

POWER SKIVING ЯК СУЧАСНИЙ СПОСІБ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ТА ОСОБЛИВОСТІ ЙОГО МОДЕЛЮВАННЯ

© Грицай І. Є., Сліпчук А. М., 2022

<https://doi.org/>

Мета. Проаналізувати стан у галузі нової технології Power skiving, межі її раціонального використання, її переваги і недоліки, сформувані основні напрямки розвитку даного методу зубонарізання та оптимізації будови і геометрії його різального інструменту. **Методика** досліджень полягає в аналізі багаточисельних праць, які присвячені новому ефективному методу зубообробки, систематизації наукових знань та практичного досвіду, розроблених методів математичного моделювання та комп'ютерного симулювання процесу Power skiving для подальшого його удосконалення та застосування у виробництві зубчастих коліс. **Результати** аналізу та систематизації даних про Power skiving дали змогу виявити недоліки відомих методів і підходів до моделювання та окреслити основні напрямки для їх удосконалення. **Наукова новизна та практичне значення** полягає у тому, що на основі опрацьованої інформації розроблено нові підходи до кінематичного описання процесу та оптимізації геометрії чашкових різців, а також обґрунтовано напрямки удосконалення технології Power skiving та різального інструменту для цього методу для максимально ефективного використання у виробництві зубчастих коліс.

Ключові слова: нарізання зубчастих коліс, технологія Power skiving, кінематика процесу, моделювання, геометричні параметри, глибина різання, сила різання, нерівномірність процесу.

Вступ

Зубчасті колеса є невід'ємними деталями приводів та передач сучасних машин, що на найближчу перспективу не мають альтернативи. Це деталі підвищеної складності і значної працемісткості, які продукують великими річними обсягами. Відомо, що на виготовлення зубчастих коліс припадає 10-12% загальної працемісткості машин, а за окремими групами обладнання та з врахуванням виробництва запасних частин – до 35-40%.

На сьогодні у різних галузях та типах виробництва використовують різні методи нарізання зубчастих коліс, які базуються на двох принципових засадах процесів різання-формування: копіювання та обкочування. Перший метод тривалий час вважався неефективним внаслідок обмеженої продуктивності, пов'язаної з необхідністю послідовного періодичного поділу, а також невисокої точності нарізання зубців. Проте його удосконалення призвело до створення швидкісного методу фрезопротягування впадин, який отримав застосування в автобудівній галузі при великих обсягах випуску продукції, що дещо розширило межі цього методу.

До останнього часу серед усіх процесів, які здійснюються на засадах неперервного обкочування найбільшого поширення набуло зубофрезерування зубчастих коліс модульними черв'ячними фрезами, яке поширюється на колеса модулем від 1 мм до 25 мм.

Це універсальний та продуктивний метод, який передбачає оброблення коліс на швидкостях різання від 30 до 180 м/хв, залежно від матеріалу інструменту. При виготовленні коліс внутрішнього зачеплення його застосування істотно обмежене розмірами деталей та спеціального спорядження. У витратах на виготовлення зубчастих коліс частка вартості черв'ячних фрез може доходити до 50-60% внаслідок складності конструкції, підвищених вимог до властивостей інструментального матеріалу, покриття та оснащення фрез пластинами з твердих і надтвердих матеріалів.

Водночас, процес зубофрезерування має істотний недолік, який полягає в нерівномірності розподілення навантаження між зубцями черв'ячної фрези. Це явище, яке можна відслідкувати за нерівномірним акустичним сигналом із зони різання, полягає в тому, що декілька зубців фрези на її

вхідній частині усувають понад половину усього припуску із впадини між зубцями заготовки. Такий стан призводить до значного навантаження на ці зубці, виникнення динамічних навантажень на інструмент і верстат, а як наслідок – це лімітує величину граничної осьової подачі і обмежує продуктивність процесів виготовлення зубчастих коліс і шестерень. Багаточисельні спроби усунути цей недолік шляхом зміни схеми різання і перерозподілення припуску між усіма зубцями фрези для його рівномірного усунення не дали жодних позитивних результатів.

