

## Аналітичний огляд зносостійкості інструментів із КНБ при торцевому фрезеруванні загартованих сталей

У статті представлено детальний аналітичний огляд зносостійкості інструментів із кубічного нітриду бору (КНБ) при торцевому фрезеруванні загартованих сталей. Розглянуто основні фактори, що впливають на зношування інструментів, враховуючи швидкість різання, подачу, геометрію інструменту та температурний режим обробки. Особлива увага приділена аналізу механізмів зношування, таких як абразивне, адгезійне та дифузійне зношування, а також їх впливу на продуктивність і якість обробки. Абразивне зношування виникає через механічне тертя між інструментом і оброблюваним матеріалом, що призводить до поступового видалення матеріалу з поверхні інструменту. Адгезійне зношування відбувається внаслідок злипання матеріалів інструменту та заготовки, що призводить до утворення мікрозварок і подальшого відриву частинок. Дифузійне зношування спричинене високими температурами в зоні різання, що призводить до дифузії атомів між інструментом і оброблюваним матеріалом, змінюючи хімічний склад і структуру інструменту. У статті також порівнюється зносостійкість інструментів із КНБ з іншими матеріалами, такими як твердосплави та кераміка, з метою визначення їх переваг та недоліків у різних умовах обробки. Наведено результати експериментальних досліджень, які демонструють вплив різних режимів різання на знос інструментів із КНБ, а також рекомендації щодо оптимізації цих режимів для підвищення довговічності інструментів. Додатково розглянуто вплив мікроструктури загартованих сталей на процес зношування інструментів та запропоновано методи покращення зносостійкості через модифікацію поверхні інструментів. Отримані дані можуть бути корисними для інженерів та дослідників у галузі механічної обробки загартованих сталей, а також для розробників нових інструментальних матеріалів.

**Ключові слова:** торцеве фрезерування; кубічний нітрид бору; загартована сталь; механізми зношування; зносостійкість.

**Актуальність теми.** Зносостійкість інструментів є одним із ключових факторів, що визначають ефективність та економічність процесів механічної обробки, особливо під час обробки загартованих сталей. Загартовані сталі широко використовуються в різних галузях промисловості, враховуючи автомобільну, авіаційну, енергетичну та інші, завдяки їх високій міцності та зносостійкості. Однак обробка таких матеріалів є складним завданням через їх високу твердість і абразивність, що призводить до швидкого зношування інструментів. Кубічний нітрид бору (КНБ) є одним із найефективніших матеріалів для виготовлення різальних інструментів завдяки своїм унікальним властивостям, таким як висока твердість, термостійкість та хімічна інертність. Використання інструментів із КНБ при торцевому фрезеруванні загартованих сталей дозволяє значно підвищити продуктивність обробки, зменшити час простою обладнання та знизити витрати на заміну інструментів. Актуальність дослідження зносостійкості інструментів із КНБ обумовлена необхідністю оптимізації процесів обробки для досягнення максимальної ефективності та якості оброблених поверхонь. Вивчення механізмів зношування, таких як абразивне, адгезійне та дифузійне зношування, дозволяє розробити рекомендації щодо вибору оптимальних режимів різання та конструкцій інструментів, що сприяє підвищенню їх довговічності. Крім того, порівняння зносостійкості інструментів із КНБ з іншими матеріалами, такими як твердосплави та кераміка, є важливим для визначення їх переваг та недоліків у різних умовах обробки. Це дозволяє інженерам та дослідникам ухвалювати обґрунтовані рішення щодо вибору інструментів для конкретних завдань. Таким чином, дослідження зносостійкості інструментів із КНБ при торцевому фрезеруванні загартованих сталей є актуальним і важливим завданням, яке сприяє розвитку технологій механічної обробки та підвищенню ефективності виробничих процесів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор.** Автори [1–3] визначили, що інструмент, оснащений пластинами із КНБ групи VL, має інтенсивне зношування по задній поверхні під час переривчастого різання, в той час, коли інструменти, що оснащені пластинами із КНБ групи VH, більш стійкі до динамічних навантажень, але зношування відбувається швидше за високошвидкісного різання.

У [4] досліджували механізми зношування та характер поведінки інструменту, який оснащений різальними пластинами із КНБ VL і VH груп за різних умов різання. Заготовки були із загартованої сталі AISI 4340 (твердість 52 HRC) у станах, що забезпечують умови незначних динамічних навантажень та обробки з ударом, а інструменти застосовувалися з композитами, що містять 50 % КНБ у зв'язці TiC, 65 % КНБ у зв'язці TiCN та 90 % КНБ у зв'язці Co-Ni.

