

КОВАЛЕНКО ІГОР

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ

<https://orcid.org/0009-0005-4455-6208>e-mail: koig@ukr.net

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ІНСТРУМЕНТУ З КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ ПРИ ОБРОБЦІ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ

Робота присвячена підвищенню зносостійкості інструменту з кубічного нітриду бору під час точіння високоміцних чавунів: чавуну з вермикулярним графітом (CGI), високоміцного сфероїдального чавуну (SGI) та аустемперованого високоміцного чавуну (ADI).

На основі аналізу рецензованих робіт встановлено, що зниження стійкості інструменту під час точіння високоміцних чавунів зумовлене сукупним впливом мікроструктури (морфологія графіту та матричні фази), механіки стружкоутворення та теплового режиму; для чавуну з вермикулярним графітом домінує безперервна стружка та кратерний знос, для високоміцного сфероїдального — адгезійні цикли «наліпання-відриву», для аустемперованого — виражений абразивний компонент [1,3,4,7]. Оцінено типові форми зносу CBN-інструменту: кратер на передній поверхні та знос на задній (VB), їхній зв'язок із режимами різання, геометрією кромки (фаска передньої поверхні, хонінг, радіус вершини) та умовами охолодження. Показано, що фаска та хонінг знижують концентрації напружень і ризик мікротріщинування, а уникнення чергування «сухо/мокро» запобігає термошоку [3,5,12].

Запропоновано практичні рекомендації: помірні швидкості та подачі для керування тепловим потоком; посилені геометрія кромки при переривчастій обробці та обробці аустемперованого чавуну; вибір порогів закінчення різання за VB та за «перемичкою» під кратером. Комплексна оптимізація дозволяє підвищити ресурс CBN-інструменту в 1,5–4 рази при збереженні необхідної якості поверхні [3,6,7].

Ключові слова: Чавун з вермикулярним графітом, високоміцний чавун, кубічний нітрид бору, обробка різанням, знос інструменту, стійкість інструменту.

KOVALENKO IHOR

V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

IMPROVING THE TOOL LIFE OF CUBIC BORON NITRIDE TOOLS IN MACHINING HIGH-STRENGTH CAST IRONS

The study focuses on improving the wear resistance of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN) cutting tools during the turning of high-strength cast irons, including compacted graphite iron (CGI), spheroidal graphite iron (SGI) and austempered ductile iron (ADI). Based on the analysis of peer-reviewed publications, it is shown that the reduction of tool life in machining these materials is governed by the combined influence of their microstructure—namely graphite morphology and matrix phases—the mechanics of chip formation, and the thermal conditions in the cutting zone. Continuous chip flow and crater wear dominate in CGI, adhesion-controlled “build-up and break-off” cycles prevail in SGI, while ADI demonstrates a pronounced abrasive contribution due to its bainitic matrix [1,3,4,7]. Typical PCBN wear patterns, including crater formation on the rake face and flank wear (VB), were evaluated together with their dependence on cutting parameters, cutting-edge geometry (rake-face chamfer, honing radius) and cooling strategy. It is shown that chamfering and edge honing reduce stress concentration and suppress micro-chipping, whereas avoiding intermittent changes between dry and lubricated conditions prevents thermal shock [3,5,12]. Practical recommendations are formulated, including moderate cutting speeds and feeds to stabilize heat flow, strengthened edge geometry for interrupted cutting or machining of ADI, and appropriate criteria for tool life based on VB and crater-to-edge remaining cross-section. Integrated optimization of tool geometry, cutting parameters and thermal conditions increases PCBN tool life by a factor of 1.5–4 while maintaining surface integrity [3,6,7]. The article extends current understanding of PCBN behaviour in high-strength cast iron machining by systematically linking microstructural features with dominant wear mechanisms and by providing experimentally grounded guidelines for improving process reliability and tool longevity.

Keywords: CGI, ADI, PCBN, SGI, cast iron, machining, tool wear, tool life.

