

ОСИПЧУК ОЛЕКСІЙ

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-7865-9484>
e-mail: aleksei.osypchuk@gmail.com

ДЗЮМАН БОГДАН

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0009-0008-5928-4569>
e-mail: dzyumanbogdan@gmail.com

ОХРИМЕНКО ОЛЕКСАНДР

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
<https://orcid.org/0000-0002-5446-6987>
e-mail: okhrimenko.oleksandr@iit.kpi.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗРІЗУВАНОВОГО ШАРУ КІНЦЕВОЮ РАДІУСНОЮ ФРЕЗОЮ

В роботі представлено методику визначення параметрів зрізуваного шару для кінцевих радіусних фрез. Проаналізовано вплив геометричних параметрів кривої радіусу кромки, таких як радіус кромки, початок та кінець кривої, і кути нахилу кромки, на товщину шару, що зрізається. Показано, що величина зрізуваного шару незначно змінюється залежно від напрямку подачі (зустрічне або попутне різання). Проведено розрахунки для знаходження товщини зрізуваного шару для різних параметрів інструменту та умов обробки, виявлено, що форма і величина зрізуваного шару залежать від роботи попереднього зубця. Результати дослідження дозволяють поліпшити якість обробки та продуктивність фрезерування.

Ключові слова: кінцева фреза, кінцева радіусна фреза, товщина зрізуваного шару, геометрія кромки, фрезерування, обробка матеріалу.

OSYPCHUK OLEKSII, DZYUMAN BOGDAN, OKHRIMENKO OLEKSANDR
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

DETERMINATION OF CUTTING LAYER PARAMETERS USING AN END RADIUS MILL

This article presents a methodology for determining the parameters of the cutting layer for end radius mills. The research is focused on analyzing the impact of the geometric parameters of the corner radius edge curve, such as the corner edge radius, the start and end of the curve, and the edge inclination angles, on the maximum thickness of the cutting layer. It was found that the feed direction (up-milling or down-milling) has a negligible impact on the thickness of the cut layer, allowing the conclusion that radius mills can be universally applied in various processing conditions.

The work includes theoretical analysis and analytical modeling of cutting processes using end radius mills. Analytical dependencies for calculating the thickness of the cut layer based on the parameters of the mill and processing conditions are proposed. The research also includes calculations for specific mill parameters, such as diameter, width, and the number of teeth. It was established that the shape and magnitude of the cut layer change depending on the cutting path and the influence of preceding teeth, affecting the quality of the machined surface.

By modeling the cutting process, the shape and size of the cutting layer were determined, allowing for more accurate prediction of processing results and improving the efficiency of the technological process. It was shown that the thickness of the cut layer for a multi-tooth tool is determined by the cutting surface of the preceding teeth. Calculations were also performed to determine the maximum thickness of the cut layer, particularly for down-milling and up-milling conditions, revealing the maximum thickness of the cut for each case.

The research results are of significant practical importance for optimizing milling processes, particularly for improving the productivity and quality of surface processing. The proposed methodology and analytical dependencies can be used for developing new tools and technological processes in material processing. Further research may focus on experimental verification of the obtained results and extending the methodology to other types of mills and processing conditions.

Keywords: end mill, radius end mill, cutting layer thickness, edge geometry, milling, material processing, analytical modeling.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Параметри шару, що зрізається інструментом, впливають на продуктивність обробки, якість поверхні, що обробляється, а також на силові, вібраційні та теплові процеси при різанні. У поєднанні зі швидкістю різання ці параметри визначають, визначають навантаження на його різальні кромки.

