

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-4(38)-9-15

УДК 621.9

Ігор Володимирович Луців

доктор технічних наук, професор кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)
E-mail: kmi_liv@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3980-428X>

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ПКНБ

У статті розглянуто інноваційні методи та технології торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів за допомогою застосування інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ). Особливу увагу приділено аналізу ефективності та довговічності ріжучих інструментів, що оснащені пластинами із надтвердих матеріалів, а також вирішенню питань з оптимізації процесу фрезерування для досягнення високої якості та точності обробленої поверхні. Розглянуто вплив різних технологічних параметрів на стабільність та продуктивність фрезерування, а також характеристики зношування ріжучих елементів інструменту. Особливу увагу приділено порівнянню властивостей та характеристик інструментального матеріалу, зокрема ПКНБ з традиційними матеріалами ріжучих інструментів, демонструючи переваги у використанні ПКНБ для обробки важкооброблюваних матеріалів. Висвітлені результати аналітичних досліджень показують переваги використання інструментів із ПКНБ у порівнянні з іншими інструментальними матеріалами ріжучих інструментів. Представлено рекомендації щодо вибору оптимальних режимів різання для підвищення продуктивності виготовлення деталей машин та економічної ефективності машинобудівного виробництва.

Ключові слова: торцеве фрезерування; полікристалічний кубічний нітрид бору; важкооброблюваний матеріал; зносостійкість; режимі різання.

Рис.: 1. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Сучасні галузі, такі як машинобудівна, оборонна, автомобільна, енергетична, вимагають використання матеріалів з високими фізико-механічними властивостями. Обробка таких матеріалів є складним завданням, що вимагає впровадження інноваційних підходів та застосування вискоелективних інструментів.

Використання інструментів із ПКНБ дозволяє значно підвищити продуктивність та якість обробки, зменшуючи зношування інструментів і покращуючи економічну ефективність виробничих процесів. Це особливо важливо в умовах сучасного промислового конкурентного ринку, де кожне підприємство прагне знизити виробничі витрати. Визначення механізмів зношування та впливу різних параметрів обробки на стабільність процесу є важливим науковим завданням. Отримані результати можуть слугувати базою для подальших досліджень і розвитку нових теорій у галузі механічної інженерії. Таким чином, проведення досліджень за цим технічним напрямком має велике значення для наукового та технічного прогресу, забезпечення високої якості продукції та підвищення ефективності виробничих технологічних процесів.

Постановка проблеми. Торцеве фрезерування важкооброблюваних матеріалів являє собою складну задачу для сучасного машинобудування та промисловості в цілому. Поява нових матеріалів з високою твердістю, міцністю та жаростійкістю, таких як суперсплави, титанові та нікелеві сплави, значно ускладнила процес їх обробки традиційними методами. Заміна стандартних ріжучих інструментів на інструменти з полікристалічного кубічного нітриду бору може значно підвищити продуктивність та якість обробленої поверхні виробів. Оптимальний вибір параметрів обробки, таких як швидкість різання, подача, глибина різання та наявність охолодження, є ключовим для забезпечення ефективності процесу. Недостатня оптимізація цих параметрів може призвести до зниження якості та підвищення зношування інструменту, що є основною задачею для встановлення умов оброблення важкооброблюваних матеріалів високої твердості.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вітчизняними та зарубіжними авторами встановлено високу ефективність застосування такого надтвердого матеріалу, як ПКНБ різних груп (з різним вмістом кубічного нітриду бору), що базується в промисловій галузі, де оброблюються важкооброблювані матеріали при чистовій та напівчистовій обробці. Важкооброблюваний матеріал, зокрема і леговані сталі високої твердості, після загартовування можуть досягати твердості до 65 HRC [1-5]. У багатьох випадках чистова обробка таких матеріалів може давати можливість відмовитися від операцій шліфування.

Авторами [10; 11; 12] встановлено, що інструмент із ПКНБ групи BL має збільшене зношування по задній поверхні при важкому переривчастому різанні, у той час як інструменти з матеріалами групи VH менш сприятливі до динамічних навантажень, але швидше зношуються при високошвидкісному різанні.

