

- of acoustic emission during turning of aluminum alloys using PCD tools and neural networks]. *Proc. of NTU "KhPI". Cutting and tools in technological systems*, (64), 53–58 [in Ukrainian].
- Novikov, M. V., Devin, L. M., Stakhniv, M. Ye., & Lysenko, K. O. (2009). Osoblyvosti prohramnoho upravlinnia analoho-tsyfrovyim peretvoriuvachem pry eksperymentalnykh doslidzhenniakh syly rizannia [Features of software control of an analog-to-digital converter in experimental studies of cutting force]. *Science-Intensive Technologies*, (2), 94–97 [in Ukrainian].
 - Briceno, J. F., El-Mounayri, H., & Mukhopadhyay, S. (2002). Selecting an artificial neural network for efficient modeling and accurate simulation of the milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(6), 663–674.
 - Ezugwu, E. O., Fadare, D. A., Bonney, J., Da Silva, R. B., & Sales, W. F. (2005). Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(12–13), 1375–1385.
 - Jaiswal, S. (2024, January 4). *What is Normalization in Machine Learning? A Comprehensive Guide to Data Rescaling*. (b. d). <https://www.datacamp.com/tutorial/normalization-in-machine-learning>
 - Sankaran, S., Wang, H., Guilhoto, L. F., & Perdikaris, P. (2022). On the impact of larger batch size in the training of Physics Informed Neural Networks. *DLDE Workshop at the 36th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022)*. (p. 1–8).

УДК 621.9.025

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-412-421

С.А. Клименко, член-кор. НАН України; **С.Ан. Клименко**, **Ю.О. Мельничук**,
М.Ю. Копейкіна, **А.О. Чумак**, **А.С. Манохін**, кандидати технічних наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
вул. Автозаводська 2, 04074, м. Київ, atmi@meta.ua*

ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ, ОСНАЩЕНОГО КОМПОЗИТАМИ З ВИСОКИМ ВМІСТОМ cBN, ПРИ ТОЧІННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ З УДАРНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

У статті досліджено працездатність різального інструменту, оснащеного полікристалічними композитами на основі кубічного нітриду бору (PcBN) з високим вмістом cBN (до 97%), під час точіння загартованої сталі ХВГ за умов ударного навантаження. Проведено експериментальні дослідження впливу геометричних параметрів інструменту, зокрема кута нахилу різальної кромки ($\lambda = 0-50^\circ$), на характер зношування інструменту, стабільність процесу різання та якість обробленої поверхні. Встановлено, що використання інструментів із $\lambda = 40^\circ$ забезпечує найвищу стійкість (до 50–60 хв) та дозволяє здійснювати ефективну обробку при підвищених подачах ($S = 0,40-0,65$ мм/об). Отримані результати підтверджують доцільність застосування інструменту із PcBN косокутної конструкції для високопродуктивного точіння загартованих залізовуглецевих сплавів в умовах динамічного навантаження.

Ключові слова: ПКНБ, зношування інструменту, загартована сталь, переривчасте різання, косокутне різання, стійкість інструменту, точіння з великою подачею, динамічне навантаження.

Вступ

Пріоритетним напрямком удосконалення технологічних процесів в машинобудуванні є підвищення продуктивності механічної обробки, що дозволяє знизити собівартість виготовлення деталей і підвищити конкурентоспроможність виробів. Особливої актуальності таке питання набуває при обробці виробів із загартованих сталей в умовах навантаження на різальний інструмент з ударом. Прикладами є обробка деталей із пазами та отворами, обробка деталей з наплавленим поверхневим шаром. Одним із шляхів підвищення продуктивності лезової обробки загартованих сталей є використання інструментів з надтвердих композитів (PcBN) на основі кубічного нітриду бора (cBN) [1], але такий інструмент може бути не досить ефективним під час обробки з динамічним навантаженням. Для останнього випадку перспективним є розробка та використання інструментів спеціальних конструкцій, оснащених PcBN, що забезпечує високу стійкість інструменту при високих режимах різання та дозволяє отримати потрібну шорсткість оброблених поверхонь виробів.

В [2] вивчався механізм зношування інструменту з PcBN за різних умов різання. Встановлено, що при обробці загартованої сталі з ударом інтенсивність термічно обумовленого зношуванням зерен cBN знижується, а складові зв'язки в композиті зношуються з підвищеною швидкістю. У таких умовах найбільшу працездатність має інструмент, оснащений композитом з 90% BN.

За результатами роботи [3] можна зробити висновок, що при токарній обробці загартованих сталей інструмент з високим вмістом cBN характеризується вищим періодом стійкості. Основне явище, яке спричинило закінчення терміну експлуатації інструменту, був знос на задній поверхні та поява кратера на передній поверхні.

Аналіз результатів роботи [4] дозволяє зробити висновок, що при точінні в умовах навантаження з ударом інструмент з PcBN працює краще, ніж керамічний інструмент, та є ефективним для фінішної обробки замість шліфування.