Кінцеві фрази поділяються на такі типи по формі різальних кромок: Плоскі (квадратні) – мають гострі кромки на кутах, які утворюють кут 90° , універсальний інструмент для загального фрезерування, прорізання пазів, фрезерування бокових і торцевих поверхонь, сюди ж відносяться чистові кінцеві фрези з великою кількістю канавок та чорнові кінцеві фрези з зубцями в канавках для одночасного зняття великої площі поверхні. Кульові кінцеві фрези – створюють радіус в половину діаметра, дозволяють створювати багатовимірні контури. Радіусні кінцеві фрези – мають квадратний кінець з заокругленими кутами для рівномірного розподілу сили різання. Заокруглені кути знижують концентрацію напружень в місцях контакту фрези з матеріалом, заокруглені кути зменшують вібрації під час обробки. Також радіусні кінцеві фрези підходять для обробки як і плоских так і криволінійних поверхонь [1, 4, 7].

Побудова різних типів радіусної різальної кромки представлена в роботі [12]. Методика формування кутового радіусу як і геометрична модель його кромки представлені в роботі [14].

Відомо, що основні види радіусних кінцевих фрез включають [7]:

- Сферичні (кульові) кінцеві фрези (мають сферичну форму на кінці) використовуються для обробки складних контурів та форм.
- Радіусні з напівкруглим кінцем – використовуються для обробки заокруглених кутів та радіусних переходів.
- Кінцеві фрези з радіусом на різальних кромках – характеризуються підвищеною стійкістю та міцністю.

У роботі [13] представлена модель сферичної кінцевої фрези яка базується на аналітичному представленні геометрії спіральної канавки з кульовим кінцем, а також передньої і задньої поверхонь.

Постає завдання визначити параметри зрізуваного шару залежно від геометричних характеристик кривої радіусу кромки: самого радіусу кромки, початкової та кінцевої точок кривої, а також кутів нахилу кромки.

Згідно з ДСТУ 2249-93 [2], товщина зрізуваного шару визначається як довжина нормалі, що перетинає поверхню різання в заданій точці різальної кромки і обмежена перерізом, утвореним при відділенні матеріалу заготовки кожним зубом інструмента за один цикл основного руху. Форма і розміри зрізуваного шару залежать від схеми обробки припуску і позицій різальних кромок інструмента, що визначають товщину зрізуваного шару в кожній точці різального елемента і його активну довжину [9].

Аналіз досліджень та публікацій

У роботі [10] наведена загальна методика аналітичного визначення товщини зрізуваного шару в будь-якій точці різальної кромки для будь-якого інструменту, формула (1). Ця формула використовується у роботі [8].

$$a = \frac{(\bar{S} * \bar{N})}{|\bar{N}|} \quad (1)$$

Де N – вектор нормалі до поверхні різання в досліджуваній точці

Відповідно до наведеного рівняння (1), можна визначити товщину зрізуваного шару в будь-якій точці різальної кромки кожного зубця на будь-якому етапі роботи інструмента [9]. Методика представлена у роботі [3], дозволяє обчислити товщину зрізуваного шару для радіусної кінцевої фрези, проте вона не враховує вплив кута нахилу кромки γ кожного зубця під час роботи інструменту, що впливає на форму та положення поверхонь різання, а також на параметри зрізуваного шару. У роботі [15], за допомогою 3D моделювання процесу роботи кінцевої плоскої фрези при обробці поворотних поверхонь, графічно визначено форму та розміри зрізуваного шару. У роботі [6] описана методика визначення мінімальної товщини зрізуваного шару за допомогою періодичності сили різання. У роботі [5] визначається площа зрізуваного шару при фрезеруванні нахиленої поверхні кульовою кінцевою фрезою.

Отже, виникає потреба розробити методику та аналітичні залежності для розрахунку параметрів зрізуваного шару при обробці кінцевою радіусною фрезою.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є розробка методики та визначення параметрів зрізуваного шару при використанні кінцевої радіусної фрези

Виклад основного матеріалу

Для вирішення цієї задачі була запропонована наступна розрахункова схема (рис. 1). Як досліджуваний інструмент розглядається кінцева радіусна фреза.