У статті [13] досліджувалися механізми зношування та характер поведінки інструменту з матеріалами груп BL і VH при різних умовах різання. Обробляли заготовки із загартованої сталі AISI 4340 (52 HRC) у станах, що забезпечують умови безперервного різання, незначних динамічних навантажень та різанні з ударом. Використовувався інструмент з композитами, що містять 50 % cBN у зв'язці TiC, 65 % cBN у зв'язці TiCN та 90 % cBN у зв'язці Co-Ni.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Обробка загартованих сталей інструментом із кубічного нітриду бору (КНБ) зазвичай проводиться шляхом точіння. Це поширене явище завдяки високій ефективності та точності процесу. Водночас торцеве фрезерування загартованих сталей залишається менш досліджуваною галуззю, що створює необхідність проведення подальших досліджень для оптимізації цього процесу, визначення критерію ефективності якості поверхонь, що отримуються шляхом механічної обробки.

Метою статті є теоретичний аналіз сучасних підходів до торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів із використанням інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору, визначення оптимальних параметрів обробки для підвищення ефективності та економічної доцільності технологічного процесу, а також дослідження впливу параметрів різання на якість обробленої поверхні виробів деталей машин і механізмів.

Постановка завдання. Розробити теоретичні моделі для подальшого проведення експериментальних досліджень, сформулювати рекомендації щодо оптимізації процесу фрезерування загартованих сталей інструментом з ПКНБ для підвищення ефективності, зменшення зносу інструменту та покращення якості обробки.

Методика досліджень. Розглянуто застосування ріжучого інструменту із ПКНБ для обробки загартованої сталі високої твердості. Аналіз проблеми оброблюваності матеріалу дає змогу поставити задачу, оцінити вплив різних умов різання на ефективність процесу фрезерування. Розробка теоретичних моделей дасть змогу оптимізувати процес обробки, підвищити якість продукції та зменшити знос інструменту, що сприятиме підвищенню ефективності виробництва за рахунок передбачення зношуваності пластин, зокрема терміну служби.

Виклад основного матеріалу. Досліджено [14] оброблюваність загартованої сталі AISI 1050 ріжучими інструментами на основі кубічного нітриду бору. Умови різання вказано в табл. 1.

Таблиця 1 – Умови різання обробки загартованої сталі AISI 1050

Фактори	Одиниці вимірювання	-2	-1	0	+1	+2
Швидкість різання	м/хв	103	138	173	208	243
Подача	мм	0,10	0,134	0,163	0,203	0,238
Глибина різання	мм	0,41	0,54	0,67	0,80	0,93

Середні значення отриманих показників шорсткості поверхні зображено в табл. 2.

Таблиця 2 – Середні значення шорсткості поверхні отримані після обробці загартованих сталей

№	Основні параметри різання			Виміряні значення шорсткості		
	V	f	d	Ra	Rz	$Rmax$
1	138	0,134	0,54	0,558	3,078	3,348
2	208	0,134	0,54	0,619	3,450	4,033
3	138	0,203	0,54	0,921	4,018	4,365
4	208	0,203	0,54	0,934	3,938	4,293
5	138	0,134	0,80	0,595	3,128	3,393
6	208	0,134	0,80	0,593	3,385	3,913
7	138	0,203	0,80	0,957	4,330	5,290
8	208	0,203	0,80	1,006	4,923	5,200
9	103	0,169	0,67	0,850	3,983	3,940
10	243	0,169	0,67	0,941	5,318	7,785
11	173	0,100	0,67	0,553	3,903	5,798
12	173	0,238	0,67	1,192	5,553	5,978
13	173	0,169	0,41	0,814	3,833	4,040
14	173	0,169	0,93	0,868	4,678	4,858
15	173	0,169	0,67	0,873	4,288	4,348
16	173	0,169	0,67	0,853	3,985	4,333
17	173	0,169	0,67	0,850	3,980	4,270
18	173	0,169	0,67	0,849	4,098	4,718

На рис. 1 зображено отримані значення шорсткості поверхні Ra , Rz , $Rmax$ залежно від швидкості різання, подачі, глибини різання.