Крім того, цей спосіб має обмеження за точністю виготовлення зубчастих коліс. Для того, щоб досягти підвищеної точності оброблення (вище 7 ступеня), необхідно використовувати черв'ячні фрези найвищих класів точності (AA та AAA), що значно здорожує собівартість таких коліс. Водночас, висока точність і якість зубчастих коліс і шестерень є основою високих експлуатаційних параметрів передач, зокрема ресурсу, рівня шуму, витрат палива чи інших видів енергії, зменшення габаритів та маси редукторів і збільшення потужності, яка передається, тощо, які є необхідними умовами функціонування сучасних машин.

Такий стан у галузі зубообробки призвів до пошуку нових альтернативних методів зубооброблення, що було реалізоване, зокрема у створенні і розвитку способу зубонарізання, який отримав назву Power skiving, або Hard scudding для оброблення коліс підвищеної твердості. Цей процес, відомий ще як зуботочіння, був винайдений на початку минулого століття у Німеччині.

На сьогодні цей процес є об'єктом всесторонніх досліджень для багатьох наукових закладів та науковців у різних країнах. Для вирішення задачі раціонального використання цього способу необхідно проаналізувати стан із межами його використання, переваги і недоліки, сформулювати основні напрямки розвитку цієї технології та оптимізації різальних інструментів для ефективної реалізації, що становить *мету даної* роботи.

Аналіз літературних джерел

Для математичного описання процесів та явищ, які супроводять той, чи інший процес різання, необхідна, насамперед адекватна кінематична схема. Аналіз першоджерел показує, що у відомих дослідженнях цього процесу не правильно оцінюють його кінематику. Так, у роботі [1] швидкість різання представлено вектором, який за величиною та напрямком визначається як векторна сума швидкостей обертання деталі та руху інструменту в осьовій подачі. Подібний підхід наведено в роботах [2-5]. При цьому, слід різання приймається як лінійний рух контуру зубця інструменту у впадині паралельно осі колеса. Проте в теорії різання, якщо рухомими є і інструмент, і заготовка, то головний рух надають не заготовці, а різальному інструменту. У даному випадку обидва рухи – осьова подача і обертовий рух різця – формують сумарну кінематику руху різання, а обертання заготовки виконує роль допоміжного руху – кругової подачі. Отже, в цих працях вектор головного руху визначено помилково, що зумовлює низку неточностей і помилок при моделюванні багатьох параметрів цього процесу, зокрема деформаційних процесів стружкоутворення, сили різання, дійсних кутів інструменту тощо.

Значна кількість відомих досліджень виконувались із метою підвищення точності оброблення та довговічності інструменту. Наприклад, в праці [4] розроблено імітаційну модель недеформованої стружки та сил різання, проте в цих розрахунках не враховано переміщення інструменту в осьовій подачі, а також дійсну форму та розміри перехідної поверхні, в якій відбувається процес різання. Для розрахунку сили різання автори використовують коефіцієнти впливу чинників процесу на цей параметр, але не базові та загальноприйняті засади теорії різання, тому цей підхід не підтверджений випробуваннями. Подібний підхід до прогнозування геометричної моделі зрізуваних шарів, сили різання та кінематичних параметрів – переднього та заднього кутів інструменту при зуботочінні описано в роботі [5], але вектор сумарної швидкості різання не відповідає дійсному напрямку головного руху, що призводить до похибки при моделюванні цього процесу. Як наслідок – експериментальні дослідження цього процесу, виконані токарно-фрезерному верстаті, значно відрізняються від теоретичних даних.