Стаття надійшла до редакції / Received 17.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 07.04.2026

Опубліковано / Published 05.05.2026

This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Коваленко Ігор

Вступ

Високоміцні чавуни — чавун з вермикулярним графітом (CGI), високоміцний сфероїдальний чавун (SGI) і аустемперований високоміцний чавун (ADI) — розглядаються як сучасна альтернатива сталям і традиційним сірим чавунам для деталей, що працюють під підвищеними силовими та тепловими навантаженнями, у середовищах вібрацій і термоциклів [7]. В автомобілебудуванні та двигунобудуванні CGI застосовують насамперед у блоках і головках циліндрів високо-навантажених двигунів завдяки поєднанню підвищеної жорсткості, міцності та демпфувальних властивостей; серійні обсяги таких відливок і поширення технологій процес-контролю їх виробництва фіксуються в галузевих оглядах і статистиці [7]. Репрезентативним прикладом дослідно-промислового впровадження є програма з проектування та випробувань бензинових блоків із CGI у легковому сегменті, де показано зниження маси, приріст жорсткості та поліпшення віброакустичних характеристик порівняно з сірим чавуном [2].

За корпоративними матеріалами SinterCast, що ліцензує і супроводжує процес-контроль серійного виробництва CGI, охоплюють понад 50 моделей 18 автомобільних брендів; у публічному переліку прикладів

наведено блоки моторів V6 3.0 л для Audi/Porsche/Volkswagen, V6 2.7–3.0 л дизельні для Ford/Jaguar/Land Rover/Volkswagen/PSA, V6 2.7–3.0 л бензинові для Ford/Lincoln, V8 6.7 л для важких пікапів, а також V6 3.0 л для Hyundai/Kia і V6 3.0 л VM Motori для марок групи (Chrysler/Jeep/Lancia/Maserati/Ram); зростання частки CGI в силових агрегатах підтверджується галузевою звітністю й статистикою інсталяцій процес-контролю [15]. Разом із тим область застосування високоміцних чавунів не обмежується CGI-блоками: SGI, завдяки в'язкості та високому опору втомі, доцільний для динамічно навантажених деталей типу валів, шатунів, ступиць, маховиків, опорних корпусів підшипників і елементів підвісок та трансмісій; ADI, що поєднує підвищену твердість і ударну в'язкість, застосовують у зубчастих колесах і диференціалах трансмісій, компонентах гальмівних механізмів, важільно-шарнірних елементах та інших вузлах, схильних до ударно-вібраційних навантажень [7].

Факти того що великі корпорації використовують чавун з вермикулярним графітом, означає що це надійний та перспективний матеріал попит на який буде збільшуватись, що призведе до більш глибокого вивчення процесу обробки, який є викликом інструментальному забезпеченню фабрик та підвищує попит на CBN інструмент. Розширення застосування цих чавунів в автогалузі неминуче загострило технологічні виклики їх механічної обробки. CGI формує щільну, важколомну стружку і призводить до підвищеного теплового впливу на інструмент; SGI провокує інтенсивні адгезійні взаємодії в зоні різання, які прискорюють викрашування кромки. ADI виявляє підвищену абразивність за рахунок бейнітної матриці. Морфологія графіту така що стійкість інструменту при точінні високоміцних чавунів істотно нижча, ніж при обробці сірого чавуну, оскільки пластинчастий графіт в сірому чавуні (Рис 1а) виступає змазкою. Обробка високоміцних чавунів ускладнює впровадження високопродуктивних режимів і вимагає спеціальних рішень — до застосування PCBN/CBN-інструменту і процес-контролю ливарного CGI-процесу для стабільності заготовок. [1]

Такі особливості формують високу актуальність дослідження стійкості CBN-інструменту при точінні високоміцних чавунів, виявлення механізмів його зносу і визначення оптимальних параметрів обробки — як з боку вибору інструментального матеріалу та геометрії кромки, так і з боку режимів різання та керування тепловим режимом. Мікроструктурна неоднорідність високоміцних чавунів безпосередньо визначає їх поведінку при різанні. Чавун з вермикулярним графітом (CGI) (Рис 1б) містить червоподібні графітні включення, що формують армуючу структуру, яка підвищує міцність на розтяг і ударну в'язкість матеріалу, але одночасно ускладнює формування короткої, легко руйнівної стружки. У високоміцному сфероїдальному чавуні (SGI) і аустемперізованому високоміцному чавуні (ADI) сфероїдальна морфологія графіту (Рис 1в) полегшує зародження і відділення стружки, проте зростання пластичності і в'язкості матриці підсилює схильність до адгезійних взаємодій в зоні різання [3].

