

Ефективність торцевого фрезерування загартованих сталей інструментом із кубічного нітриду бору

Торцеве фрезерування загартованих сталей є важливим процесом у сучасному машинобудуванні, оскільки дозволяє досягти високої точності та якості обробки поверхонь деталей машин. З розвитком технологій та матеріалознавства з'явилися нові інструментальні матеріали, які значно підвищують ефективність обробки. Одним із таких матеріалів є кубічний нітрид бору (CBN), який завдяки своїм унікальним властивостям став незамінним у багатьох галузях промисловості. CBN є другим за твердістю матеріалом після алмазу, що робить його придатним для обробки твердих матеріалів, таких як загартовані сталі. Висока термостійкість та хімічна інертність CBN дозволяють використовувати його в умовах високих температур і агресивних середовищ, що значно підвищує продуктивність та довговічність інструменту. Крім того, інструменти з CBN забезпечують високу якість обробленої поверхні, зменшуючи шорсткість та покращуючи точність обробки плоских поверхонь. У статті розглядається ефективність використання інструментів із кубічного нітриду бору при торцевому фрезеруванні загартованих сталей. Проведено аналітичні дослідження, спрямовані на оцінку впливу різних режимів різання на якість обробленої поверхні загартованої сталі та на зносостійкість інструменту. Результати аналізу показують, що інструменти з CBN забезпечують високу точність обробки та зменшення шорсткості поверхні, що робить їх ефективними для обробки загартованих сталей високої твердості.

Також у статті розглянуто економічні аспекти використання CBN-інструментів у промислових умовах. Висока вартість інструментів з CBN компенсується їх довговічністю та високою продуктивністю, що в кінцевому підсумку знижує загальні витрати на обробку. Таким чином, використання інструментів із кубічного нітриду бору є перспективним напрямом для підвищення ефективності та якості обробки загартованих сталей.

Ключові слова: торцеве фрезерування; загартована сталь; шорсткість поверхні; кубічний нітрид бору.

Актуальність теми. Дослідження ефективності торцевого фрезерування загартованих сталей інструментом із кубічного нітриду бору є важливим і актуальним як з практичної, так і з наукової точки зору. Використання інструментів з CBN дозволяє значно підвищити продуктивність обробки завдяки їх високій твердості та зносостійкості. Це сприяє підвищенню якості та продуктивності виробничих процесів, знижує витрати та вплив на навколишнє середовище, а також стимулює подальший розвиток інноваційних технологій у галузі обробки матеріалів. Однією з важливих переваг використання інструментів із кубічного нітриду бору (КНБ) є їх здатність працювати за високих температур без втрати твердості. Це дозволяє проводити обробку на високих швидкостях, що значно скорочує час циклу обробки. Крім того, завдяки високій термостійкості, інструменти з КНБ можуть ефективно працювати без використання охолоджувальних рідин, що знижує витрати на їх придбання та утилізацію, а також зменшує екологічний вплив виробництва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Роботи С.А. Клименка, А.О. Чумака присвячені лезовій обробці плоских поверхонь інструментом, що оснащений різальними пластинами із полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ) групи BL, BH [1–3]. У [4–6] визначено, що матеріали з низьким вмістом кубічного нітриду бору (45–65 об. %) показали найбільшу стійкість інструменту під час обробки загартованих сталей. Автори Tien Dung Hoang, Nhu Tung Nguyen, Duc Quy Tran, Van Thien Nguyen [7] досліджували оброблюваність загартованої сталі SKD61 твердістю 46 HRC при торцевому фрезеруванні інструментом Sandvik Coromant R390-020A20-11L CoroMill 390. Авторами [8] досліджено вплив параметрів різання при торцевому фрезеруванні загартованої сталі на сили різання та температуру різання. Дослідження показали, що сили різання зростають зі збільшенням подачі, а температура різання зростає зі збільшенням швидкості різання. Вплив швидкості різання на сили різання є незначним. При збільшенні подачі з 0,05 до 0,15 мм/зуб температура різання значно зростає. У [9] досліджено оброблюваність загартованої штампової сталі 2379 TS при торцевому фрезеруванні інструментом SANDVIK при різних умовах охолодження. При охолодженні в розчині олії забезпечуються кращі показники шорсткості обробленої поверхні, ніж після охолодження на повітрі. Автори пояснюють це тим, що при охолодженні на повітрі деякі частини стружки прилипають до матеріалу заготовки, що призводить до утворення наростів. Автори [10] досліджували механізм зношування та характер поведінки

