

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-361-25>

УДК 621.9

КОВАЛЕНКО ІГОР

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

<https://orcid.org/0009-0005-4455-6208>

e-mail: koig@ukr.net

ВЗАЄМОДІЯ ГРАФІТУ З МАТЕРІАЛОМ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ НА ОСНОВІ РСВН ПРИ ОБРОБЦІ ЧАВУНУ

У даній статті представлено комплексний аналіз проблеми обробки чавуну з вермикулярним графітом (ЧВГ) різальними інструментами з полікристалічного кубічного нітриду бору (PCBN). Розглянуто актуальність застосування ЧВГ в автомобільній промисловості як матеріалу, що дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики двигунів і знизити шкідливі викиди. Однак його широке впровадження стримується низькою оброблюваністю, яка значно поступається сірому чавуну. На основі аналізу наданих наукових і технічних документів систематизовано основні причини низької стійкості інструментів з РСВН. Ключовою проблемою є унікальна мікроструктура ЧВГ з вермикулярною формою графіту і низьким вмістом сірки. Це поєднання призводить до інтенсивних термомеханічних навантажень на різальну кромку і перешкоджає утворенню захисного шару (MnS), який ефективно знижує знос при обробці сірого чавуну. В результаті домінуючими механізмами зносу РСВН-інструментів стають термохімічний і дифузійний знос, що супроводжується проникненням заліза в структуру інструменту і переважним руйнуванням зерен кубічного нітриду бору. У статті розглянуто можливі шляхи вирішення цієї проблеми, включаючи розробку нових марок РСВН з поліпшеними сполучними матеріалами і застосування інноваційних методів обробки, таких як обробка з модулюванням, яка перетворює безперервне різання в переривчасте, знижуючи термічні навантаження і значно збільшуючи стійкість інструменту.

Ключові слова: чавун з вермикулярним графітом, полікристалічний кубічний нітрид бору, PCBN, CGI.

KOVALENKO IHOR

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

INTERACTION OF GRAPHITE WITH PCBN-BASED CUTTING TOOL MATERIAL IN CAST IRON MACHINING

The article presents a comprehensive analysis of the problem of machining high-strength cast iron with vermicular graphite (CGI) using cutting tools made of polycrystalline cubic boron nitride (PCBN). The relevance of the study is determined by the importance of CGI in the automotive industry for improving engine performance and reducing harmful emissions. However, its widespread use is hampered by low machinability, which is significantly inferior to gray cast iron. Based on the analysis of scientific documents, the main reasons for the low stability of PCBN tools have been systematized. The unique microstructure of PCBN is recognized as the key problem: vermicular graphite combined with low sulfur content. This leads to intense thermomechanical stresses and prevents the formation of a protective sulfide layer (MnS), which effectively reduces wear when machining gray cast iron. As a result, thermochemical and diffusion wear become the dominant wear mechanisms, accompanied by the penetration of iron into the tool structure and the destruction of boron nitride grains. The article discusses possible ways to solve the problem, in particular, development of new PCBN grades with improved binding materials. Application of innovative processing methods, such as modulation-assisted machining (MAM). It is shown that MAM converts continuous cutting into intermittent cutting, which reduces thermal loads and significantly increases tool life. In addition, the review highlights that cutting speed and thermal management strategies play a crucial role in controlling the intensity of diffusion wear. Optimizing these parameters can partially compensate for the lack of a lubricating sulfide layer and improve the overall machining performance of CGI. Moreover, recent studies indicate that controlled cooling techniques can further stabilize the cutting zone, thereby reducing tool degradation and enhancing dimensional accuracy during CGI machining.

Keywords: cast iron with vermicular graphite, polycrystalline cubic boron nitride, PCBN, CGI.