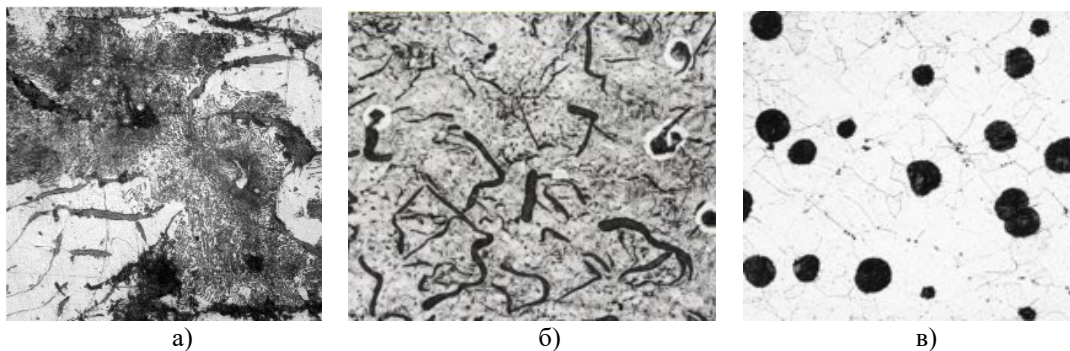


Рис.1. Морфологія графітових включень в сірому чавуні - а)[16] з вермикулярним графітом -б) кулястим графітом -в)

Підвищена міцність і жорсткість цих матеріалів призводять до формування високих контактних тисків на передній поверхні інструменту і до локальних зон перегріву, що прискорює дифузійні процеси і, як наслідок, дифузійний знос. Додатковим фактором є відсутність природної мастильно-захисної плівки: якщо при обробці сірого чавуну сірка сприяє утворенню плівки MnS, що знижує тертя і екранує хімічну взаємодію, то в CGI вміст сірки істотно нижчий, тому плівка практично не формується [1].

До технологічних ризиків додається підвищена віброочутливість високоміцних чавунів. Їх висока міцність і структурна неоднорідність роблять процес особливо чутливим до малих подач, на яких зростає ймовірність самозбуджуваних коливань і циклів змінного навантаження на різальну кромку. При обробці заготовок ситуацію погіршують ливарні припуски, локальні карбідні включення і структурні неоднорідності: при їх проходженні виникає короткочасна втрата контакту, а потім ударне навантаження інструменту, що прискорює викрашування і руйнування кромки. У сукупності перераховані фактори перетворюють обробку високоміцних чавунів у серйозний технологічний виклик, що вимагає обережного підбору ріжучого матеріалу, геометрії кромки і режимів різання.

Актуальність проблеми

Ключ до розуміння низької технологічності високоміцних чавунів — їх мікроструктура та тепломеханіка різання. У чавуні з вермикулярним графітом червоподібна форма графітних включень утворює просторову «армуючу» структуру, що підвищує міцність і жорсткість, але ускладнює розрив стружки та відведення тепла [7].

Результат — тривалий контакт стружки з передньою поверхнею інструменту та підвищені температури в зоні різання, що активує дифузійні та термохімічні механізми зносу [3]. У високоміцному сфероїдальному чавуні сфероїдальна форма графіту полегшує формування стружки, але в'язка матриця сприяє налипанню матеріалу на інструмент; цикли «налипання–відриву» створюють ударні навантаження і призводять до мікротрощування кромки [4]. В аустемперованому високоміцному чавуні, завдяки бейнітній структурі, зростає частка абразивного зносу та посилюється чутливість процесу до коливань. Для всіх трьох матеріалів характерний низький вміст сірки, відсутність захисної плівки MnS і вищий рівень тертя порівняно з сірим чавуном [1, 7]. Ці обставини вимагають більш жорсткої технологічної системи, оптимізації геометрії різальної кромки та правильного вибору режимів різання [6, 7].