В дослідженнях, наведених в роботах [6-10], подано методику проектування інструментів, із врахуванням їх багатократного повторного перезагострення, нанесення багатшарових покриттів та оптимізації негативних задніх кутів, які виникають на інструменті в результаті його установки з пархрещенням осей відносно заготовки, але результати цих досліджень не використані повною мірою для практичної реалізації отриманих результатів. В роботі [8] розроблено імітаційну модель процесу різання в процесі Power skiving на основі методу основи кінцевих елементів, за якою прогнозують силу різання і температуру, проте запропонований підхід характеризується значною складністю та працемісткістю досліджень.

Поширення методу в наш час

Аналіз першоджерел засвідчує, що на даний час Power skiving успішно використовують для виготовлення зубчастих прямозубих і косозубих коліс внутрішнього і зовнішнього зачеплення, а також шліцевих поверхонь.

Якщо до 2020 року ця технологія успішно застосовувалася в автотракторобудуванні, верстатобудуванні для коліс малих і середніх модулів, то останнім часом вона поширюється на колеса модулем 6-10 мм і більше, зокрема в енергетичному і важкому машинобудуванні.

Завдяки найновішим технологічним розробкам, зокрема досягненням у галузі верстатобудування, їх програмного забезпечення та інструментального виробництва ця технологія стала гнучкою та ефективною, а також альтернативною традиційним методам зубооброблення.

Обладнанням служать як універсальні багатоцільові п'ятикоординатні верстати з ЧПК, так і спеціалізовані напівавтоматичні зубонарізні верстати (рис. 1). Як показує практика, для цих цілей можливе також використання модернізованих верстатів фрезерної і токарної груп.

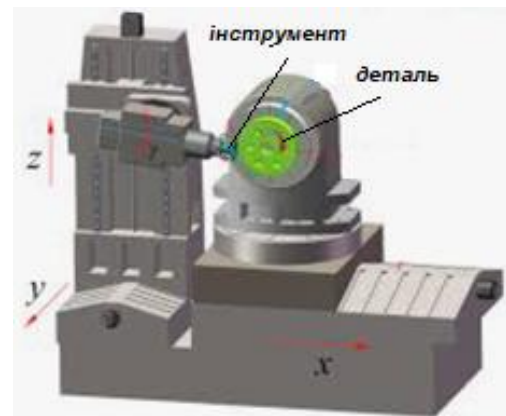


Рис. 1. Загальний вид спеціалізованого зубонарізного верстата з ЧПК для процесу Power skiving

Fig. 1. General view of a specialized CNC gear cutting machine for the Power skiving process

Суть методу

Різальним інструментом у Power skiving служать чашкові різці, які за будовою та розмірами в осьовому січненні аналогічні до модульних зубчастих довбачів, але сам інструмент є косозубчастим і відповідає евольвентному колесу з гвинтовими зубцями (рис. 2).

Процес різання відбувається за рахунок різниці швидкостей ковзання профілів внаслідок схрещення осей колеса та інструменту на певний кут (рис. 3), який при нарізанні прямозубих коліс рівний куту підйому гвинтової лінії різачка.



Рис. 2. Типові інструменти для Power skiving

Fig. 2. Typical tools for

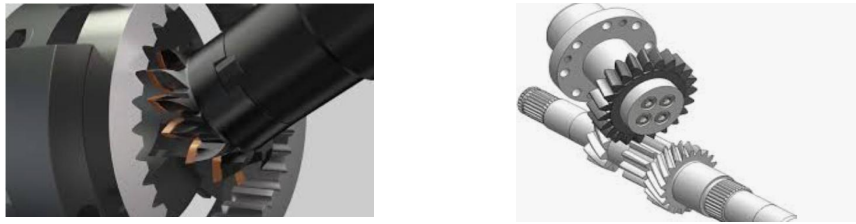


Рис. 3. Перехрещення осей інструменту і заготовки

Fig. 3. Intersection of tool and workpiece axes

Передню поверхню зубців в інструменті формують нормально до напрямку гвинтової поверхні його зубців, а у верстатному зачепленні інструменту і заготовки відтворено евольвентне зачеплення в циліндричній передачі з перехресними осями. Якщо передня поверхня зубців сформована у площині торця чашкоподібного різця, то для формування евольвентних профілів зубців, які нарізають, торцевий профіль зубців інструменту необхідно корегувати з урахуванням їх нахилу відносно зубців колеса, що ускладнює проектування та здорожчує їх виробництво.

