

УДК 622.24.051.55

doi:10.20998/2413-4295.2024.02.01

ВПЛИВ СТРАТЕГІЇ РІЗАННЯ НА ГЕОМЕТРІЮ НЕДЕФОРМОВАНОЇ СТРУЖКИ НА ЕТАПІ ВРІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ЗОВНІШНЬОГО ЗУБЧАСТОГО КОЛЕСА МЕТОДОМ POWER SKIVING

А. М. СЛІПЧУК*, Д. О. ДЖУРА

кафедра робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, УКРАЇНА

*e-mail: andrii.m.slipchuk@lpnu.ua

АНОТАЦІЯ Описано кінематику зубонарізання та алгоритм моделювання під час вривання різального інструменту в заготовку. Цей важливий етап процесу різання є одним з найнебезпечнішим не тільки у зуботочінні, але і при будь-якому методі обробки, а тому потребує ретельного дослідження. Аналізуючи результати дослідження у цьому напрямі та враховуючи стрімкий розвиток відносно нового методу нарізання зубчастих коліс можна зробити висновки про ще велику кількість не вирішених проблем під час обробки. Перш за все це пов'язано із складною кінематикою процесу і відповідно ускладненнями при відтворенні різання. В описі кінематики зубонарізання були представлені методи створення моделі симуляції зубонарізання, а також системи координат необхідні для перетворення системи координат профілю інструмента в систему координат профілю заготовки. Завдяки використанню середовища САПР, твердотільні моделі, які беруть участь у процесі, з найкращою доступною точністю відтворюють процес різання. Для кожного такого положення було встановлено точне розташування різачка та проміжне положення заготовки в цей момент часу. Для конкретного прикладу, на основі алгоритму було побудовано профілі зрізів недеформованої стружки для зовнішніх прямозубих коліс при різних стратегіях вривання. Крім того, було застосовано аналітичний метод розрахунку положення перехідної поверхні та визначено максимальну товщину та площу стружки та підтверджено симуляцією для різних технологічних параметрів, а саме глибини вривання та кількості робочих переходів. Порівняння між аналітично розрахованою максимальною товщиною стружки та змодельованою максимальною товщиною стружки показує хороший збіг результатів. Отримані товщини і площі зрізів стружки можуть бути використані як індикатори для регулювання процесу різання, так і для оптимізації процесу. Встановлено характер зміни геометрії стружки для різних стратегій та переходів. Маючи повну інформацію про геометричні величини недеформованої стружки можна також встановити якісні характеристики процесу.

Ключові слова: Power skiving; вривання; недеформована стружка; зуботочіння; моделювання; зубчасте колесо.

THE IMPACT OF CUTTING STRATEGY ON THE GEOMETRY OF THE UNDEFORMED CHIP DURING THE CUTTING-IN STAGE IN THE PROCESSING OF EXTERNAL GEAR USING THE POWER SKIVING METHOD

A. SLIPCHUK, D. DZHURA

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

ABSTRACT The kinematics of gear cutting and the modeling algorithm for the cutting-in of the cutting tool into the workpiece is described. This important stage of the cutting process is one of the most dangerous not only in gear turning, but in any machining process, and therefore requires careful study. Analyzing the results of research in this area, and taking into account the rapid development of a relatively new method of gear cutting, we can conclude that there are still a large number of unsolved problems during machining. This is primarily due to the complex kinematics of the process and the associated difficulties in reproducing the cut. In describing the kinematics of gear cutting, we have presented methods for creating a gear cutting simulation model, as well as the coordinate systems required to convert the tool profile coordinate system into the workpiece profile coordinate system. Using the CAD environment, the solid models involved in the process reproduce the cutting process with the best accuracy available. For each of these positions, the exact position of the cutter and the intermediate position of the workpiece at that time were determined. In a specific example, the algorithm was used to generate undeformed cutting profiles for external spur gears with different cutting strategies. In addition, an analytical method was applied to calculate the position of the transition surface and the maximum chip thickness and area were determined and confirmed by simulation for various process parameters, namely depth of cut and number of working transitions. The comparison between the analytically calculated maximum chip thickness and the simulated maximum chip thickness shows a good agreement. The obtained chip thicknesses and cut areas can be used as indicators to control the cutting process and to optimize the process. The nature of the change in chip geometry for different strategies and transitions was determined. With complete information on the geometric values of undeformed chips, it is also possible to determine the qualitative characteristics of the process.

Keywords: Power Skiving technology; cutting-in; undeformed chip; gear cutting; modeling; gear.

Вступ

Більшість механічного обладнання в аерокосмічній, автомобільній, верстатобудівній галузі потребує передачі зусиль, крутних моментів та руху,

що з великою точністю досягається за допомогою зубчастих коліс. Проте, ефективна робота зубчастої пари залежить головним чином від форми, геометричної точності та якості профілю зубчастих

коліс. Ці характеристики часто пов'язані з похибками під час виробництва зубчастих коліс, тому при виборі технологічного процесу виготовлення будь-якої деталі, ключову роль буде відігравати методи оброблення та обладнання. Не менш важливим фактором при виборі оптимального методу оброблення є його економічна доцільність та ефективність для відповідного типу виробництва.

Серед різноманіття методів нарізання зубчастих коліс за останні роки серед відомих світових виробників все частіше можна зустріти застосування Power skiving. З розвитком програмованого верстатобудування технічні можливості спеціального устаткування з ЧПУ, з удосконаленням різальним інструментом для нарізання зубчастого вінця дозволяє розширювати область застосування такого методу (рис. 1). На даний момент цей метод зуботочіння можна вже застосовувати і на звичайних 5- та 6- координатних верстатах, які мають високий ступінь жорсткості та синхронізації шпинделів, з необхідним програмним забезпеченням [1]. Свою популярність він завдячує перед усім високою продуктивністю, гнучкістю, точністю та універсальністю. Зараз цей метод є найпродуктивніший для виготовлення більшості звичайних евольвентних зубчастих коліс [2], особливо із внутрішнім зубчастим вінцем, де арсенал можливих способів нарізання досить малий. Метод, який все частіше застосовується для нарізання зовнішніх чи внутрішніх зубчастих вінців, як прямозубих, косозубих коліс з різними модулями (в більшості випадків до 10мм) та діаметрами (обмежуються розмірами обладнання), так і шевронних [1,3]. Сьогодні він все більше витісняє такі найпопулярніші методи, як зубофрезерування, зубодовбання та протягування, недоліками яких залишається дорого вартісний інструмент або низька продуктивність. Завдяки безперервному різанню та обробкою за один установ заготовки методом Power skiving можна за короткий проміжок часу нарізати зубчастий вінець 7 ступеня точності з якісною поверхнею зубця [4].