Автори [5] вивчали характеристики та механізм зношування інструменту, оснащеного PcBN без зв'язуючого, при фрезеруванні сірого чавуну та показали, що для такого інструменту не спостерігається виникнення термічно-обумовлених тріщин. Наведені результати, окрім ефекту від підвищеної міцності композитів без зв'язки, демонструють важливість збільшення теплопровідності (до 500 Вт/м·К) матеріалу інструменту в умовах високоінтенсивних імпульсних теплових навантажень.

В [6, 7] встановлено, що інструменти, оснащені PcBN з підвищеним вмістом надтвердої фази, менш чутливі до динамічного навантаження.

Одним з найбільш важливих завдань досліджень при врізанні інструменту в оброблюваний матеріал в початковий момент оброблення з ударом, є встановлення зв'язку між параметрами навантаження та можливим руйнування різального інструменту. Особливо це питання, враховуючи видатні потенціальні можливості та значну вартість, актуально для випадку використання інструменту з PcBN.

Метою цієї роботи було вивчення працездатності різального інструменту, оснащеного PcBN з високим вмістом кубічного нітриду бору, при точінні загартованої сталі з ударним навантаженням.

Методика досліджень

В даній роботі використовувались PcBN із високим (97 %) вмістом кубічного нітриду бору марки КМ 14/10 – композити cBN-Al та cBN-Si₃N₄. Для дослідження особливостей контактної взаємодії при різанні сталей високої твердості та вивчення ефективності застосування в лезовому інструменті із спечених заготовок, згідно ISO 1832-2004, виготовлено різальні пластини RNMN 070300, RNMN 12T300 із гострою різальною кромкою. Шорсткість робочих поверхонь пластин Ra 0,05–0,07.

Дослідження проводились при точінні зразків із загартованої сталі ХВГ (62–64 HRC). Для створення ударних навантажень на різальний інструмент на зразках були виготовленні повздовжні пази (6 шт.) розміром 10×10 мм. Твердість заготовок із загартованих сталей вимірювалась із використанням динамічного твердоміра ТДМ-1 (НПФ «Промприлад») і контролювалась у радіальному напрямку через кожні 2 мм знятого припуску. Лезова обробка проводилась на токарно-гвинторізному верстаті ФТ-11 із забезпеченням високої жорсткості кріплення оброблюваного зразка та інструменту. Різальні пластини встановлювались з механічним кріпленням у державці прохідного різця, що забезпечувало інструментам передній кут $\gamma = -10^\circ$, задній кут $\alpha = 10^\circ$, кут нахилу різальної кромки $\lambda = (0-50)^\circ$. Параметри шорсткості обробленої поверхні зразків вимірювались з використанням профілометра-профілографа мод. 170621 (стаціонарне обладнання) та профілометра мод. 170311 (вимірювання безпосередньо на верстаті).

Величина зносу інструменту після певного періоду роботи вимірювалась безпосередньо на верстаті за допомогою відеокамери, підключеної до ПК. Кінетику зносу інструментів також вивчали в режимі реального часу з урахуванням зміни складових сили різання, які вимірювали універсальним динамометром УДМ-1200. Одержані дані фіксували за допомогою апаратно-програмного комплексу з модулем вимірювання з АЦП та опрацьовували на персональному комп'ютері.

Дослідження проведено при точінні з глибиною різання $t = 0,2$ мм.

Робота виконувалася за три етапи з наступними режимами різання: перший етап – швидкість різання $v = 120$ м/хв., подача $S = 0,12$ мм/об; другий етап – швидкість різання $v = 200$ м/хв., подача $S = 0,12$ мм/об; – швидкість різання $v = 120$ м/хв; подача $S = 0,19$ мм/об; третій етап – $v = 120$ м/хв; $S = 0,38$ мм/об та $0,67$ мм/об.

Результати досліджень та їх обговорення

Вже після двох хвилин роботи спостерігається інтенсивний знос інструменту, оснащеного композитом cBN-Si₃N₄, з різальною пластиною RNMN 070300, встановленою з $\lambda = 0^\circ$, по задній поверхні ($h_3 = 0,16$ мм) та зміна геометричних параметрів його різальної кромки (рис. 1, б). При продовженні роботи протягом 4 та 6 хвилин інтенсивність зношування інструменту знижується (рис. 1, в, г), проте поступово збільшується величина та глибина зношених ділянок ($h_3 = 0,25$ мм). Поступово збільшуються сили різання, починають з'являтися вібрації та погіршується якість обробленої поверхні. Проводити подальшу обробку таким інструментом є недоцільним внаслідок збільшення ймовірності його сколювання та неможливості подальшого використання різальної пластини, яка повинна мати 8–12 робочих ділянок з кожної сторони. Суттєвих відмінностей у характері зношування інструменту при використанні композитів cBN-Si₃N₄ (рис. 1, б, г) та cBN-Al (рис. 1, д, е) не визначено (рис. 1).