Розглянемо нерухому систему координат (X, Y, Z) (рис. 1), де вісь обертання фрези завжди паралельна осі Z і переміщується в площині XZ відповідно до подачі S_0 мм/об, як і в роботі [9]. При попутній подачі рух відбувається протилежно до напрямку осі X, а при зустрічній – за напрямком осі X. Положення зубця фрези навколо осі інструменту визначається кутом повороту t ; поворот фрези відбувається проти годинникової стрілки. Подача визначається по формулі (2) відповідно до роботи [8].

$$S = \frac{S_0}{2 * \pi} = \frac{S_z * z}{2 * \pi} \quad (2)$$

Параметри інструменту (рис.1) задані схожим чином, що і у роботі [9]: R – радіус фрези, B – ширина фрези, Θ – кутова відстань між зубцями фрези, що прямо пропорційна їх кількості, АВ – граничні точки на різальній кромці. Положення різальної кромки описується головним кутом ϕ_i у плані і кутом нахилу λ_i . Координата Z визначає розташування точки M на ріжучій кромці через параметр u. Товщина зрізуваного шару заготовки дорівнює H, а координата верхньої площини заготовки по осі Y становить $-R + H$.

Відомо, що у роботі [11] рівняння різальної кромки виражено через 2 параметри – кут нахилу Θ та положення точки по вісі z - h

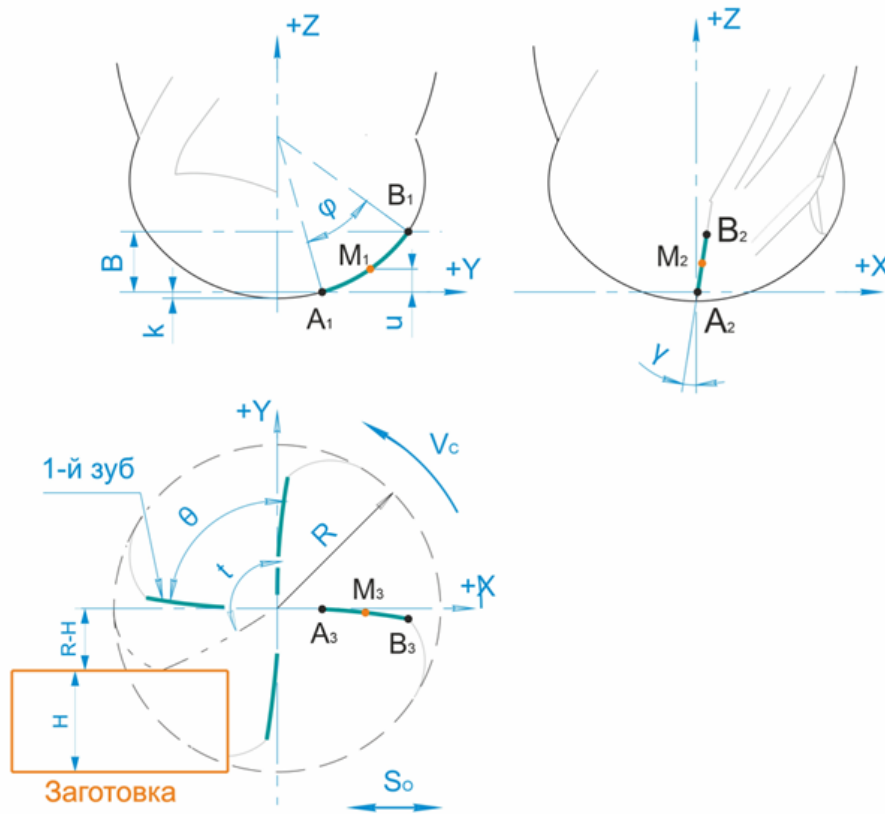


Рис. 1. Розрахункова схема визначення параметрів завантаження різальної частини радіусної кінцевої фрези

