

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛИ РІЗАННЯ ТА ЇЇ ВПЛИВУ НА БЕЗВІДМОВНІСТЬ ПРОЦЕСУ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС РАДІАЛЬНО-КОЛОВИМ МЕТОДОМ

<https://doi.org/10.23939/istcipa2023.59.036>

О Вергун В. А., 2025

Метою цієї статті є дослідження сили різання в радіально-коловому методі та її впливу на безвідмовність процесу зубооброблення. **Актуальність.** Верстати для виготовлення зубчастих коліс належать до автоматизованого обладнання. Це стосується як верстатів, оснащених системами ЧПК, так і універсальних верстатів, які працюють в автоматичному режимі протягом тривалого часу, беручи до уваги високу продуктивність операцій зубонарізання. Для такого виду обладнання важливо забезпечити його надійне функціонування, оскільки відмова в умовах безлюдного виробництва може завдати виробництву істотних збитків. До первинних чинників, які можуть бути причиною збоїв в роботі зубонарізних верстатів, належить сила різання. Процеси зубофрезерування, що відбуваються під час неперервного генерування зубчастих поверхонь, характеризуються значною нерівномірністю сили різання та періодичною стрибкоподібною зміною сили різання і крутного моменту, зумовлених особливістю схеми різання в умовах неперервного обточування. Скачки сили різання, які мають циклічний характер, можуть спричинити виникнення мікротріщин, відшарування, сколювання та ламання лез інструментів, що означає втрату працездатності верстатів. Виходячи з цього, завдання, яке розв'язується в статті, актуальне для сучасного виробництва. **Методика.** Прогнозування сили різання виконано на основі графо-аналітичного моделювання параметрів зрізуваних шарів та системи імітаційного моделювання Деформ 2Д. **Наукова новизна.** Результати дослідження створюють основу для обґрунтованого вибору умов перебігу процесів зубофрезерування радіально-коловим методом та вказують на можливі шляхи і заходи запобігання ламанню твердосплавного зубонарізного інструменту та забезпечення максимальної безвідмовної роботи зубофрезерних верстатів.

Ключові слова: зубчасті колеса, радіально-коловий метод, сила різання, піки сили, надійність, безвідмовність.

Вступ

Для автоматичного або автоматизованого обладнання важливо забезпечити надійність його функціонування протягом певного часу. Це повною мірою стосується зубонарізних верстатів як оснащених ЧПК, так і універсальних обточувальних верстатів, які можуть працювати тривалий час в безлюдному режимі. Особливо складним завданням є створення умов для безвідмовної роботи верстатів, оскільки збій, або відмова, є випадковою подією, яка важко піддається прогнозуванню, а непередбачуваний раптовий вихід з ладу інструменту та аварійна зупинка обладнання дорого коштує виробництву.

Серед основних чинників процесу нарізання зубчастих коліс, які можуть вплинути на втрату працездатності обладнання, є сила різання. Цей параметр впливає на низку показників технологічної операції, зокрема, на рівень пружних деформацій, вібрацій та коливань пружної системи, а також на роботу з усунення стружки та відповідно на теплоту і температуру різання. Кожне з цих явищ та їх параметрів може спричинити збій в роботі верстата. Так, коливання та вібрації, створюючи циклічні навантаження на різальний інструмент, і елементи верстата можуть викликати їх ламання. Теплота різання як результат роботи і тертя на контактних поверхнях інструменту стають причиною виникнення мікротріщин на їхніх робочих поверхнях, що може завершитися сколюванням частини різальної поверхні та ламанням інструменту. Беручи до уваги високу вартість зубооброблювальних верстатів та

різальних інструментів, відмови в роботі та заходи з їх усунення істотно впливають на собівартість зубчастих коліс і загалом машин, у приводах яких вони використовуються. Отже, запобігання цих негативних явищ, які зумовлені надмірними силами різання, є *актуальним завданням* для раціонального проєктування процесів виготовлення зубчастих коліс.

Одним з найбільш прогресивних та сучасних методів зубонарізання є радіально-коловий метод, який базується на використанні як різального інструменту тонкої відрізної дискової фрези. За цим методом одним простим і дешевим інструментом на одному звичайному зубофрезерному верстаті можна виготовляти колеса різних видів і типів зачеплення, що робить його найбільш гнучким, універсальним та ефективним. Виходячи з цього, *метою* цієї статті є дослідження сили різання в радіально-коловому методі та її впливу на безвідмовність процесу зубооброблення.