Taylan F., Çolak O., Kayacan M.C. [5] визначили зносостійкість різальних пластин із КНБ без покриттів (CBN300 Grade-SNEN0903ENE-M06) та КНБ з покриттям TiN (CBN300P Grade- SNMN090308) при торцевому фрезеруванні загартованої сталі 90MnCrV8 твердістю 61 HRC. Досліджено [6] вплив параметрів різання на зношування інструменту, а саме швидкість різання при постійній подачі. Дослідження показали, що зношування бічної поверхні інструменту збільшується при збільшенні швидкості різання.

Автори [7] досліджували механізми зношування твердосплавних інструментів під час обробки сталі AISI 1045. Критерій стійкості інструменту базувався на зношуванні бічної поверхні інструменту, оскільки це основний механізм, пов'язаний зі стійкістю інструменту. Вони дійшли висновку, що високі температури і сили, що виникають у процесі різання, є основною причиною виходу інструменту з ладу при обробці на високих швидкостях різання і подачі.

**Метою статті** є проведення всебічного аналітичного огляду зносостійкості інструментів із кубічного нітриду бору (КНБ) при торцевому фрезеруванні загартованих сталей. Основні завдання враховують: визначення основних факторів, що впливають на зношування інструментів із КНБ, таких як швидкість різання, подача, геометрія інструменту та температурний режим обробки. Аналіз механізмів зношування інструментів із КНБ, включаючи абразивне, адгезійне та дифузійне зношування, та їх вплив на продуктивність і якість обробки.

**Викладення основного матеріалу.** Дослідження показують, що інструменти з КНБ демонструють значно вищу зносостійкість порівняно з традиційними твердосплавними інструментами під час обробки загартованих сталей. Це дозволяє збільшити продуктивність і зменшити витрати на заміну інструментів.

Визначено [5] пошкодження різального інструменту при торцевому фрезеруванні і характер зношування самих пластин із КНБ без покриття та з покриттям Ti(C, N) + (Ti, Al)N + TiN. Результати вимірювання зносу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Вимірювання зносу різючих пластин із КНБ при торцевому фрезеруванні

№ з/п	Явища руйнування інструменту		Критерій, мм			Зображення
			S маленький	N нормальний	L великий	
	Відколи (руйнування)		Для x або z з відповідними значеннями довжини			
1	Рівномірно					
2	Нерівномірно					
3	Локалізовано					
		Довжина, мм				
A	Мікро-руйнування	< 0,3	0,2	0,25	0,3	
B	Макро-руйнування	0,3–1	0,25	0,4	0,5	
C	Поломка	>1	-	-	-	

На рисунку 1 показано SEM-зображення максимального і мінімального зношування інструменту із КНБ. Максимальне зношування відбувалося при швидкості різання 154,4 м/хв. Мінімальне зношування досягалося при швидкості різання 524,5 м/хв і подачі 0,05 мм/зуб.