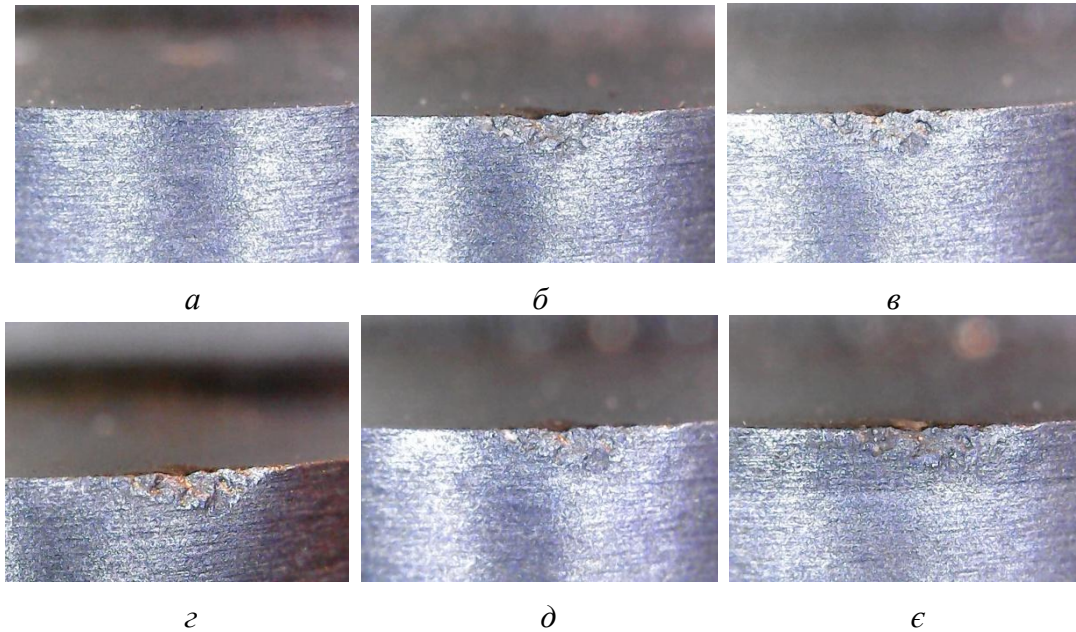


Рис. 1. Контактні ділянки по задній поверхні інструменту з $\lambda = 0^\circ$ (а – вихідний інструмент), оснащеного композитами $sBN-Si_3N_4$ (а–г), $sBN-Al$ (д–е), час точіння: б – 2 хв; в – 4 хв; г – 6 хв; д – 2 хв.; е – 6 хв

За аналогічних режимів різання проведено дослідження кінетики зношування інструменту з композитом $sBN-Si_3N_4$, що працює за косокутною схемою різання. На рис. 2 наведено зображення контактних ділянок по задній поверхні інструменту з різальною пластиною RNMN 12T300, встановленою з $\lambda = 50^\circ$. Після чотирьох хвилин точіння величина зносу по задній поверхні інструменту не перевищує $h_3 = 0,03$ мм, не спостерігалось суттєвого руйнування різальної кромки та викришувань інструменту (рис. 2, б).

При подальшій роботі протягом восьми хвилин процес точіння характеризується поступовим рівномірним зношуванням інструменту без суттєвих слідів руйнування (рис. 2, в). За таких умов процес точіння був стабільним, суттєвого погіршення якості обробленої поверхні не спостерігалось.

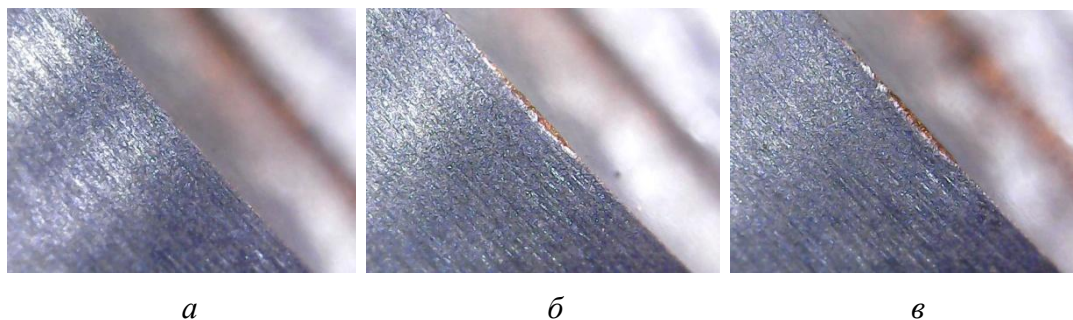


Рис. 2. Контактні ділянки по задній поверхні інструменту з $\lambda = 50^\circ$ (а – вихідний інструмент), оснащеного композитом $sBN-Si_3N_4$, час точіння: б – 4 хв.; в – 8 хв

Це свідчить про високу стійкість інструменту з РсВN при обробці з динамічним навантаженням за умов проведення процесу точіння за косокутною схемою різання (рис. 3).