Особливості кінематики процесу Power skiving

Відомо, що зуботочіння за методом Power skiving здійснюється з високими швидкостями різання – до 300 м/хв. Це вимагає підвищеної жорсткості верстата та високого рівня синхронізування обертання інструменту і заготовки, оскільки порушення цих вимог призводить до втрати точності нарізання зубчастих коліс.

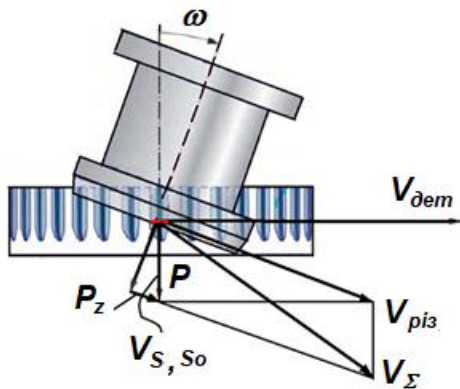


Рис. 4. Кінематика процесу Power skiving

Fig. 4. Kinematics of the Power skiving

На відміну від поширеного трактування кінематики, суть якого наведена вище, пропонується інша кінематична схема, наведена на рис. 4. На цій схемі позначено: V_{dem} – лінійна швидкість обертального руху деталі; V_{piz} – лінійна швидкість чашкового різця; V_s – швидкість руху інструменту в осьовій подачі, що збігається з швидкістю зниження зубця по осі подачі внаслідок перехрещення осей; V_{Σ} – швидкість сумарного результуючого руху різання.

Відповідно до такого підходу, перший компонент головного руху, тобто руху різання – це обертання різця, який поєднаний з конструктивним переміщенням різця в напрямку осі заготовки (для прямозубого колеса), що виникає внаслідок схрещення осей. Другим компонентом кінематики різання є переміщення інструменту в осьовій подачі s_o . В таких умовах результуючий рух різання, який описаний вектором V_{Σ} , буде визначений геометричною сумою цих двох рухів.

Ще один рух, присутній в цьому методі – обертання заготовки, тобто, колова подача, є допоміжним рухом, що відповідає вектору V_{dem} .

Істотний недолік у прийнятому трактуванні кінематики процесу Power skiving, як це наведено, зокрема, в роботі [1], полягає в наступному. Для здійснення процесу різання і формоутворення робоча пара “інструмент – заготовка” повинна відтворювати зачеплення колеса і шестірні одного модуля з різною кількістю зубців. Очевидно, що частота обертання кожного з елементів цієї пари є різною, відповідно до величини передавального співвідношення “ i ”. Це означає, що лінійна швидкість заготовки V_{dem} буде в “ i ” разів більшою від лінійної швидкості різця

$V_{різ}$. Отже, результуюча швидкість різання, в основу якої покладено величину і вектор $V_{дет}$, буде і за напрямком, і за величиною відрізнятися від реальної. Якщо моделювання базувати на цьому векторі, то, очевидно, будуть неправильно розраховані сила стружкоутворення, сили тертя на передній і задній поверхнях, кінематичні кути на вершинному і бокових лезах інструменту, а також вплив цих чинників на інші важливі параметри цього процесу.