Це є визначальними характеристиками для застосування способу нарізання зубів у будь-якому конкурентноздатному підприємстві, особливо, якщо це стосується великої партії готової продукції [2].

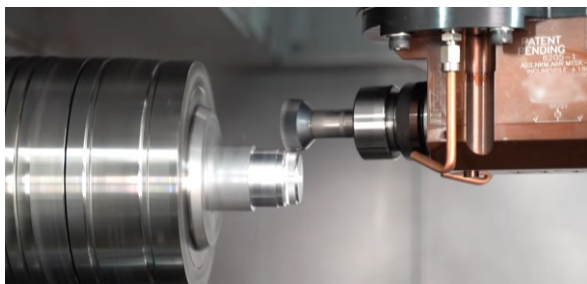


Рис. 1 – Процес нарізання зовнішнього зубчастого колеса на підприємстві [5]

Хоча метод Power skiving вперше був описаний теоретично ще 1910 році [6], то лише за останні два десятиліття він став предметом ретельного дослідження різних світових технічних установ та лабораторій. Враховуючи відносно новизну застосування такого методу нарізання зубчастих коліс, цей метод постійно удосконалюється в області визначення ефективніших параметрів різального інструменту, підборі робочих режимів різання, визначення оптимальної кінематичної схеми зуботочіння для відповідного обладнання.

Мета роботи

Провести моделювання процесу врізання інструменту у заготовку під час нарізання зовнішніх зубців для різних технологічних параметрів, а саме глибини врізання та встановлення кількості робочих переходів. Цей важливий етап процесу різання є одним з найнебезпечніших не тільки у зуботочінні, але і при будь-якому різанні. Відомо, що у момент врізання припадає найбільше поломок інструмента [7]. У процесі різання етап врізання та виходу інструмента із матеріалу супроводжується динамічними процесами коливання, ударами, різкими знакозмінними напруженнями.

Огляд літературних джерел

При дослідженні зубофрезерування, які на сьогоднішній день повністю вивчені науковцями, одним з найефективніших методів відтворення його кінематики є отримання недеформованої стружки. В подальшому дослідники визначали сили різання, тертя, роботу інструмента. Аналогічна методика застосовується і при вивченні тривимірної топографії бічних поверхонь у міжзубних проміжках циліндричних зубчастих коліс, які обробляються методом Power Skiving [8,10,11]. Автори цих робіт застосовують потужні програмні середовища, проте, змушені вдаватись до певних спрощень при відтворенні процесу різання. Зокрема, такі програми, як FRS, FRSDYN та FRSFEM, були використанні в їх дослідженнях. Для випадку нарізання зубчастих коліс відповідні розрахунки автори проводили за допомогою чисельних методів із задовільною точністю, яка в подальшому була покращена за допомогою моделювання на основі САПР, як це показано в [8,12-14].

Фундаментальні дослідження проведено у роботі [15], де автори представили тривимірну модель для розрахунку граничних значень швидкості різання, переднього кута і товщини недеформованої зрізаної стружки, яка була реалізована за допомогою САПР 3D. Результати дослідження були отримані виключно теоретичними розрахунками та моделюванням. Проте, автори так і не отримали кінцеві аналітичні залежності, за допомогою яких можна було б вибрати

безпечну та ефективну подачу інструменту при відповідній товщині різання.

Дослідники у роботі [16] розробили модель для проектування процесу з багатопрхідною стратегією різання. Вони встановили випадки зварювання стружки, яке могло бути наслідком наявності від'ємних передніх кутів під час різання. Проте, авторами не було визначено ні сили різання, ні моделі деформованої стружки.

За допомогою програми Software SPARTAPRO Берг та інші у роботі [17] створили моделі заготовки та інструменту. Таким чином, вони отримали січення недеформованої стружки на кожному проході, побудували два різні профілі зубчастих коліс. Представили аналітичний метод розрахунку максимальної товщини стружки. Проте, відтворення процесу різання показано із певним зміщенням, а профіль зубця різача змодельовано не симетрично, що призводить до деяких спотворень результатів.

Дослідження у роботі [18] зосереджене на моделюванні кінематики процесу різання за допомогою комерційного програмного забезпечення CAD, і автор наводить недеформовану стружку та розраховані сили різання. Проте, автор розглядає прямо бічний профіль різача та не вірно відтворює кінематику процесу, що призводить до отримання недостовірних результатів, які змушений корегувати поправочними коефіцієнтами.

Шульц та інші у роботі [19] представили результати дослідження кінематики процесу та механізмів стружкоутворення. Спочатку було описано експериментальний аналіз, який є важливою основою для розробки та підтвердження розроблених моделей. В подальших експериментах було визначено поведінку досліджуваного матеріалу SAE 5120. Моделювання процесу є центральним аспектом дослідження. Це включає в себе базове моделювання кінематики в 3D-моделі. Моделювання дозволяє проаналізувати вплив кінематичних параметрів, а також механізмів утворення стружки та дати оцінку їх впливу на надійність процесу. Проте, у своїх дослідженнях автори змушені застосувати певні спрощення при моделюванні, зокрема, припускають прямобічний профіль зуба різача та розглядають процес, як зубофрезерування, а це принципово два різних методи. Як наслідок, автори так і не встановили математичну модель, а основні результати були зосереджені на підвищенні стійкості інструменту.

