

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

DOI: 10.20535/1970.71(1).2026.361919

УДК 621.9

**ВПЛИВ МОРФОЛОГІЇ ГРАФІТОВОЇ ФАЗИ НА МЕХАНІЗМИ ЗНОСУ рСВН
ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНІЙ СУХІЙ ОБРОБЦІ ЧАВУНІВ***Коваленко І.**Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ, Україна**E-mail: koig@ukr.net*

У статті наведено комплексний системний аналіз трибохімічних і термомеханічних процесів, що відбуваються у зоні різання при високошвидкісній сухій обробці чавунів різної структури із застосуванням інструментів з полікристалічного кубічного нітриду бору (рСВН). Актуальність дослідження зумовлена зростанням вимог до продуктивності та надійності обробки відповідальних деталей із сірих, високоміцних та чавунів з вермикулярним графітом в умовах відмови від мастильно охолоджувальних середовищ. Метою роботи є встановлення впливу морфології графітової фази на формування контактних умов у зоні різання та визначення домінуючих механізмів зношування рСВН інструменту.

Методологічну основу дослідження становить узагальнення експериментальних даних провідних наукових груп за період 2020–2025 рр., отриманих при високошвидкісному точінні чавунів із різною формою графіту, з використанням сучасних методів аналізу, зокрема SEM, EDX, SIMS та чисельного FEM моделювання. Показано, що морфологія графітових включень істотно впливає на температурно силовий стан у зоні різання, умови тертя та інтенсивність теплоутворення.

Встановлено, що при обробці сірого чавуну з пластинчастим графітом формується суцільна захисна графітова трибоплівка, яка виконує функцію дифузійного бар'єра та забезпечує стабільний абразивний характер зношування. Для високоміцних чавунів із кулястим графітом характерним є розвиток дифузійного зносу, зумовленого хімічною взаємодією між рСВН та залізною матрицею при локальних температурах понад 1100 °С. Обробка чавунів з вермикулярним графітом супроводжується динамічно нестабільним тепловим режимом, що призводить до розвитку термомеханічної втоми різальної кромки. Отримані результати дозволяють обґрунтувати раціональний вибір складу та зв'язки рСВН інструменту залежно від типу чавуну та умов високошвидкісної обробки.

Ключові слова: рСВН, чавун, морфологія графіту, зношування інструменту, CGI, cast iron, високошвидкісна обробка, термомеханічна втома.

Вступ

Сучасний розвиток приладобудівної галузі та прецизійного машинобудування базується на забезпеченні гранично високої геометричної точності та стабільності розмірів вузлів. На відміну від загального машинобудування, у приладобудуванні конструкційні чавуни (сірий СЧ, високоміцний ВЧ та вермикулярний ЧВГ) цінуються за їхню унікальну здатність ефективно гасити мікровібрації, високу демпфуючу здатність та геометричну стабільність протягом усього терміну експлуатації [1]. Це є критичною умовою для підтримки точності таких компонентів, як:

- Основи контрольно-вимірювальних машин та мікроскопів, де стабільність чавуну забезпечує незмінність положення вимірювальних вузлів.
- Корпуси датчиків тиску та витратомірів, виготовлені з високоміцного чавуну (SGI), де точність посадкових місць визначає похибку вимірювання.

- Вузли спеціальної гідравліки із вермикулярного чавуну (CGI), де термомеханічна стабільність розмірів є гарантією надійності системи.

Зазначені типи чавунів характеризуються специфічними механічними та оброблювальними властивостями. Зокрема, ЧВГ та ВЧ завдяки поєднанню високої міцності, термостійкості та здатності протистояти циклічним механічним і термічним навантаженням широко застосовуються у відповідальних елементах, що працюють в умовах підвищених температур та інтенсивного зношування [2].

Геометрична точність деталей приладобудування безпосередньо залежить від параметрів мікрогеометрії (шорсткості) поверхні. У прецизійних деталях висока шорсткість призводить до втрати заданої точності форми [3]. Реалізація потенціалу цих матеріалів можлива лише при переході до високошвидкісної сухої обробки (HSC) інструментами з рСВН. При швидкостях понад 500 м/хв до 90 % теплової енергії концентрується в зоні різання

ня, де єдиним модулятором теплових потоків стає графітова фаза заготовки [4, 5].