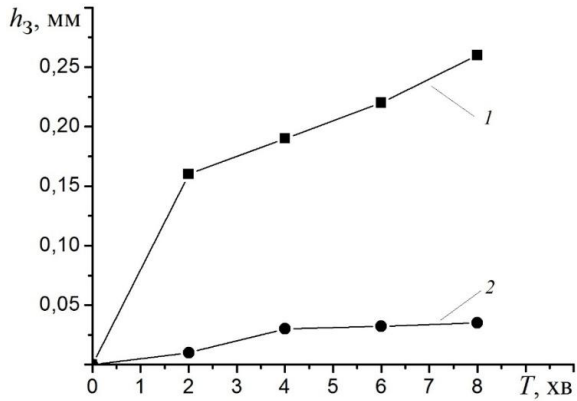


Рис. 3. Кінетика зносу інструменту з $\lambda = 0^\circ$ (1) та $\lambda = 50^\circ$ (2) по задній поверхні (h_3)

Як відомо із попередніх досліджень, із збільшенням швидкості різання при безударній безперервній обробці загартованих залізобуглецевих сталей інструментами, оснащеними РсВN, стійкість інструменту знижується [8].

Особливо інтенсифікується процес зношування інструменту при швидкості різання понад 150 м/хв. Це пов'язано з тим, що із збільшенням швидкості різання збільшується контактна температура, що інтенсифікує хімічну взаємодію між оброблюваним матеріалом та матеріалом інструменту у

зоні різання. У той же час, результати досліджень показують, що при використанні інструменту з РсВN, до складу якого входить велика кількість надтвердої складової, при обробці заготовок із загартованої сталі високої твердості збільшення швидкості різання вище 150 м/хв недоцільно у зв'язку з низькою стійкістю інструменту.

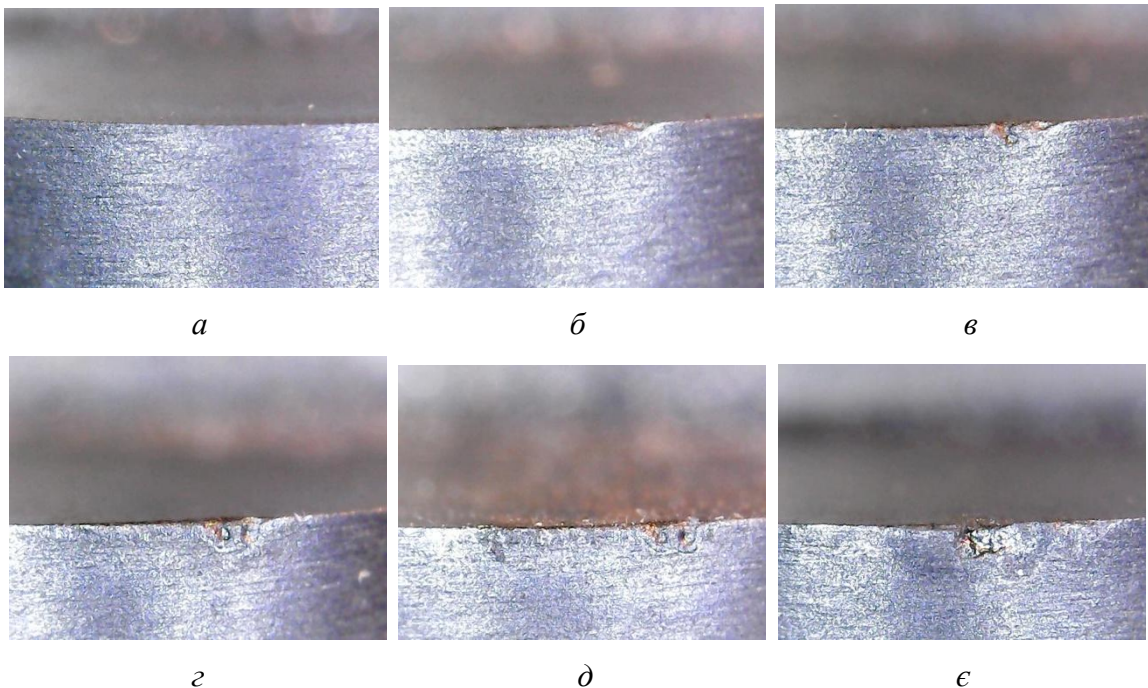


Рис. 4. Контактні ділянки по задній поверхні інструменту (а – вихідний інструмент) з $\lambda = 0^\circ$, оснащеного композитом сВN-Аl, (б–д – $v = 200$ м/хв; $S = 0,12$ мм/об; е – $v = 120$ м/хв; $S = 0,19$ мм/об), час точіння: б – 1,5 хв.; в – 3 хв.; г – 4,5 хв.; д – 6 хв.; е – 0,5 хв

Результати проведених досліджень показують, що в розглянутих умовах переривчастого точіння загартованих сталей з ударним навантаженням із зростанням швидкості різання

інтенсивність зношування інструменту з PcBN знижується. У порівнянні із точінням зі швидкістю різання 120 м/хв при підвищенні швидкості до 200 м/хв на перших хвиликах роботи не відбувається інтенсивне руйнування робочої ділянки інструмента. Після $1,5$ хвилин точіння величина зносу по задній поверхні інструменту становить $h_3 = 0,10 \text{ мм}$ (рис. 4).