інструменту з матеріалами груп ВЛ і ВН за різних умов різання. Обробляли загартовану сталь AISI 4340 з твердістю 52 HRC, у станах, що забезпечують умови безперервного різання, незначних динамічних навантажень та різання з ударом. Використовували інструмент з вмістом 50 % КНБ у зв'язці TiC, 65 % КНБ у зв'язці КНБ та 90 % КНБ у зв'язці Co-Ni.

Метою статті є аналіз та оцінка ефективності процесу торцевого фрезерування загартованих сталей інструментом, оснащеним кубічним нітридом бору для визначення продуктивності, якості обробки та зниження витрат на інструмент.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для забезпечення ефективності процесів різання та якості поверхні загартованої сталі при торцевому фрезеруванні вимоги до інструменту полягають у зазначеному далі:

- 1) володіти високими механічними властивостями, такими як міцність, твердість, ударна в'язкість;
- 2) мати високу зносостійкість, тобто здатність протистояти стиранню під час обробки;
- 3) бути технологічно зручними у використанні та економічно вигідними;
- 4) бути хімічно інертними до оброблюваного матеріалу;
- 5) зберігати твердість при високих температурах (теплостійкість) і мати хорошу теплопровідність;
- 6) мати відповідний коефіцієнт тертя, який залежить від хімічного складу та оброблюваного матеріалу.

На шорсткість поверхні також впливає геометрія інструменту. Розміри радіуса скруглення та форма різальної кромки значно впливають на процес різання. При обробці на них діють значні механічні та термічні навантаження, тому для підвищення продуктивності та якості оброблення необхідно велику увагу приділяти саме геометрії кромки. Типи скруглення різальних кромок зображено на рисунку 1.

