DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-102-106
УДК 621.9.025.7

В.М. Рубан, к.т.н., доц.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Зносостійкість різальних пластин з кубічного нітриду бору та інструментальної кераміки при торцевому фінішному фрезеруванні чавунів з вермикулярним графітом

Чавуни з вермикулярним графітом все частіше використовуються в машинобудуванні завдяки вдалому поєднанню механічних властивостей сірих і високоміцних чавунів, включаючи високу міцність, пластичність, теплопровідність і здатність гасити вібрації. Завдяки цим властивостям цей матеріал використовується для виготовлення корпусних деталей, блоків циліндрів, гальмівних дисків та інших навантажених елементів машин. Однак їх механічна обробка ускладнена через високу твердість, складну морфологію вермикулярного графіту, структурну неоднорідність, що призводить до інтенсивного абразивного і термічного зношування різального інструменту. Особливо гостро ця проблема стоїть в умовах сухого фрезерування, де відсутність охолодження призводить до локальних перегрівів і додаткових навантажень на ріжучу кромку.

У статті проаналізовано ефективність використання інструментів з кубічного нітриду бору (КНБ) та кераміки як інструментальних матеріалів, здатних працювати в екстремальних умовах високошвидкісного фрезерування без застосування мастильно-охолоджувальних рідин. Проведено порівняльний аналіз впливу режимів різання (швидкість, подача, глибина) та геометрії інструменту, зокрема головного кута різання, на інтенсивність зношування, якість обробленої поверхні, стабільність процесу та кількість матеріалу, що знімається. Встановлено, що в умовах високошвидкісного фрезерування КВГ без охолодження інструментами з КНБ забезпечується найвища зносостійкість і висока якість обробки.

Ключові слова: *кубічний нітрид бору (КНБ); інструментальна кераміка; чавуни з вермикулярним графітом (ЧВГ); фінішне торцеве фрезерування; зносостійкість.*

Постановка проблеми. У сучасному машинобудуванні зростає попит на високоміцні та важкооброблювані матеріали. До таких матеріалів належить чавуни з вермикулярним графітом (ЧВГ), в яких поєднуються механічні переваги сірих (СЧ) та високоміцних чавунів з кулястим графітом (ВЧК). Завдяки кращому співвідношенню міцності до ваги, термічній стійкості та здатності гасити вібрації, зростає їх використання в автомобілебудуванні, енергетиці та транспортній галузі. Однак механічна обробка ЧВГ супроводжується високими тепловиділенням та інтенсивним абразивним зношуванням ріжучих крайок, особливо при високошвидкісному торцевому фрезеруванні [1].

Загальновизнаний вектор розвитку промисловості спрямований на підвищення екологічної відповідальності, скорочення ресурсоспоживання та впровадження технологій, які зводять до мінімуму негативний вплив на навколишнє середовище. При цьому актуальними є вдосконалення технологій механічної обробки без використання мастильно-охолоджувальних рідин (МОР). Дуже важливо забезпечити стабільність обробки, контрольований тепловий режим і прогнозоване зношування ріжучої кромки інструменту в процесах фінішного фрезерування, під час якого якість обробленої поверхні особливо чутлива до змін геометрії різання.

Як один з ключових напрямків сталого виробництва, розглядається сухе фрезерування як процес, що дозволяє знизити споживання енергії, зменшити витрати на утилізацію мастильно-охолоджувальних рідин. Та попри очевидні переваги, ця технологія супроводжується низкою проблем, таких як підвищене зношування інструменту, погане відведення тепла та, як наслідок, погіршення якості обробленої поверхні. Для вирішення цих проблем необхідне впровадження інноваційних інструментальних матеріалів, оптимізація режимів різання, використання сучасних покриттів і вдосконалення конструкцій інструменту [2].