У подальшому спостерігається повільне збільшення зношених ділянок інструменту із формуванням на передній поверхні кратера вздовж різальної кромки. Після 6 хвилин роботи величина зносу по задній поверхні інструменту становить $h_3 = 0,14 \text{ мм}$, а інструмент зберігає працездатність.

При роботі інструментом з $\lambda = 0^\circ$ з режимами різання $v = 120 \text{ м/хв}$; $S = 0,19 \text{ мм/об}$; $t = 0,2 \text{ мм}$ має місце інтенсифікація процесів зношування та руйнування його робочих ділянок. Це пов'язано із зростанням сил різання та збільшенням динамічного навантаження на контактні ділянки інструмента. Після 30 секунд роботи спостерігається сколювання різальної кромки та вихід з ладу інструменту (рис. 4, е).

Для оптимізації геометричних параметрів інструменту при косокутному точінні були проведені дослідження із різними кутами нахилу різальної кромки. Режими різання при варіюванні геометричними параметрами інструмента склали: $v = 120 \text{ м/хв}$; $t = 0,2 \text{ мм}$. Величина подачі в даних дослідженнях була $S = 0,19 \text{ мм/об}$, що забезпечувало суттєве підвищення продуктивності обробки. Як було показано вище, застосування інструменту з $\lambda = 0^\circ$ в таких умовах є неефективним.

На рис. 5 наведено зображення задньої поверхні різця інструмента із кутом нахилу різальної кромки $\lambda = 30^\circ$. Вже на перших хвиликах роботи спостерігається формування фаски зносу по задній поверхні із величиною $h_3 = 0,10\text{--}0,12 \text{ мм}$.

У подальшому швидкістю зношування інструменту досягає 40 мкм/хв . При цьому поступово погіршується якість обробленої поверхні.

При збільшенні величини кута нахилу різальної кромки до $\lambda = 40^\circ$ стійкість інструменту при роботі в умовах динамічного навантаження зростає. Це пов'язано із зменшенням впливу ударних навантажень на матеріал інструменту. Упродовж майже 5 хвилин роботи слідів зношування на контактних ділянках, як по передній так і по задній поверхнях інструменту, практично не спостерігається (рис. 6).

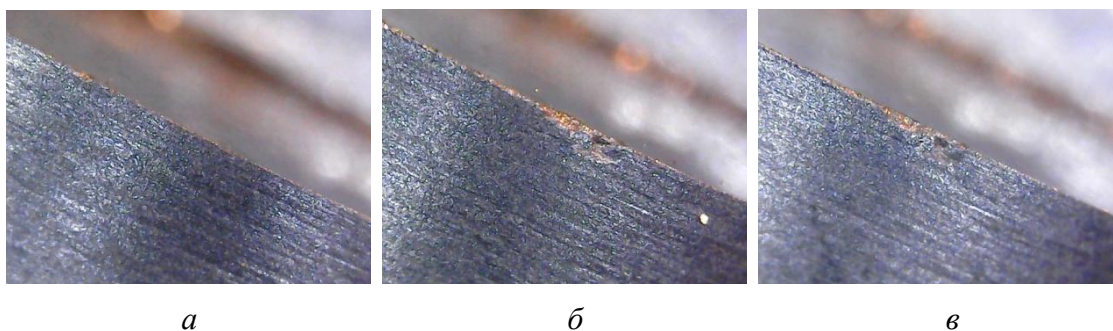


Рис. 5. Контактні ділянки по задній поверхні інструмента (а – вихідний інструмент) з $\lambda = 30^\circ$, оснащеного композитом cBN-Al , ($v = 120 \text{ м/хв}$; $S = 0,19 \text{ мм/об}$), час точіння: б – $1,5 \text{ хв.}$; в – 3 хв.

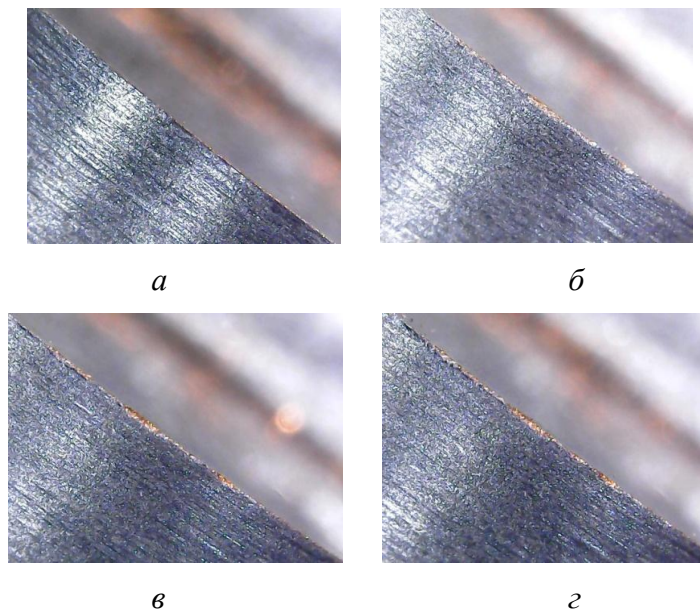


Рис. 6. Контактні ділянки по задній поверхні інструменту (а – вихідний інструмент) з $\lambda = 40^\circ$, оснащеного композитом cBN-Al, ($v = 120$ м/хв; $S = 0,19$ мм/об), час точіння: б – 1,5 хв.; в – 3 хв.; г – 6 хв