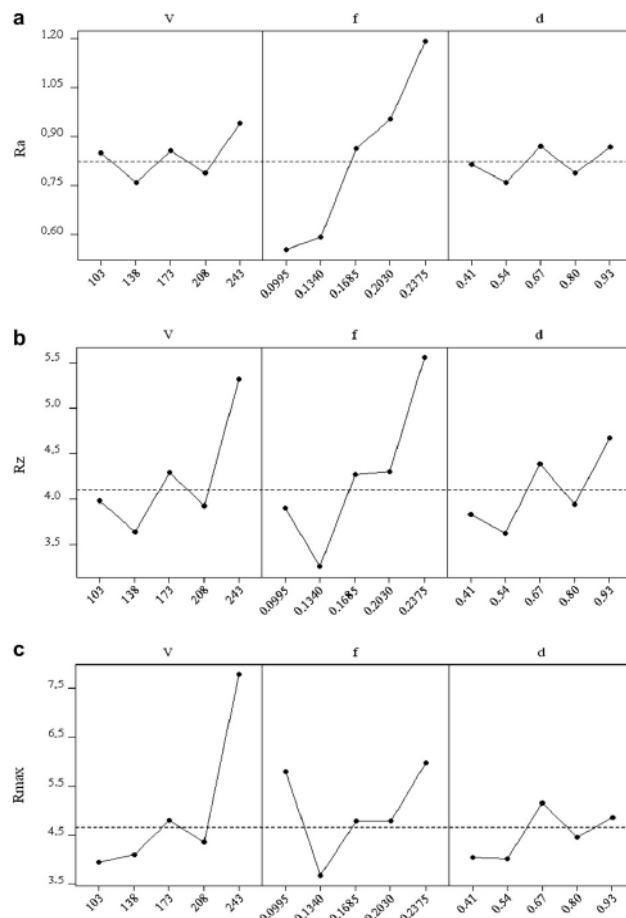


Рис. 1. Вплив основних параметрів різання V , f , d на шорсткість поверхні Ra , Rz , $Rmax$ при обробці загартованих сталей ріжучими інструментами з КНБ

Швидкість різання – V , подача – f , глибина різання – d . Шорсткість поверхні значно зростає зі збільшенням подачі, тоді як при зміні швидкості різання і глибини різання зміни були незначні. Загалом найменші значення шорсткості поверхні R_a , R_z , R_{max} було отримано при зменшенні цих трьох основних факторів. Можна зробити висновок, що при збільшенні V , f , d показники шорсткості зростають. Разом з тим, як ми бачимо, різні параметри різання мають вагомий вплив на якість поверхні важкооброблюваних матеріалів.

Один із сучасних підходів до торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів є використання ріжучих інструментів із КНБ зі зносостійкими покриттями. Нанесення зносостійких покриттів на ПКНБ різко підвищує їхню довговічність при фрезеруванні важкооброблюваних матеріалів. Покриття забезпечують високу стійкість до окиснення при помірно-високих температурах (до ~ 800 °C), а покриття із вмістом Ti і N – ще вищу термостабільність (до ~ 1100 °C), що критично при високошвидкісному різанні загартованих сталей.

Визначено [15] вплив зносостійких покриттів (Ti(C, N) + (Ti, Al) N + TiN) на механізми зношування інструменту. Аналіз характеристики зносу бічної поверхні інструменту показав, що макросколи, які були утворені на інструментах без покриттів сприяли швидшому руйнуванню ріжучої кромки.