Більшість робіт, присвячених Power skiving, базуються на моделюванні методу з подальшим порівнянням результатів, які отримали шляхом багато чисельних експериментів. Числові значення визначенні шляхом теоретичних розрахунків частково підтверджують з практично отриманими даними. Зокрема, автори [2,16] намагалися описати кінематику нарізання зубців на шестерні та відтворити алгоритм моделювання.

Аналізуючи результати дослідження та враховуючи стрімкий розвиток цього відносно нового

методу різання зубчастих коліс можна зробити висновки про ще велику кількість не вирішених проблем під час обробки. Перш за все, це пов'язано із складною кінематикою процесу і відповідно ускладненнями при відтворенні різання. У більшості представлених дослідницьких робіт для підтримки дослідницької діяльності використовувалося програмне забезпечення для моделювання та розрахунків. Однією з можливостей моделювання є метод скінчених елементів [20], але, як бачимо, автори розглядають в основному усталений режим різання, а процеси, які відбуваються під час врізання, залишаються поза увагою науковців.

Методика досліджень

Для побудови недеформованої стружки використаємо методику, яка розроблена для черв'ячного зубофрезерування [14]. Принцип його застосування полягає в тому, що процес різання розглядається як дискретні положення контура зубця в кожний момент часу. Кожне таке положення різача встановлюється з врахуванням кута повороту та його проходження в осьовому напрямі за одиницю часу та призначають відповідний індекс «i». Отже, необхідно відобразити контури зубців інструменту, наприклад, для якогось n оберту по куту повороту при $(i-1)\varphi$, а потім у цих же положеннях, але для $n+1$ оберту та з врахуванням осьової подачі $(i-1)s_o$. Якщо співставити ці контури, то можна отримати відображення миттєвий перегин зрізу. Такий контур зрізу виконує даний зубець різача в певний момент часу у своєму робочому положенні. Склавши всі отримані зрізи недеформованої стружки, які отримані для кожного дискретного положення інструменту, можна відстежити динаміку зміни геометрії стружки, а при застосування кінематичної операції у програмному середовищі отримати 3D модель.

Основний матеріал

Хоча моделювання методом скінчених елементів дає близькі до реальних результатів, які отримані під час експерименту, воно вимагає високих обчислювальних потужностей і хороших знань для коригування моделі.

Більш ефективним з точки зору обчислень є отримані результати, які пораховані після аналітичних розрахунків. Необхідно аналітично описати рух 2 тіл (заготовка-різач), тобто встановити їх положення в кожний момент часу. Наклавши відповідні профілі зубчастого колеса та зубця різача один відносно одного, можна отримати переріз утвореної стружки для розглянутого положення. При розрахунку геометричного врізання інструменту в заготовку моделювання зводиться до множини двовимірних накладань лінійних площин їх профілів. Отримані результати за допомогою цього методу були успішно підтвержені в минулому для

зубофрезерування [21]. Маючи кінцеві моделі, можна відтворити хід процесу різання. З'являється можливість згенерувати цифровий дизайн кінцевої геометрії зубчастих коліс [22] та стружки [23].

Для того, щоб виконати розрахунок врізання, необхідно описати інструмент і заготовку в параметричній формі. Використаємо вже описаний метод [24] для процесу Power skiving, але під час врізання. І якщо усталений режим різання для різних технологічних параметрів різання був розглянутий в [24], то етап врізання є ключовим та надзвичайно важливим у розглядуваному методі зубочіння та може вплинути на призначення кількості проходів та змінити рекомендовані технологічні величини.

Процес зубонарізання аналітично досліджується з точки зору максимальної товщини стружки і, виходячи з цього, пропонуються рекомендації щодо проектування процесу. Розроблена симуляція здатна розраховувати відповідну геометрію зрізу на кожному оберті врізання інструменту в заготовку. Розраховується товщина стружки, площа стружки і отримані результати вносяться у таблицю. За допомогою спроектованого профілю різця та перехідної поверхні можна розрахувати глибину проникнення інструменту в заготовку для дискретних часових і просторових інтервалах. Нарешті, розроблена симуляція була протестована на колесі із зовнішнім зубчастим вінцем.

Розглянемо випадок нарізання зубчастого колеса з такими вихідними даними:

- колесо евольвентне прямозубе;
- модуль 2,5 мм;
- кількість зубців: колеса 33, різак 24;
- осьова подача 0,5 мм/об.;
- швидкість різання 190 м/хв.;
- кут нахилу зубців різця і кут схрещення осей

25°;

- кількість проходів: розглянемо три, чотири та п'ять проходів.

- матеріал пластин різця – твердий титано-танталовий сплав;

- висота вінця колеса 30 мм;

- коефіцієнт тертя на передній поверхні для даної швидкості 0,63;

Для дослідження процесу нарізання зубців на колесі розглянемо три стратегії підбору глибини для кожного переходу.

Розподілимо усю глибину по проходах:

Стратегія 1 –

для трьох переходів відповідно 2мм, 2мм та 1,25мм.

Стратегія 2 – для чотирьох переходів відповідно 1,5мм, 1,5мм, 1,5 мм та 0,75мм.

Стратегія 3 – для п'яти переходів відповідно 1,5мм, 1мм, 1мм, 1мм та 0,75мм.

Для отримання правильного зрізу стружки та реального відтворення процесу врізання необхідно аналітично розрахувати положення зубця різаків та отриманої впадини на зубчастому колесі, яка була отримана на попередньому оберті. Такі розрахунки

були здійснені за допомогою системи рівняння перетину овалу (різак) та кола (зубчасте колесо), яке було складено для практичного розглянутого прикладу та підтверджено 3D моделюванням (рис. 2).

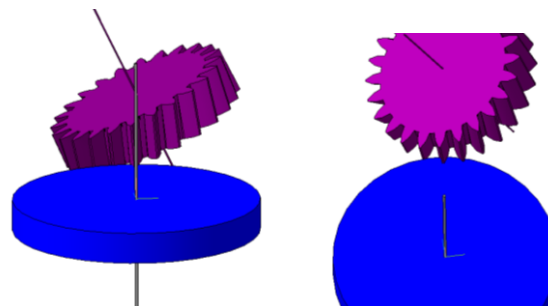


Рис. 2 – 3D моделювання процесу Power skiving

Завдяки використанню середовища САПР, твердотільні моделі, які беруть участь у процесі, з найкращою доступною точністю відтворюють процес різання. Для кожного такого положення було встановлено точне розташування різаків та проміжне положення заготовки в цей момент часу. Симуляція також дозволяє візуалізувати процес різання та покращує розуміння процесу врізання.