Величина ширини фаски зносу по задній поверхні після 4,5 хвилин роботи інструменту не перевищує $h_3 = 0,02$ мм. За таких умов забезпечується формування високої якості обробленої поверхні $Ra 0,5$.

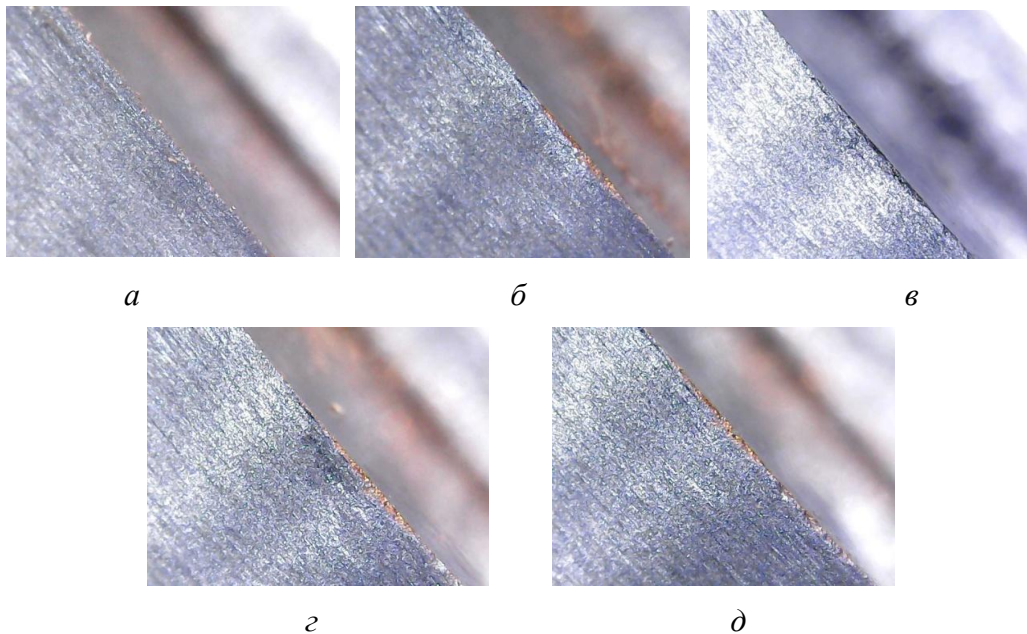


Рис. 7. Контактні ділянки по задній поверхні інструменту (а – вихідний інструмент) з $\lambda = 50^\circ$, оснащеного композитом cBN-Al, ($v = 120$ м/хв; $S = 0,19$ мм/об), час точіння: б – 1,5 хв.; в – 3 хв.; г – 4,5 хв.; д – 6 хв

У подальшому спостерігається процес мікрОВикришування матеріалу інструменту. Після 6 хвилин роботи на контактних поверхнях інструменту формуються невеликі зазубрини, зростання яких у подальшому може призвести до погіршення якості обробленої поверхні.

Враховуючи, що швидкість зношування інструменту на даному етапі становить 5,8 мкм/хв, стійкість інструменту із кутом нахилу різальної кромки $\lambda = 50^\circ$ при досягненні фаски зносу по задній поверхні $h_3 = 0,30$ мм може становити 40–50 хв.

Результати досліджень, наведені на рис. 8, показують, що при обробці з режимами $v = 120$ м/хв; $S = 0,19$ мм/об інструментом, оснащеним композитом cBN-Al, максимальну стійкість має інструмент із кутом нахилу різальної кромки $\lambda = 40^\circ$.