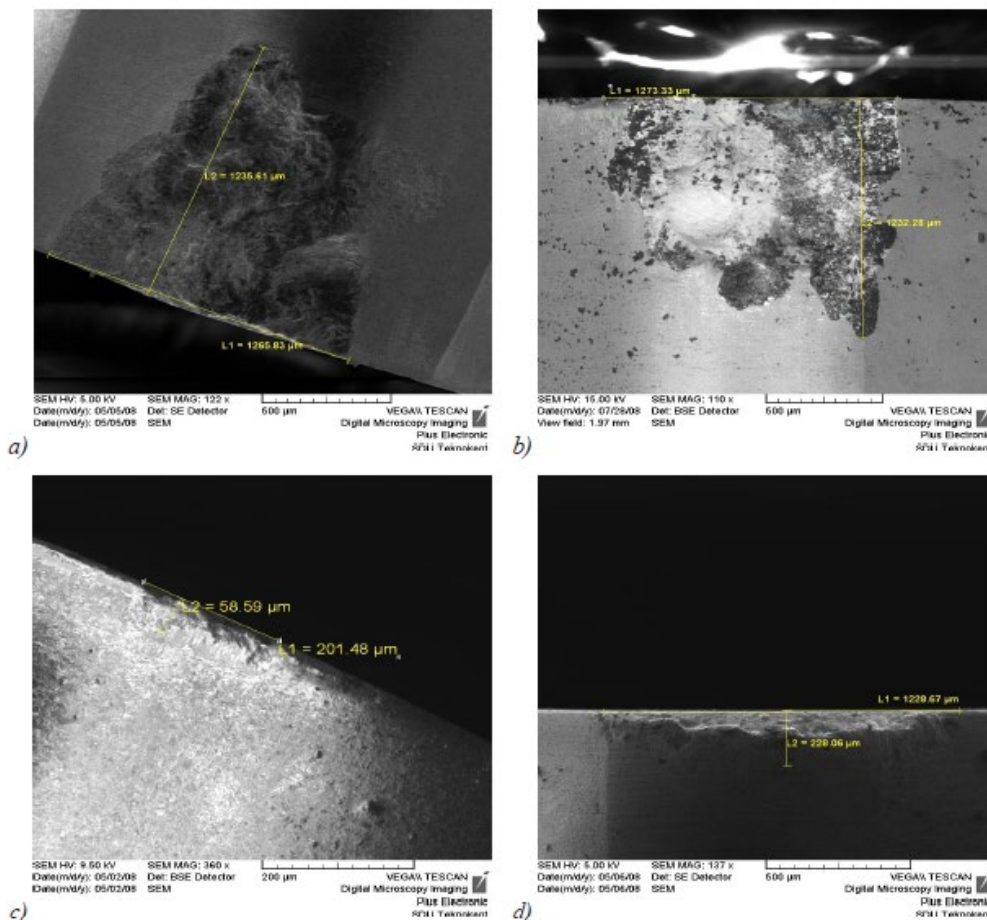


Рис. 3. Знос інструменту SEM-зображення:

- a* – максимальний знос інструменту для пластини з CBN ($v_c = 154,4$ м/хв, $f = 0,15$ мм/зуб);
- б* – максимальний знос інструменту для пластини з покриттям Ti(C,N) + (Ti, Al) N + TiN CBN ($v_c = 154,4$ м/хв, $f = 0,1$ мм/зуб);
- с* – Мінімальний знос інструменту для пластини з CBN ($v_c = 524,5$ м/хв, $f = 0,05$ мм/зуб);
- д* – Мінімальний знос інструменту для пластини з покриттям Ti(C,N) + (Ti, Al) N + TiN CBN ($v_c = 524,5$ м/хв, $f = 0,05$ мм/зуб)

Оптимальна швидкість різання та подача для двох типів пластин була в діапазоні від 450 до 550 м/хв та від 0,05 до 0,1 мм/зуб, відповідно. При обробці загартованої сталі ріжучими інструментами із КНБ без покриттів спостерігається більший знос пластини на 6,25 %, що підтверджує доцільність застосування сучасного підходу як зносостійкі покриття.

Висновки. Сучасні підходи до торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів включають в себе використання різних груп КНБ для різних діапазонів твердості та типів навантаження, зносостійкі покриття забезпечують стійкість до окиснення при високих температурах, що в подальшому підвищує їх довговічність. Торцеве фрезерування інструментами із КНБ розглядається як сучасний метод альтернативи процесу шліфування при твердості > 55 HRC. Застосування таких інструментів дозволяє досягати низької шорсткості ($R_a < 0.2-0.4$ $\mu\text{м}$) із більшою продуктивністю порівняно зі шліфувальними операціями.