У статті проведено системний аналіз впливу морфології графітової фази на формування контактних умов та механізми зношування інструменту з полікристалічного кубічного нітриду бору (pCBN) при обробці чавунів. Дослідження спрямоване на забезпечення стабільної шорсткості та геометричної точності прецизійних деталей приладобудування. Поєднано результати систематизації сучасних наукових досліджень за 2020–2025 рр. із власними експериментальними даними. Показано, що застосування pCBN-інструментів дозволяє досягти шорсткості обробленої поверхні на рівні $Ra = 0,9\text{--}1,6$ мкм, що є критично важливим для функціонування прецизійних вузлів.

Встановлено, що при високошвидкісній сухій обробці (High-Speed Cutting, HSC) чавунів із різ-

ною морфологією графіту – сірого (СЧ), високоміцного (ВЧ) та чавуну з вермикулярним графітом (ЧВГ) – структура графітової фази є визначальним фактором, який контролює температурний режим, характер тертя, трибохімічну взаємодію та механізми деградації різального інструменту.

Разом з тим, підвищення швидкостей різання та перехід до сухої обробки значно ускладнюють умови контакту в зоні різання. У таких умовах різко зростає температура та інтенсивність навантаження на різальну кромку, а відсутність мастильно-охолоджувальних середовищ призводить до того, що ключову роль у регулюванні контактних процесів відіграє сама структура матеріалу заготовки, насамперед морфологія графітових включень (рис. 1).

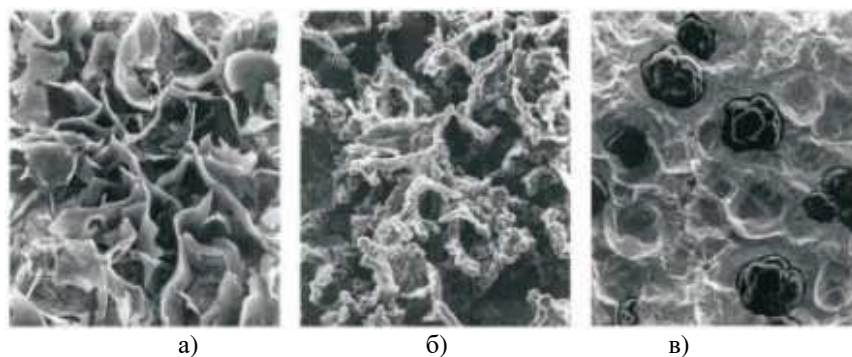


Рис. 1. Морфологія графітових включень у різних типах чавунів: а) пластинчастий графіт у сірому чавуні, б) вермикулярний графіт у чавуні з вермикулярною графітовою структурою, в) кулястий графіт у високоміцному чавуні з кулястим графітом [2]

Попри значну кількість досліджень у галузі обробки чавунів, питання системного опису впливу морфології графіту на механізми зношування pCBN-інструменту в умовах високошвидкісної сухої обробки залишається недостатньо узагальненим. Відсутня узгоджена модель, що поєднує морфологію графітових включень, контактні умови та домінуючі механізми деградації інструменту.

Таким чином, дослідження впливу морфології графітової фази на термомеханічні та трибологічні процеси у зоні різання є актуальним науковим і практичним завданням, спрямованим на підвищення ефективності високошвидкісної обробки та забезпечення стабільної якості поверхні деталей приладобудування.

Аналіз сучасних досліджень

Аналіз сучасних досліджень у галузі високошвидкісної обробки чавунів інструментами з полікристалічного кубічного нітриду бору (pCBN) показує, що ключовим фактором, який визначає умови різання та стійкість інструменту, є морфологія графітової фази. Згідно з оглядовими роботами [1, 4], форма та розподіл графітових включень безпосередньо впливають на теплоутворення, температурне поле та характер контактних проце-

сів у зоні взаємодії «інструмент–заготовка», особливо в умовах сухої високошвидкісної обробки.

Показано [6, 7], що навіть при близьких механічних властивостях чавунів їх оброблюваність суттєво залежить від морфології графіту. Для сірого чавуну з пластинчастим графітом характерне зниження сил різання та формування більш сприятливих умов деформування, тоді як у високоміцному чавуні куляста форма графіту сприяє виникненню зон прямого контакту металевої матриці з інструментом.

Механізми зношування pCBN-інструменту суттєво відрізняються для різних типів чавунів. Як встановлено у [8, 9], для сірого чавуну характерне утворення стабільної графітової трибоплівки, яка виконує функцію дифузійного бар'єра та забезпечує переважно абразивний характер зношування. Для високоміцного чавуну, навпаки, відсутність такої плівки призводить до високотемпературного контакту та активації дифузійно-хімічного руйнування pCBN при температурах понад 1000–1100 °C [5, 10].