Використаний у моделі підхід із застосуванням послідовних профілів для опису руху інструменту в тривимірному просторі дозволяє краще контролювати точність створеного твердого тіла.

Для моделювання процесу різання всі рухи, які є у ньому, розглядаються у певний момент часу і фіксуються у деякому положенні. Таким чином, інструмент 1 обертається навколо своєї власної осі з деякою швидкістю $V_{різ}$, крім того він переміщується вздовж осі обертання заготовки - $V_{под}$. Вісь нахилена під певним кутом Σ (рис. 3).

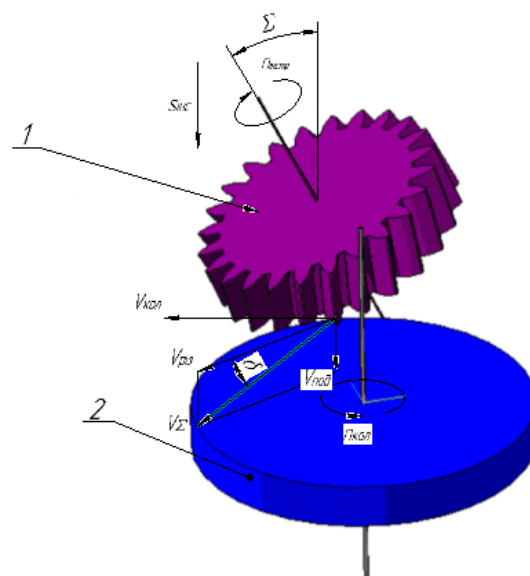


Рис. 3 – Кінематична схема розташування інструмент-заготовка при методі Power skiving

Для адекватного відтворення Power skiving створена імітаційна модель відображала рухи інструменту:

- $n_{\text{інстр}}$ – частота обертання інструмента навколо своєї осі;
- $n_{\text{кол}}$ – частота обертання заготовки зубчастого колеса навколо своєї осі;
- Σ – кут нахилу інструмента відносно заготовки. На виробництві такий кут приймають в межах від 15° до 35° . Чим більший кут нахилу, тим менша кутова швидкість потрібна для процесу різання, але так як кут не можливо збільшувати з технологічної точки зору, особливо для внутрішнього нарізання, то для нашого випадку його величину приймемо 25° .

$S_{\text{інс}}$ – подача інструмента вздовж осі обертання заготовки зубчастого колеса.

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

Враховуючи, що міжосьова відстань між колесом та різачком для кожного проходу буде змінюватися, зону зачеплення інструменту із заготовкою зубчастого колеса будемо розподіляти в залежності від проходу. Розглянемо перший випадок, коли весь процес нарізання буде відбуватися у 3 проходи. На першому проході, коли глибина перекриття рівна 2,0мм (рис.4 а), зону зачеплення інструменту із заготовкою зубчастого колеса поділимо на 5 послідовних кутових позицій, позначених -3, -2, -1, 0, 1. Перший оберт різачка, при якому відбувається різання, буде відповідати положенню -3 (положення відкладено вправо від вертикалі на $13,4^{\circ}$), на другому оберті – положення -2 (9°), -1 позиція кут рівний $4,7^{\circ}$, а на четвертому положенню 0 позиція кут рівний $0,4^{\circ}$ (кути були визначені аналітичними розрахунками). П'яте положення вже буде знаходитися після вертикалі, а кут відкладений вліво буде рівний $3,9^{\circ}$, що відповідає 1 положенню (положення зубця різачка на п'ятому оберті). Для даного випадку такий кутовий крок між положеннями буде рівний $4,34^{\circ}$. Вже для наступного проходу з глибиною перекриття 4,0мм таких положень буде 6, так як зона перекриття у цьому випадку буде більшою (рис.4 б). Для такої глибини позначимо нове положення -4, як буде відповідати врізанні на першому оберті У такий спосіб розрахуємо всі базові положення різачка для кожного проходу і для кожної глибини.