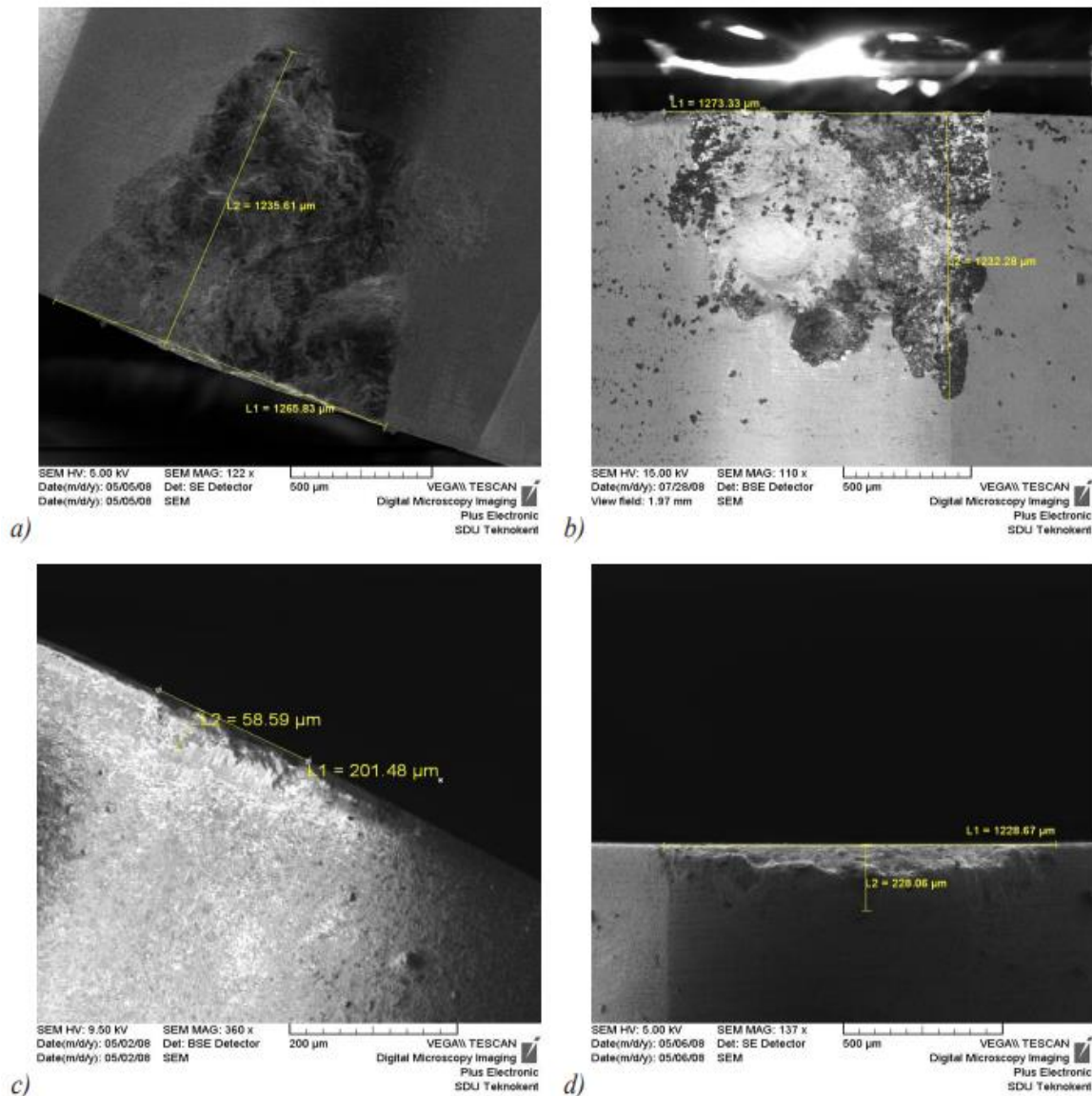


Рис. 1. SEM-зображення зношування інструментів: а) максимальне зношування пластин із КНБ ( $V_c = 154,4$  м/хв,  $f = 0,15$  мм/зуб); б) максимальне зношування пластин із КНБ з покриттям  $Ti(C, N) + (Ti, Al)N + TiN$  ( $V_c = 154,4$  м/хв,  $f = 0,1$  мм/зуб); в) мінімальне зношування пластин із КНБ ( $V_c = 524,5$  м/хв,  $f = 0,05$  мм/зуб); г) мінімальне зношування пластин із КНБ з покриттям  $Ti(C, N) + (Ti, Al)N + TiN$  ( $V_c = 524,5$  м/хв,  $f = 0,05$  мм/зуб) [5]

Досліджувалося [7] зношування різальних пластин при торцевому фрезеруванні загартованої сталі AISI 1045. На рисунку 2 показано приклади зношування інструменту під час фрезерування за різних умов різання.

Варто підкреслити, що у всіх випадках знос бокових поверхонь інструменту почав проявлятися при  $V = 500$  м/хв, і що різні механізми зносу інструменту проявлялися одночасно на кожній з різних поверхонь інструменту під час різання за різних умов.