Огляд інформаційних джерел

Сила різання є функцією трьох основних чинників: інтенсивності осадження стружки, що визначається коефіцієнтом осадження χ ; міцності матеріалу, який обробляють (межі міцності на зсув – $[t]$), та площі зрізу – поперечного перерізу стружки (S). Величина параметра χ характеризує інтенсивність процесів на передній поверхні в ділянках первинного та вторинного пластичного деформування зрізуваного шару. Для адекватного описання сили різання треба мати достовірні дані про ці параметри. Стосовно процесів зубооброблення, які здійснюються в умовах неперервного генерування, до яких належить радіально-коловий метод, складність визначення параметрів зрізуваних шарів та інтенсивності зсуву полягає в тому, що їхні величини не є сталими, а змінюються на кожному зубці інструменту залежно від його положення в ділянці усунення припуску, а також за кутом повороту зубця. Ці обставини значно ускладнюють моделювання вказаних процесів.

Аналіз першоджерел, які містять результати дослідження параметрів зрізів у процесах зубооброблення, показав, що внаслідок їхньої складності часто вдаються до спрощення кінематики цих процесів, замінюючи просторові схеми планарними, або вилучаючи з рухів різання один з них – рух обкочування [1–11]. За такого підходу неможливо врахувати перехідну поверхню, яка утворена слідами різів інструменту, що формували впадину між зубцями в попередніх положеннях, а, власне, ця поверхня відображає внутрішню форму стружки та її розміри. Як наслідок, параметри, що впливають на силу різання – площа, товщина і ширина зрізів будуть визначені зі значними відхиленнями, що зменшує достовірність результатів моделювання.

Під час розрахунків сили різання також спостерігається відхід від умов реальних процесів. Поширена заміна площі перерізу, що є комплексним параметром, товщиною зрізу. Водночас це частковий параметр, який прив'язаний лише до вершинного леза і не дає повного уявлення про навантаження на бокові леза активних зубців інструменту. Відповідно, при цьому немає можливості оцінити осьову, тангенційну та радіальну складові сили різання та їх вплив на технологічну систему [1–4, 7, 12, 13].

Часто дослідники, не маючи повноцінного математичного апарату для врахування усіх чинників процесу, математично описують його в першому наближенні, а далі експериментально визначають вплив інших чинників та вводять в початкові формули відповідні поправні коефіцієнти [4, 12]. Зокрема, в статті [4] силу різання представляють у вигляді її складових, але значення цих складових визначають за допомогою коефіцієнтів, які отримують на основі експериментальних даних, що звужує діапазон використання таких результатів.

Відомі дослідження, в яких силу різання визначають на основі певного значення питомої сили різання [1, 2, 12]. Цей параметр відповідає величині сили, потрібної для зрізання припуску площею 1 мм^2 . Водночас питома сила є функцією коефіцієнта осадження стружки, який своєю чергою залежить від змінної товщини зрізуваних шарів. Під час зрізання тонких стружок, а також контакту зубця з заготовкою інтенсивність пластичного деформування значно більша порівняно із різанням з великою товщиною зрізу. Отже, питома сила не є статичною величиною, в процесі усунення припуску вона змінюється в широких межах навіть протягом одного різу, тому результати таких досліджень не можна вважати повноцінними.

Мета та завдання роботи

Метою є дослідження сили різання в радіально-коловому методі та її впливу на безвідмовність процесу зубооброблення. Завдання – на основі базових положень теорії різання і залежностей для сили різання дослідити її закономірності в радіально-коловому методі виготовлення зубчастих коліс, виявити причини циклічної зміни цього параметра, його вплив на стан дискового інструменту та сформулювати умови усунення потенційних причин виходу з ладу різального інструменту.