Стаття надійшла до редакції / Received 17.11.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.01.2026

Опубліковано / Published 29.01.2026



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

На даний момент популярність чавуну з вермикулярним графітом зростає, але обробка цього матеріалу є викликом для виробництва. Ця стаття містить комплексний аналіз проблем, пов'язаних з обробкою високоміцного чавуну з вермикулярним графітом (CGI) за допомогою інструменту з полікристалічного кубічного нітриду бору (PCBN) різальних інструментів. Обговорюється актуальність CGI в автомобільній промисловості як матеріалу, що покращує характеристики двигуна та зменшує шкідливі викиди [8]. Однак його широке застосування гальмується через погану оброблюваність, яка значно поступається оброблюваності сірого чавуну [9]. На основі аналізу [10] наданих науково-технічних документів систематизовано основні причини низького терміну служби інструментів PCBN. Ключова проблема полягає в унікальній мікроструктурі CGI, що характеризується вермикулярним графітом і низьким вмістом сірки [2, 9]. Ця комбінація призводить до інтенсивних термомеханічних навантажень на різальну кромку і запобігає утворенню захисного шару сульфиду марганцю (MnS), який ефективно зменшує знос при обробці сірого чавуну [6, 9]. В результаті, домінуючими механізмами зносу для інструментів з PCBN стають термохімічний і дифузійний знос, що супроводжується проникненням заліза в структуру інструменту і переважним руйнуванням кубічних зерен нітриду бору [6, 9]. У статті досліджуються потенційні рішення цієї проблеми, включаючи розробку нових марок PCBN з поліпшеними зв'язувальними матеріалами [3, 7] і застосування інноваційних методів обробки,

таких як обробка з модулюванням (modulation-assisted machining, далі скорочено : МАМ) . МАМ перетворює безперервне різання в перерваний процес, тим самим зменшуючи термічні навантаження і значно збільшуючи термін служби інструменту [8].

Актуальність проблеми обробки чавуну з вермикулярним графітом

В останні десятиліття автомобільна та машинобудівна галузі стикаються зі зростаючими вимогами щодо підвищення ефективності двигунів внутрішнього згоряння та одночасним посиленням екологічних норм [8]. Також розглядається питання полегшення блоку моторів, насосів що впливає на загальну вагу автомобіля та на його швидкісні та екологічні показники. Одним з ключових матеріалів, що дозволяють досягти цих цілей, став CGI (ЧВГ), також відомий як чавун з вермикулярним графітом (ЧВГ). Завдяки своїй мікроструктурі, що займає проміжне положення між сірим чавуном з пластинчастим графітом і високоміцним чавуном з кулястим графітом, ЧВГ має унікальне поєднання властивостей [9]. Він демонструє міцність на розтяг і втомну міцність, що майже вдвічі перевищують показники сірого чавуну, при цьому його модуль пружності вищий приблизно на 35% [8, 9]. Ці характеристики дозволяють створювати більш легкі і компактні блоки циліндрів та інші компоненти двигунів, здатні витримувати більш високі тиски і температури в камері згоряння, що призводить до підвищення паливної економічності і зниження викидів [8, 9]. Незважаючи на очевидні конструкційні переваги, широке впровадження ЧВГ у масове виробництво натрапляє на серйозну перешкоду — його низьку оброблюваність різанням [9]. При безперервних операціях, таких як точіння або розточування, стійкість різального інструменту, особливо з полікристалічного кубічного нітриду бору (PCBN), може бути в 10-20 разів нижчою в порівнянні з обробкою сірого чавуну в аналогічних умовах [8]. Навіть в умовах переривчастого різання, наприклад, при фрезеруванні, стійкість інструменту при обробці ЧВГ виявляється на 50% меншою [8]. Ця проблема призводить до значного збільшення виробничих витрат, зниження продуктивності та ускладнення технологічних процесів [4, 9]. Таким чином, проблема взаємодії різального інструменту з матеріалом ЧВГ, особливо розуміння механізмів інтенсивного зносу, є однією з найактуальніших задач в сучасному машинобудуванні. Вирішення цієї проблеми дозволить розкрити повний потенціал ЧВГ і сприятиме подальшому розвитку більш ефективних і екологічних двигунів [9].

Сучасний стан питання, мета роботи, методика досліджень

Наукові дослідження останніх років дозволили виявити фундаментальні причини низької оброблюваності ЧВГ. Ключові відмінності від сірого чавуну полягають у морфології графіту, хімічному складі і, як наслідок, в термомеханічних умовах в зоні різання.