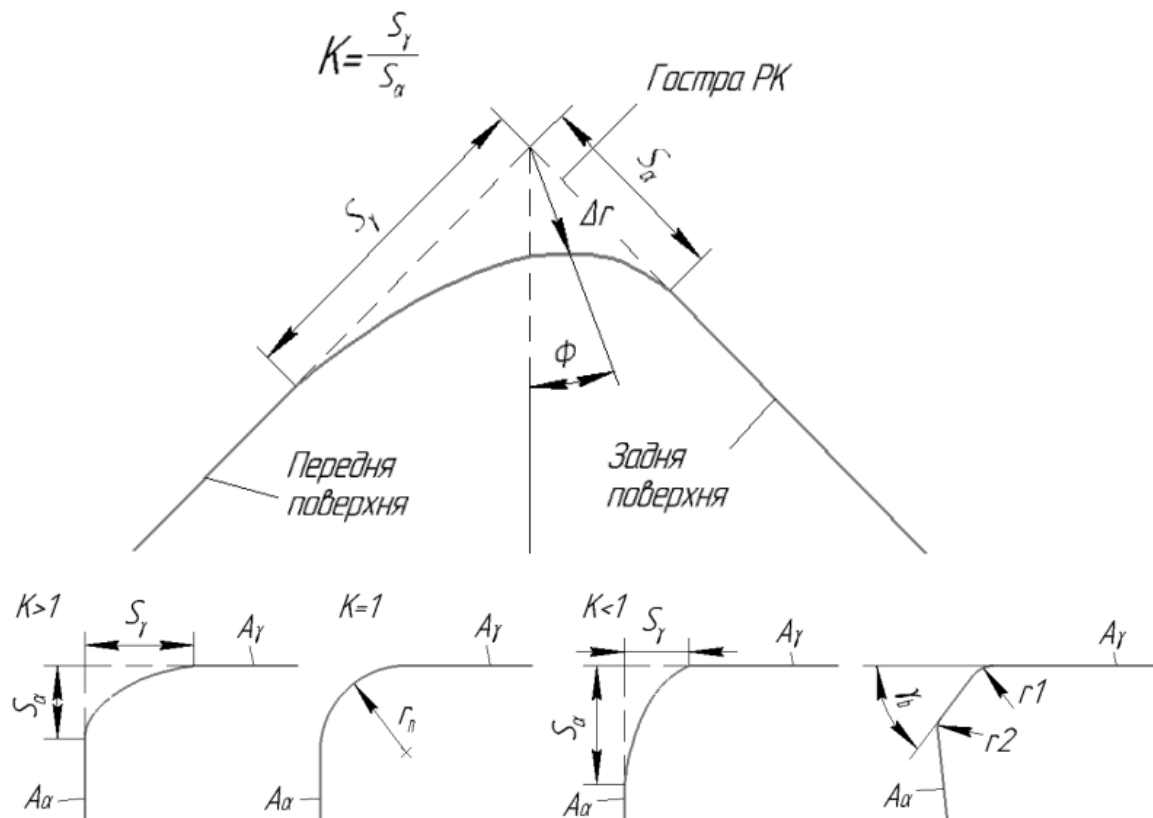


Рис. 1. Типи скруглення різальних кромок

Якщо застосовувати метод Денкена і описувати мікрогеометрію кромки, то як критерій класифікації різальної кромки, що наведено на рисунку 1, було вибрано величину К-фактор (форм-фактор). К-фактор – це співвідношення S_1/S_a , де S_a та S_1 – це відстань між точкою розділу округленої кромки, точкою, в якій починається перехід від плоскої поверхні до округленої різальної кромки, та кінчиком інструменту з ідеально гострою різальною кромкою на задній та передній поверхнях відповідно. Δr та кут ϕ описує затуплення інструменту та вимірюється як найкоротша відстань та зміщення між ідеально гострою та округленою різальною кромкою. Таким чином форму можна розділити на 3 класи: $K = 1$ – описує симетричну мікрогеометрію різальної кромки, $K > 1$ – вказує на нахил на передню поверхню, $K < 1$ – вказує

на нахил на задню поверхню. Визначено, що величина К-фактора значно впливає не тільки на механізм зношення інструменту, а й на механічне та термальне навантаження РК. Важливо зауважити, що величина та форма радіуса округлення RK має відповідати типу різання, режимам різання та властивостям інструментального й оброблюваного матеріалів. Під час округлення різальної кромки вздовж неї мікрогеометрія в кожній її точці буде різною [11].

На шорсткість отриманої поверхні після торцевого фрезерування також впливають параметри різання, такі як: швидкість різання, подача, глибина різання. На рисунку 2 зображено значення подачі на зуб порівняно з іншими параметрами різання та їх взаємодію.