Виклад основного матеріалу

Особливістю процесів нарізання зубчастих коліс, які відбуваються за методом неперервного обкочування, є періодична зміна параметрів зрізуваних шарів за кутом повороту інструментів, що викликає коливання сили різання та крутного моменту. За цим методом здійснюються основні процеси зубооброблення, а саме – черв'ячне зубофрезерування, обкочувальне зубодовбання, зуботочіння ("power skiving"), а також радіально-коловий метод. У процесі *power skiving* усі зубці сканінг-фрези зрізають однакові за формою та розмірами стружки, хоча і зі змінними по її довжині параметрами. Значно складніші процеси зубофрезерування черв'ячною фрезою та дисковою фрезою в РКМ. Кількість стружок, які усувають інструменти із впадин між зубцями колеса, відповідає кількості активних зубців на гвинтовій поверхні черв'ячної фрези та на периферії дискової фрези, водночас кожна з окремих стружок на певному зубці має відмінні від інших форму та розміри. Відповідно сила різання як функція цих чинників буде підлягати складній залежності. Для прикладу на рис. 1 показано, як змінюється товщина зрізів дискової фрези в радіально-коловому методі під час зміни модуля (кількість зубців: колеса 20, фрези 20; осьова подача 1,2 мм/об., різання на повну глибину профіля зубця).

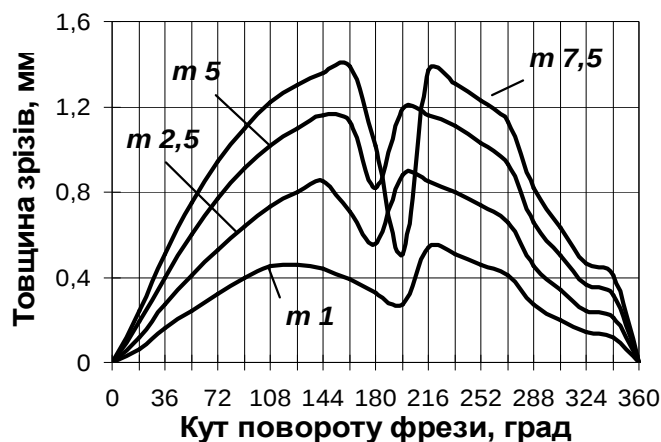


Рис. 1. Товщина зрізів дискової фрези по куту повороту залежно від модуля

Fig. 1. Chip thickness of a disk cutter by rotation angle, depending on the module of the slice section

На основі аналізу головної складової сили різання P_o , вектор якої збігається з вектором швидкості, її величина описується такою формулою різання [Герус, МЕ + Столяр, Стт_2]:

$$P_o = [\tau] \times S \times \chi, \text{ Н}, \quad (1)$$

де: S – площа поперечного перерізу зрізу, мм²; $[\tau]$ – межа міцності матеріалу заготовки на зсув, МПа; χ – коефіцієнт осадження стружки, який змінюється по товщині зрізів.

Результати досліджень залежності інтенсивності осадження стружки від товщини зрізів, виконані в системі Деформ 2Д для коліс модулем 1–10 мм, відображені на рис. 2.

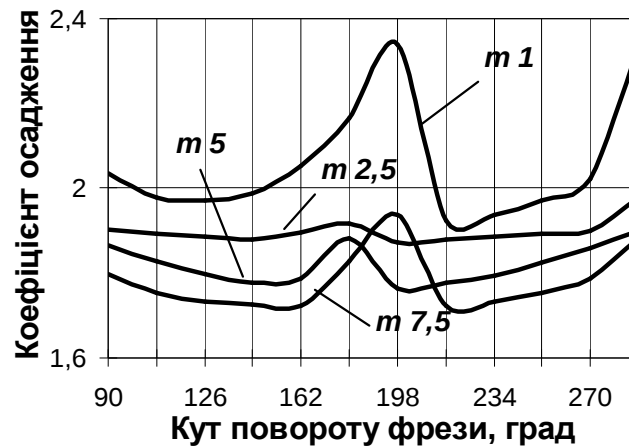


Рис. 2. Коефіцієнт осадження стружки по куту повороту колеса залежно від товщини зрізаного шару
 Fig. 2. The chip thickness ratio by gear rotation angle, depending on the thickness of the cut layer

Для цих залежностей і матеріалу колеса сталь 45 при межі міцності на зсув 325 МПа на рис. 3 відображено графіки сили різання по куту повороту фрези.