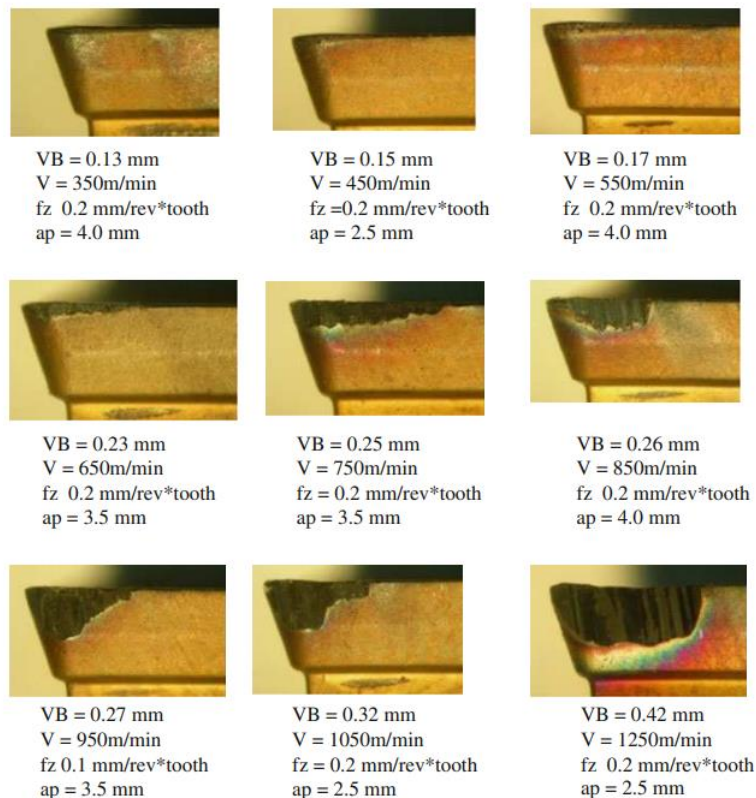


Рис. 2. Зношування інструменту при торцевому фрезеруванні сталі AISI 1045 за різних умов різання

На рисунку 3 показано структуру поверхні інструменту з  $VB = 0,3$  мм. Цей інструмент використовувався для торцевого фрезерування сталі AISI 1045 при різанні зі швидкістю  $V = 950$  м/хв,  $f_z = 0,3$  мм/зуб та  $a_p = 2,5$  мм. Аналізуючи рисунок 3, а, можна спостерігати наявність абразивного механізму зношування інструменту. На цьому ж рисунку також спостерігається кратероутворення, де представлено дифузійний механізм зношування інструменту. Для того щоб підтвердити цей результат, був проведений EDX-аналіз у зазорі, розташованому біля кратера інструменту (рис. 3, в).

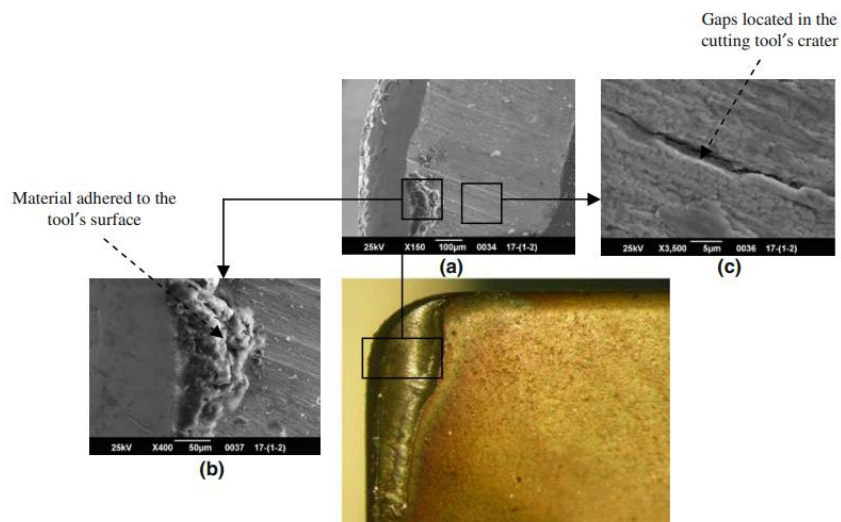


Рис. 3. Зображення різних ділянок поверхні інструменту при торцевому фрезеруванні AISI 1045 при  $V = 950$  м/хв,  $f_z = 0,3$  мм/зуб та  $a_p = 2,5$  мм: (а) поверхня інструменту, що демонструє абразивний, дифузійний та адгезійний знос інструменту, 150×, (б) поверхня інструменту, що демонструє адгезійний знос інструменту, 400×, (с) поверхня інструменту, що демонструє дифузійний знос інструменту, 3,500×

Результати цього аналізу показують наявність хімічних елементів С і Fe, які є елементами, що входять до складу сталі AISI 1045, а також С і W, які є хімічними елементами інструменту. Результат цього аналізу показано на рисунку 4. Також на ньому можна побачити наявність налиплих частинок на поверхні інструменту. Ці частинки походять з матеріалу, що фрезерується, і підтверджують наявність адгезійного механізму зношування інструменту.