Вплив мікроструктури на процес різання

Морфологія графіту і формування стружки. У сірому чавуні графіт має форму тонких, хаотично орієнтованих пластин (лусочок) [Рис 1] з гострими краями [4, 8].

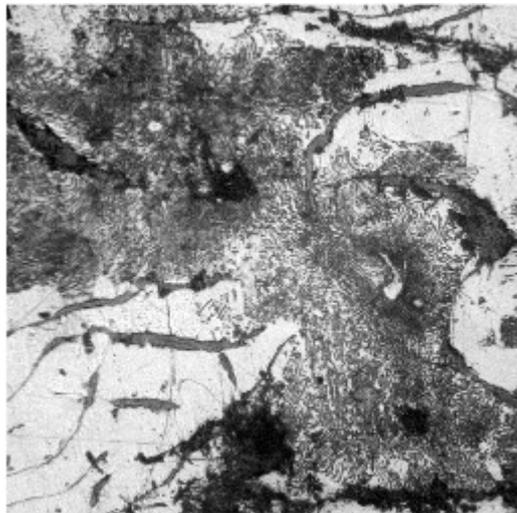


Рис 1. Структура графіту в сірому чавуні, мікроскопічне збільшення в 500 разів

Ці пластини діють як концентратори напружень і природні шляхи для поширення тріщин в процесі різання [9]. В результаті стружка легко ламається, утворюючи короткі, сегментовані елементи [4, 9]. Це призводить до короткої зони контакту стружки з передньою поверхнею інструменту, що обмежує максимальну температуру різання і знижує різальні сили [9]. У ЧВГ графіт має червякоподібну (вермикулярну) форму [Рис 2] із закругленими краями, і його частинки тісно переплетені та взаємопов'язані в складну тривимірну структуру, схожу на корал [8, 9]. Така морфологія забезпечує міцний зв'язок між графітом і металеву матрицею, перешкоджаючи легкому зародженню і поширенню тріщин [9]. У процесі різання матеріал не стільки ламається, скільки пластично деформується, що призводить до формування більш довгої, безперервної стружки і значно більшої зони контакту з інструментом [2, 9]. Це, в свою чергу, викликає більш інтенсивний нагрів різальної кромки.

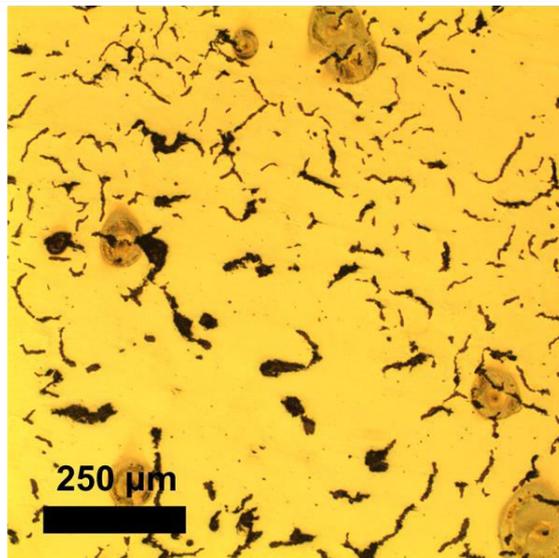


Рис 2. Структура графіту в CGI [8]

Роль сульфиду марганцю (MnS). Одним з найважливіших відкриттів стало розуміння ролі сульфиду марганцю (MnS) в процесі обробки чавуну [6, 9]. Сірий чавун містить відносно високу кількість сірки (0,08–0,12%), яка в процесі кристалізації утворює включення MnS [6, 8]. Ці включення є м'якими і пластичними і при високих температурах і тисках в зоні різання здатні формувати на поверхні інструменту тонкий захисний шар [6, 9]. Цей шар виконує дві ключові функції:

1. Змащувальна: Знижує тертя між стружкою та інструментом [9].