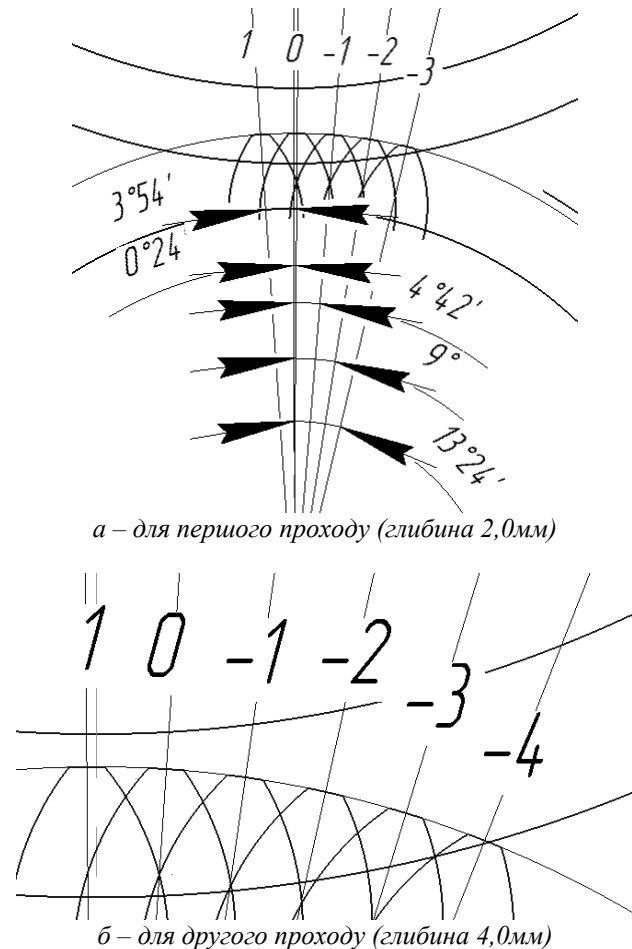


Рис. 4 – Проекції зубця різачка на заготовку під час врізання для різних обертів

Так як на першому проході та на першому оберті різачка заготовка є ще суцільним тілом, то перший зріз буде суцільним та буде відповідати перекриттю зубця різачка і заготовки (Рис. 5 а). Вже на другому оберті профіль різця буде розташований в положенні -2, а зріз, отриманий після першого оберту, необхідно встановити у положення, яке зміщене на величину подачі, помножену на передаточне відношення. Необхідно сумістити профіль різця та зріз, встановлений після першого проходу – отримаємо другий зріз (замальована зона) (рис. 5 б). Таку саму операцію проводимо і для наступного положення. Отримаємо ансамбль зрізів на кожному оберті (рис. 5 в). При такій глибині перекриття інструмент-заготовка процес різання перейде в усталений режим вже на шостому оберті. У даній статті він нас не буде цікавити, так як вже розглядався у роботах [25]. Виконаємо таку саму процедуру для наступної глибини перекриття – 4,0 мм. та 5,25мм. Як видно з рис. 4, для встановлення усталеного режиму різання при більшій глибині перекриття кількість обертів врізання зростає, а відповідно і положень. Зокрема, при повній глибині різання 5,25мм таких обертів врізання в заготовки потрібно 7,3, щоб вийти

на стаціонарний режим роботи інструменту. По такій самій методиці розглянемо інші стратегії нарізання зубчастого вінця, а саме в 4 та 5 проходів з відповідними глибинами різання, які прописані вище.

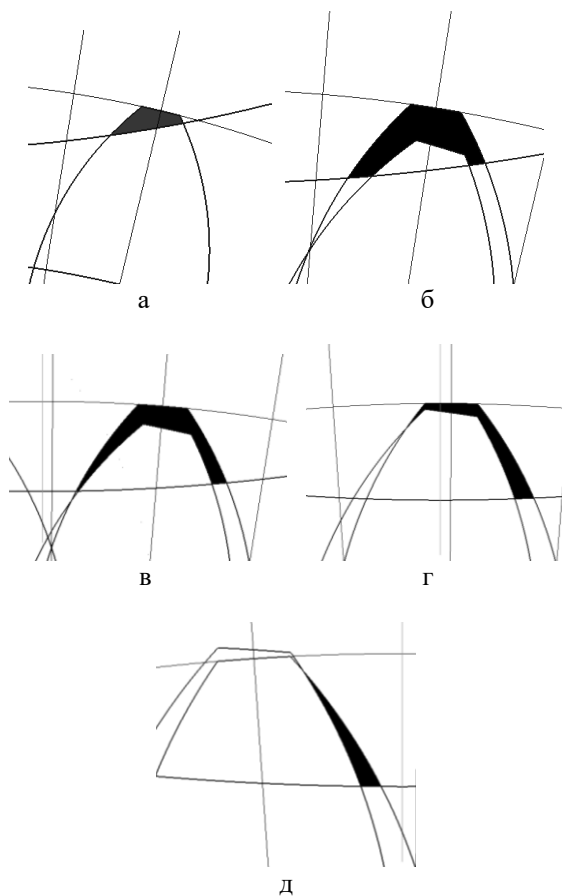


Рис. 5 – Зрізи стружки, які утворюються під час процесу врізання від першого обороту (а) до n'ятого обороту (д)

Результати досліджень

Моделювання було виконано для нарізання зовнішнього зубчастого вінця (вхідні дані див. вище), а його результати (для першого переходу) відтворені у графічному вигляді (рис. 5). Для покращення розуміння роботи зубця різачка можна розділити його леза на частини: вхідна, вершина, вихідна, але розрахунків тоді буде представлено занадто багато, тому зупинимося лише на результатах різних стратегій проходження (розглянемо різну кількість проходів для встановлення оптимальної кількості. За результатами дослідження можна підібрати оптимальну стратегію нарізання зубчастого вінця, відповідно до можливостей обладнання. Встановивши сили різання, а вони безпосередньо залежать від площі недеформованої стружки (за формулою Кінцле), можна вибрати необхідну кількість проходів та подачу інструменту. Аналіз отриманих зрізів на відповідній стратегії (при різних значеннях глибини

різання для кожного проходку інструмента) дозволить адекватно побачити роботу скайвінг-інструменту, зробити висновки та рекомендувати технологічні параметри для ефективного процесу різання. Отримані залежності продемонстровано на рис. 6-8.

Стратегія 1

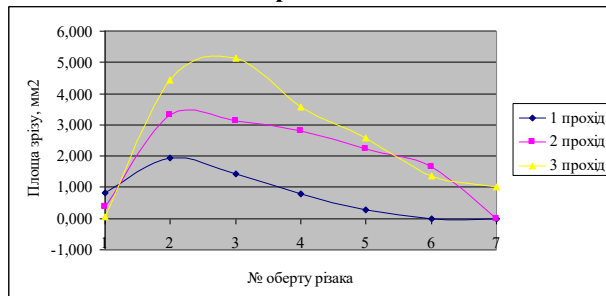


Рис. 6 – Площі зрізу стружки при зубонарізанні за стратегією 1

Стратегія 2

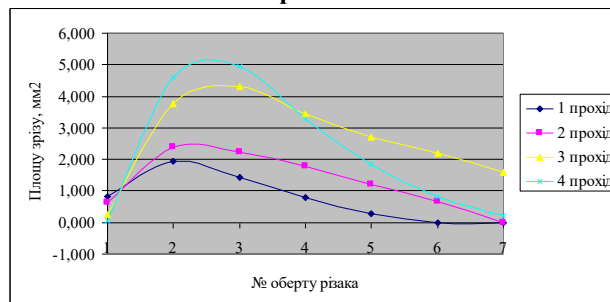


Рис. 7 – Площі зрізу стружки при зубонарізанні за стратегією 2

Стратегія 3

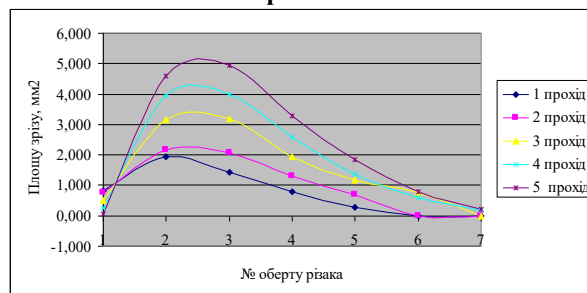


Рис. 8 – Площі зрізу стружки при зубонарізанні за стратегією 3

Обговорення результатів

Як видно з рис. 6-8, не залежно від вибраної стратегії, максимальна площа зрізу недеформованої стружки припадає на 2-3 оберт. Така властивість характерна також для кожного переходу. Вже після 3 обороту різачка площа поступово зменшується, а після 7 обороту процес різання переходить у стаціонарний