Визначено, що швидкість різання, подача, глибина різання мають значний вплив на якість обробленої поверхні важкооброблюваних матеріалів при торцевому фрезеруванні інструментом із ПКНБ. Найбільший вплив має подача, порівнюючи з іншими параметрами різання. Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти високих показників шорсткості поверхневого шару та точності обробки. Використання інструментів із КНБ забезпечує значно кращу якість обробленої поверхні завдяки їх високій твердості та зносостійкості ріжучих елементів. Це підтверджено як теоретичними, так і експериментальними дослідженнями вітчизняних та зарубіжних дослідників. Інструменти з КНБ демонструють високу стійкість до зношування, що сприяє тривалій експлуатації та знижує частоту заміни інструментів, а також позитивно впливає на економічну ефективність машинобудівного виробництва деталей машин.

Список використаних джерел

1. Клименко, С. А. Технологічні можливості інструментів, оснащених композитами на основі кубічного нітриду бора / С. А. Клименко, М. Ю. Копейкіна, А. Ю. Чумак // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2017. – Вип. 12. – С. 54-60.
2. Клименко, С. А. Механічна обробка інструментами з надтвердих матеріалів: стан і перспективи [Електронний ресурс] / С. А. Клименко // Високі технології: тенденції розвитку : матеріали ХХVIII міжнар. науково-техн. семінару, м. Харків, 3-5 листоп. 2020 р. – Харків : Вид-во НТУ «ХПІ», 2020. – С. 37-40. – Режим доступу: https://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020_Matters_TextOnline.pdf.
3. Faga, M. G. Microstructural and mechanical characteristics of recycled hard metals for cutting tools. / M. G. Faga // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2010. – Pp. 133-136.
4. Slipchenko K. Investigation of the mechanical properties and cutting performance of cBN-based cutting tools with Cr₃C₂ binder phase / K. Slipchenko, I. Petrussha, V. Turkevich, J. Johansson, V. Bushlya, Jan-Eric Ståhlb // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 72. – Pp. 1433-1438.
5. Sumiya H. Mechanical properties of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT / H. Sumiya, K. Harano, Y. Ishida // Diamond and Related Materials. – 2014. – Vol. 41. – Pp. 14-19.
6. Investigation of the Impact of Face Milling Parameters on the Roughness of the Machined Surface for 1.4301 Steel / Michał Bembenek [et al.] // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2023. – Vol. 17, no. 4. – Pp. 299–312. DOI: <https://doi.org/10.12913/22998624/170422>.
7. Rahman, A. M. Modeling and optimization of process parameters in face milling of Ti6Al4V alloy using Taguchi and grey relational analysis / A. M. Rahman, S. A. Rob, A. K. Srivastava // Procedia Manufacturing. – 2021. – Vol. 53 – Pp. 204-212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.06.023>.
8. Study on grinding mode effect on external conical thread quality / L. Ya Ropyak [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1018. – P. 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1018/1/012014>.

9. Siller, H. R. Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools / H. R. Siller [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2008. – Vol. 40, no. 1-2. – Pp. 12–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1309-0>.
10. Chou, Y. K. Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting / Y. K. Chou // *Wear*. – 2003. – Vol. 255. – Pp. 1388-1394.
11. Chou, Y. K. Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting / Y. K. Chou, C. J. Evans // *Wear*. – 1999. – Vol. 225-229. – Pp. 234-245.
12. Diniz A. E. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting / Anselmo Eduardo Diniz, Denilson Martins Gomes, Aldo Braghini // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – Vol. 159, №. 2. – Pp. 240-248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.05.011>.
13. Halpin, T. The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining / T. Halpin [et al.] // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2009. – Vol. 223, №. 8. – Pp. 947-953. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544054jem1488>.
14. Sahin Y. Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool / Y. Sahin, A. R. Motorcu // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2008. – Vol. 26, №. 2. – P. 84-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2007.02.005>.
15. Taylan F. Investigation of TiN Coated CBN and CBN Cutting Tool Performance in Hard Milling Application / Fatih Taylan, Oğuz Çolak, Mehmet Cengiz Kayacan // *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. – 2011. – Vol. 57, №. 05. – Pp. 417-424. DOI: <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.059>.