2. Захисна: Діє як бар'єр, що запобігає прямій дифузії та хімічній реакції між матеріалом інструменту (особливо PCBN) і залізом з оброблюваної деталі [6, 8]. При виробництві ЧВГ для отримання вермикулярної структури графіту необхідно мінімізувати вміст вільної сірки до дуже низьких рівнів (<0,02%), зазвичай шляхом додавання в розплав магнію або кальцію [8, 9]. Ці елементи зв'язують сірку, що перешкоджає утворенню включень MnS [9]. Відсутність цього захисного шару є головною причиною катастрофічно швидкого зносу PCBN-інструментів при обробці ЧВГ [6, 8, 9].

Механізми зносу PCBN і роль вуглецю

Термохімічний і дифузійний знос. В умовах відсутності захисного шару MnS і при високих температурах, характерних для обробки ЧВГ, домінуючим стає термохімічний і дифузійний знос [6, 8]. Дослідження з використанням просвічувальної та скануючої електронної мікроскопії (TEM і SEM) показали, що відбувається активне проникнення заліза з оброблюваної деталі в мікроструктуру різального інструменту [6]. При цьому залізо переважно атакує зерна кубічного нітриду бору (cBN), а не сполучну фазу (наприклад, TiC, TiN), викликаючи їх деградацію і «вимивання» з матриці [6, 9]. В результаті різальна кромка швидко втрачає свою форму і різальну здатність.

Вплив вуглецю і вибір інструменту CBN. Часто виникає питання про роль графіту (вуглецю) у зносі інструменту. Важливо розуміти, чому для обробки чорних металів використовується саме кубічний нітрид бору, а не алмаз, який є алотропною модифікацією вуглецю і найтвердішим матеріалом [5, 7]. При високих температурах, що виникають при різанні сталі та чавуну, алмаз виявляє високу хімічну спорідненість до заліза [5]. Це призводить до його швидкої дифузії в оброблюваний матеріал і графітизації, що викликає катастрофічний знос інструменту [5]. Кубічний нітрид бору (CBN) був синтезований як надтвердий матеріал, який, на відміну від алмазу, хімічно стабільний і не вступає в активну реакцію із залізом при високих температурах [3, 5, 7]. Саме ця властивість робить PCBN ідеальним матеріалом для високошвидкісної обробки загартованих сталей і чавунів [3, 4]. Однак при екстремальних умовах, що виникають при обробці ЧВГ (висока температура через низьку теплопровідність матеріалу і відсутність захисного шару), навіть хімічна стабільність CBN виявляється недостатньою [9]. Відбувається дифузія бору і азоту з інструменту в деталь, і заліза — з деталі в інструмент, що послаблює структуру PCBN [6, 9]. Таким чином, графіт в ЧВГ сам по собі не вступає в реакцію з CBN, а скоріше впливає на механіку процесу (а в сірому чавуні сприяє переривчастому стружкоутворенню). Основна хімічна проблема полягає в прямому контакті заліза з матеріалом інструменту при високих температурах [6].

Абразивний знос і вплив легуючих елементів. Крім термохімічного зносу, важливу роль відіграє абразивний знос, викликаний твердими включеннями в структурі ЧВГ [9]. До них відносяться карбіди і карбонітриди титану і ванадію [9]. Навіть незначне збільшення вмісту титану (з 0,01% до 0,02%) може скоротити стійкість твердосплавного інструменту вдвічі [9]. Це вказує на необхідність суворого контролю хімічного складу ЧВГ.

Теплові навантаження і тріщиноутворення. Низька теплопровідність ЧВГ в порівнянні з сірим чавуном призводить до того, що велика частина тепла концентрується в зоні різання і не йде в деталь [2, 9]. При переривчастому різанні (фрезеруванні) це призводить до різких циклів нагрівання і охолодження різальної

кромки, що викликає термічні напруги і утворення термічних тріщин, які з часом призводять до викрашування і руйнування інструменту [3].