Сучасний стан питання, мета роботи, методика досліджень

Сучасні дослідження підтверджують, що стійкість інструменту під час точіння високоміцних чавунів визначається сукупним впливом морфології графіту та співвідношення матричних фаз, механіки утворення стружки та довжини контакту стружки з передньою поверхнею, теплового режиму в зоні різання, геометрії різальної кромки, а також умов охолодження [3, 4, 7]. Для чавуну з вермикулярним графітом характерна стійка тенденція до формування безперервної стружки та до підвищеного теплового навантаження на інструмент [3, 7], тоді як для високоміцного сфероїдального чавуну при малих подачах домінують адгезійні явища з циклами «налипання–відриву» [4].

Мета роботи — узагальнити закономірності зносу інструменту з кубічного нітриду бору при точуванні високоміцних чавунів, виявити роль мікроструктури та тепломеханіки процесу, а також запропонувати практичні рекомендації щодо вибору геометрії інструменту, режимів різання та умов охолодження.

Методика базується на аналітичному огляді рецензованих публікацій та інженерних джерел щодо обробки чавуну з вермикулярним графітом, високоміцного сфероїдального та аустемперованого високоміцного чавуну, із зіставленням трибологічних, теплових та кінематичних факторів [1–14].

Результати досліджень

У чавуні з вермикулярним графітом тривала контактна зона «стружка–інструмент» зумовлена просторовою зв'язністю графітної фази; на макрорівні це проявляється підвищеною температурою та тертям на передній поверхні, що прискорює термохімічний та дифузійний знос [3, 7]. У високоміцному сфероїдальному чавуні при малих подачах переважають адгезійні механізми, що викликають налипання, подальший відрив і ударні навантаження на ріжучу кромку [4]. В аустемперованому високоміцному чавуні завдяки бейнітній матриці зростає абразивна складова зносу і знижується стабільність процесу.

Механізми зносу CBN-інструменту: Для всіх високоміцних чавунів одночасно діють кілька механізмів: термохімічний (дифузійний), адгезійний та абразивний; при переривчастому різанні додається мікротрощування фаски та зони хонінгування [4, 7]. Відсутність захисної сульфідної плівки, характерної для сірого чавуну, посилює прямий контакт стружки та інструменту і підвищує хімічну активність зони [1, 7].

Геометрія різальної кромки: Фаска передньої поверхні знижує концентрацію напружень і ймовірність відколів, але її надмірна ширина збільшує сили різання. Хонована кромка вирівнює розподіл навантажень і підвищує стійкість інструменту до мікротрощування. Збільшення радіуса вершини зменшує локальні напруження та покращує опір ударним навантаженням, особливо при переривчастому різанні та при обробці аустемперованого високоміцного чавуну [5].

Режими різання та тепловий режим при обробці. Підвищення швидкості різання закономірно збільшує температуру та інтенсифікує дифузійні процеси в контактній зоні; занадто мала подача посилює адгезію та схильність до «налипання–відриву» (Рис 2), тоді як надмірно велика подача посилює абразивний знос та сили різання [3, 6, 7]. Для чавуну з вермикулярним графітом оптимальні помірні швидкості та подачі, що забезпечують стабільне утворення стружки та контрольований тепловий потік [3, 7]; для високоміцного сфероїдального та аустемперованого — підвищена увага до подачі та посилення різальної кромки.

Охолодження та стабільність процесу. Стабільний температурний режим є критичним для стійкості CBN-інструменту. Повна відмова від охолодження знижує ризик термошоку, але підвищує середню температуру; застосування охолоджувальних рідин дозволяє знизити температуру, однак при циклічному змочуванні кромки зростає ризик термічних ударів. На практиці ефективні або стійкі «сухі» режими, або дозоване охолодження без чергування «сухо/мокро» [3, 12]. Жорсткість системи «верстат–інструмент–заготовка» та відсутність переривчастих ділянок істотно знижують ймовірність мікротрощування кромки [4].

Висновки

1. Поведінка високоміцних чавунів під час точіння визначається мікроструктурою та тепломеханікою процесу: для чавуну з вермикулярним графітом характерні безперервна стружка та високе теплове навантаження; для високоміцного сфероїдального — адгезія та цикли «налипання–відриву» (Рис 2), для аустемперованого — підвищена абразивність.