режим. Максимальні зусилля будуть припадати на останній перехід, що і очікувалося. Можливо, якщо різниця глибини різання між передостаннім та останнім обертом різального інструменту буде меншою (до 0,5 мм, у вигляді фінішного переходу), то площі будуть менші. Такі припущення можна провести у наступних дослідженнях, і переконатися у їх достовірності.

Характер геометрії стружки для різних стратегій та переходів залишається сталим і є типовим для всіх обертів (рис. 5). Різниця полягає лише у величині площі і товщині стружки. Процес різання на першому оберті у всіх випадках починається від вершинного леза (рис. 5 а), а далі вже в наступному оберті чашковий різець працює всіма лезами (рис. 5 б-г), лише останній оберт етапу врізання показує те, що зубонарізання відбувається вхідним лезом (рис. 5 д).

З рис. 5 а-д можна спостерігати, що для вершинного леза площа недеформованої стружки спочатку поступово зростає (від 1 до 2 оберту), але вже починаючи з третього оберту різачка площа зрізу стружки спадає, а на останніх обертах взагалі відсутнє. І навпаки, вхідне лезо зуба різачка на першому оберті не ріже (рис. 5 а), а далі поступово навантаження на нього зростає. На останньому оберті стадії врізання інструменту лише воно працює, хоча і площа менша ніж на попередньому оберті.

Таким чином, якщо аналізувати етап врізання, то кількість переходів суттєво не впливає на величину площі зрізу стружки, а лише при стаціонарному різанні. Останні переходи для кожної стратегії визначають максимальні зусилля, які буде зазнавати різальний інструмент, на нього і слід орієнтуватися. Можна зробити висновки, що глибину різання перших переходів можна встановлювати з більшим значенням, а на останніх переходах необхідно зменшувати таку величину. Для визначеної площі зрізу можна розрахувати значення сил різання та підібрати таку глибину різання, щоб технічні можливості обладнання (допустимі зусилля та критична потужність) дозволяли проводити безпечне зубонарізання. Як і слід було очікувати, з кожним наступним робочим проходом величина площі та товщини стружки зростають (рис. 6-8). Аналізуючи отримані числові значення цих величин, стає зрозуміло, що при таких глибинах різання, подача 0,5 мм/об є надто великою, особливо на останніх проходах. Інструмент і обладнання буде зазнавати великих навантажень і відповідно температур, що негативно впливає на роботу інструменту. Очевидно, що для врізання такі режими не годяться. І якщо ще при стаціонарному режимі різання подачі 0,5 мм/об за 4 проходи можна нарізати, як це показано у [26], то для режиму врізання такі умови роботи є небезпечними.

Для розглянутого випадку видно, що сумарна площа зрізу взагалі більша 5мм², що є абсолютно не прийнятно для роботи інструменту. Отже, у цьому випадку необхідно обов'язково зменшувати глибину

різання, особливо останні робочі проходи (збільшити кількість проходів і зменшити величину подачі). В залежності від характеристик обладнання, його силових параметрів можна підібрати оптимальні технологічні величини та встановити остаточні показники різання.

При зубонарізуванні існують різні стратегії та підходи щодо регулювання різання. Можливі варіанти: при вибраній кількості переходів підібрати відповідну подачу, яка дозволить не виходити за межі сил та потужності верстату. Можна змінити кількість переходів для заданої осьової подачі, при будь-яких умовах необхідно врахувати і швидкість різання, яка дозволить отримати прийнятну якість поверхні зуба та його точність. Як видно з початкових даних, вказана задача представляє собою багатофакторні дослідження для знаходження оптимального підбору технологічних параметрів, основна мета якої є час обробки.

Такі дослідження можна провести також для різних осьових подач інструмента, під різними кутами нахилу, для нарізання зубчастих коліс з різними модулями та кількістю зубців інструменту.

Висновки

Під час врізання на перших обертах зубець skiving-інструменту в момент контакту з площиною торця колеса зазнає інтенсивних ударів, а відповідно сила різання тоді буде зростати стрибкоподібно. На основі отриманих результатів можна запропонувати такий шлях підвищення ефективності процесу Power Skiving. Для більшості коліс, які виготовляють серійно, шлях врізання значно менший від висоти вінця колеса. Для багатократного зменшення ударних навантажень, які діють на інструмент і верстат необхідно значно збільшити кількість проходів, тобто, зменшити глибину різання на кожному проході, проте лише на етапі врізання. Після завершення врізання в багатьох випадках можливо продовження різання на решту висоти колеса на повну глибину за один прохід. При необхідності, якщо ця сила занадто велика, можна використати два, або три проходи. Ефективність можна збільшити, якщо обробляти вузькі зубчасті колеса шляхом закріплення їх у пакет з кількох заготовок.

Список літератури

1. Dix M., Drossel W. G., Schlecht B. et.al. Potentials and limitations in production and use of herringbone gears for high-performance gearboxes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023. 45. P. 151-161. doi: 10.1016/j.cirpj.2023.06.007.
2. 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. doi: 10.1299/jsmeimpt.2017.02-13.