Іншою особливістю при моделюванні процесу зуботочіння є наступне. Стружка, яка зрізається окремих зубцем інструменту в процесі усталеного різання, тобто в проміжному положенні заготовки та різачка на певній віддалі від торця колеса, починає формуватися на куті $\varphi_{вхід}$, а завершує формуватися на куті повороту різачка $\varphi_{вих}$ (рис. 5), переміщаючись за час даного повороту по осі колеса в русі подачі. Таким чином, траєкторія руху зубця є коловою, а не прямолінійною, як це представлено в наведених вище роботах. Не врахування кругового руху інструменту також призводить до додаткових відхилень при моделюванні об'ємної недеформованої стружки, а звідси – до чергових помилок в описанні усіх явищ, які супроводять цей процес, зокрема до розподілу складових сили різання і оцінки їх впливу на пружні коливання і точність оброблення, тертя, теплоту і зношування інструменту.

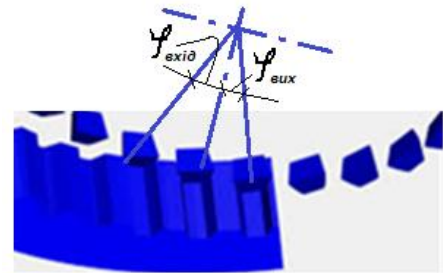


Рис. 5. Траєкторія руху зубців різачка в процесі зуботочіння

Fig. 5. The trajectory of the movement of the teeth of the cutter in the Power skiving

Порівняно із черв'ячним зубофрезеруванням в процесі зуботочіння стружка в окремій впадині на куті, рівному $\varphi_{вхід} + \varphi_{вих}$, формується одним зубцем, в той час, як для черв'ячної фрези кожен із її зубців на робочій довжині фрези зрізає тільки йому притаманну стружку. Таким чином, сили різання в зуботочінні значно більші, що може стати причиною підвищених коливань та вібрацій верстата. Це означає, що необхідно враховувати динаміку процесу різання та його вплив на виникнення вимушених і автоколивань в процесі Power skiving, залежно від сили різання, швидкості різання та динамічних параметрів пружної системи верстата.

Особливості технології

Процес Power skiving є оригінальним процесом, не подібним до інших відомих процесів нарізання зубчастих коліс. Єдиною спільною ознакою для цих процесів, зокрема зубофрезерування черв'ячними фрезами та зубодовбанням, є те, що всі вони здійснюються в умовах неперервного обкочування інструменту і заготовки.

Висока продуктивність процесу Power skiving досягається завдяки дуже високим швидкостям різання, але іншою необхідною умовою цього є необхідність використання малих глибин різання; для коліс модулем понад 3 мм використовують багатопрохідне зуботочіння.

Важливе значення в цих умовах має оптимізація розподілу припуску між проходами. Занадто мала товщина зрізів зумовлює малу товщину зрізуваних шарів. Як відомо, при малих товщинах зрізів радіус заокруглення співмірний із цим параметром, а різання замінюється зминанням і розтиранням припуску по поверхні різання. Зміцнення цієї поверхні, яке виникає при цьому, негативно впливає на стійкість інструменту.

Іншим аспектом зменшення глибини різання є підвищення інтенсивності процесу осадження стружки, що призводить до зростання сили різання і навантаження на технологічну систему верстата.

Якщо ж при розподіленні припуску між окремими проходами збільшити глибину різання більше певного її значення, то це призведе до зростання сили різання (P) і крутного моменту, який викликає окружна сила P_z (рис. 4), порушення синхронізації в рухах інструменту і заготовки, що не припустиме при великих частотах їх обертання.

Таким чином, необхідно розробити математичний апарат для оптимізації поділу глибини різання між окремими послідовними проходами усунення припуску із впадин між зубцями.