Забезпечення ефективності сухого фрезерування при обробці чавуну з вермикулярним графітом вимагає інструменту з високою зносостійкістю, здатного стабільно працювати при високих температурах без охолодження, забезпечуючи при цьому високу якість поверхні і стабільність процесу обробки. Одними з інструментальних матеріалів, які можуть ефективно працювати без охолодження є кубічний нітрид бору (КНБ) та інструментальна кераміка. КНБ вирізняється високою твердістю, термостійкістю та хімічною стійкістю до чавуну, завдяки чому забезпечується його висока ефективність при високошвидкісній обробці [3–6]. Інструменти з кераміки також характеризуються високою зносостійкістю та термостійкістю, поряд з низькою вартістю, що є вагомою перевагою в умовах великосерійного виробництва [6–10].

 © В.М. Рубан, 2025

Попри наявність численних публікацій, у науковій літературі відсутній ґрунтовний аналіз порівняльної зносостійкості КНБ та інструментальної кераміки в умовах сухого фрезерування чавуну з вермикулярним графітом. Питання впливу основних технологічних параметрів різання на інтенсивність зношування інструменту, стабільність процесу, параметри шорсткості та загальну ефективність обробки висвітлені недостатньо. Недостатня кількість систематизованих досліджень не дозволяє зробити технічно обґрунтований вибір оптимального інструменту з урахуванням не лише його зносостійкості, але й економічної доцільності та технологічної надійності обробки, що безпосередньо впливає на конкурентоспроможність сучасного виробництва.

Метою цієї роботи є аналітичне дослідження зносостійкості інструментів з кубічного нітриду бору та кераміки при фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом шляхом аналізу впливу параметрів різання на зношування інструменту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переваги інструментів із КНБ і кераміки представлені в роботах [3–10], де здійснено порівняльний аналіз довговічності різних інструментальних матеріалів при фрезеруванні сірого чавуну, ЧВГ із низьким та високим вмістом перліту. Згідно з даних представлених в роботі [6], інструменти з кубічного нітриду бору забезпечили найвищу стійкість (понад 17 км) навіть при високих швидкостей різання (V_c = 800 м/хв), що значно перевищує показники для кераміки та твердого сплаву (рис. 1).

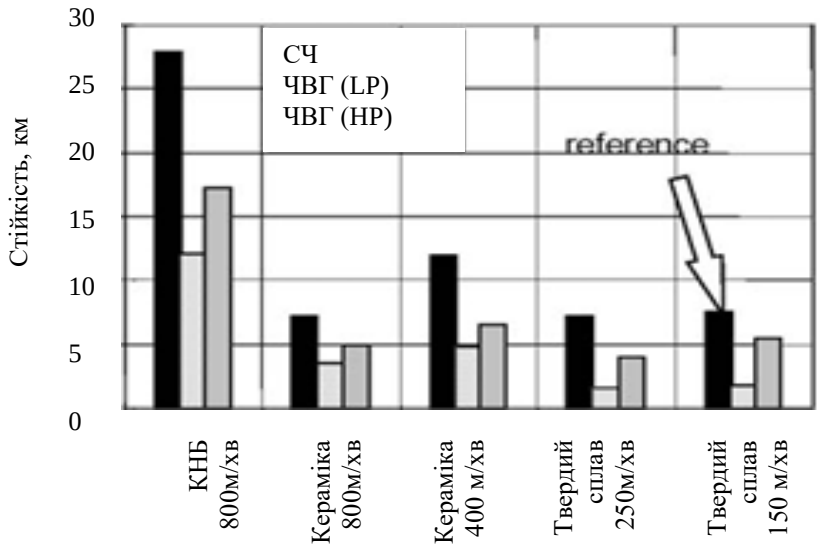

Рис. 1. Стійкість інструментів з кубічного нітриду бору, металокераміки та твердосплавів при торцевому фрезерувані чавунів з вермикулярним графітом [6]

Інструментальна кераміка також демонструє ряд переваг порівняно з твердосплавними інструментами: при швидкостях 400–800 м/хв її ресурс був у 1,5–2 рази вищим за тверді сплави з покриттями. Водночас, як видно на рисунку 1, твердосплавні інструменти навіть при менших швидкостях різання (150–250 м/хв) демонструють найнижчий ресурс роботи з поміж розглянутих інструментальних лезових матеріалів, що свідчить про їхню недостатню ефективність у складних умовах обробки без охолодження [6].