3. Bauer R., Dix M. Novel method for manufacturing herringbone gears by power skiving. *Procedia CIRP*. 2022. 112. P. 310-315 doi: 10.1016/j.procir.2022.09.003.
4. Guo Z., Xie R., Guo W., Han W., Gao F., Zhang Y. A Novel Method for Improving the Skiving Accuracy of Gears with Profile and Lead Modifications. *Machines*. 2023. 11(1). 87. doi: 10.3390/machines11010087.
5. Power Skiving. URL: <https://www.cmz.com/en/power-skiving/> (дата звернення: 28.05.2024).
6. W. von Pittler. Verfahren zum Schneiden von Zahnradern mittels eines zahnradartigen, an den Stirnflächen der Zahne mit Schneidkanten versehenen Schneidwerkzeugs. *Patent specification n. 243514*, Berlin. 1910.
7. Булига Ю. В., Слабкий А. В. *Основи інструментального виробництва : навчальний посібник*. Вінниця: ВНТУ, 2018. 149 с.
8. Michalski J., Skoczylas L. Modelling the tooth flanks of hobbled gears in the CAD environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008. 36. P. 746-751. doi: 10.1007/s00170-006-0874-y.
9. Грицай І. Є. *Теоретико-прикладні основи комплексних наукових досліджень процесу нарізання зубчастих коліс*. Львів: Сполом, 2009. 254 с.
10. Antoniadis A., Vidakis N., Bilalis N. Fatigue fracture investigation of cemented carbide tools in gear hobbing, Part 1: FEM modeling of fly hobbing and computational interpretation of experimental results. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2002. 124(4). P.784-791. doi: 10.1115/1.1511172.
11. Jia K., Guo J., Ma T. et al. Mathematical modelling of power skiving for general profile based on numerical enveloping. *Int J Adv Manuf. Technol.* 2021. 116. P. 733–746. doi: 10.1007/s00170-021-07485-6.
12. Vasilis D., Nectarios V., Aristomenis A. Advanced computer aided design simulation of gear hobbing by means of three-dimensional kinematics modeling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007. 129(5). P. 911-918. doi: 10.1115/1.2738947.
13. Dimitriou V., Antoniadis A. CAD-based simulation of the hobbing process for the manufacturing of spur and helical gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. 1. P. 347-357. doi: 10.1007/s00170-008-1465-x.
14. Nikolaos T., Aristomenis A. CAD-based calculation of cutting force components in gear hobbing. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2012. 134 (3). P. 031009. doi: 10.1115/1.4006553.
15. Vargas B., Schulze V. Three-dimensional modeling of gear skiving kinematics for comprehensive process design in practical applications. *CIRP Annals*. 2021. 70(1). P. 99-102. doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.075.
16. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., & Krömer M. Technological and simulative analysis of power skiving. *Procedia Cirp*. 2016. 50. P. 773-778. doi: 10.1016/j.procir.2016.05.052.
17. Bergs T., Georgoussis A., Löpenhaus C. Development of a numerical simulation method for gear skiving. *Procedia CIRP*. 2020. 88. P. 352-357. doi: 10.1016/j.procir.2020.05.061.
18. 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. 100(5-8). P. 1779-1785. doi: 10.1007/s00170-018-2790-3.
19. Schulze V., Kühlewein C., Autenrieth H. 3D-FEM modeling of gear skiving to investigate kinematics and chip formation mechanisms. *Advanced Materials Research*. 2011. 223. P. 46 - 55. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.46.
20. McCloskey P., Katz A., Berglind L., Erkorkmaz K., Ozturk E., Ismail F. Chip geometry and cutting forces in gear power skiving. *CIRP Annals*. 2019. 68(1). P. 109-112. doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.085.
21. Hrytsay I., Stupnytsky V., Topchii V. Improved Method of Gear Hobbing Computer Aided Simulation. *Archive of mechanical engineering*. 2019. 66 (4). P. 475-494. doi: 10.24425/ame.2019.131358.
22. Krömer M., Brecher C., Löpenhaus C., Weber G. T. Validierung von spanenden Fertigungssimulationen am Beispiel Wälzfräsen. In *GETPRO. Kongress zur Getriebeproduktion*. 2015.
23. Сліпчук А. Моделювання недеформованої стружки, утвореної під час нарізання внутрішнього зубчастого вінця методом "power skiving". *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2023. 3(17). P. 26–33. doi: 10.20998/2413-4295.2023.03.04.
24. Slipchuk A. Modeling of undeformed chip in power skiving gear cutting process. *Scientific Journal of TNTU*. 2023. 11(3). P. 84–96. doi: 10.33108/visnyk_tntu2023.03.084.
25. Hrytsay I., Slipchuk A., & Bosansky M. Justification of the choice of parameters for the gear power skiving operation based on computer simulation. *Strojnický časopis – Journal of mechanical engineering*. 2023. 73(2). P. 33-44. doi: 10.2478/scjme-2023-0020.
26. Hrytsai I., Slipchuk A. Features of using the over-skiving method for multi-pass cutting of external gears. *Mech. Adv. Technol.* 2023. 7 (3) (99). P. 317–324. doi: 10.20535/2521-1943.2023.7.3.289230.

References (transliterated)

1. Dix M., Drossel W. G., Schlecht B. et.al. Potentials and limitations in production and use of herringbone gearings for high-performance gearboxes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2023, 45, pp. 151-161, doi: 10.1016/j.cirp.2023.06.007.
2. 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, pp. 02-13, doi: 10.1299/jsmeimpt.2017.02-13.
3. Bauer R., Dix M. Novel method for manufacturing herringbone gears by power skiving. *Procedia CIRP*, 2022, 112, pp. 310-315, doi: 10.1016/j.procir.2022.09.003.
4. Guo Z., Xie R., Guo W., Han W., Gao F., Zhang Y. A Novel Method for Improving the Skiving Accuracy of Gears with Profile and Lead Modifications. *Machines*, 2023, 11(1), pp. 87, doi: 10.3390/machines11010087.
5. Power Skiving. Available at: <https://www.cmz.com/en/power-skiving/> (accessed: 28.05.2024).
6. W. von Pittler. Verfahren zum Schneiden von Zahnradern mittels eines zahnradartigen, an den Stirnflächen der Zahne mit Schneidkanten versehenen Schneidwerkzeugs. *Patent specification n. 243514*, Berlin. 1910.
7. Bulyha Yu. V., Slabkyy A. V. *Osnovy instrumental'noho vyrobnytstva [Fundamentals of instrumental production]*. Vinnitsa. VNTU, 2018. 149 p.
8. Michalski J., Skoczylas L. Modelling the tooth flanks of hobbled gears in the CAD environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 36, pp. 746-751, doi: 10.1007/s00170-006-0874-y.
9. Hrytsai I. *Teoretyko-prykladni osnovy kompleksnykh naukovykh doslidzhen' protsesu narizannya zubchastykh*