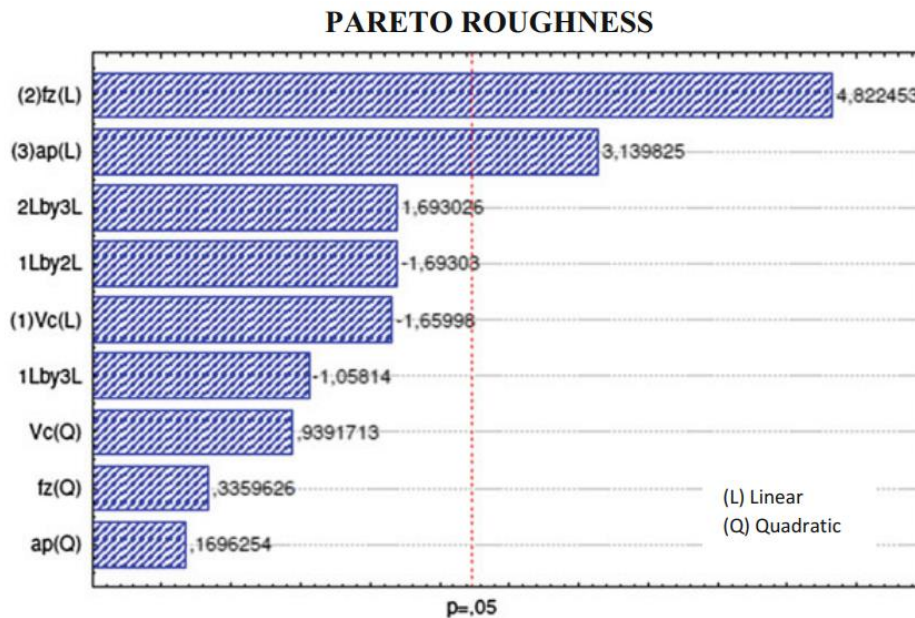


Рис. 2. Діаграма Парето впливу параметрів різання на шорсткість поверхні

Вплив подачі на шорсткість поверхні видно на рисунку 3, де показано поведінку подачі залежно від швидкості різання і радіальної глибини різання.

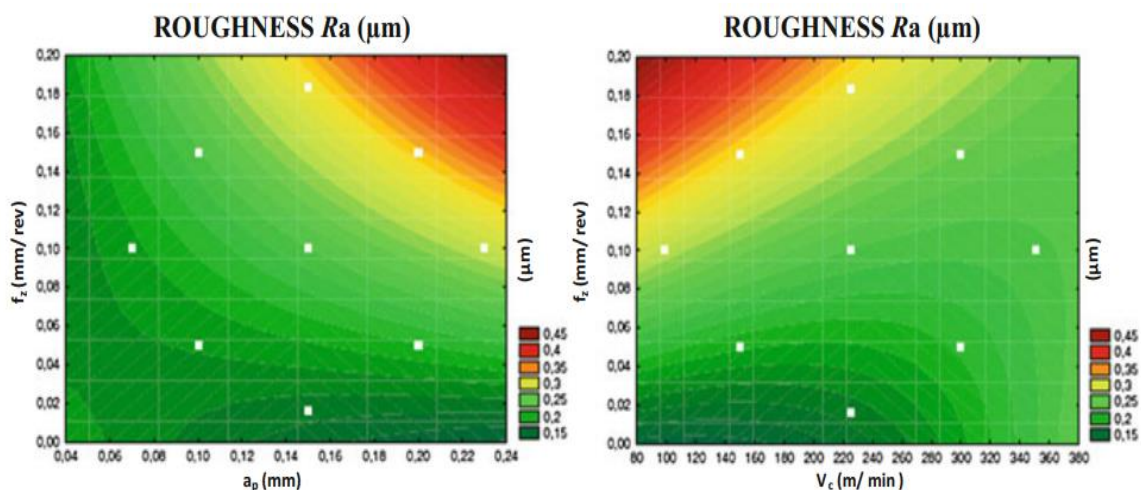


Рис. 3. Зображення залежності шорсткості від швидкості різання (V_c) та радіальної глибини різання (a_p)

За допомогою програмного забезпечення можна побудувати **чисельну модель 1**, а саме нелінійну регресію (рис. 4):

$$R_a = k \cdot v_c^a \cdot f_z^b \cdot a_p^c, \quad (1)$$

де V_c – швидкість різання, м/хв;

f_z – подача, мм/зуб;

a_p – радіальна глибина різання, мм.

В результаті побудови було отримано такі рівняння:

$$R_a = 3,48 \cdot V_c^{-0,228} \cdot F_z^{0,320} \cdot A_p^{0,373}, \quad (2)$$

$$R^2 = 69,44 \% (R_{aj}^2 = 63,7 \%). \quad (3)$$

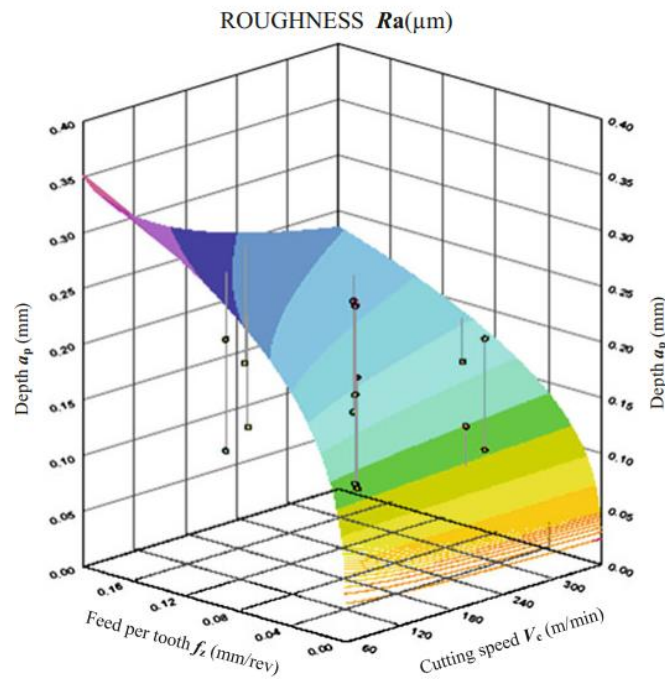


Рис. 4. Нелінійна регресія шорсткості на основі параметрів різання a_p, f_z, V_c (модель 1)

Побудовано **чисельну модель 2** лінійної регресії за допомогою програмного забезпечення (рис. 5):

$$R_a = a \cdot V_c + b \cdot f_z + c \cdot a_p + k, \quad (4)$$

$$R^2 66,8 \% (R_{aj}^2 = 60,1 \%). \quad (5)$$

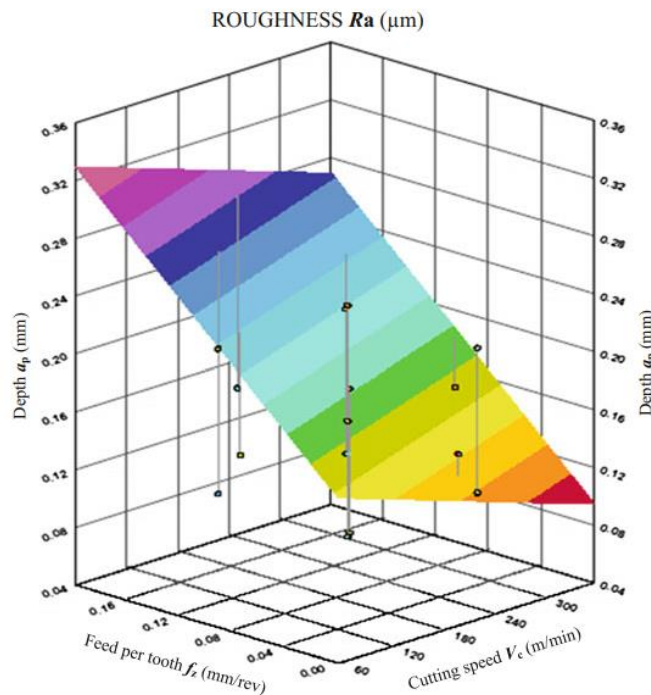


Рис. 5. Нелінійна регресія шорсткості на основі параметрів різання a_p, f_z, V_c (модель 2)

Висновки та перспективи подальших досліджень. Аналітичні результати показують, що застосування КНБ дозволяє значно підвищити продуктивність обробки та покращити якість обробленої поверхні. Шорсткість поверхні є важливим параметром, що впливає на експлуатаційні характеристики деталей машин. На шорсткість впливають такі фактори, як режими різання (швидкість, подача, глибина різання), властивості інструментальних та оброблюваних матеріалів, геометрія інструменту та його зносостійкість. Зокрема, збільшення швидкості подачі може призвести до зростання показників шорсткості поверхні через вплив геометричних параметрів різального інструменту. Основні геометричні параметри, які впливають на шорсткість, включають передній кут, задній кут, радіус заокруглення та кут нахилу різальної кромки. Всі ці параметри мають бути відповідно налаштовані для досягнення найкращої якості обробленої поверхні з мінімальною шорсткістю. Важливо також враховувати режими різання, матеріал інструменту та оброблюваного матеріалу, а також умови охолодження.