Сформулюємо рівняння різальної кромки інструмента, виражене через єдиний параметр положення точки u , згідно з методикою, описаною в роботі [8]. Згідно зі схемою (рис. 1), рівняння різальної кромки можна записати у векторній формі:

$$K(u) = \begin{pmatrix} R * \tan\left(\frac{4 * \gamma}{\pi}\right) \\ \sqrt{R^2 - ((u + k) - R)^2} \\ u \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Подібна методика прив'язки параметру u до вісі z використана в роботах [8, 9]. k – розмір, що відповідає за положення початкової точки на кромці. u – параметр точки на різальній кромці

Згідно з методикою, наведеного в роботі [8], формулюємо рівняння поверхні різання, яка утворюється цією ріжучою кромкою (3) під час її функціонування. З роботи [9] використаємо матрицю афінного перетворення, що описує обертальний рух фрези та супутній їй поступальний рух:

$$m(t, n) = \begin{pmatrix} \cos(t + \theta * n) & \sin(t + \theta * n) & 0 & S * t \\ \sin(t + \theta * n) & \cos(t + \theta * n) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

де n – номер зубця, що досліджується (нумерація зубців починається з 0-го, рис. 1); t – параметр, що відповідає за кут повороту інструменту навколо своєї осі. Тоді, відповідно до роботи [9], рівняння поверхні різання будь-якого зубця інструменту запишеться наступним чином:

$$R(u, t, n) = m(t, n) * K(u, n) \quad (5)$$

Для визначення товщини зрізаного шару a будемо використовувати методику, описану в роботах [8, 9, 15]. Для досліджуваної точки різальної кромки запишемо вектор нормалі до поверхні різання. Виходячи з рівняння поверхні різання (4) і при заданому значенні параметра n (номер зубця), нормаль до поверхні визначається як векторний добуток часткових похідних цього рівняння по параметрах u і t . Вектор нормалі повинен бути спрямований у тіло заготовки [9]. Для зручності, згідно з роботою [8] рівняння нормалі запишемо в одиничному вигляді:

$$V(u, t, n) = \frac{d}{dt} R(u, t, n) \quad (6)$$

$$\tau(u, t, n) = \frac{d}{du} R(u, t, n) \quad (7)$$

$$NP_n(u, t, n) = \frac{-(V(u, t, n) \times \tau(u, t, n)) * (-1)^n}{|V(u, t, n)| * |\tau(u, t, n)|} \quad (8)$$

Значення товщини зрізаного шару визначатиметься як найменше невід'ємне значення параметра a при перетині лінії нормалі NPn з поверхнями різання зубців, які оброблялися раніше. Це зубці, для яких параметр n є більшим, ніж у досліджуваного зубця. Якщо значення товщини зрізаного шару a буде від'ємним, це вказує на те, що зрізання матеріалу не відбувається.

Для реалізації такого підходу потрібно записати рівняння одиничної нормалі до поверхні різання (5) в досліджуваній точці різальної кромки [8]:

$$NP0_n(u, t, n, l) = \begin{pmatrix} R_x(u, t, n) + NP_{nx}(u, t, n) * l \\ R_y(u, t, n) + NP_{ny}(u, t, n) * l \\ R_z(u, t, n) + NP_{nz}(u, t, n) * l \end{pmatrix} \quad (9)$$

де R_x, R_y, R_z – компоненти поверхні різання досліджуваного зубця по відповідним осям координат (5), NP_x, NP_y, NP_z – компоненти вектора нормалі до цієї поверхні по відповідним осям (8), Параметр l – відповідає довжині нормалі до поверхні різання досліджуваного зубця. Дана методика застосовується у роботах [8, 9].

Товщина зрізаного шару визначається як мінімальне значення параметру l з наступних залежностей [9]:

$$\begin{pmatrix} R_x(u, t, n + 1) + NP0_n(u, t, n, l) \\ R_x(u, t, n + 2) + NP0_n(u, t, n, l) \\ \begin{pmatrix} u_1 \\ -(R_a - H) \\ t_1 \end{pmatrix} \end{pmatrix} = NP0_n(u, t, n, l) \quad (10)$$

де u_1, t_1 – незалежні параметри, що характеризують поверхню різання попередніх зубців. Остаточне рівняння визначає перетин нормалі до поверхні різання з граничною поверхнею заготовки [9] (рис. 1).