Найбільш складним з точки зору механізмів зношування є чавун з вермикулярним графітом. Як показано в роботах [4, 8, 9], для нього характерна динамічна нестабільність контактних умов, обумовлена дискретним розподілом графіту. Це при-

зводить до локальних температурних коливань та розвитку термомеханічної втоми різальної кромки [6, 11]. Відсутність стабільного захисного шару зумовлює комбінований характер зношування – абразивний, адгезійний та термохімічний.

Окрім властивостей матеріалу, значний вплив на процеси зношування мають параметри різання та геометрія інструменту. У роботах [5, 12, 13] показано, що збільшення швидкості різання активує дифузійні механізми зношування, тоді як подача і геометрія різальної кромки визначають рівень контактних напружень і стабільність процесу.

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що морфологія графітової фази визначає характер тертя, інтенсивність теплоутворення та домінуючі механізми зношування рCBN-інструменту. Разом з тим, відсутній єдиний узагальнений підхід, який би пов'язував морфологію графіту з механізмами деградації інструменту в умовах високошвидкісної сухої обробки, що обумовлює актуальність даного дослідження.

Методологія

Для дослідження впливу морфології графітової фази на механізми зношування рCBN-інструменту застосовано комбінований підхід, що поєднує систематизацію сучасних наукових даних та власні експериментальні дослідження. Такий підхід дозволив встановити взаємозв'язок між структурою матеріалу, умовами різання та формуванням якості поверхні.

Методологічна база дослідження ґрунтується на узагальненні результатів робіт провідних наукових груп за 2020–2025 рр., отриманих із застосуванням сучасних методів аналізу, зокрема скануючої електронної мікроскопії (SEM) та енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX) для дослідження зон контакту інструмента із заготовкою [14, 15], а також чисельного моделювання методом кінцевих елементів (FEM) для оцінки температурно-силових умов у зоні різання [6].

Умови проведення експерименту

Власні експериментальні дослідження проводилися в умовах високошвидкісного сухого точіння на токарно-гвинторізного верстаті моделі ФТ-11.

Об'єктами дослідження були три групи чавунів із різною морфологією графітової фази:

- сірий чавун СЧ25 – пластинчастий графіт;
- високоміцний чавун ВЧ50 – кулястий графіт;
- чавун з вермикулярним графітом EN-GJV 400 – вермикулярна структура.

Розміри заготовок становили:

діаметр $D = 100$ мм, довжина $L = 300$ мм.

Працездатність різального інструменту багато в чому визначається хімічним складом оброблюваного матеріалу тому в якості різального інструменту використовувалися змінні пластини RNUN 0704T 020 20 M з композиційного матеріалу на основі рCBN («Борсиніт») [16]. Геометрія інстру-

менту включала від'ємний передній кут $\gamma = -20^\circ$ та фаску шириною 0,2 мм. Застосування фаски відповідає рекомендаціям [7] і спрямоване на підвищення механічної міцності різальної кромки та запобігання її передчасному руйнуванню.

Обробка здійснювалася в умовах сухого різання без застосування мастильно-охолоджувальних середовищ при наступних режимах:

- швидкість різання V_c – до 500 м/хв;
- подача f – 0,1–0,2 мм/об;
- глибина різання a_p – 0,2–0,3 мм.

Контрольно-вимірювальні процедури

Контроль параметрів процесу різання та оцінка стану інструменту і поверхні здійснювалися із застосуванням сучасних засобів вимірювання:

- вимірювання сил різання – трикомпонентний динамометр Kistler, що дозволив зафіксувати динамічні коливання процесу різання, зокрема при обробці чавуну з вермикулярним графітом [6, 11, 17];
- аналіз шорсткості поверхні – профілометр-профілограф, визначалися параметри R_a та R_z ;
- визначення залишкових напружень – методом рентгенівської дифракції на установці Stresstech Xstress Robot;
- оцінка зносу інструменту – оптична мікроскопія (NEOPHOT 21) з визначенням ширини фаски зносу по задній поверхні (VB).

Отримані експериментальні дані інтерпретувалися з урахуванням сучасних уявлень про трибологічні, термохімічні та термомеханічні процеси у зоні різання.