Мета роботи

Метою даної статті є систематизація та аналіз інформації з наданих джерел для формування цілісного уявлення про фізичні процеси, що відбуваються на контакті інструменту з PCBN і чавуну з вермикулярним графітом. Основні завдання:

1. Проаналізувати вплив мікроструктури ЧВГ, зокрема морфології графіту і низького вмісту сірки, на механізми стружкоутворення і зносу інструменту.
2. Детально описати роль захисного шару MnS і пояснити причини його відсутності при обробці ЧВГ.
3. Охарактеризувати домінуючі механізми зносу (дифузійний, термохімічний) інструменту з PCBN.
4. Розглянути та оцінити існуючі та перспективні шляхи вирішення проблеми низької оброблюваності ЧВГ, включаючи модифікацію інструментальних матеріалів та застосування інноваційних технологій обробки.

Методика досліджень

Ця робота є аналітичним оглядом, заснованим на наукових статтях, технічних звітах .

Методологія включає в себе:

1. Порівняльний аналіз: Зіставлення даних щодо оброблюваності ЧВГ, сірого та високоміцного чавунів.
2. Систематизація даних: Групування інформації за ключовими аспектами, такими як мікроструктура, механізми зносу, різальної сили, температури та методи підвищення стійкості.
3. Синтез інформації: Об'єднання результатів з різних джерел для побудови цілісної картини фізичних і хімічних процесів, що визначають взаємодію в системі «інструмент-деталь».
4. Критична оцінка: Аналіз запропонованих рішень та їх застосовності в промислових умовах.

Результати досліджень

Проблематика матеріалу та питання дослідження

Аналіз джерел дозволяє виділити кілька взаємопов'язаних проблем, що визначають складність обробки ЧВГ.

Вплив варіативності властивостей ЧВГ. Вміст перліту в матриці безпосередньо впливає на твердість і міцність чавуну, а отже, і на різальні сили та знос інструменту [9]. Повністю перлітний ЧВГ (наприклад, GJV-500) має найвищу міцність, але й найгіршу оброблюваність [9].

Крім термохімічного зносу, важливу роль відіграє абразивний знос, викликаний твердими включеннями в структурі ЧВГ [9]. До них відносяться карбіди і карбонітриди титану і ванадію, які можуть бути присутніми в якості домішок, що потрапляють в розплав з шихтою [9]. Навіть незначне збільшення вмісту титану (з 0,01% до 0,02%) може скоротити стійкість твердосплавного інструменту вдвічі [9]. Це вказує на необхідність суворого контролю хімічного складу ЧВГ не тільки для отримання заданих механічних властивостей, але і для забезпечення прийнятної оброблюваності. Для ЧВГ характерний переважно абразивний механізм зносу, на відміну, наприклад, від ковкого чавуну, для якого більш характерний адгезійний знос [1].

Більшість досліджень підтверджують, що ЧВГ характеризується меншою теплопровідністю та більшою твердістю порівняно з сірим чавуном, що спричиняє локальне накопичення тепла, погіршення умов теплообміну та прискорене зношування інструмента. Встановлено, що підвищення швидкості різання, подачі та глибини обробки призводить до зростання температури та сил різання, особливо в умовах сухого фрезерування [11].

Можливі шляхи вирішення проблем обробки

Дослідження, представлені в документах, вказують на кілька перспективних напрямків для підвищення ефективності обробки ЧВГ.

1. Модифікація процесу різання: Модульно-асистована обробка (МAM).

Одним з найбільш сучасних рішень є застосування модульно-асистованої обробки (МAM) [8]. Суть методу полягає в накладенні на інструмент або деталь контрольованих низькочастотних (1000 Гц) осциляцій у напрямку подачі [8]. Це ефективно перетворює процес безперервного різання (наприклад, точіння) в дискретний, переривчастий процес [8]. Така зміна кардинально змінює умови в зоні різання:

– Зниження часу контакту: Періодичний відрив інструменту від заготовки перериває постійний тепловий потік, що значно знижує середню температуру на різальній кромці [8].

– Поліпшення доступу МОР: У моменти відриву інструменту створюються умови для проникнення мастильно-охолоджуючої рідини безпосередньо в зону контакту, що поліпшує змащення і охолодження [8].