Список використаної літератури:

1. Климченко С. Фізико-хімічні особливості зношування інструменту із ПКНБ / С.Климченко // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта : матеріали науково-технічної конференції. – 2023. – № XXIII. – С. 145–148. DOI: 10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278236.
2. Високошвидкісне точіння деталей з загартованих сталей інструментами, що оснащені матеріалами на основі кубічного нітриду бору / Ю.О. Мельничук, І.А. Петруша, С.А. Климченко та ін. // Інструментальний світ. – 2015. – № 1–4 (61–64). – С. 13–15.
3. Климченко С.А. Аналітична оцінка величини температурних спалахів на контактних поверхнях інструменту з полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору / С.А. Климченко, С.Ан. Климченко, В.В. Бурикін // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Житомир : ЖДТУ, 2012. – Вип. 12. – С. 58–66.
4. Cutting performance of binderless nano-polycrystalline cBN and PcBN milling tools for high-speed milling of hardened steel / D.Wang, L.Yin, A.Hänel and other // *Ceramics International*. – 2023. – Vol. 49, Issue 22, Part A. – P. 34757–34773.
5. Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718 / J.P. Costes, Y.Guillet, G.Poulachon, M.Dessoly // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2007. – № 47. – P. 1081–1087.
6. Термобаричне спікання і працездатність різального композиту cBN-TiC групи VL при точінні загартованої сталі Caldie / І.А. Петруша, В.М. Бушля, О.С. Осінов та ін. // Породоруїнівний та металообробний інструмент – техніка та технологія його виготовлення та застосування : зб. наук. пр. – К. : ICM ім. В.М. Бакуля, 2015. – Вип. 18. – С. 338–345.
7. Matras A. Precision milling of hardened steel with CBN tools / A.Matras, W.Zębala, R.Kowalczyk // *Key Engineering Materials*. – 2014. – Vol. 581. – P. 182–187. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.182.
8. Zhang Q. Three Dimensional Finite Element Simulation of Cutting Forces and Cutting Temperature in Hard Milling of AISI H13 Steel / Q.Zhang, S.Zhang, J.Li // 45th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 45. – LA, USA, 2017.
9. Phokobye S. Investigating the Surface Roughness of Hardened Tool Steel (2379) during Face Milling Operation / S.Phokobye, D.Desai, I.Thabadi // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. – 2022. – Vol. 11, No. 1. – P. 22–30.
10. The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining / T.Halpin, G.Byrne, J.Barry, E.Ahearne // *Proc. IMechE. Part B : J. Engineering Manufacture*. – 2009. – Vol. 223. – P. 947–953.
11. Музиченко Н.С. Основи теорії проектування різальних інструментів для високошвидкісної обробки / Н.С. Музиченко. – Механіко-машинобудівний інститут, 2017. – 250 с.
12. Experimental Numerical Model of Roughness in Finishing Face Milling of AISI 4140 Hardened Steel Improved Performance of Materials / M.Filho, M.Stipkovic, E.Bordinassi and other // *Advanced Structured Materials*. – 2018. – Vol. 72. – P. 83–91. DOI: 10.1007/978-3-319-59590-0_8.

References:

1. Klymenko, S. (2023), «Fizyko-khimichni osoblyvosti znoshuvannya instrumentu iz PKNB», *Prohresyivna tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita*, materialy naukovo-tekhnichnoi konferentsii, No. XXIII, pp. 145–148, doi: 10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278236.
2. Melniichuk, Yu.O., Petrusha, I.A., Klymenko, S.A. et al. (2015), «Vysokoshvydkisne tochinna detalei z zahartovanykh stalei instrumentamy, shcho osnashcheni materialamy na osnovi kubichnoho nitrydu boru», *Instrumentalniy svit*, No. 1–4 (61–64), pp. 13–15.
3. Klymenko, S.A., Klymenko, S.An. and Burykin, V.V. (2012), «Analitichna otsinka velychyny temperaturnykh spalakhiv na kontaknykh poverkhniakh instrumentu z polikrystalichnykh nadtverdykh materialiv na osnovi kubichnoho nitrydu boru», *Protsesty mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni*, zb. nauk. pr., ZhDTU, Zhytomyr, Issue 12, pp. 58–66.
4. Wang, D., Yin, L., Hänel, A. et al. (2023), «Cutting performance of binderless nano-polycrystalline cBN and PcBN milling tools for high-speed milling of hardened steel», *Ceramics International*, Vol. 49, Issue 22, Part A, pp. 34757–34773.
5. Costes, J.P., Guillet, Y., Poulachon, G. and Dessoly, M. (2007), «Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718», *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, No. 47, pp. 1081–1087.