Проведені експериментальні дослідження показали, що морфологія графітової фази визначає як характер контактних умов у зоні різання, так і домінуючі механізми зношування рCBN-інструменту, та якість обробленої поверхні, що узгоджується з сучасними науковими уявленнями [1, 4, 8, 18].

Оптимізація процесу обробки рCBN інструментом для формування стискаючого поля залишкових напружень [14] та досягнення мінімальної шорсткості є критично важливим завданням у сучасній технології приладобудування та машинобудування. Зокрема, для високоміцних чавунів з кулястим графітом доведено, що зниження шорсткості за рахунок обробки підвищує межу міцності на розтяг [19]. У чавунів з вермикулярним та сферичним графітом міцність втоми безпосередньо залежить від стану поверхневого шару [9, 17, 20 – 22]. Слід підкреслити, що куляста морфологія графітових включень забезпечує більш рівномірний перерозподіл контактних напружень у матеріалі порівняно з пластинчастою формою та не сприяє виникненню локальних концентрацій напружень, характерних для гострокрайових дефектів.

Отримані результати та їх обговорення

У процесі точіння середні значення параметра шорсткості R_a суттєво варіювалися залежно від

типу матеріалу: для чавуну з вермикулярним графітом (CGI) цей показник становив близько 1,1 мкм, для високоміцного чавуну з кулястим графітом (SGI) – приблизно 0,9 мкм, а для сірого чавуну досягав 1,6 мкм. Такі відмінності в стані поверхні безпосередньо зумовлені морфологією графітних включень та специфікою механізмів формування мікрогеометрії під час механічної обробки. Аналіз результатів показав, що найбільша висота мікронерівностей характерна для сірого чавуну (рис. 2, с), тоді як найбільш якісна поверхня з мінімальними параметрами шорсткості формується при обробці чавуну з кулястим графітом (рис. 2, b).

Вплив морфології графіту на якість поверхні

Аналіз результатів шорсткості показав суттєву залежність параметра Ra від типу чавуну. Найменші значення шорсткості були отримані при обробці високоміцного чавуну (ВЧ50) – близько $Ra \approx 0,9$ мкм. Для чавуну з вермикулярним графітом значення становили $Ra \approx 1,0$ – $1,2$ мкм, тоді як для сірого чавуну спостерігалися найбільші значення – до $Ra \approx 1,6$ мкм.

Такі відмінності пояснюються специфікою механізмів формування поверхні. У сірому чавуні пластинчастий графіт сприяє крихкому викришуванню матеріалу та формуванню більш розвиненого мікрорельєфу [6, 7, 17]. У високоміцному чавуні куляста форма графіту забезпечує більш рівномірне деформування шару різання, що дозволяє отримати поверхню з меншою шорсткістю [5, 10, 17, 23]. Для чавуну з вермикулярним графітом характерний проміжний характер формування мікрогеометрії [4, 8].

Вплив режимів різання

Встановлено, що визначальним параметром формування мікрогеометрії поверхні є подача. Мінімальні значення шорсткості досягаються при $f \approx 0,15$ мм/об, що узгоджується з даними літератури щодо оптимальних режимів точіння чавунів [13, 15]. Збільшення подачі призводить до зростання шорсткості внаслідок копіювання профілю різальної кромки на оброблювану поверхню [13].

При високих швидкостях різання ($V_c > 300$ – 500 м/хв) тепловий фактор стає домінуючим, що призводить до інтенсифікації дифузійних процесів і зміни характеру контакту, що підтверджено в роботах [9, 12, 24].

Знос інструменту та його вплив на якість

Встановлено, що стан різальної кромки (рис. 3) безпосередньо корелює з якістю обробленої поверхні. Із зростанням зносу по задній поверхні (VB) відбувається перенесення дефектів інструменту на поверхню деталі [8, 9, 19, 23].

При досягненні критичного значення зносу $VB \approx 0,3$ мм спостерігається різке погіршення

параметрів шорсткості та дестабілізація процесу різання, що відповідає класичним уявленням про граничний знос інструменту [19, 26].

Механізми зношування рCBN-інструменту

Отримані результати підтверджують, що механізми зношування рCBN-інструменту визначаються морфологією графітової фази.

При обробці сірого чавуну формується стабільна графітова трибоплівка на передній поверхні інструменту, яка знижує коефіцієнт тертя та виконує функцію дифузійного бар'єра. У цих умовах домінує рівномірний абразивний знос [8, 3].