За отриманими залежностями було проведено розрахунки товщини зрізаного шару для кінцевої радіусної фрези з наступними параметрами: діаметр фрези $Da=6$, подача попутна $Sz=0.15$, ширина $B=2.5$ мм, кількість зубів $Z=4$ $\phi=53.6^\circ$ $\gamma=5^\circ$ $H=12.5$ мм. За розрахунками максимальне значення товщини зрізаного шару становить $a_{max}=0.286$ мм. Розподіл товщини зрізаного шару, залежно від розташування зубця на шляху різання та по ширині інструменту, наведено на (рис. 2).

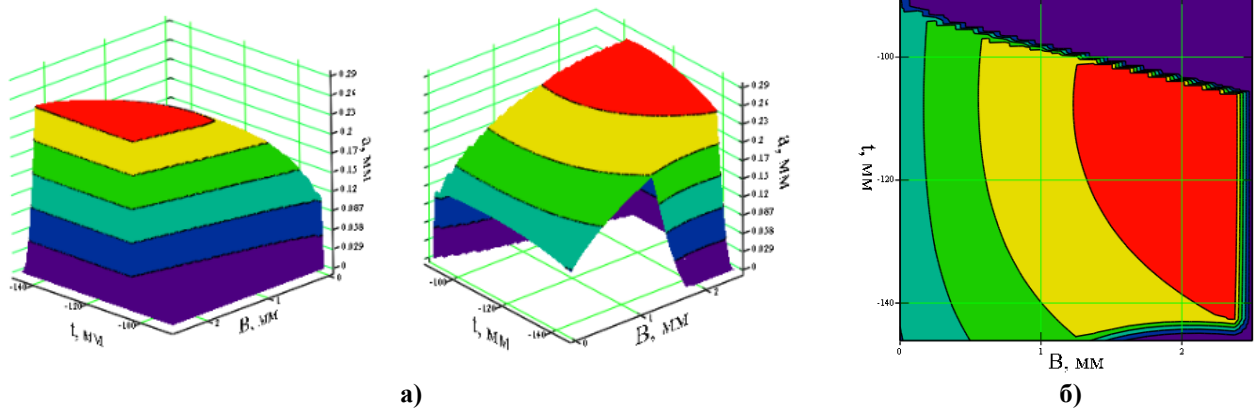


Рис. 2. Розподілення товщини зрізаного шару, в залежності від розташування зубця, на шляху різання та по ширині інструменту: $D = 6$ мм, подача попутна $Sz = 0.15$ мм/зуб, $B = 2.5$ мм. а) ізометричне зображення зміни товщини зрізаного шару, б) зміна ширини зрізаного шару від шляху різання

З розрахунків (рис. 2) видно, що процес врізання в заготовку не здійснюється по всій ширині різальної кромки фрези, а відбувається поступово. Найбільша ширина зрізаного шару матеріалу зображена на (рис. 2.б), і становить 2.5 мм. При переході від попутної подачі до зустрічної максимальна товщина зрізу становить $a_{max}=0.271$ мм. Зміни у формі зрізаного шару матеріалу в залежності від шляху різання та параметра tt , представлені на (рис. 3), а умови різання – на (рис. 2). Аналіз формування зрізаного шару, враховуючи шлях різання та вплив інших зубців, показав, що при врізанні в заготовку на форму і товщину зрізаного шару впливає робота попереднього зубця (рис. 3, а-б).

