки для практичного випадку нарізання зовнішнього зубчастого вінця.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Для того, щоб імітувати процес різання Power Skiving, з використанням CAD системи була розроблена імітаційна модель, зображена на рисунку 1.

Для адекватного відтворення Power Skiving імітаційна модель мала такі параметри:

- $\omega_i$  – кутова швидкість інструмента навколо своєї осі;
- $\omega_k$  – кутова швидкість заготовки зубчастого колеса навколо своєї осі;
- $\psi$  – кут нахилу інструмента відносно заготовки. Як правило, його величина коливається в межах від  $20^\circ$  до  $35^\circ$ .
- $S_i$  – подача інструмента вздовж осі обертання заготовки зубчастого колеса.

Траєкторію переміщення різця відносно заготовки за один оберт інструмента від початку врізання чашкового різця у заготовку до його виходу із "зачеплення" було розбито на 9 фіксованих положень (рис. 2). Тобто траєкторія була поділена на чотири положення до вертикалі (положення -4 – це врізання) та чотири положення після 0 (положення 4 відповідає ви-

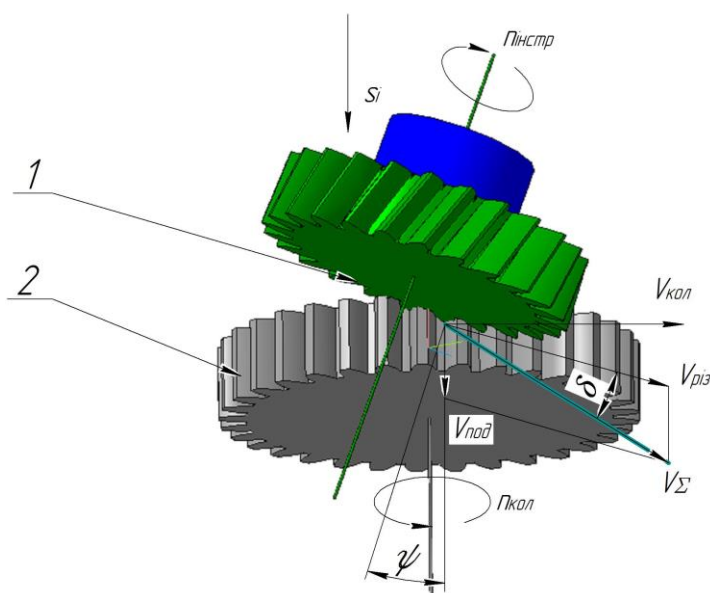


Рисунок 3 – Кінематична схема до методу Power Skiving

ходу різця із заготовки). Положення 0 – це вертикальне розташування різця, яка відповідає середині всієї траєкторії переміщення.

Завдяки використанню середовища САПР, твердотільні моделі, які беруть участь у процесі, з найкращою доступною точністю відтворюють процес різання. Адже, моделі повністю відтворюють геометричні форми інструменту та заготовки і дозволяють побачити перекриття різця та перехідної поверхні на заготовці. Для кожного такого положення було встановлено точне розташування різця та проміжне положення заготовки в цей момент часу. Симуляції також дозволяє візуалізувати процес різання та покращує розуміння процесу різання.

Кутовий крок між послідовними положеннями обертання є довільним значенням і буде визначати точність результатів. Чим більше положень буде розглянуто у прикладі, тим точніші результати 3D моделювання недеформованої стружки будуть отримані. Підхід із використанням послідовних зрізів для опису руху інструменту в тривимірному просторі дозволяє краще контролювати точність створеного твердого тіла. Для даного випадку такий кутовий крок буде рівний  $6,1^\circ$  (рис. 2).

Для моделювання процесу різання опишемо всі можливі рухи інструмента та заготовки (рис. 3):

- інструмент 1 обертається навколо своєї власної осі з деякою швидкістю  $V_{різ}$ ;
- інструмент 1 переміщується вздовж своєї осі обертання заготовки -  $V_{под}$ . Вісь нахилена під певним кутом  $\psi$ ;
- заготовка 2 обертається як навколо своєї власної осі з деякою швидкістю  $V_{заг}$ .

Таким чином, розглядаються у певний момент часу і фіксуються у деякому положенні інструмент та заготовка.