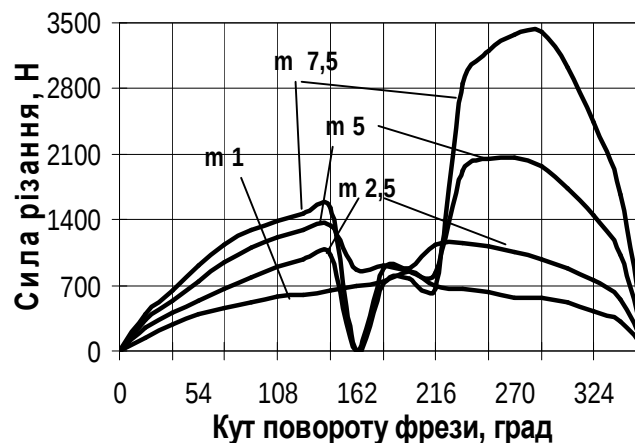


Рис. 3. Сила різання по куту повороту дискової фрези для різних значень модуля
 Fig. 3. Cutting force along the angle of rotation of the disk cutter for different values of the module

Графіки на рис. 3 ілюструють, що залежність сили різання, яка відображається її головною складовою, від модуля є неоднозначною.

Прорізання однієї впадини дисковою фрезою в радіально-коловому методі складається з двох етапів: різання із збільшенням ексцентриситету і рух фрези в напрямку до дна впадини (врізання) та різання зі зворотним рухом фрези від дна впадини до вершини зубця і зменшенням ексцентриситету (вихід).

Відповідно до результатів дослідження, сила різання в радіально-коловому методі зубооброблення змінюється за складною закономірністю. У процесі збільшення ексцентриситету на першій ділянці – врізання – сила різання зростає. Під час фрезерування дна впадини між зубцями сила набуває найменшого значення, після чого її величина інтенсивно збільшується. Стрибоподібне зростання сили

різання має місце під час зменшення ексцентриситету, а її максимальне значення фіксується у процесі оброблення вихідної частини профілю в ділянці ділильного діаметра зубчастого колеса. Під час виходу фрези з впадини сила різання зменшується.

З отриманих даних випливає, що за впливом на величину сили різання площа зрізів переважає інтенсивність зсуву. Найбільші значення коефіцієнта осадження стружки припадають на ділянки різання, де товщина зрізів мінімальна, тобто під час оброблення dna впадини між зубцями, зі збільшенням інтенсивності зсуву після руху фрези від dna впадини до вершини.

Практично миттєве зростання сили різання на ділянці, яка відповідає повороту фрези в межах 270^0 – 290^0 свідчить про пікове навантаження фрези і всієї системи верстата. Такі умови є небезпечними з погляду безвідмовності процесу різання. Кількакратне зростання сили різання за час порядку однієї сотої секунди може призвести до виходу з ладу інструменту. Особливо небезпечною є циклічність цього явища, якщо воно буде виникати на одних і тих самих зубцях дискової фрези. Максимальне унавантаження силою та відповідно теплотою різання на кожному оберті фрези буде припадати на одні і ті ж зубці інструменту, якщо кількість зубців колеса дорівнює кількості зубців дискової фрези. Крім того, негативна дія цих чинників підсилюється тим, що ці зубці мають найбільший радіус – вектор та найдовший шлях різання. Це зумовить пришвидшену втрату їх ресурсу та може проявитися як швидкоплинне розмірне зношування, так і як ламання лез, що є втратою працездатності інструменту у вигляді відмови. У разі, якщо це співвідношення виражається цілим числом, то періодичність навантаження одних і тих же зубців буде відповідати числу кратності. Уникнути таких негативних умов можна такими засобами і шляхами:

1. За наявності набору стандартних різальних інструментів потрібно вибирати дискову фрезу з кількістю зубців, некратною кількості зубців колеса, яке нарізають. Наприклад, якщо є парна кількість зубців колеса, то фреза має мати непарну кількість зубців. У такому разі на кожному оберті фрези і в кожній наступній впадині в ділянці максимального силового і теплового навантаження в основі зубців колеса будуть працювати різні зубці фрези. Тоді інструмент по периферії буде навантажений рівномірно, а причини, які можуть зумовити його відмову за параметром сили різання будуть усунені.

2. Якщо програма випуску зубчастих коліс є достатньо великою, то для цього випадку можна виготовити спеціальну фрезу, яка має нерівномірний окружний крок: на ділянці її максимального ексцентриситету крок має бути збільшений. З такою конструкцією інструменту під час різання dna впадини кількість різів зменшиться, а товщина зрізу зросте; це дасть змогу зменшити інтенсивність пластичного деформування стружки та силу різання.