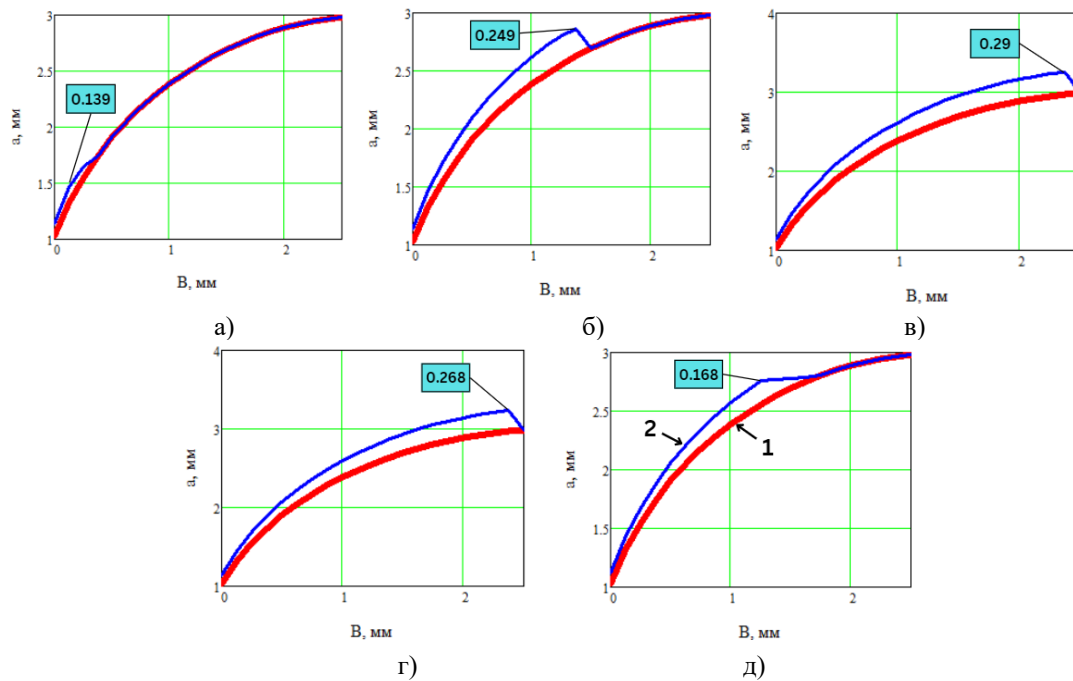


Рис. 3. Зміна форми зрізаного шару матеріалу залежно від шляху різання: 1 - різальна кромка, 2 - границя зрізаного шару, що сформована попереднім зубцем

У подальшому товщина зрізаного шару в основному визначається дією поточного зубця, тоді як попередній зубець впливає лише на ширину зрізу (рис. 3, в-д). У цьому випадку максимальну товщину зрізаного шару можна розрахувати за формулою (2), припускаючи, що інструмент має вдвічі менше зубців.

На (рис. 4) зображено, як максимальна товщина зрізаного шару змінюється залежно від величини та напрямку подачі (попутної чи зустрічної).

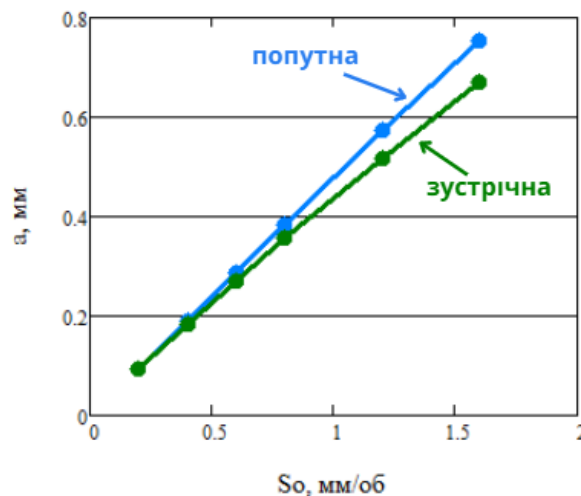


Рис. 4. Залежність максимальної товщини зрізаного шару від величини і напрямку подачі

Оцінка впливу подачі на максимальну товщину зрізаного шару демонструє, що напрямок подачі (зустрічне або попутне різання) має незначний вплив на величину цієї товщини (рис. 4). Методики обчислення, використані при створенні (рис. 2, рис. 3 та рис. 4), застосовані в роботах [8, 9].