Завдяки обертальній симетрії зубчастого колеса та інструменту моделювання процесу різання достатньо розглянути для усталеного режиму. Фактично нам потрібно спроектувати поверхню, яка була отримана після проходження різця на  $i$ -му оберті інструмента. Контур цієї поверхні повністю ідентичний контуру різця, який був у цьому положенні і на даному оберті. Отримавши таку поверхню на  $i$ -му оберті різачка, інструмент на  $i+1$  оберті переміститься вздовж осі обертання заготовки на величину подачі вниз. Накладаючи отриману поверхню на  $i$ -му оберті з дискретними положеннями різачка на  $i+1$  оберті ми зможемо отримати зрізи стружки. Графічно це виглядає як накладання проєкції різця на  $i$ -му оберті з проєкцією різця на  $i+1$ -му оберті для кожного з положень. Отримана форма зрізу стружки в кожному положенні є достатньою умовою для створення її 3D моделі. Крім того, завдяки кінематиці процесу отримана стружка може дати інформацію про роботу кожного леза чашкового різця. Можна проаналізувати роботу кожної різальної кромки та врахувати це для подальших рекомендацій під час обробки зубчастого колеса.

Для отримання практичних результатів розглянемо такий випадок. Вхідними даними для нього будуть:

- модуль зубчастого колеса  $m=2,5\text{мм}$ ;
- кількість зубців на колесі  $Z_{кол}=33$ ;
- кількість чашкових різців на інструменті  $Z_{інс}=24$ ;

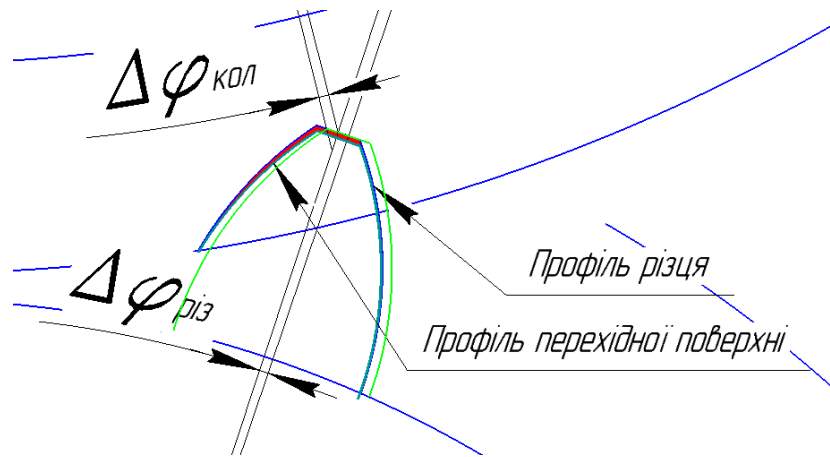


Рисунок 4 – Миттєве розташування профілю різця та перехідної поверхні

Таблиця 1 – Форми поперечного зрізу недеформованої стружки для різних положень різця

Положення	-2	-1	0	1	2	3	4
Вигляд зрізу стружки							

- осьова подача інструменту  
 $S_{\text{інс}}=0,75\text{мм/об}$ ;

- кут нахилу інструменту -  $30^\circ$ ;  
 - швидкість різання - 190 м/хв.

На рис. 3 представлено 3D модель процесу Power Skiving. Імітаційна модель може відображати кожне дискретне положення різця та колеса, а при накладанні перехідної зрізаної поверхні, яка була отримана на  $i$ -му оберті, та положенні різця, на  $i+1$  положення, можна отримати профіль зрізу. Першим кроком моделювання є створення та позиціонування профілю перехідної поверхні. Для зручного візуального сприйняття спроектуємо її вигляд на площину.