2. Стійкість інструменту з кубічного нітриду бору обмежується одночасною дією термохімічного, адгезійного та абразивного зносу; при переривчастому різанні домінує мікротрощування фаски та зони хонінгування.

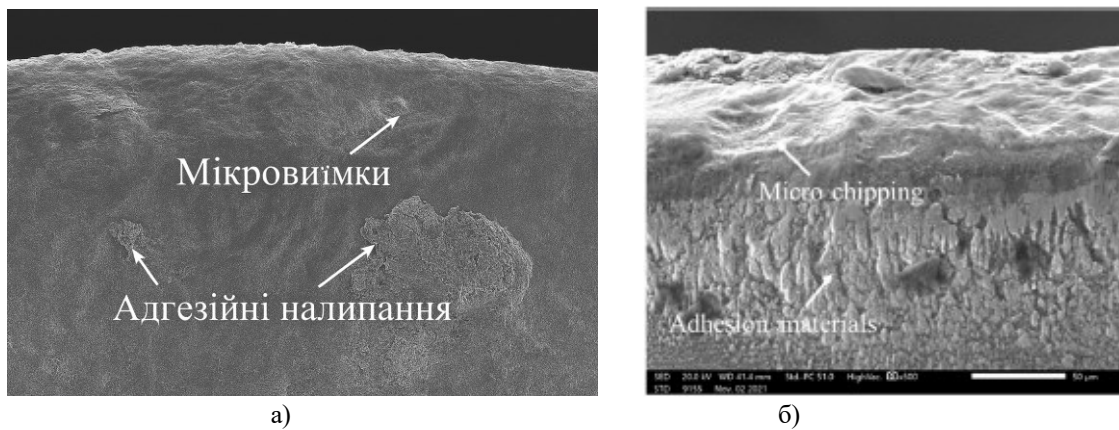


Рис 2. SEM зображення адгезійного зносу рCBN інструменту, формування мікрочіпків на передній поверхні інструменту після відриву часток матеріалу

3. Геометрія кромки є ключовим важелем підвищення стійкості: фаска передньої поверхні та хонінгування знижують концентрацію напружень; збільшений радіус вершини підвищує стійкість до ударних навантажень.

4. Оптимізація швидкості різання, подачі та глибини різання необхідна для управління тепловим режимом і механікою стружкоутворення; чергування «сухо/мокро» неприпустиме через ризик термошоку.

5. Комплексна оптимізація інструменту, режимів та умов охолодження дозволяє істотно підвищити ресурс CBN-інструменту та забезпечити стабільну високопродуктивну обробку високоміцних чавунів.

6. Шляхом екстраполяції даних автора [3] встановлено, що інтенсивність зношування інструментів з рCBN закономірно зростає у ряді $GCI < SGI < CGI < ADI$, досягаючи максимуму при обробці ADI (56 HRC) через трансформацію залишкового аустеніту в мартенсит під впливом температурно-силових навантажень. Для забезпечення промислової стійкості інструменту та збереження якості поверхні $Ra=0,9-1,6$ мкм необхідне обмеження швидкості різання до 200–250 м/хв, оскільки перевищення цього порога призводить до різкого досягнення критичного зносу $VB=0,3$ мм.