- kolis [Theoretical and applied foundations of complex scientific studies of the gear cutting process].* Lviv. Spolom, 2009. 254 p.
10. Antoniadis A., Vidakis N., Bilalis N. Fatigue fracture investigation of cemented carbide tools in gear hobbing, Part 1: FEM modeling of fly hobbing and computational interpretation of experimental results. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2002, 124(4), pp. 784-791, doi: 10.1115/1.1511172.
 11. Jia K., Guo J., Ma T. et al. Mathematical modelling of power skiving for general profile based on numerical enveloping. *Int J Adv Manuf. Technol.*, 2021, 116, pp. 733-746, doi: 10.1007/s00170-021-07485-6.
 12. Vasilis D., Nectarios V., Aristomenis A. Advanced computer aided design simulation of gear hobbing by means of three-dimensional kinematics modeling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, 129(5), pp. 911-918, doi: 10.1115/1.2738947.
 13. Dimitriou V., Antoniadis A. CAD-based simulation of the hobbing process for the manufacturing of spur and helical gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 1, pp. 347-357, doi: 10.1007/s00170-008-1465-x.
 14. Nikolaos T., Aristomenis A. CAD-based calculation of cutting force components in gear hobbing. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2012, 134 (3), pp. 031009, doi: 10.1115/1.4006553.
 15. Vargas B., Schulze V. Three-dimensional modeling of gear skiving kinematics for comprehensive process design in practical applications. *CIRP Annals*, 2021, 70(1), pp. 99-102, doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.075.
 16. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., & Krömer M. Technological and simulative analysis of power skiving. *Procedia Cirp.*, 2016, 50, pp. 773-778, doi: 10.1016/j.procir.2016.05.052.
 17. Bergs T., Georgoussis A., Löpenhaus C. Development of a numerical simulation method for gear skiving. *Procedia CIRP*, 2020, 88, pp. 352-357, doi: 10.1016/j.procir.2020.05.061.
 18. 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, 100(5-8), pp. 1779-1785, doi: 10.1007/s00170-018-2790-3.
 19. Schulze V., Kühlewein C., Autenrieth H. 3D-FEM modeling of gear skiving to investigate kinematics and chip formation mechanisms. *Advanced Materials Research*, 2011, 223, pp. 46-55, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.46.
 20. McCloskey P., Katz A., Berglund L., Erkorkmaz K., Ozturk E., Ismail F. Chip geometry and cutting forces in gear power skiving. *CIRP Annals*, 2019, 68(1), pp. 109-112, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.085.
 21. Hrytsay I., Stupnytskyy V., Topchii V. Improved Method of Gear Hobbing Computer Aided Simulation. *Archive of mechanical engineering*, 2019, Vol. 66, no. 4, pp. 475-494, doi: 10.24425/ame.2019.131358.
 22. Krömer M., Brecher C., Löpenhaus C., Weber G. T. Validierung von spanenden Fertigungssimulationen am Beispiel Wälzfräsen. In *GETPRO. Kongress zur Getriebeproduktion*. 2015.
 23. Slipchuk A. Modelyuvannya nedeformovanoi struzhky utvorennoi pid chas narizannya vnutrishn'oho zubchastoho vintsya metodom "POWER SKIVING" [Simulation of undeformed chip formed during cutting for internal crown tooth by the " POWER SKIVING " method]. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2023. 3(17), pp. 26-33, doi: 10.20998/2413-4295.2023.03.04.
 24. Slipchuk A. Modeling of undeformed chip in power skiving gear cutting process. *Scientific Journal of TNTU*, 2023, Vol. 111, no 3, pp. 84-96, doi: 10.33108/visnyk_tntu2023.03.084.
 25. Hrytsay I., Slipchuk A., & Bosansky M. Justification of the choice of parameters for the gear power skiving operation based on computer simulation. *Strojnicky časopis – Journal of mechanical engineering*, 2023, 73(2), pp. 33-44, doi: 10.2478/scjme-2023-0020.
 26. Hrytsai I., Slipchuk A. Features of using the over-skiving method for multi-pass cutting of external gears. *Mech. Adv. Technol.*, 2023, Vol. 7, no. 3 (99), pp. 317-324, doi: 10.20535/2521-1943.2023.7.3.289230.

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, Lviv Polytechnic National University, Docent of the Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, c. L'viv, Ukraine, ORCID: orcid.org/0000-0003-0584-6104, e-mail: andsl@ukr.net

Джюра Данило Олегович – магістр, Національний університет «Львівська політехніка», магістр кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, м. Львів, Україна; e-mail: danylo.dzhura.mmptm.2023@lpnu.ua

Dzhura Danylo – Master, Lviv Polytechnic National University, Docent of the Department of Robotics and Integrated Mechanical Engineering Technologies, c. L'viv, Ukraine, e-mail: danylo.dzhura.mmptm.2023@lpnu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сліпчук А. М., Джюра Д. О. Вплив стратегії різання на геометрію недеформованої стружки на етапі врізання при обробці зовнішнього зубчастого колеса методом power skiving. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 2 (20). С. 3-11. doi:10.20998/2413-4295.2024.02.01.

Please cite this article as:

Slipchuk A., Dzhura D. The impact of cutting strategy on the geometry of the undeformed chip during the cutting-in stage in the processing of external gear using the power skiving method. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 2(20), pp. 3-11, doi:10.20998/2413-4295.2024.02.01.

*Надійшла (received) 28.05.2024
Прийнята (accepted) 23.06.2024*