Візьмемо для прикладу третє положення різця (рис. 2). Позиціонування профілю перехідної поверхні визначається наступним чином. Нехай різець знаходиться у цьому положенні на  $i$ -му оберті різця. У наступному оберті  $i+1$  різець зміститься вниз вздовж осі колеса на величину подачі, тобто на 0,75мм. За цей час профіль різця розраховується таким чином, щоб різальні кромки описували послідовні положення різального інструменту в процесі обробки. На наступному оберті  $i+1$ , різець залишивши зріз, повернеться на деякий кут  $\Delta\varphi_{\text{різ}}$  вправо (зелений профіль), а оскільки колесо також обертається, то відповідно повернеться відносно колеса вліво на  $\Delta\varphi_{\text{кол}}$ . Таким чином буде встановлено розташування зрізу (смарагдовий

профіль) перехідної поверхні для кожного положення (рис. 4). Накладаючи два профіля: профіль різця (синій) та профіль перехідної поверхні (смарагдовий) ми отримаємо зріз недеформованої стружки в цьому положенні (червона площа).

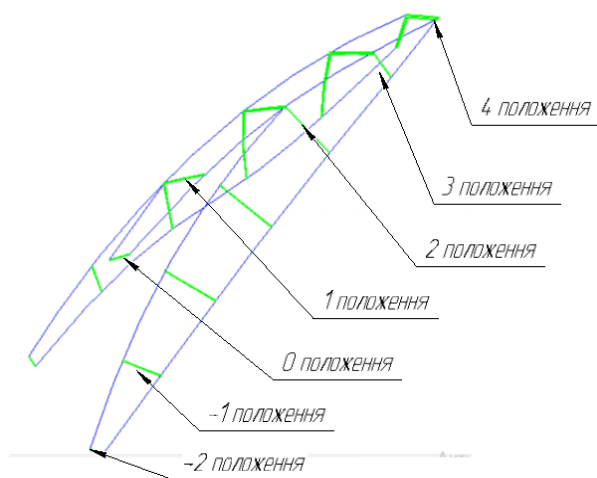
Отже, для кожного поворотного положення проведемо аналогічні розрахунки та визначимо точне положення чашкового різця на  $i+1$  оберті і профілю поверхні, яка отримана на  $i$ -му оберті після зрізу інструмента.

У кожному такому положенні отримано різницю зрізів перехідної поверхні та профілю різця – це і буде профіль стружки, яка утворюється на кожному кроці під час взаємодії інструменту та заготовки. Набір зрізів, змодельованих на всіх положеннях, дозволить побудувати 3D-модель недеформованої стружки, яка утворилася після різання чашкового різця на  $i+1$  оберті (табл. 1).

Процес, описаний вище, може бути застосований як для внутрішнього, так і зовнішнього зубчастого вінця. Після завершення моделювання результати містять геометрію стружки, яку можна використовувати для подальшого аналізу процесу Power Skiving. Геометрію отриманого зубця колеса можна проаналізувати та отримати морфологію боків, форми ніжки зуба, а також аналізу силових та теплових процесів різання [15].

**Розрахунок товщини стружки**

Після завершення моделювання та отримання всіх зрізів недеформованої стружки у кожному фіксованому положенні різця можна створити 3D модель стружки (рис. 5). Знаючи траєкторію руху інструменту та за відомою формою зрізу стружки на кожному кроці, можна відтворити об'ємну її форму. Запропонований алгоритм дозволяє це реалізувати за допомогою САПР. Особливу увагу необхідно звернути на товщину стружки в кожному такому положенні, а також на зміну площі поперечного зрізу стружки у процесі різання. Товщина стружки визначається на поперечному зрізі недеформованої стружки для кожного положення і для кожної частини різця (вхідна, верхня, вихідна).



**Рисунок 5 – Розташування зрізів, які формуються під час різання методом Power Skiving**

Першим кроком процесу створення 3D моделі стружки є відтворення проміжних площин, на яких накладатиметься поперечний зріз. Ці площини розташовуються за траєкторією проходження чашкового різця. На кожен таку площину буде накладатися свій профіль зрізу стружки (рис. 5).

Вимірювання проводили перпендикулярно до різальної кромки різця через рівномірні проміжки, яких було запропоновано 9: починаючи від положення врізання аж до виходу різця із "зачеплення". Фактично траєкторія руху чашкового різця – це дуга кола з радіусом різального інструменту. Після складання усіх зрізів за допомогою кінематичної команди, яка будує 3D модель за перерізами у САПР, створюємо твердотільну модель недеформованої стружки (рис. 6).

**Результати досліджень**

Змодельовано процес різання зовнішнього зубчастого вінця, а його результати показано у табл. 2. Для покращення сприйняття характеру зміни товщини стружки та її площі в залежності від положення чашкового різця, ці результати продемонстровано на рис. 6.