Геометричні параметри інструменту

Внаслідок кутової установки інструменту відносно деталі змінюється дійсна геометрія різця, але це зміна не постійна, а відбувається по куту повороту інструменту. Максимальна зміна величини кінематичних (дійсних) кутів на лезах різця, порівняно з початковими (“базовими”, або “інструментальними” кутами) має місце на вході і виході, а в центральній площині (площині міжосьового перпендикуляра) ці кути відповідають інструментальним, які надаються інструменту при його виготовленні. Неперервна зміна цих кутів викликає зміну сили стружкоутворення на вершинному і бокових лезах зубця чашкового різця, а також зміну тертя на його передній і задній поверхнях. Дані про закономірності зміни кінематичних кутів дадуть змогу при виготовленні різальних пластин утворити на їх бокових лезах базові кути, які компенсують їх зміну внаслідок установки інструменту на верстаті, і таким чином, зменшити силу і потужність різання, а також підвищити стійкість інструментів.

Покриття

Дуже мала товщина зрізів у даному процесі вимагає для нормальної роботи гострозаточеного інструменту. Проте малий радіус округлення леза і великий додатній передній кут послаблює різальний клин зубця. Отже, щоб у таких умовах зберегти міцність зубців необхідно використовувати захисні покриття. Товщина цих багат шарових покриттів, склад їх шарів та властивості повинні враховувати одночасно захист від тертя, яке різне на різних поверхнях цих зубців та необхідність зміцнення покращенням їх механічних властивостей. Крім того, оскільки після кожного переозагострювання по передній поверхні змінюється профіль зубців інструменту, то необхідно враховувати таку зміну для збереження стабільності профілю цих зубців, щоб мінімізувати похибки оброблення. Як описано раніше, профіль зуба заготовки регулярно змінюється під час повторного заточування заднього кута різачка. Крім того, профіль зуба різачка змінюється в процесі видалення покриття перед повторним нанесенням. Ці похибки накопичуються при повторному нанесенні нового покриття. Таким чином, бокові сторони зуба різачка необхідно періодично змінювати, щоб мінімізувати похибки різання.

Висновки

1. На сьогодні застосування Power skiving поширюється на зубчасті колеса все більших модулів та охоплює все ширші галузі машинобудування.

2. Особливості високошвидкісного процесу Power skiving вимагають детального обґрунтування такого робочого параметра, як глибина різання для можливості вести оброблення зубчастих коліс із високими швидкостями.

3. Внаслідок специфічної схеми різання дійсна геометрія чашкових різців значно відрізняється від тої, яку цей інструмент отримав у процесі його виготовлення. Це спричиняє значні зміни в процесах стружкоутворення і тертя на різних поверхнях робочих зубців, що визначає задачу зміни конструкції цих інструментів.

4. Зміна дійсних кутів різального клина під час нарізання зубців призводить до нерівномірності навантаження на технологічну систему, тому актуальною задачею є модифікація схеми різання і будови чашкових різців для усунення цих негативних явищ.

5. Процес Power skiving (PS) характеризується нерівномірним навантаженням на інструмент і верстат у процесі нарізання зубчастих коліс, що вимагає удосконалення базової схеми різання з метою більш плавної роботи та забезпечення високої синхронізації в кінематичних ланках інструменту і заготовки.

6. Такий стан у технології PS пояснює потребу в необхідності розроблення моделей і комп'ютерного симулювання цього процесу для вирішення вказаних задач.

Список літератури

1. Stadtfeld H. J. Power Skiving of Cylindrical Gears on Different Machine Platforms // Gear Technology. 2014. Vol. 1. P. 52-62. URL : <https://www.geartechnology.com/ext/resources/issues/0114x/power-skiving.pdf>.
2. Nishikawa T., Shimada S., Kobayashi G., Ren Z., Sugita N. Using Power Skiving to Increase the Efficiency and Precision of Internal Gear Cutting // Komatsu Tech. Rep. 2018. № 64. P. 1-7.
3. Tapoglou N. Calculation of non-deformed chip and gear geometry in power skiving using a CAD-based simulation // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 100 (5-8). P. 1779-1785. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2790-3>.
4. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. Cutting force model for power skiving of internal gear // Journal of Manufacturing Processes. 2020. № 56. P. 1277-1285. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.022>.
5. 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). P. 109-112. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.085>.
6. Tsai C. Y. Mathematical model for design and analysis of power skiving tool for involute gear cutting // Mechanism and Machine Theory. 2016. № 101. P. 195-208.
7. Tsai C. Y. Simple mathematical approach for analyzing gear tooth profile errors of different gears cut using same power-skiving tool // Mechanism and Machine Theory. 2022. № 177. P. 105042. URL : <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105042>.
8. Kühlewein C. Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation: 3D-FEM Kinematik-und Spanbildungssimulation. 2013.
9. 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.
10. 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). P. 1779-1785.