У роботі Ş.Karabulut і A.Güllü [7] проведено дослідження зносостійкості керамічних ріжучих інструментів при фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом в умовах сухої обробки. В експериментах вивчали вплив кута головного кута різання (K_r = 45°, 60°, 75°, 88°), швидкості різання (400–530 м/хв) та максимальної товщини зрізу (0,070–0,101 мм) на інтенсивність зношування задньої поверхні інструмента (*VB*).

Встановлено, що зниження кута значно підвищує зносостійкість керамічного інструменту за рахунок зменшення навантаження на ріжучу кромку та покращеного відведення тепла. Мінімальний рівень зношування (*VB* = 0,11 мм) досягнуто при K_r = 45 ° і V_c = 400 м/хв, тоді як найбільший (*VB* = 0,87 мм) – при *Kr* = 88 ° і *Vc* = 530 м/хв при знятому об'ємі матеріалу 500 см^3.

Регресійна залежність зношування від головного кута, швидкості різання та товщини стружки [7] (рис. 2):

$$VB = -1{,}33 + 0{,}0198 \cdot K_r + 0{,}000403 \cdot V_c + 4{,}68 \cdot h_{ex}.$$

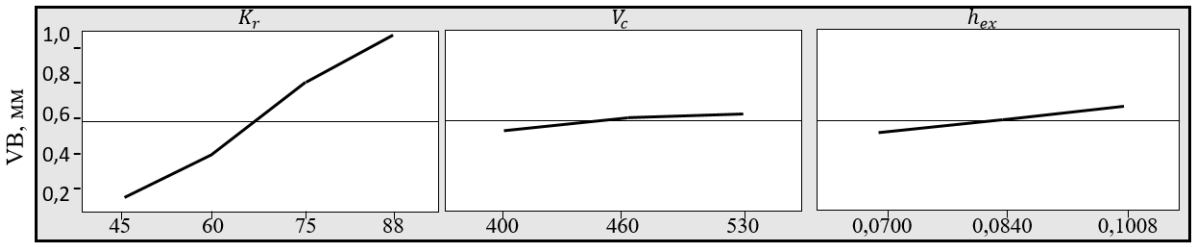

Рис. 2. Залежність зношування від головного кута K_r, швидкості різання V_c та товщини стружки h_{ex} [7]

У дослідженні I.Sadik [8] було здійснено порівняння зносостійкості керамічних (з покриттями та без них) та твердосплавних інструментів з покриттями під час високошвидкісного фрезерування чавуну з вермикулярним графітом у широкому діапазоні вмісту титану (0,004–0,1 %). За умов швидкості різання 700 м/хв, подачі 0,125 мм/зуб і глибини різання 2 мм було встановлено, що керамічні інструменти демонструють у 2,5–3 рази вищу зносостійкість, ніж тверді сплави з покриттями (при вмісті титану до 0,04 %). Зокрема, тривалість служби до досягнення критичного зносу *VB* = 0,3 мм для кераміки без покриття становила до 90 хвилин, тоді як для твердосплавного інструменту з покриттям – лише 30–35 хвилин. Крім того, об'єм знятого матеріалу на одну вставку для кераміки сягав понад 7000 см³, що перевищувало аналогічний показник для твердосплавну з покриттям у 2,7 рази, як показано на рисунку 3. Цей ефект пов'язаний з вищою термостійкістю кераміки, її стійкістю до окислення та здатністю протистояти абразивному зношуванню, спричиненому твердими включеннями Ti(C, N), які утворюються при легуванні ЧВГ титаном