Дослідження були проведені для різних кутів нахилу, який змінювався від 20° до 35°, що відповідає практичному застосуванню. Розглянемо результати досліджень на прикладі положення 3 та проаналізуємо характер зміни площі та товщини для цього положення (рис. 7-10).

**Таблиця 2 – Товщина та площа зрізів недеформованої стружки для різних положень різця**

Параметри зрізів недеформованої стружки для лез		Положення різця						
		-2	-1	0	1	2	3	4
Вхідне лезо	Товщина, мм	0,022	0,037	0,043	0,032	0,042	0,063	0
	Площа, мм <sup>2</sup>	0,012	0,055	0,089	0,128	0,141	0,096	0
Вершина леза	Товщина, мм	0	0,000	0,010	0,068	0,133	0,203	0,261
	Площа, мм <sup>2</sup>	0	0,000	0,005	0,076	0,158	0,250	0,269
Вихідне лезо	Товщина, мм	0	0,000	0,028	0,064	0,101	0,153	0,210
	Площа, мм <sup>2</sup>	0	0,000	0,036	0,131	0,275	0,444	0,348



**Рисунок 6 – Різні види 3D моделі недеформованої стружки**

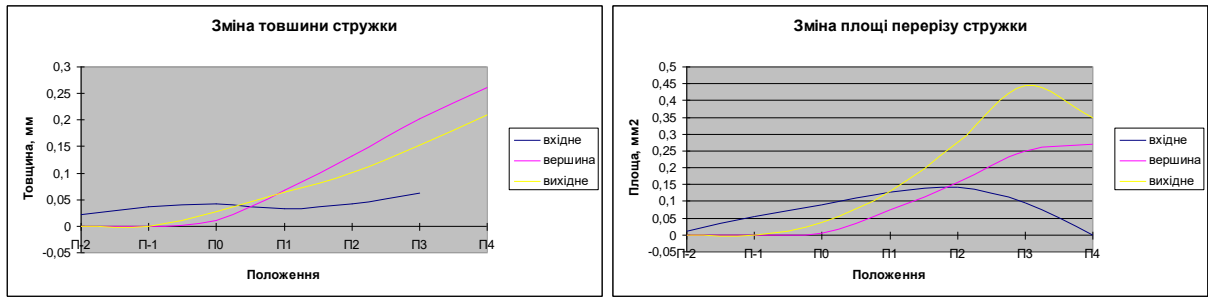


Рисунок 7 – Зміна товщини та площі зрізів недеформованої стружки для різних положень різця

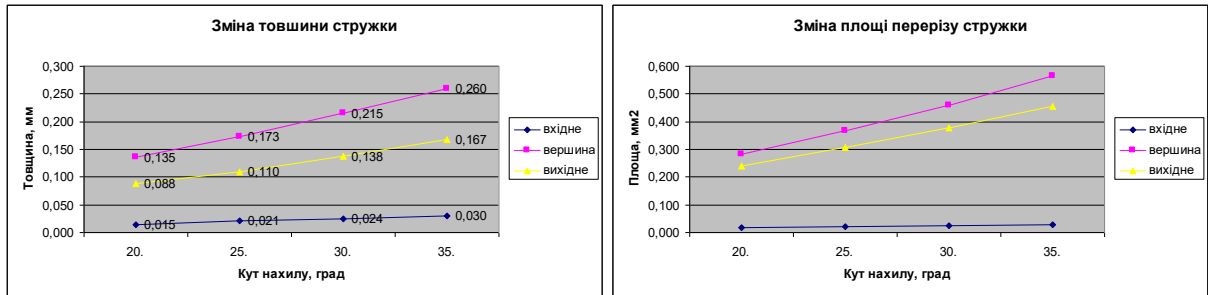


Рисунок 8 – Зміна товщини та площі зрізів недеформованої стружки для різних кутів нахилу інструмента