I. Hrytsay, A. Slipchuk

Lviv Polytechnical National University

POWER SKIVING AS A MODERN METHOD OF CUTTING GEAR WHEELS AND FEATURES OF ITS MODELING

Aim. Analyze the state of the branch of new Power skiving technology, the limits of its rational use, its advantages and disadvantages, to form the main directions of development of this method of tooth cutting and optimization of the structure and geometry of its cutting tool. **Method.** The research consists in the analysis of numerous works; they are devoted to a new effective method of tooth processing, systematization of scientific knowledge and practical experience, developed methods of mathematical modeling and computer simulation of the Power skiving process for its further improvement and application in the production of gear wheels. **Results.** The results of the analysis and systematization of data on Power skiving made it possible to identify the shortcomings of known methods and approaches to modeling and outline the main directions for their improvement. **The scientific novelty and practical significance** lies in the fact that, on the basis of the processed information, new approaches to the kinematical description of the process and the optimization of the geometry of cup cutters have been developed, as well as the directions for improving the Power skiving technology and the cutting tool for this method have been substantiated for the most effective use in the production of gear wheels.

Key words: gear cutting, power skiving technology, process kinematics, modeling, geometric parameters, cutting depth, cutting force, irregularity of process.

References

1. Stadtfeld H. J. (2014). Power Skiving of Cylindrical Gears on Different Machine Platforms // Gear Technology. Vol. 1. P. 52-62. URL : <https://www.geartechnology.com/ext/resources/issues/0114x/power-skiving.pdf>.
2. Nishikawa T., Shimada S., Kobayashi G., Ren Z., Sugita N. (2018). Using Power Skiving to Increase the Efficiency and Precision of Internal Gear Cutting // Komatsu Tech. Rep. № 64. P. 1-7.
3. Tapoglou N. (2019). Calculation of non-deformed chip and gear geometry in power skiving using a CAD-based simulation // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 100 (5-8). P. 1779-1785. URL : <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2790-3>.

3. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. (2020). Cutting force model for power skiving of internal gear // *Journal of Manufacturing Processes*. № 56. P. 1277-1285. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.022>.
5. McCloskey P., Katz A., Berglind L., Erkorkmaz K., Ozturk E., Ismail F. (2019). Chip geometry and cutting forces in gear power skiving // *CIRP Annals*. № 68(1). P. 109-112. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.085>.
6. Tsai C. Y. (2016). Mathematical model for design and analysis of power skiving tool for involute gear cutting // *Mechanism and Machine Theory*. № 101. P. 195-208.
7. Tsai C. Y. (2022). Simple mathematical approach for analyzing gear tooth profile errors of different gears cut using same power-skiving tool // *Mechanism and Machine Theory*. № 177. P. 105042. URL : <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2022.105042>.
8. Kühlewein C. (2013). Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation: 3D-FEM Kinematik-und Spanbildungssimulation.
9. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., Krömer M. (2016). Technological and simulative analysis of power skiving // *Procedia Cirp*. № 50. P. 773-778.
10. Tapoglou N. (2019). Calculation of non-deformed chip and gear geometry in power skiving using a CAD-based simulation. *The International // Journal of Advanced Manufacturing Technology*. № 100(5). P. 1779-1785.