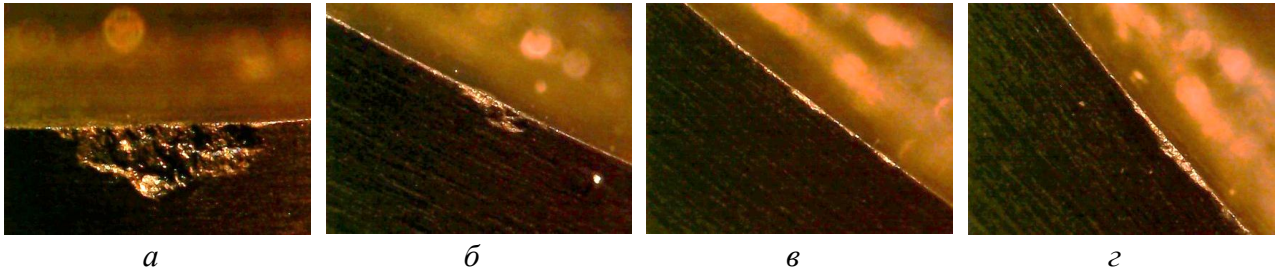


Рис. 8. Контактні ділянки по задній поверхні інструменту, оснащеного композитом cBN-Al, ($v = 120$ м/хв; $S = 0,19$ мм/об), час точіння 3 хв.: а – $\lambda = 0^\circ$; б – $\lambda = 30^\circ$; в – $\lambda = 40^\circ$; г – $\lambda = 50^\circ$

Для визначення технологічних можливостей косокутного інструменту, оснащеного RcBN, проведені його випробування із високими подачами.

Збільшення подачі до $S = 0,38$ мм/об при точінні інструментами із кутом нахилу $\lambda = 40^\circ$ та 50° не призводить до суттєвого зростання інтенсивності зношування інструменту. Після 3 хвилин роботи на контактних ділянках інструменту не спостерігається викришування, а різальна кромка залишається рівною (рис. 9, а, б). Це свідчить про високу стійкість інструментів при обробці у таких умовах.

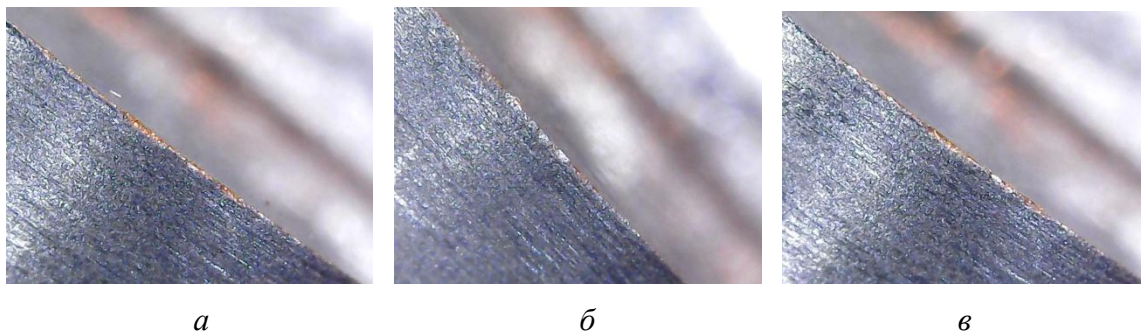


Рис. 9. Контактні ділянки по задній поверхні інструменту, оснащеного композитом cBN-Al, ($v = 120$ м/хв.; $S = 0,38$ мм/об), час точіння 3 хв. (а, б); $S = 0,67$ мм/об, час точіння 2 хв. (в): а, в – $\lambda = 40^\circ$, б – $\lambda = 50^\circ$

При збільшенні подачі до $S = 0,67$ мм/об при використанні інструменту із кутом нахилу $\lambda = 40^\circ$ при обробці на вищенаведених режимах різання не спостерігається катастрофічного руйнування різця (рис. 9, в). Обробка з такою подачею суттєво підвищує продуктивність обробки, проте призводить до збільшення висоти мікронерівностей на обробленій поверхні до $Ra 2,5$. Тому такі режими обробки можна встановлювати тільки при чорновій обробці.

Проведені дослідження показали, що при обробці високотвердих залізовуглецевих сплавів надтвердими полікристалічними матеріалами на основі cBN в умовах динамічного навантаження найбільш ефективними є застосування косокутного інструменту.

Для розглянутого випадку точіння загартованої сталі з ударним навантаженням інструментом, оснащеним PcBN, оптимальний кут нахилу різальної кромки λ становить 40° – максимальна стійкість інструменту складає 50–60 хвилин. При цьому, використання подач $S = 0,40\text{--}0,65$ мм/об забезпечує високу продуктивність обробки.

Висновки

1. При обробці загартованої сталі ХВГ в умовах динамічного навантаження ефективним є застосування косокутного інструменту, оснащеного надтвердими полікристалічними матеріалами з високим вмістом кубічного нітриду бору. Оптимальний кут нахилу різальної кромки, який забезпечує максимальну стійкість (50–60 хвилин) інструменту при точінні в таких умовах, становить 40° . Підвищення стійкості інструменту із PcBN за косокутної схеми різання досягається за рахунок зменшення піку ударного зусилля на різальну кромку інструменту в момент врізання.

2. При обробці інструментом, оснащеним круглою різальною пластиною, із кутом нахилу 40° та 50° використання високих подач ($S = 0,40\text{--}0,65$ мм/об) не призводить до суттєвого зростання інтенсивності зношування інструменту, що пов'язано із більш рівномірним розподілом навантаження по довшій різальній кромці, що знижує питомі сили різання, та більш ефективним відводом тепла стружкою за рахунок збільшення кількості видаленого матеріалу. Збільшення величини подачі при косокутній схемі обробки суттєво підвищує технологічні можливості інструменту.