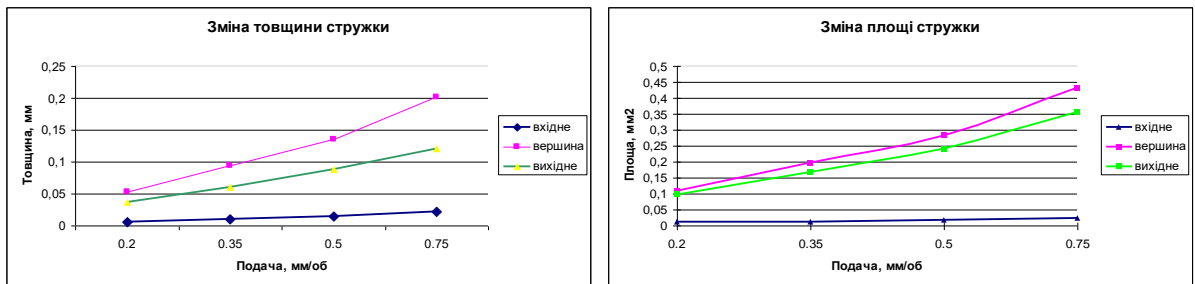


Рисунок 9 – Зміна товщини та площі зрізів недеформованої стружки для різних подач інструмента

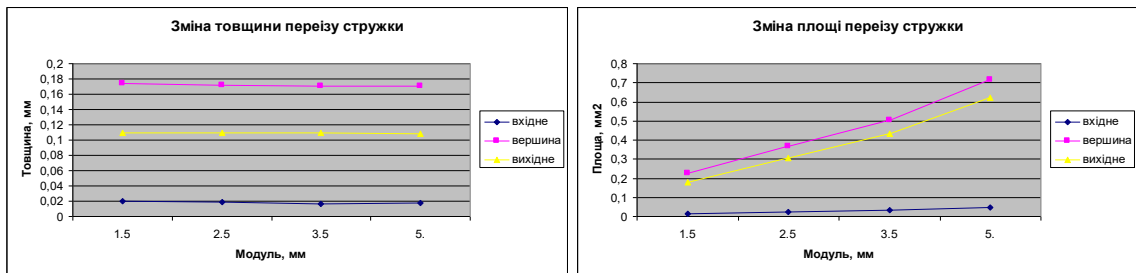


Рисунок 10 – Зміна товщини та площі зрізів недеформованої стружки для різних модулів зубчастого колеса

**Висновки**

Як видно з рис. 7-10, площа і товщина у верхній частині стружки є найбільшими. Це вказує на те, що верхнє лезо чашкового різця зрізає найбільше матеріалу. Крім того, розглянуто вплив подачі, модуля на характер зміни форми та геометрію недеформованої стружки. Процес різання у всіх випадках починається від вхідного леза, а далі, з наближенням до верти-

калі, починає працювати верхнє лезо. В положенні -4 та -3 різання не відбувається, і тільки в положенні -2 з'являється переший зріз вхідним лезом. Далі зріз зростає, а починаючи з положення 0, всі леза різця починають зрізати стружку. Після проходження положення 0 процес різання здійснюється усіма лезами: вхідним, вихідним та верхнім (табл. 1).

З початку і до кінця процесу різання товщина та площі зрізів від всіх лез зростають. Що стосується впливу кута нахилу інструменту на геометрію стружки, то можна помітити, що збільшення кута нахилу призводить до збільшення товщини стружки та площі поперечного зрізу стружки (рис. 8). Більші значення кута нахилу інструменту призводить до нарізання довшої стружки. Такий ефект пояснюється збільшеною траєкторією зачеплення між інструментом і робочою заготовкою [16]. Збільшення осьової подачі різання призводить також до збільшення як товщини стружки, так і площі поперечного зрізу стружки в усіх зрізах (рис. 9).

У всіх випадках максимальна товщина та площа стружки спостерігалася на останніх етапах різання. У процесі різання максимального навантаження зазнавала верхня частина різця (рис. 7-10). Це також узгоджується з експериментальними результатами інших авторів, які проводили дослідження на реальному обладнанні [17, 18].

У всіх виконаних симуляціях вплив осьової подачі інструмента на величину товщини та площі зрізу недеформованої стружки є найбільшим, що демонструє прямий зв'язок між швидкістю подачі та формою стружки. Оскільки в багатьох випадках зона безперешкодного руху навколо шестерні обмежена, великі значення кута нахилу не завжди досяжні.