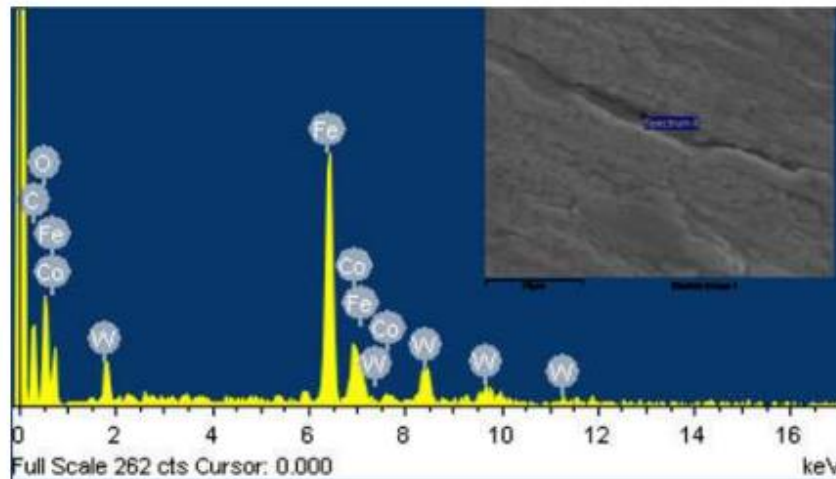


Рис. 4. Результати дослідження поверхні інструменту з наявністю дифузійного механізму зношування інструменту при торцевому фрезеруванні AISI 1045

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** При аналітичному огляді встановлено, що при вибраних режимах різання при торцевому фрезеруванні загартованої сталі на різальний інструмент впливають механізми абразивної, адгезійної, дифузійної, механічної та термічної втоми. Швидкість різання є параметром, що найбільше впливає на зношування бічної поверхні інструменту, за ним це подача на зуб і осьова глибина різання. Діапазони швидкостей різання для отримання механізму абразивного зносу інструменту становлять 250–1250 м/хв, адгезійного – 650–1250 м/хв, дифузійного – 850–1250 м/хв. Ці аспекти підкреслюють важливість досліджень у сфері зносостійкості інструментів із КНБ та їх вплив на сучасне виробництво та технології.

#### References:

1. Chou, Y.K. (2003), «Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting», *Wear*, No. 255, pp. 1388–1394.
2. Chou, Y.K. and Evans, C.J. (1999), «Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting», *Wear*, No. 225–229, pp. 234–245.
3. Diniz, A.E., Gomes, D.M. and Braghini, A.Jr. (2004), «Turning of hardened steel with interrupted and semiinterrupted cutting», *Mater. Processing Technol.*, Vol. 129, No. 2, pp. 240–248.
4. 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.
5. Taylan, F., Çolak, O. and Kayacan, M.C. (2011), «Investigation of TiN Coated CBN and CBN Cutting Tool Performance in Hard Milling Application», *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 57, Issue 5, pp. 417–424.
6. Serdar, K., Adem, A., Mustafa, U. and Bilgehan, O. (2006), «Effect of Cutting Speed on Tool Performance in Milling of B4CP Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites», *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 178, pp. 241–246.
7. Mun'oz, P., Dı'az, N. and Cassie, Z. (2012), «Prediction of Tool Wear Mechanisms in Face Milling AISI 1045 Steel», *JMEPEG*, Vol. 21, pp. 797–808.
8. Liu, Z.Q, Zhang, X., Wang, Z.T. and Wan, Y. (2002), «Wear Patterns and Mechanisms of Cutting Tools in High-Speed Face Milling», *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 129, pp. 222–226.

**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 та технологічного забезпечення якості та експлуатаційних характеристик деталей машин та приладів;
- конструювання та формування топографії зносостійких покриттів.

**Antonyuk V.S.**

**Analytical review of the wear resistance of CBN tools in face milling of hardened steels**

The article presents a detailed analytical review of the wear resistance of cubic boron nitride (CBN) tools in face milling of hardened steels. The main factors affecting tool wear, including cutting speed, feed, tool geometry, and thermal regime of processing, are considered. Special attention is given to the analysis of wear mechanisms such as abrasive, adhesive, and diffusion wear, and their impact on performance and machining quality. Abrasive wear occurs due to mechanical friction between the tool and the workpiece, leading to gradual material removal from the tool surface. Adhesive wear happens due to the sticking of tool and workpiece materials, resulting in micro-welds and subsequent particle detachment. Diffusion wear is caused by high temperatures in the cutting zone, leading to atom diffusion between the tool and workpiece, changing the chemical composition and structure of the tool. The article also compares the wear resistance of CBN tools with other materials such as carbides and ceramics to determine their advantages and disadvantages under different machining conditions. Experimental research results are presented, demonstrating the impact of various cutting regimes on the wear of CBN tools, along with recommendations for optimizing these regimes to enhance tool longevity. Additionally, the influence of the microstructure of hardened steels on the tool wear process is discussed, and methods for improving wear resistance through tool surface modification are proposed. The obtained data can be useful for engineers and researchers in the field of machining hardened steels, as well as for developers of new tool materials.

**Keywords:** face milling; cubic boron nitride; hardened steel; wear mechanisms; wear resistance.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2024.