3. Дослідження зносу інструментів із PcBN при обробці загартованої сталі ХВГ із динамічними навантаженнями, які працюють за косокутної схеми обробки, показало, що кінетика зносу характеризується двома фазами – на початковому етапі відбувається інтенсивне механічне зношування із формуванням фаски по задній поверхні та руйнуванням різальної кромки; – на другому етапі відбувається сповільнення інтенсивності зростання фаски зносу по задній поверхні та поява мікролунки по передній поверхні інструменту. Основними механізмами зношування інструментів із PcBN є абразивне та ударне мікроруйнування різальної кромки, термічно-хімічна взаємодія за підвищених температур у зоні різання (особливо при $v > 150$ м/хв), мікрівикришування зерен cBN на більш пізніх етапах експлуатації.

S. Klymenko, S. Klymenko, Yu. Melniychuk, M. Kopeykina, A. Chumak, A. Manokhin

V.M. Bakul Institute of Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine

PERFORMANCE OF A CUTTING TOOL EQUIPPED WITH COMPOSITES WITH HIGH cBN CONTENT IN TURNING HARDENED STEEL WITH IMPACT LOAD

The article investigates the performance of a cutting tool equipped with polycrystalline composites based on cubic boron nitride (PcBN) with a high cBN content (up to 97%) during turning of hardened steel HVG under impact loading conditions. Experimental studies of the influence of the geometric parameters of the tool, in particular the angle of inclination of the cutting edge ($\lambda = 0\text{--}50^\circ$), on the nature of tool wear, the stability of the cutting process and the quality of the machined surface were conducted. It was established that the use of tools with $\lambda = 40^\circ$ provides the highest stability (up to 50–60 min) and allows for effective machining at increased feeds ($S = 0,40\text{--}0,65$ mm/rev). The results obtained confirm the feasibility of using a PcBN tool with an oblique design for high-performance turning of hardened iron-carbon alloys under dynamic loading conditions.

Key words: PcBN, tool wear, hardened steel, interrupted cutting, oblique cutting, tool life, high feed turning, dynamic loading.

Література

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. 608 с.
2. Halpin T., Byrne G., Barry J., Ahearne E. The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining. *Proceed. of the Institution of Mech. Eng., Part B: J. of Eng. Manuf.* 2009. Vol. 223, N 8. P. 947–953..
3. Diniz A., Denilson M., Aldo B. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting *J. of Mat. Proc. Technol.* 2005. Vol. 159. P. 240–248.
4. De Godoy V. A. A., Diniz A. E. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools *J. of Mat. Proc. Technol.* 2011. – Vol. 211, N 6. P 1014–1025.
5. Kato H., Shintani K., Sumiya H. Cutting performance of a binder-less sintered cubic boron nitride tool in the high-speed milling of gray cast iron. *J. of Mat. Proc. Technol.* 2002. Vol. 127, N 2. P. 217–221.
6. Chou Y.K. Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting. *Wear.* 2003. Vol. 255. P. 1388–1394.
7. Chou Y.K., Evans C.J. Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting. *Wear.* 1999. Vol. 225–229. P. 234–245.
8. Клименко С.А., Манохин А.С., Копейкина М.Ю., Клименко С.Ан., Мельничук Ю.А., Чумак А.А. Высокопроизводительная чистовая лезвийная обработка деталей из сталей высокой твердости / под ред. С.А. Клименко. К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2018. 304 с.

Надійшла 15.08.25

References

1. Novikov, N.V., & Klimenko, S.A. (Eds.) (2014). *Instrumenty iz sverkhhtverdykh materialov [Tools made of super-hard materials]*. Mashinostroenie [in Russian].
2. Halpin, T., Byrne, G., Barry, J., Ahearne, E. (2009). The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining. *Proceed. of the Institution of Mech. Eng., Part B: J. of Eng. Manuf.*, 223(8), 947–953.
3. Diniz A., Denilson M., Aldo B. (2005). Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *J. of Mat. Proc. Technol.*, 159, 240–248.
4. De Godoy, V. A. A., Diniz, A. E. (2011). Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools. *J. of Mat. Proc. Technol.*, 211(6), 1014–1025.
5. Kato, H., Shintani, K., Sumiya, H. (2002). Cutting performance of a binder-less sintered cubic boron nitride tool in the high-speed milling of gray cast iron. *J. of Mat. Proc. Technol.*, 127(2), 217–221.
6. Chou, Y.K. (2003). Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting. *Wear*, 255, 1388–1394.
7. Chou, Y.K., & Evans, C.J. (1999). Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting. *Wear*, 225–229, 234–245.
8. Klimenko, S.A. (Ed.). (2018). *Vysokoproizvoditelnaia chistovaia lezviinaia obrabotka detalei iz stalei vysokoi tverdosti [High-performance finishing of high-hardness steel parts with cutting blades]*. ISM im. V.N. Bakulya NAN Ukrainy [in Russian].