Цікаво, що модуль зубчастого колеса не впливає на товщину зрізу стружки - зростає лише її площа за рахунок довжини стружки (рис. 10). Результати моделювання підтверджують здатність моделі надійно та імітувати процес різання Power skiving. Інформація, отримана з моделі, може покращити розуміння процесу різання. Маючи графічні залежності площі чи товщини недеформованої стружки від осьової подачі, модуля, кута нахилу інструмента технолог може підібрати оптимальні технологічні параметри для нарізання зубчастого вінця для відповідного обладнання. Також відомо [19], що площа зрізу недеформованої стружки безпосередньо пов'язана з величиною сили різання і необхідною потужністю двигуна обладнання.

## Література / References

1. Monden T., Kikuchi T., Yoshikawa K., Fujimura N., Georgoussis A. Super Skiving Cutter: An Innovative Process Modification for Gear Skiving. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*. 2019. Vol. 56(1). P. 1-7. <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e561/e561110.pdf>
2. Olivoni E., Vertechy R., Parenti-Castelli V. Power skiving manufacturing process: A review. *Mechanism and Machine Theory*. 2022. Vol. 175. P. 104955. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104955>
3. Nagata E., Tachikawa T., Nakahara Y., Kurita N., Nakamura M., Iba D., Moriwaki I. Gear skiving for mass production. The Japan Society of Mechanical Engineers. *In The Proceedings of the JSME international conference on motion and power transmissions*. 2017. P. 02-13. <https://doi.org/10.1299/jsmeimpt.2017.02-13>
4. Inui M., Huang Y., Onouka H., Umezu N. Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 48. P. 520-527.
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.promfg.2020.05.078>
6. Bauer R., Dix M. Novel method for manufacturing herringbone gears by power skiving. *Procedia CIRP*, 2022. Vol. 112. P. 310-315. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.003>
7. 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>
8. 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. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.08.004>
9. Fang Z., Ren Z., Shu L., Kizaki T., Sugita N. A parametric modeling for fast radial infeed planning process in gear skiving. *Mechanism and Machine Theory*. 2022. Vol. 174. P. 104909. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104909>
10. Huang K., Yu J., Wang J., Zhang C., Wan L. A vectorization model to closed-form solution for cutting forces prediction during face-hobbing of hypoid gears. *Mechanism and Machine Theory*.



2022. Vol. 173. P. 104824. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.104824>

11. 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>

12. Apprich T., Brenner J., Dambacher M., Dreher F., Fischer G., Greiner G., Hochstatter A. Tabellenbuch für Zerspantechnik. In *Europa-Fachbuchreihe für Metallberufe. Verlag Europa-Lehrmittel*. 2020. [https://bsz.ibs-bw.de/aDISWeb/app?service=direct/0/Home/\\$DirectLink&sp=SOPAC15&sp=SAKSWB-IdNr1727857992](https://bsz.ibs-bw.de/aDISWeb/app?service=direct/0/Home/$DirectLink&sp=SOPAC15&sp=SAKSWB-IdNr1727857992)

13. Li J., Wang P., Jin Y. Q., Hu Q., Chen X. C. Cutting force calculation for gear slicing with energy method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 83. P. 887-896. DOI: [10.1007/s00170-015-7630-0](https://doi.org/10.1007/s00170-015-7630-0)

14. 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>

15. 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](https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0008).

16. Tapoglou N. Calculation of non-deformed chip and gear geometry in power skiving using a CAD-based simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 100(5). P. 1779-1785. DOI: [10.1007/s00170-018-2790-3](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2790-3)

17. Antoniadis A. Gear skiving – CAD simulation approach. *Computer-Aided Design*. 2012. Vol. 44(7), P. 611-616. DOI: [10.1016/j.cad.2012.02.003](https://doi.org/10.1016/j.cad.2012.02.003).

18. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. Cutting force model for power skiving of internal gear. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 56, P. 1277-1285. DOI: [10.1016/j.jmapro.2020.04.022](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.022)

19. Hrytsay I., Slipchuk A., Bosansky M. Justification of the choice of parameters for the gear power skiving operation based on computer simulation. *Journal of Mechanical Engineering – Strojnícky Casopis*. 2023. Vol. 73(2), P. 33–44. DOI: [10.2478/scjme-2023-0020](https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0020).