Для високоміцного чавуну характерна відсутність суцільної графітової плівки, що призводить до прямого контакту металевої матриці з інструментом. У результаті при високих температурах активуються дифузійно-хімічні процеси деградації рCBN, пов'язані з взаємодією бору з залізом [5, 9, 10].

Чавун з вермикулярним графітом характеризується найбільш нестабільними умовами різання. Нерівномірний контакт графітових включень призводить до циклічних температурних навантажень і розвитку термомеханічної втоми різальної кромки, що підтверджується експериментальними та FEM-дослідженнями [6, 11].

Механізми зношування рCBN-інструменту

Отримані результати підтверджують, що механізми зношування рCBN-інструменту визначаються морфологією графітової фази.

При обробці сірого чавуну формується стабільна графітова трибоплівка на передній поверхні інструменту, яка знижує коефіцієнт тертя та виконує функцію дифузійного бар'єра. У цих умовах домінує рівномірний абразивний знос [8, 3].

Для високоміцного чавуну характерна відсутність суцільної графітової плівки, що призводить до прямого контакту металевої матриці з інструментом. У результаті при високих температурах активуються дифузійно-хімічні процеси деградації рCBN, пов'язані з взаємодією бору з залізом [5, 9, 10].

Чавун з вермикулярним графітом характеризується найбільш нестабільними умовами різання. Нерівномірний контакт графітових включень призводить до циклічних температурних навантажень і розвитку термомеханічної втоми різальної кромки, що підтверджується експериментальними та FEM-дослідженнями [6, 11].

У цих умовах реалізується комбінований механізм зношування, що включає абразивний, адгезійний і термохімічний компоненти, а також мікророзколювання різальної кромки [8, 9].

Отримані результати узгоджуються з сучасними дослідженнями [1, 4, 12] і підтверджують, що морфологія графітової фази визначає не лише оброблюваність чавунів, але й характер деградації інструменту.

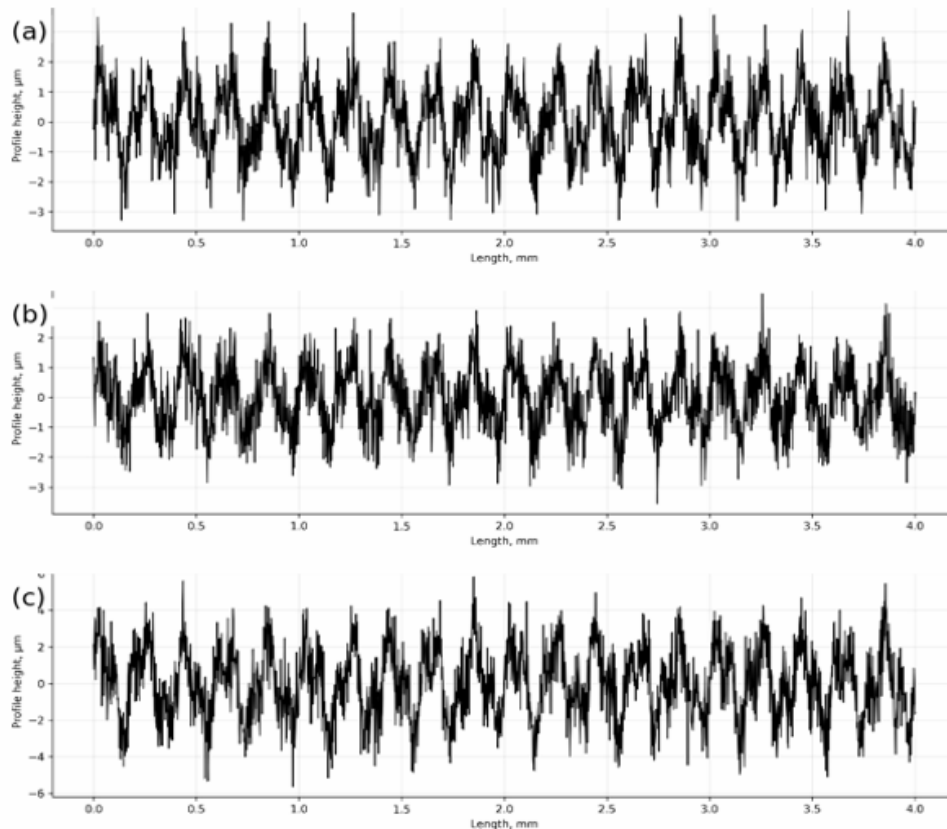


Рис. 2. Профілограми шорсткості поверхні чавуну з вермикулярним графітом (а), високоміцного чавуну з кулястим графітом (б) та сірого чавуну (с) після точіння інструментом з рCBN