6. Petrusha, I.A., Bushlia, V.M., Osipov, O.S. et al. (2015), «Termobarychne spikannia i pratsezdattist rizalnoho kompozytu cBN-TiC hrupy BL pry tochinni zahartovanoi stali Caldie», *Porodoruivnyi ta metaloobrobnyi instrument – tekhnika ta tekhnolohiia yoho vyhotovlennia ta zastosuvannia*, zb. nauk. pr., ISM im. V.M. Bakulia, K., Issue 18, pp. 338–345.
7. Matras, A., Zębala, W. and Kowalczyk, R. (2014), «Precision milling of hardened steel with CBN tools», *Key Engineering Materials*, Vol. 581, pp. 182–187, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.581.182.
8. Zhang, Q., Zhang, S. and Li, J. (2017), «Three Dimensional Finite Element Simulation of Cutting Forces and Cutting Temperature in Hard Milling of AISI H13 Steel», *45th SME North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 45*, LA, USA.
9. Phokobye, S., Desai, D. and Tlhabadira, I. (2022), «Investigating the Surface Roughness of Hardened Tool Steel (2379) during Face Milling Operation», *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol. 11, No. 1, pp. 22–30.
10. Halpin, T., Byrne, G., Barry, J. and Ahearne, E. (2009), «The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining», *Proc. IMechE. Part B. J. Engineering Manufacture*, Vol. 223, pp. 947–953.
11. Muzychenko, N.S. (2017), *Osnovy teorii proektuvannia rizalnykh instrumentiv dlia vysokoshvydkisnoi obrobky*, Mekhaniko-mashynobudivnyi instytut, 250 p.
12. Filho, M., Stipkovic, M., Bordinassi, E. et al. (2018), «Experimental Numerical Model of Roughness in Finishing Face Milling of AISI 4140 Hardened Steel Improved Performance of Materials», *Advanced Structured Materials*, Vol. 72, pp. 83–91, doi: 10.1007/978-3-319-59590-0_8.

Антонюк Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0003-0690-2411>.

Наукові інтереси:

- підвищення працездатності різального інструменту й технологічного забезпечення якості та експлуатаційних характеристик деталей машин і приладів;
- конструювання та формування топографії зносостійких покриттів.

Antonyuk V.S.

Efficiency of face milling hardened steels with cubic boron nitride tools

Face milling of hardened steels is an important process in modern mechanical engineering, as it allows achieving high precision and quality of machined surfaces of machine parts. With the development of technology and materials science, new tool materials have emerged that significantly enhance machining efficiency. One such material is cubic boron nitride (CBN), which, due to its unique properties, has become indispensable in many industries. CBN is the second hardest material after diamond, making it suitable for machining hard materials such as hardened steels. The high thermal stability and chemical inertness of CBN allow its use in high-temperature and aggressive environments, significantly increasing tool productivity and longevity. Additionally, CBN tools provide high surface quality, reducing roughness and improving the accuracy of machining flat surfaces. This article examines the efficiency of using cubic boron nitride tools in face milling of hardened steels. Analytical studies were conducted to evaluate the impact of different cutting regimes on the quality of the machined surface of hardened steel and the wear resistance of the tool. The analysis results show that CBN tools ensure high machining accuracy and reduced surface roughness, making them effective for machining high-hardness hardened steels.

The article also discusses the economic aspects of using CBN tools in industrial conditions. The high cost of CBN tools is offset by their durability and high productivity, ultimately reducing overall machining costs. Thus, the use of cubic boron nitride tools is a promising direction for improving the efficiency and quality of machining hardened steels.

Keywords: face milling; hardened steel; surface roughness; cubic boron nitride.

Стаття надійшла до редакції 05.09.2024.