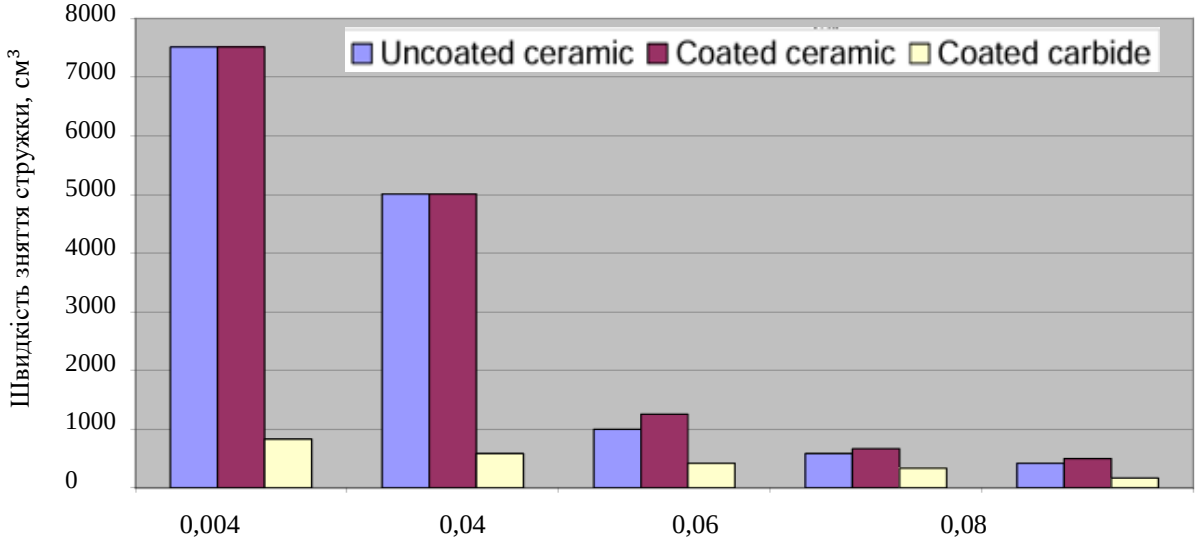

Рис. 3. Швидкість зняття стружки відносно ресурсу інструмента при торцевому фрезеруванні ЧВГ з різним вмістом титану за умов: V_c = 700 м/хв, fz = 0,125 мм/зуб, ap = 2 мм, ae = 40 мм [8]

Аналіз даних, отриманих у роботі [8], підтверджує перевагу керамічних ріжучих інструментів порівняно з твердосплавними при фрезеруванні чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ) у високошвидкісному режимі (400–1000 м/хв). Встановлено, що твердосплавні пластини характеризуються швидким зношуванням, особливо за умови підвищеного вмісту титану (понад 0,05 %) у структурі оброблюваного матеріалу, що призводить до значного скорочення ресурсу роботи інструмента.

На відміну від них, керамічні інструменти демонструють високу термостійкість, стійкість до абразивного зношування та меншу чутливість до змін у хімічному складі заготовки (рис. 4). Це забезпечує стабільну роботу інструмента в умовах підвищених навантажень, а також сприяє досягненню більшої точності й якості обробки.