References

1. Klymenko, S. A., Kopeikina, M. Yu., Chumak, A. Yu. (2017). *Tekhnolohichni mozhlyvosti instrumentiv, osnashchenykh kompozytamy na osnovi kubichnoho nitrydu bora [Technological capabilities of tools equipped with composites based on cubic boron nitride]*.
2. Klymenko, S. A. (2020). Mekhanichna obrobka instrumentamy z nadtverdykh materialiv: stan i perspektyvy [Mechanical processing with superhard material tools: state and prospects]. *Vysoki tekhnolohii: tendentsii rozvytku – High Technologies: Development Trends : materials of the XXVIII International Scientific and Technical Seminar* (pp. 37-40). Vyd-vo NTU «KhPI». http://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020_Matters_TextOnline.pdf.
3. Faga, M. G. (2010). Microstructural and mechanical characteristics of recycled hard metals for cutting tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 133–136.
4. Slipchenko, K., Petrusha, I., Turkevich, V., Johansson, J., Bushlya, V., & Ståhl, J.-E. (2018). Investigation of the mechanical properties and cutting performance of cBN-based cutting tools with Cr₃C₂ binder phase. *Procedia CIRP*, 72, 1433-1438.
5. Sumiya, H., Harano, K., & Ishida, Y. (2014). Mechanical properties of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT. *Diamond and Related Materials*, 41, 14-19.
6. Bembenek, M., Dzienniak, D., Dzindziora, A., Sułowski, M., & Ropyak, L. (2023). Investigation of the Impact of Selected Face Milling Parameters on the Roughness of the Machined Surface for 1.4301 Steel. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 17(4), 299–312. <https://doi.org/10.12913/22998624/170422>
7. Rahman, A. M., Rob, S. A., & Srivastava, A. K. (2021). Modeling and optimization of process parameters in face milling of Ti6Al4V alloy using Taguchi and grey relational analysis. *Procedia Manufacturing*, 53, 204-212.
8. Ropyak, L. Y., Vytvytskyi, V., Velychkovych, A., Pryhorovska, T., & Shovkopliias, M. (2021). Study on grinding mode effect on external conical thread quality. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 012014.
9. Siller, H., Vila, C., Rodriguez, C., & Abellán, J. (2009). Study of face milling of hardened AISI D3 steel with a special design of carbide tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40, 12–25.
10. Chou, Y. K. (2003). Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting. *Wear*, 255, 1388–1394.

11. Chou, Y. K., & Evans, C. J. (1999). Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting. *Wear*, 225–229, 234–245.
12. Diniz, A. E., Gomes, D. M., & Braghini, A. Jr. (2004). Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *Mater. Processing Technol.*, 129(2), 240–248.
13. Halpin, T., Byrne, G., Barry, J., & Ahearne, E. (2009). The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining. *Proc. IMechE*, 223 Part B: *J. Engineering Manufacture*, 947–953.
14. Sahin, Y., & Motorcu, A.R. (2008). Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 26, 84–90.
15. Taylan, F., Çolak, O., & Kayacan, M. C. (2011). Investigation of TiN Coated CBN and CBN Cutting Tool Performance in Hard Milling Application. *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, 57(5), 417-424.

Отримано 20.12.2024

УДК 621.9

Ihor Lutsiv

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering
State University «Zhytomyr Polytechnic» (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: kmi_liv@ztu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3980-428X>

**MODERN APPROACHES TO FACE MILLING
OF HARD-TO-MACHINE MATERIALS USING PCBN TOOLS**

The article discusses innovative methods and technologies for face milling of hard-to-machine materials using polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) tools. Special attention is paid to the analysis of the efficiency and durability of cutting tools equipped with superhard inserts, as well as to issues related to the optimisation of the milling process to achieve high quality and precision of the machined surface. The influence of various technological parameters on the stability and productivity of the milling process, as well as the wear characteristics of the cutting elements of the tool, are considered. Special attention is given to the comparison of the properties and characteristics of tool materials, in particular PCBN, with traditional cutting tool materials, demonstrating the advantages of using PCBN for machining difficult-to-machine materials. The results of analytical studies highlight the advantages of using PCBN tools over other tool materials. Recommendations are given for the selection of optimum cutting modes in order to increase the productivity of machine part production and the economic efficiency of the manufacturing process.

Keywords: face milling, polycrystalline cubic boron nitride, hard-to-machine material, wear resistance, cutting modes.
Fig.: 1. References: 14.