– Зниження термохімічного зносу: Зниження температури і часу контакту пригнічує домінуючий механізм дифузійного і термохімічного зносу PCBN інструменту [8]. Експериментальні дані показують, що застосування МAM при високошвидкісному точінні ЧВГ інструментом з PCBN дозволяє збільшити стійкість інструменту як мінімум в 20-30 разів у порівнянні з традиційною обробкою [8]. Цей метод дозволяє ефективно обробляти ЧВГ на високих швидкостях (>500 м/хв), що раніше вважалося практично неможливим [8].

2. Застосування спеціалізованих МОР. Оскільки відсутність сірки в ЧВГ є ключовою проблемою, логічним рішенням видається введення сірки в зону різання ззовні. Дослідження показали, що використання МОР з активною сіркою (наприклад, Mobilmet 766) у поєднанні з МAM може додатково поліпшити стійкість інструменту [8]. Переривчастий характер різання при МAM сприяє доставці активних компонентів МОР до різальної кромки, де вони можуть вступати в реакцію з марганцем з чавуну, потенційно формуючи штучний

захисний сульфідний шар [8].

3. Розробка вдосконалених інструментальних матеріалів PCBN:

Прогрес у галузі матеріалознавства також пропонує шляхи вирішення проблеми. Знос PCBN-інструментів часто починається з руйнування або деградації сполучної фази [9]. Тому зусилля розробників спрямовані на:

- Оптимізацію сполучного: Створення нових сполучних матеріалів (наприклад, на основі TiC, TiN, TiCN) з підвищеною термостійкістю, хімічною стабільністю і міцністю зчеплення з зернами cBN [3, 9]. Дослідження показують, що інструменти зі зв'язком на основі TiCN показують кращі результати в порівнянні зі зв'язком на основі кобальту, який має низьку термічну стабільність [9]. Також розробляються сполучні з коефіцієнтом теплового розширення, близьким до cBN, що знижує внутрішні напрути при термоциклюванні [3].

- Контроль розміру зерна і вмісту cBN: Підбір оптимального розміру зерна (наприклад, 1-2 мкм) і об'ємної частки cBN (90-94%) дозволяє досягти необхідного балансу між твердістю, міцністю і теплопровідністю інструменту [3].

- Створення беззв'язкових PCBN: Перспективним напрямком є розробка нанополікристалічних матеріалів PCBN без сполучної фази [7]. У таких матеріалах нанорозмірні зерна cBN безпосередньо міцно пов'язані між собою [7]. Це усуває «слабку ланку» у вигляді зв'язки і дозволяє отримати матеріал з твердістю і міцністю, що перевершують навіть монокристали, що обіцяє кардинальне підвищення стійкості інструменту [7].

Аналіз світової практики та практичних експериментів показує що практичні дослідження, описані в наданих документах, підтверджують теоретичні передумови і демонструють проблеми, а також ефективність запропонованих рішень.

У порівняльних випробуваннях з точіння сірого чавуну та ЧВГ за однакових режимів було показано, що інструмент з PCBN, який успішно обробляє сірий чавун протягом десятків кілометрів різки, при обробці ЧВГ виходить з ладу катастрофічно швидко, часто не пройшовши і 1-2 км [8]. Мікроструктурний аналіз зношених інструментів після обробки низькосірчистих матеріалів (аналогів ЧВГ) наочно демонструє проникнення заліза вглиб інструменту і деградацію зерен cBN, в той час як при обробці високосірчистих матеріалів на поверхні інструменту утворюється чітко видимий захисний шар, що містить марганець і сірку [6].