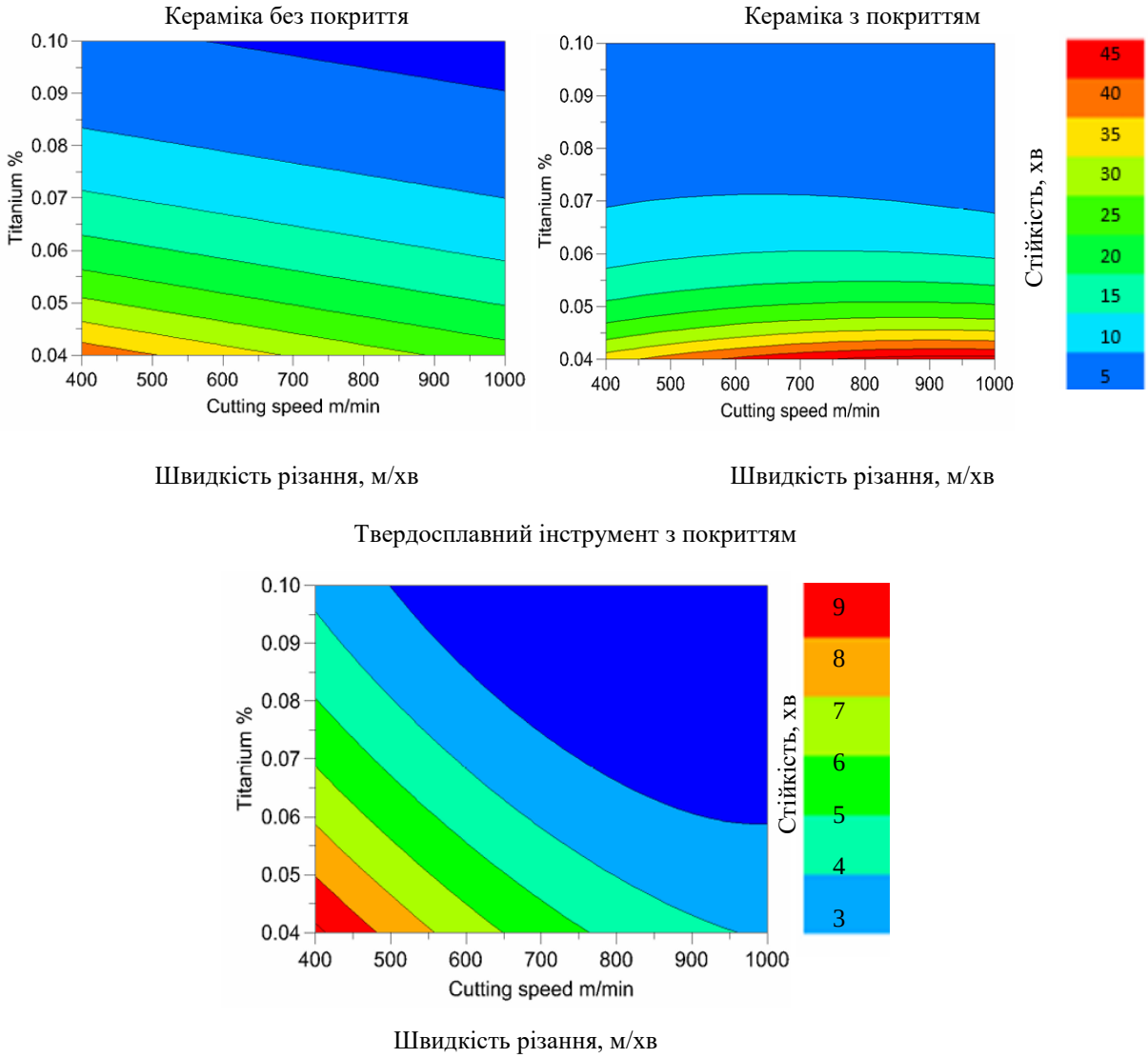

Рис. 4. Стійкість інструментів з твердосплавів з покриттями, кераміки з покриттями та без і при торцевому фрезерувані чавунів з вермикулярним графітом [6]

Висновок. Інструменти з кубічного нітриду бору та кераміки продемонстрували високу ефективність при сухому фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом, однак для забезпечення обґрунтованого вибору оптимального інструментального матеріалу необхідні подальші дослідження впливу технологічних параметрів на знос, якість обробки та економічну доцільність процесу.