Література

- Zhu, L. Wear Study of Cubic Boron Nitride (cBN) Cutting Tool for Machining of Compacted Graphite Iron (CGI) with Different Metalworking Fluids / L. Zhu, R. Evans, Y. Zhou, F. Ren // *Lubricants*. – 2022. – Vol. 10, No. 4. – Article 51. – DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants10040051>.
- Grzesik, W. Machining of nodular cast iron (PF NCI) using CBN tools / W. Grzesik, P. Kiszka, D. Kowalczyk, J. Rech, Ch. Claudin // *Procedia CIRP*. – 2012. – Vol. 1. – P. 483–487. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.086>.
- Aslantas, K. Evaluation of the Performance of CBN Tools When Turning Austempered Ductile Iron Material / K. Aslantas, İ. Uzun, K. Gök // *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2008. – Vol. 130, No. 5. – Article 054503. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2977825>.
- Chen, L. Performance assessment of pCBN and bCBN tools in machining of high chromium white cast iron / L. Chen, J. Zhou, V. Bushlya, O. Gutnichenko, J. E. Ståhl // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 79. – P. 635–644. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6863-2>.
- Yin, G. Experimental Investigation on the Machinability of PCBN Chamfered Tool in Dry Turning of Gray Cast Iron / G. Yin, J. Shen, Z. Wu, X. Wu, F. Jiang // *Processes*. – 2022. – Vol. 10, No. 8. – Article 1547. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10081547>.
- Gasmi, B. Machinability investigation of gray cast iron in turning with ceramics and CBN tools: Modeling and optimization using desirability function approach / B. Gasmi, M. A. Yaltese, S. Boucherit, S. Chihaoui, T. Mabrouki // *Structural Engineering and Mechanics*. – 2023. – Vol. 86, No. 1. – P. 119–137. – DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2023.86.1.119>.
- Sirtuli, L. J. Machining of Compacted Graphite Iron: A review / L. J. Sirtuli, J. M. Bello Bermejo, C. Windmark, S. Norgren, J.-E. Ståhl, D. Boing // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2024. – Vol. 332. – Article 118553. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118553>.
- Tasdelen, B. Machining of gray cast irons and compacted graphite iron / B. Tasdelen, M. Escursell, G. Grenmyr, L. Nyborg // *Swedish Production Symposium*. – 2007. – P. 1–6. – URL: <https://old.foundrygate.com/upload/artigos/MACHINING%20OF%20GRAY%20CAST%20IRONS%20AND%20COMPACTED%20GRAPHITE%20IRON.pdf> (дата звернення: 15.01.2026).
- Grenmyr, G. Investigation of tool wear mechanisms in CGI machining / G. Grenmyr, A. Berglund, J. Kaminski, C. M. Nicolescu // *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*. – 2011. – Vol. 4, No. 1.

– P.3–18. – DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2011.037996>.

10. Soshi, M. A study on cubic boron nitride (CBN) milling of hardened cast iron for productive and quality manufacturing of machine tool structural components / M. Soshi, P. Fonda, M. Kashihara, H. Yonetani, K. Yamazaki // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 67. – P. 2637–2646. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4272-3>.

11. Tungaloy Corporation. New solid CBN grade for high speed machining of cast iron (SBN30). – Прес-реліз. – 2025. – Iwaki, Japan. – URL: <https://tungaloy.com> (дата звернення: 02.01.2026).

12. Mitsubishi Materials. CBN — Technical Info / Cutting Formula. – Технічний гайд MMC Carbide. – URL: <https://www.mmc-carbide.com> (дата звернення: 25.01.2026).

13. Yoshioka, Y. New series “SUMIBORON BN7115/BN7125 for Cast Iron and Sintered Alloy” / Y. Yoshioka, Y. Ishida, Y. Matsuda, S. Kukino, Y. Kawamura, A. Ishii // Sumitomo Electric Technical Review. – 2025. – No. 100. – P. 36–41. – URL: <https://sumitomoelectric.com> (дата звернення: вказати дату).

14. Okada, Y. Development of “ACE COAT AC420K” Coated Carbide and “SUMIBORON BNC500” Coated PcBN for Cast Iron Turning / Y. Okada, K. Okamura, A. Paseuth, Y. Matsuda, T. Fukaya // SEI Technical Review. – 2011. – No. 73. – P. 61–67. – URL: <https://sumitomoelectric.com> (дата звернення: 25.01.2026).

15. SinterCast AB. Corporate CGI process-control materials (applications overview, System 4000, tracking technologies). – URL: <https://www.sintercast.com> (дата звернення: 25.01.2026).

16. Коваленко, І.А. Взаємодія графіту з матеріалом різального інструменту на основі PCBN при обробці чавуну / Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2026. – Вип. 1 (361). – С. 189–195. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-25>.

References

1. Zhu, L. Wear Study of Cubic Boron Nitride (cBN) Cutting Tool for Machining of Compacted Graphite Iron (CGI) with Different Metalworking Fluids / L. Zhu, R. Evans, Y. Zhou, F. Ren // Lubricants. – 2022. – Vol. 10, No. 4. – Article 51. – DOI: <https://doi.org/10.3390/lubricants10040051>.