3. Під час використання зубофрезерних верстатів з числовим програмним керуванням подібного ефекту можна досягти регулюванням осьової подачі – збільшувати величину подачі на кожному оберті в циклі обертання, коли дискова фреза обробляє впадину в основі зубців колеса.

Висновки

На основі моделювання процесу нарізання зубчастих коліс радіально-коловим методом з використанням автоматизованого обладнання досліджено умови забезпечення надійної роботи зубофрезерних верстатів за параметром сили різання.

Встановлено, що зі зміною ексцентриситету фрези по куту її обертання цей параметр описується складною залежністю та є неоднозначним. Найбільшу небезпеку для безвідмовної роботи становить стрибкоподібне збільшення сили різання та навантаження на дискову фрезу під час фрезерування в ділянці ділильного діаметра колеса біля виходу фрези. В таких умовах зростає робота різання та генерується значна теплота, результатом чого буде інтенсивне розмірне зношування лез, а також виникнення тріщин і сколів на різальному клині, тобто втрата працездатності верстата внаслідок відмови інструменту.

Для уникнення цього негативного явища можна використати різні засоби, які полягають у виборі некратної кількості зубців фрези і колеса, яке потрібно нарізати; використовувати дискові фрези зі змінним кутовим кроком; регулювати величину осьової подачі в циклі обертання фрези за

допомогою системи ЧПК. Такі заходи дадуть змогу забезпечити рівномірне силове і теплове навантаження на фрезу по її периферії, що зменшить ймовірність відмови інструменту та забезпечить тривалий час роботи автоматизованого обладнання.

Інформаційні джерела

1. Inuia M., Huang Y., Onozuka H., Umez N. Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation, *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, pp. 520–527, 2020. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.078
2. Vargas B., Zapf M., Klose J., Zanger F., Schulze V. Numerical modelling of cutting forces in gear skiving, *Procedia CIRP*, Vol. 82, pp. 455–460, 2019. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.039
3. Bergs T., Georgoussis A., Löpenhaus C. Development of a numerical simulation method for gear skiving, *Procedia CIRP*, Vol. 88, pp. 352–357, 2020. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.061
4. McCloskey P., Katz A., Berglind L., Erkorkmaz K., Ozturk E., Ismail F. Chip geometry and cutting forces in gear power skiving, *CIRP Annals*, Vol. 68, No.1, pp. 109–112, 2019. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.085
5. 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.*, Vol. 64, pp. 1–7, (2018).
6. Janßen C., Brimmers J., Bergs T. Validation of the plane-based penetration calculation for gear skiving”, *Procedia CIRP*, Vol. 99, pp. 220–225, 2021. DOI: 10.1016/j.procir.2021.03.034
7. Onozuka H., Tayama F., Huang Y., Inui M. Cutting force model for power skiving of internal gear”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 56, pp. 1277–1285, 2020. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.04.022
8. 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*, Vol. 100, No. 5–8, pp. 1779–1785, 2019. DOI: 10.1007/s00170-018-2790-3
9. Sabkhi N., Moufki A., Nouari M., Pelaingre C., and Barlier C.. Prediction of the hobbing cutting forces from a thermomechanical modeling of orthogonal cutting operation. *Journal of Manufacturing Processes*, 23:1–12, 2016. DOI : 10.1016/j.jmapro.2016.05.002
10. Klocke F., Brecher C., Löpenhaus C., Ganser P., Staudt J., Krömer M. Technological and Simulative Analysis of Power Skiving, *Procedia CIRP*, Vol. 50, pp. 773–778, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.052.
11. Stadtfeld H. J. Power Skiving of Cylindrical Gears on Different Machine Platforms”, *Gear Technology*, Vol. 1, pp. 52–62, 2014. [online] Available at: <https://www.geartechnology.com/ext/resources/issues/0114x/power-skiving.pdf> [Accessed: January/February]. 2014.
12. Antoniadis A. Gear skiving–CAD simulation approach, *Computer-Aided Design*, Vol. 44, No. 7, pp. 611–616, 2012. DOI: 10.1016/j.cad.2012.02.003
13. Antoniadis N. Vidakis, Bilalis N. A simulation model of gear skiving, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No2, pp. 213–220, 2004. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.019