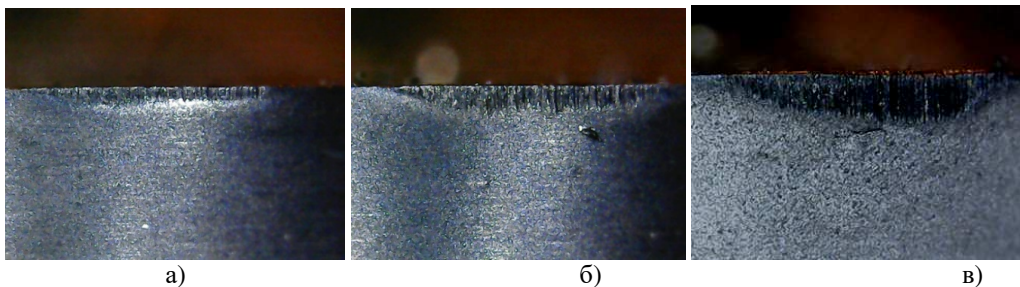


Рис. 3. Стан різальної кромки при обробці: сірого чавуну – (а), високоміцного чавуну – (б), чавуну з вермикулярним графітом – (в)

Перехід від пластинчастого до кулястого та вермикулярного графіту супроводжується зміною домінуючих механізмів зношування від абразивного до дифузійного та термомеханічного, що має бути враховано при виборі інструментального матеріалу та режимів різання.

Висновки

У статті узагальнено результати теоретичних та експериментальних досліджень впливу морфології графітової фази на контактну взаємодію, механізми зношування рCBN-інструменту та формування якості поверхні при високошвидкісній обробці чавунів, без використання мастильно-охолоджуючих рідин:

- Встановлено, що морфологія графітової фази є визначальним фактором формування контактних умов у зоні різання та механізмів зношування рCBN-інструменту при високошвидкісній сухій обробці чавунів.
- Показано, що при обробці сірого чавуну формування стабільної графітової трибоплівки на поверхні інструменту забезпечує переважно абразивний характер зношування та відносно стабільну роботу інструменту.
- Встановлено, що для високоміцного чавуну характерним є дифузійно-хімічний механізм зношування, обумовлений прямим контактом інструменту з металевою матрицею та високо-температурною активацією термохімічних процесів.
- Показано, що обробка чавуну з вермикулярним графітом супроводжується динамічно нестабільними термомеханічними умовами, що призводить до розвитку термомеханічної втоми.