2. Grzesik, W. Machining of nodular cast iron (PF NCI) using CBN tools / W. Grzesik, P. Kiszka, D. Kowalczyk, J. Rech, Ch. Claudin // Procedia CIRP. – 2012. – Vol. 1. – P. 483–487. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.086>.

3. Aslantas, K. Evaluation of the Performance of CBN Tools When Turning Austempered Ductile Iron Material / K. Aslantas, İ. Uzun, K. Gök // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2008. – Vol. 130, No. 5. – Article 054503. – DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2977825>.

4. Chen, L. Performance assessment of pCBN and bCBN tools in machining of high chromium white cast iron / L. Chen, J. Zhou, V. Bushlya, O. Gutnichenko, J. E. Ståhl // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 79. – P. 635–644. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6863-2>.

5. Yin, G. Experimental Investigation on the Machinability of PCBN Chamfered Tool in Dry Turning of Gray Cast Iron / G. Yin, J. Shen, Z. Wu, X. Wu, F. Jiang // Processes. – 2022. – Vol. 10, No. 8. – Article 1547. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10081547>.

6. Gasmı, B. Machinability investigation of gray cast iron in turning with ceramics and CBN tools: Modeling and optimization using desirability function approach / B. Gasmı, M. A. Yallesc, S. Boucherit, S. Chihaoui, T. Mabrouki // Structural Engineering and Mechanics. – 2023. – Vol. 86, No. 1. – P. 119–137. – DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2023.86.1.119>.

7. Sirtuli, L. J. Machining of Compacted Graphite Iron: A review / L. J. Sirtuli, J. M. Bello Bermejo, C. Windmark, S. Norgren, J.-E. Ståhl, D. Boing // Journal of Materials Processing Technology. – 2024. – Vol. 332. – Article 118553. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118553>.

8. Tasdelen, B. Machining of gray cast irons and compacted graphite iron / B. Tasdelen, M. Escursell, G. Grenmyr, L. Nyborg // Swedish Production Symposium. – 2007. – P. 1–6. – URL: [https://old.foundrygate.com/...](https://old.foundrygate.com/) (Accessed: 15.01.2026).

9. Grenmyr, G. Investigation of tool wear mechanisms in CGI machining / G. Grenmyr, A. Berglund, J. Kaminski, C. M. Nicolescu // International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems. – 2011. – Vol. 4, No. 1. – P. 3–18. – DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2011.037996>.

10. Soshi, M. A study on cubic boron nitride (CBN) milling of hardened cast iron for productive and quality manufacturing of machine tool structural components / M. Soshi, P. Fonda, M. Kashihara, H. Yonetani, K. Yamazaki // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 67. – P. 2637–2646. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4272-3>.

11. Tungaloy Corporation. New solid CBN grade for high speed machining of cast iron (SBN30). – Press Release. – 2025. – Iwaki, Japan. – URL: <https://tungaloy.com> (Accessed: 02.01.2026).

12. Mitsubishi Materials. CBN — Technical Info / Cutting Formula. – MMC Carbide Technical Guide. – URL: <https://www.mmc-carbide.com> (Accessed: 25.01.2026).

13. Yoshioka, Y. New series “SUMIBORON BN7115/BN7125 for Cast Iron and Sintered Alloy” / Y. Yoshioka, Y. Ishida, Y. Matsuda, S. Kukino, Y. Kawamura, A. Ishii // Sumitomo Electric Technical Review. – 2025. – No. 100. – P. 36–41. – URL: <https://sumitomoelectric.com> (Accessed: [Insert date here]).

14. Okada, Y. Development of “ACE COAT AC420K” Coated Carbide and “SUMIBORON BNC500” Coated PcBN for Cast Iron Turning / Y. Okada, K. Okamura, A. Paseuth, Y. Matsuda, T. Fukaya // SEI Technical Review. – 2011. – No. 73. – P. 61–67. – URL: <https://sumitomoelectric.com> (Accessed: 25.01.2026).

15. SinterCast AB. Corporate CGI process-control materials (applications overview, System 4000, tracking technologies). – URL: <https://www.sintercast.com> (Accessed: 25.01.2026).

16. Коваленко, І. А. Interaction of graphite with PCBN-based cutting tool material during cast iron machining / Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2026. – Issue 1 (361). – P. 189–195. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-25>.