Експерименти з модульно-асистованої обробки (МAM) ЧВГ є найбільш показовими. У дослідженні Сталбаума (T. Stalbaum) показано, що при швидкості різання 550 м/хв інструмент при звичайній обробці повністю руйнується після 1,4 км різання, тоді як при використанні МAM той же інструмент показує незначний зростання зносу навіть після 45 км різання [8]. Графіки зносу наочно демонструють перехід від експоненціального зростання зносу при звичайній обробці до пологої кривої зі стабільним, низьким темпом зносу при МAM [8]. На Рис 3 зображення вставок з КНБ (кубічного нітриду бору) за допомогою оптичного мікроскопа, що демонструють зношування по головній задній та передній поверхнях при МAM і звичайній обробці (СМ). V=550 м/хв; ho=0.05 мм/об; doc=1 мм; мастильно-охолоджувальна рідина (МОР) Mobilmet 766. [8]

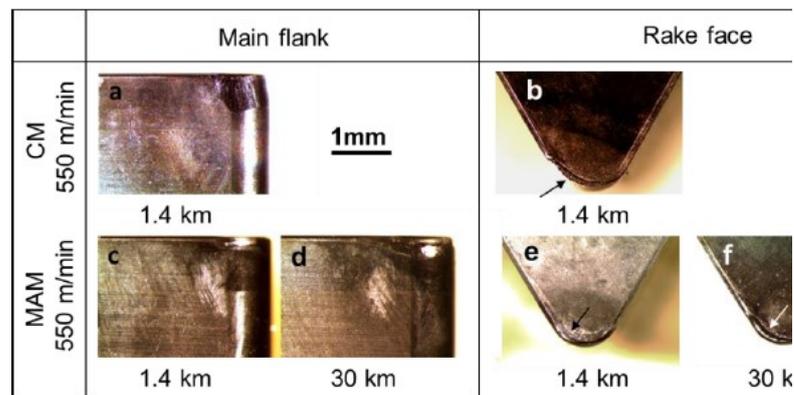


Рис 3.

Цікавим є також ефект швидкості різання при МAM: на відміну від класичної теорії різання, збільшення швидкості з 550 до 730 м/хв призводило не до збільшення, а до зниження зносу інструменту [8]. Це може бути пов'язано з тим, що при більш високих температурах, що виникають на більш високих швидкостях, в присутності сірковмісної МОР інтенсифікується формування захисного шару, що переважає негативний ефект від зростання температури [8]. Подібна поведінка (зростання стійкості зі збільшенням швидкості) спостерігається і при обробці сірого чавуну, де це пов'язують з ущільненням і стабілізацією шару MnS при більш високих температурах [8, 9].

Дослідження різних покриттів для твердосплавних інструментів також показують складність проблеми. Наприклад, покриття на основі Al₂O₃, які традиційно вважаються хімічно інертними до заліза, можуть вступати в реакцію з включеннями MgO в ЧВГ, утворюючи м'який продукт реакції типу (Mg,Fe,Mn)Al₂O₄, який легко стирається [9]. Це підкреслює необхідність розробки спеціалізованих покриттів, адаптованих саме під хімічний склад і мікроструктуру ЧВГ [9].

Висновки

На підставі аналізу наданих документів можна зробити наступні висновки:

1. Основна причина низької оброблюваності ЧВГ інструментами з PCBN носить комплексний характер і полягає в поєднанні його унікальної мікроструктури (міцна вермикулярна форма графіту) і хімічного складу (критично низький вміст сірки) [2, 8, 9].

2. Вермикулярний графіт забезпечує високі механічні властивості матеріалу, але в процесі різання призводить до формування довгої стружки і великої зони контакту, що викликає інтенсивне нагрівання різальної кромки [9].

3. Низький вміст сірки в ЧВГ перешкоджає утворенню захисного і змащувального шару сульфіду марганцю (MnS) на поверхні інструменту, який є ключовим фактором високої стійкості PCBN-інструментів при обробці сірого чавуну [6, 9].

4. За відсутності шару MnS домінуючим механізмом зносу стає прямий термохімічний і дифузійний знос, при якому залізо з оброблюваної деталі проникає в структуру PCBN і вибірково руйнує зерна кубічного нітриду бору [6,9].

5. Найбільш перспективним рішенням проблеми є зміна самого процесу різання шляхом застосування модульно-асистованої обробки (МAM). Перетворення безперервного різання на переривчасте кардинально знижує термічні навантаження і дозволяє збільшити стійкість інструменту більш ніж у 20 разів, роблячи високошвидкісну обробку ЧВГ економічно доцільною [8].