- ми та комбінованого механізму зношування (абразивного, адгезійного та термохімічного).
- Експериментально встановлено, що шорсткість обробленої поверхні залежить від типу чавуну і становить: для високоміцного чавуну – $Ra \approx 0,9$ мкм; для чавуну з вермикулярним графітом – $Ra \approx 1,0-1,2$ мкм; для сірого чавуну – до $Ra \approx 1,6$ мкм.
 - Визначено, що оптимальне значення подачі для забезпечення мінімальної шорсткості становить $f \approx 0,15$ мм/об, тоді як відхилення від цього значення призводить до погіршення якості поверхні.
 - Показано, що зростання зносу інструменту ($VB \approx 0,3$ мм) призводить до різкого погіршення шорсткості та дестабілізації процесу різання.
 - Узагальнено, що перехід від пластинчастого до кулястого та вермикулярного графіту супроводжується зміною домінуючих механізмів зношування рCBN-інструменту від абразивного до дифузійного та термомеханічного.
 - Отримані результати можуть бути використані для оптимізації режимів високошвидкісної обробки, вибору геометрії різальної кромки та складу рCBN-інструменту залежно від морфології графітової фази.
 - Куляста морфологія графітових включень забезпечує більш рівномірний перерозподіл контактних напружень у матеріалі порівняно з пластинчастою формою та не сприяє виникненню локальних концентрацій напружень, характерних для гострокрайових дефектів.
 - Встановлено, що для деталей приладобудування (основи вимірювальних систем, корпуси датчиків, елементи гідравлічних вузлів) забезпечення шорсткості на рівні $Ra = 0,9-1,6$ мкм є критичним для стабільності роботи, а вибір типу чавуну та параметрів обробки повинен здійснюватися з урахуванням морфології графітової фази.
- Література**
- [1] J. A. G. de Sousa, W. F. Sales, A. R. Machado, “A review on the machining of cast irons”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, pp. 4073–4092, 2018. DOI: 10.1007/s00170-017-1140-1.
 - [2] Антонюк, В. С., “Аналіз температур у зоні різання та сил різання при лезовій обробці чавуну з вермикулярним графітом,” *Технічна інженерія*, no 1(95), pp. 19–23, 2025. DOI: 10.26642/ten-2025-1(95)-19-23
 - [3] A. Duchosal, D. Joly, R. Leroy, R. Serra, “Effects of microstructure of CGI in tribological strategy”, *Materials*, vol. 11, p. 2110, 2018. DOI: 10.3390/ma11112110
 - [4] L. J. Sirtuli, J. M. Bello Bermejo, C. Windmark, S. Norgren, J.-E. Ståhl, D. Boing, “Machining of compacted graphite iron: A review”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 332, p. 118553, 2024. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2024.118553
 - [5] P. Wang, X. Li, Y. Jiu, H. Yin, Y. Zhang, “Cutting parameter–tool material interaction on PCBN tool wear behaviour in ductile iron machining”, *Scientific Reports*, vol. 16, p. 9473, 2026. DOI: 10.1038/s41598-026-38314-z
 - [6] V. Nayyar, G. Grenmyr, J. Kaminski, L. Nyborg, “Machinability of compacted graphite iron and flake graphite iron with coated carbide”, *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, vol. 13, no. 1, pp. 1–18, 2013. DOI: 10.1504/IJMMM.2013.050720
 - [7] M. C. Cakir, A. Bayram, K. K. Kircali, C. Ensarioglu, “Effects of microstructure on machinability of ductile iron”, *Proc. IMechE Part C*, 2010. DOI: 10.1177/2041297510394101
 - [8] L. Zhu, R. Evans, Y. Zhou, F. Ren, “Wear study of cubic boron nitride cutting tool for machining of compacted graphite iron”, *Lubricants*, vol. 10, no. 4, p. 51, 2022. DOI: 10.3390/lubricants10040051
 - [9] B. Zou, M. Chen, H. Shao, “Experimental study of cubic boron nitride cutting tool wear for high-speed machining of compacted graphite iron”, *Materials*, vol. 15, no. 4, p. 1432, 2022. DOI: 10.3390/ma15041432
 - [10] H.-L. Ma, B.-J. Sun, J.-H. Zhang, “Wear behaviors of PcBN milling insert in high-speed dry milling of nodular cast iron”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 46, p. 521, 2024. DOI: 10.1007/s40430-024-05088-2
 - [11] S. Dawson, I. Hollinger, M. Robbins, J. Daeth, U. Reuter, H. Schulz, “The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron”, SinterCast Technical Research Report, 2014. [Online]. Available: <https://sintercast.com/media/01pafvv/the-effect-of-metallurgical-variables-on-the-machinability-of-compacted-graphite-iron.pdf>
 - [12] X. Wu, Z. Su, C. Zhang, X. Zhao, H. Yao, F. Jiang, “The cutting edge geometric optimization of the PCBN tool for the machining of cast iron”, *Micromachines*, vol. 16, no. 9, p. 978, 2025. DOI: 10.3390/mi16090978
 - [13] G. Yin, J. Shen, Z. Wu, X. Wu, F. Jiang, “Experimental investigation on the machinability of PCBN chamfered tool in dry turning of gray cast iron”, *Processes*, vol. 10, no. 8, p. 1547, 2022. DOI: 10.3390/pr10081547
 - [14] T. Sjögren, *Residual Stresses and Fatigue of Shot Peened Cast Iron*, Linköping University, 2009.
 - [15] K. P. Varghese, A. K. Balaji, “Wear of carbide and cermet tools in machining of CGI”, in *ASME/STLE Tribology Conference*, 2007. DOI: 10.1115/PTC2007-44367
 - [16] С. А. Клименко, В. С. Антонюк, О. Ф. Саленко, *Надтверді матеріали інструментального призначення для автоматизованого виробництва*, Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.