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У цій роботі була представлена методика визначення параметрів зрізаного шару для радіусних кінцевих фрез. Показано, що при визначенні товщини зрізаного шару для інструмента з багатьма зубцями зовнішньою поверхнею служить поверхня різання попередніх зубців. Встановлено, що форма зрізаного шару кожним зубцем в процесі різання змінюється через зміну поверхні різання у період контакту з заготовкою. Результати дослідження дозволяють поліпшити якість обробки та продуктивність фрезерування.

Література

1. Clark D. Milling. The Crowood Press, 2014. <https://www.perlego.com/book/3157441/milling-pdf> (Original work published 2014).
2. DSTU 2249-93. Processing by cutting. Terms, definitions, and designations. Effective from 1995.01.01. Kyiv: Derzhstandart of Ukraine, 1994.
3. Duan X., Li L., Chen C., Yu S., Zhu Z., Peng F. Cutting force prediction considering force-deflection coupling in five-axis milling with fillet-end cutter. 2021. doi:10.21203/rs.3.rs-766959/v1.
4. Haynes G. Milling machines & milling operations. Cyber Press, 2016. https://www.academia.edu/105114039/Milling_Machines_Milling_Operations_George_Haynes (Original work published 2016).
5. Hiroyasu I., Keisuke S., Mitunori S. Analysis of Cutting Mechanism by Ball End Mill Using 3D-CAD. JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing. 2006. Volume 49(1). P. 28–34. <https://doi.org/10.1299/jsmec.49.28>.
6. Kim C., Mayor J.R., Ni J. A Static Model of Chip Formation in Microscale Milling. ASME. J. Manuf. Sci. Eng. 2004. Volume 126(4). P. 710–718. <https://doi.org/10.1115/1.1813475>.
7. MMC Carbide. Types of Solid End Mills. MMC Carbide. https://www.mmc-carbide.com/in/technical_information/tec_rotating_tools/technical/tec_solid_end_mills_types.
8. Okhrimenko, O., Vovk, V., Maidaniuk, S., Lashyna, Y. Determining the width of a layer cut with saws with multidirectional teeth. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Volume 3(1 (111)). P. 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231779>.
9. Ravska N.S., Okhrimenko O.A., Maidaniuk S.V. Determining the parameters of the layer cut by a disk tool with multidirectional teeth. Reliability of tools and optimization of technological systems: collection of scientific works. 2017. No. 40. P. 3–10. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/45631>.
10. Rodin P.R. Fundamentals of designing cutting tools. Kyiv: Vyshcha shkola, 1990. 424 p.
11. Wang L., Chen Z.C., Li J. et al. A novel approach to determination of wheel position and orientation for five-axis CNC flute grinding of end mill. Int J Adv Manuf Technol. 2016. Volume 84. P. 2499–2514. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7851-2>.
12. Wei Ji, Xianli Liu, Lihui Wang, Yue Meng, Xuefeng Wu. A study on geometry modelling of a ball-end mill with chamfered cutting edge. Journal of Manufacturing Processes. 2015. Volume 19. P. 205–211. ISSN 1526-6125. – Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.10.003>.
13. Yücesan, G., Altıntaş, Y. Prediction of Ball End Milling Forces. ASME. J. Eng. Ind. 1996. Volume 118(1). P. 95–103. <https://doi.org/10.1115/1.2803652>.
14. Zhao Cai, Tang Fei, Li Shu, Wang Xiaohao. A Novel CNC Grinding Method about Relief Surface of Corner Radius End Mill Based on a CAM System. Applied Mechanics and Materials. 2011. Volume 120. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.120.26.
15. Zhu L., Li H., Liu C. Analytical modeling on 3D chip formation of rotary surface in orthogonal turn-milling. Archiv.Civ.Mech.Eng. 2016. Volume 16. P. 590–604. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.03.011>.