Vasyl Verhun

Lviv Polytechnic National University

RESEARCH ON CUTTING FORCE AND ITS INFLUENCE ON THE FAILURE PROCESS OF CUTTING GEARS USING THE RADIAL-CIRCULAR METHOD

Problem Statement and Purpose of the Work. This article studies the cutting force in the radial-circular method and its influence on the reliability of the gear-cutting process. **Relevance.** Gear manufacturing machines are classified as automated equipment. This applies to machines equipped with CNC systems, as well as conventional machines operating in automatic mode for extended periods, given the high labour intensity of gear cutting operations. It is therefore important to ensure the reliable operation of this type of equipment, since failure in unmanned production conditions can result in significant production losses. Cutting force is one of the primary factors that can cause failure in gear cutting machine operation. Gear milling processes that occur during the continuous generation of gear surfaces are characterised by significant unevenness of the cutting force, as well as periodic jumps in the cutting force and torque. This is due to the peculiarity of the cutting scheme in conditions of gear continuous generative. These cyclical jumps in cutting force can cause microcracks, delamination, chipping and

breakage of tool blades, resulting in a loss of machine tool performance. Therefore, the problem addressed in this article is highly relevant to modern production. **Research Methodology.** Cutting forces prediction was performed using graph-analytical modelling of cut layer parameters and the Deform 2D simulation modelling system. **Scientific novelty.** The study's results provide a solid foundation for selecting optimal conditions for gear cutting processes using the radial-circular method, while also suggesting ways to prevent carbide gear cutting tool breakage and ensure the smooth operation of gear milling machines.

Keywords: gears, radial-circular method, cutting force, force peaks, reliability, fail-safe.

References

1. Inuia, M., Huang, Y., Onozuka, H., Umezu, N. Geometric simulation of power skiving of internal gear using solid model with triple-dexel representation, *Procedia Manufacturing*, Vol. 48, pp. 520–527, 2020. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.05.078
2. Vargas, B., Zapf, M., Klose, J., Zange, F., Schulze, V. Numerical modelling of cutting forces in gear skiving, *Procedia CIRP*, Vol. 82, pp. 455–460, 2019. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.039
3. Bergs, T., Georgoussis, A., Löpenhaus, C. Development of a numerical simulation method for gear skiving, *Procedia CIRP*, Vol. 88, pp. 352–357, 2020. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.061
4. McCloskey, P., Katz, A., Berglind, L., Erkorkmaz, K., Ozturk, E., Ismail, F. Chip geometry and cutting forces in gear power skiving, *CIRP Annals*, Vol. 68, No.1, pp. 109–112, 2019. DOI: 10.1016/j.cirp.2019.04.085
5. 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.*, Vol. 64, pp. 1–7, (2018).
6. Janßen, C., Brimmers, J., Bergs, T. Validation of the plane-based penetration calculation for gear skiving”, *Procedia CIRP*, Vol. 99, pp. 220–225, 2021. DOI: 10.1016/j.procir.2021.03.034
7. Onozuka, H., Tayama, F., Huang, Y., Inui, M. Cutting force model for power skiving of internal gear”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 56, pp. 1277–1285, 2020. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.04.022
8. 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*, Vol. 100, No. 5–8, pp. 1779–1785, 2019. DOI: 10.1007/s00170-018-2790-3
9. Sabkhi, N., Moufki, A., Nouari, M., Pelaingre, C., and Barlier, C. Prediction of the hobbing cutting forces from a thermomechanical modeling of orthogonal cutting operation. *Journal of Manufacturing Processes*, 23:1–12, 2016. DOI: 10.1016/j.jmapro.2016.05.002
10. Klocke, F., Brecher, C., Löpenhaus, C., Ganser, P., Staudt, J., Krömer, M. Technological and Simulative Analysis of Power Skiving, *Procedia CIRP*, Vol. 50, pp. 773–778, 2016. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.052
11. Stadtfeld, H. J. Power Skiving of Cylindrical Gears on Different Machine Platforms”, *Gear Technology*, Vol. 1, pp. 52–62, 2014. [online] Available at: <https://www.geartechnology.com/ext/resources/issues/0114x/power-skiving.pdf> [Accessed: January/February], 2014.
12. Antoniadis, A. Gear skiving–CAD simulation approach, *Computer-Aided Design*, Vol. 44, No. 7, pp. 611–616, 2012. DOI: 10.1016/j.cad.2012.02.003
13. Antoniadis, N. Vidakis, Bilalis, N. A simulation model of gear skiving, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 2, pp. 213–220, 2004. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2003.10.019