6. Додатковими факторами підвищення ефективності є застосування МОР з активною сіркою [8] і подальше вдосконалення інструментальних матеріалів PCBN, зокрема, розробка нових сполучних і створення безсполучних нанополікристалічних структур [3, 7].

Література

- Li, S. High-Speed Machining of Malleable Cast Iron by Various Cutting Tools Coated by Physical Vapor Deposition / S. Li, H. Lin, T. Zhang, J. Sui, C. Wang // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 34, No. 46. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00561-8>
- Tasdelen, B. Machining of gray cast irons and compacted graphite iron / B. Tasdelen, M. Escursell, G. Grenmyr, L. Nyborg // Swedish Manufacturing Symposium. – 2007. – P. 1–6.
- 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.
- 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.
- Zhou, Y. The Application and Performance of Diamond and PCBN Tools in Difficult-to-Cut Materials / Y. Zhou // Solid State Phenomena. – 2017. – Vol. 263. – P. 90–96. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.263.90>
- Angseryd, J. Effect of workpiece sulphur content on the degradation of a PCBN tool material / J. Angseryd, E. Olsson; H.-O. Andrén // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2011. – Vol. 29, No. 6. – P. 674–680. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.04.016>
- Sumiya, H. Innovative Ultra-hard Materials: Binderless Nanopolycrystalline Diamond and Nanopolycrystalline Cubic Boron Nitride / H. Sumiya, K. Harano // SEI Technical Review. – 2016. – No. 82. – P. 21–26.
- Stalbaum, T. P. High speed turning of compacted graphite iron (CGI) using controlled modulation / T. P. Stalbaum // Purdue University, Open Access Theses. – 2013. – No. 56
- 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, No. 118553. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118553>
- 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>
- Антонюк, В. С. Аналіз температур у зоні різання та сил різання при лезовій обробці чавуну з вермикулярним графітом / В.С. Антонюк // Технічна інженерія. – 2025. – № 1(95), С. 19–23. – DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-19-23](https://doi.org/https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-19-23)

References

- Li, S. High-Speed Machining of Malleable Cast Iron by Various Cutting Tools Coated by Physical Vapor Deposition / S. Li, H. Lin, T. Zhang, J. Sui, C. Wang // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2021. – Vol. 34, No. 46. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00561-8>
- Tasdelen, B. Machining of gray cast irons and compacted graphite iron / B. Tasdelen, M. Escursell, G. Grenmyr, L. Nyborg // Swedish Manufacturing Symposium. – 2007. – P. 1–6.
- 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.
- 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.

-
5. Zhou, Y. The Application and Performance of Diamond and PCBN Tools in Difficult-to-Cut Materials / Y. Zhou // *Solid State Phenomena*. – 2017. – Vol. 263. – P. 90–96. – DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.263.90>
 6. Angseryd, J. Effect of workpiece sulphur content on the degradation of a PCBN tool material / J. Angseryd, E. Olsson; H.-O. Andrén // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2011. – Vol. 29, No. 6. – P. 674–680. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2011.04.016>
 7. Sumiya, H. Innovative Ultra-hard Materials: Binderless Nanopolycrystalline Diamond and Nano-polycrystalline Cubic Boron Nitride / H. Sumiya, K. Harano // *SEI Technical Review*. – 2016. – No. 82. – P. 21–26.
 8. Stalbaum, T. P. High speed turning of compacted graphite iron (CGI) using controlled modulation / T. P. Stalbaum // *Purdue University, Open Access Theses*. – 2013. – No. 56
 9. 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, No. 118553. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118553>
 10. 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>
 11. Antoniuk, V. S. Analiz temperatur u zoni rizannia ta syl rizannia pry lezovii obrobtsti chavunu z vermykuliarnym hrafitom / V.S. Antoniuk // *Tekhnichna inzheneriia*. – 2025. – № 1(95), S. 19–23. – DOI: [https://doi.org/https://doi.org/10.26642/ten-2025-1\(95\)-19-23](https://doi.org/https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-19-23)