References:

1. Guo, Y., Wang, C.Y., Yuan, H. et al., «Milling Forces of Compacted Graphite Iron (CGI) and Gray Iron (GI)», Guangdong University of Technology.
2. Sheth, A.C. and Raykar, S.J. (2017), «Machining: A Step towards Sustainable Machining – Challenges and Future Directions», *Journal of Cleaner Production*, Vol. 165, pp. 1557–1571, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.235.
3. Dogra, M., Sharma, V.S., Sachdeva, A. et al. (2010), «Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: A review», *Int. J. Precis. Eng. Manuf*, Vol. 11, pp. 341–358, doi: 10.1007/s12541-010-0040-1.
4. Tu, L.Q., Tian, S., Xu, F. et al. (2020), «Cutting performance of cubic boron nitride-coated tools in dry turning of hardened ductile iron», *J Manuf Process*, Vol. 56, pp. 158–68.
5. Gastel, M., Konetschny, C., Reuter, U. et al. (2000), «Ortner, Investigation of the wear mechanism of cubic boron nitride tools used for the machining of compacted graphite iron and grey cast iron», *Int. J. Refract. Met. Hard Mater*., Vol. 18 (6), pp. 287–296, doi: 10.1016/S0263 4368(00)00032-9.
6. Abele, E., Sahm, A. and Schulz, H. (2002), «Wear mechanism when machining compacted graphite iron», *CIRP Annals. Manufacturing Technology*, Vol. 51, Issue 1, pp. 53–56, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61464-4.
7. Karabulut, Ş. and Güllü, A. (2013), «Wear Model in Milling Compacted Graphite Iron with different lead angle using ceramic cutting tools», *Solid State Phenomena*, doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.199.371.

8. Sadik, I., «The Influence of Titanium Content on the Tool Performance in High Speed Milling of Compacted Graphite Iron», Sandvik Tooling, R&D Materials and Processes, Stockholm, Sweden.
9. Lin, Y., He, S., Lai, D. et al. (2020), «Wear mechanism and tool life prediction of high-strength vermicular graphite cast iron tools for high-efficiency cutting», *Wear*, Vol. 454–455, doi: 10.1016/j.wear.2020.203319.
10. Mohammed, W.M., Ng, E. and Elbestawi, M.A., «Modeling the effect of compacted graphite iron microstructure on cutting forces and tool wear».

Рубан В'ячеслав Миколайович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

https://orcid.org/0000-0002-9216-3506.

Наукові інтереси:

– підвищення працездатності різального інструменту й технологічного забезпечення якості та експлуатаційних характеристик деталей машин і приладів;
– конструювання різальних інструментів;
– механічна обробка важкооброблюваних матеріалів.

Ruban V.M.

Wear resistance of cutting inserts made of cubic boron nitride and ceramic during face milling of compacted graphite iron

Compacted graphite irons increasingly being used in mechanical engineering due to the successful combination of mechanical properties of gray and high-strength cast irons, including high strength, ductility, thermal conductivity and the ability to dampen vibrations. Thanks to these properties, this material is used to make body parts, cylinder blocks, brake discs and other loaded machine components. However, their machining is complicated due to the high hardness, complex morphology of vermicular graphite, and structural heterogeneity, which leads to intense abrasive and thermal wear of the cutting tool. This problem is especially acute in dry milling conditions, where the lack of cooling leads to local overheating and additional loads on the cutting edge.

The article analyzes the effectiveness of using tools made of cubic boron nitride (CBN) and ceramic as tool materials capable of operating under extreme conditions of high-speed milling without the use of lubricating and cooling fluids. A comparative analysis of the effect of cutting modes (speed, feed, depth) and tool geometry, in particular the main cutting angle, on wear rate, machined surface quality, process stability, and the amount of material removed was performed. It has been established that under conditions of high-speed milling of CBN without cooling, tools made of CBN provide the highest wear resistance and high quality of machining.

Keywords: cubic boron nitride (CBN); ceramic; compacted graphite iron (CGI); face milling; wear; wear resistance.

Стаття надійшла до редакції 18.04.2025.