- [17] V. Nayyar, M. Z. Alam, J. Kaminski, K. S. Suresh, L. Nyborg, "Influence of cutting-edge geometry on machinability of CGI", *Int. J. Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering*, vol. 3, pp. 35–49, 2013. DOI: 10.4018/ijmmme.2013010103
- [18] Y. Qiu, J. C. Pang, E. N. Yang, S. X. Li, M. X. Zhang, Z. F. Zhang, "Transition of tensile strength and damaging mechanisms of compacted graphite iron with temperature", *Materials Science & Engineering A*, vol. 677, pp. 290–301, 2016. DOI: 10.1016/j.msea.2016.09.043
- [19] S. Kimura, Y. Ufuktepe, H. E. Elsayed-Ali, "Cutting performance of binderless CBN tool in high-speed milling", *Int. J. Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 37, pp. 124–130, 2013. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2012.11.006
- [20] C. L. Zou, L. J. Chen, J. C. Pang, S. X. Li, Y. Qiu, Z. F. Zhang, "The low-cycle fatigue and life prediction of compacted graphite iron", *Materials Science & Engineering A*, vol. 763, p. 138101, 2019. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138101
- [21] Y. Qiu, J. C. Pang, S. X. Li, M. X. Zhang, Z. F. Zhang, "Influence of thermal exposure on microstructure evolution and fracture of CGI", *Materials Science & Engineering A*, vol. 664, pp. 129–139, 2016. DOI: 10.1016/j.msea.2016.03.111
- [22] Y. Qiu, J. C. Pang, M. X. Zhang, S. X. Li, Z. F. Zhang, "Influence of temperature on the high-cycle fatigue properties of CGI", *International Journal of Fatigue*, vol. 112, pp. 84–93, 2018. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.03.007
- [23] T. P. Stalbaum, *High Speed Turning of Compacted Graphite Iron (CGI) Using Controlled Modulation*, Purdue University, 2013.
- [24] T. Özel, Y. Karpat, "Plastic deformation and residual stress in high-speed turning", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 183, pp. 165–174, 2007. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.10.012
- [25] Л. І. Путятіна, *Лезово-зміцнювальна механічна обробка деталей з високоміцного чавуну*, Київ, 2004.
- [26] W. Grzesik, J. Rech, K. Zak, C. Claudin, "Machining performance of nodular cast iron", *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, pp. 125–133, 2009. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2008.10.003

UDC 621.9

I. Kovalenko*V. Bakul Institute for Superhard Materials, Kyiv, Ukraine***INFLUENCE OF GRAPHITE PHASE MORPHOLOGY ON THE WEAR MECHANISMS OF PCBN TOOLS DURING HIGH SPEED DRY MACHINING OF CAST IRONS**

This paper presents a comprehensive and systematic analysis of tribochemical and thermomechanical processes occurring in the cutting zone during high speed dry turning of cast irons with different graphite morphologies using polycrystalline cubic boron nitride (pCBN) cutting tools. The relevance of the study is driven by the increasing demand for high productivity and tool reliability in machining critical components made of gray, nodular, and vermicular cast irons under environmentally friendly dry cutting conditions. The aim of the work is to clarify the influence of graphite morphology on contact conditions in the cutting zone and to identify the dominant wear mechanisms of pCBN tools.

The study is based on the synthesis and comparative analysis of experimental results reported by leading research groups between 2020 and 2025, obtained under high speed machining conditions. Advanced characterization techniques, including scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X ray spectroscopy (EDX), secondary ion mass spectrometry (SIMS), and finite element method (FEM) modeling, were used to analyze tool wear, temperature distribution, and stress states in the cutting zone. The results demonstrate that graphite morphology plays a decisive role in controlling friction behavior, heat generation, and temperature–force interactions at the tool–workpiece interface.

It is shown that machining of gray cast iron with lamellar graphite promotes the formation of a continuous graphite tribo layer on the tool rake face, which acts as a sacrificial diffusion barrier and leads to stable abrasive flank wear. In contrast, nodular cast iron is characterized by the absence of a protective graphite layer, resulting in direct metal–tool contact, local temperatures exceeding 1100 °C, and diffusion controlled chemical degradation of pCBN due to boron dissolution into the iron matrix. Vermicular cast iron exhibits a dynamically unstable thermal regime caused by intermittent contact between graphite and the pearlitic matrix, leading to high frequency thermal cycling and premature thermomechanical fatigue of the cutting edge. The findings provide a mechanistic basis for selecting appropriate pCBN grades and binder systems depending on cast iron type and high speed machining conditions.

Keywords: pCBN, cast iron, graphite morphology, tool wear, high speed machining, thermal fatigue.

Надійшла до редакції

02 квітня 2026 року

Рецензовано

18 квітня 2026 року



© 2026 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).