УДК 621.91 DOI: 10.20998/2079-004X.2024.1(9).02

КЛИМЕНКО С. А., МАНОХІН А. С., КЛИМЕНКО С. Ан., ЧУМАК А. О., КОПЄЙКІНА М. Ю., МЕЛЬНІЙЧУК Ю. О.

СИЛОВІ ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ІНСТРУМЕНТАМИ, ОСНАЩЕНИМИ PcBN груп ВН, BL

Анотація. Проведений комплекс досліджень з вивчення силових особливостей обробки загартованої сталі інструментом, оснащеним PcBN групи ВН, отриманими з вихідних порошків cBN з покриттям зі сполук Ti та без покриття, а також PcBN групи BL. Визначені особливості процесу обробки показали, що значний вплив на величині складових сили різання має зношування різального інструменту – під час різання зі швидкістю 350 м/хв. процес обробки інструментом з PcBN групи ВН, отриманим з порошків з покриттям, у порівнянні з обробкою інструментом з PcBN групи ВН, отриманим з порошків без покриттям, характеризується на 15–20% меншою величиною складових сили різання. При швидкісній обробці в умовах динамічних ударних навантажень інструмент, оснащений PcBN групи ВН, отриманим з порошків cBN з покриттям, на відміну від різців з PcBN групи BL зберігає працездатність при подачі 0,38 мм/об – зазвичай робота з таких умовах призводить до крихкого руйнування інструменту, оснащеного PcBN групи BL, за рахунок сколювання окремих фрагментів різальної кромки з боку задньої поверхні, а на інструменті, оснащеному PcBN (5% Ti), спостерігаються окремі сліди мікровикришування. Отримані результати досліджень свідчать про можливість використання інструментів, оснащених PcBN групи ВН, спечених з порошків cBN з покриттям, в умовах швидкісного різання, що характерно для інструментів з PcBN групи BL, але при наявності динамічного навантаження.

Ключові слова: PcBN груп ВН, BL; покриття; складові сили різання; загартована сталь; знос інструменту.

KLYMENKO S. A., MANOKHIN A. S., KLYMENKO S. An., CHUMAK A. O., KOPIEIKINA M. Yu., MELNIYCHUK Yu. O.

STRENGTH FEATURES OF HARDENED STEEL TREATMENT BY TOOLS EQUIPPED WITH PcBN OF BH, BL GROUP

Resume . A set of studies has been carried out to investigate the power features of machining hardened steel with a tool equipped with PcBN of the VN group, obtained from the initial cBN powders coated with Ti and uncoated compounds, as well as PcBN of the BL group. The determined features of the machining process have shown that the wear of the cutting tool has a significant impact on the value of the cutting force components – when cutting at a speed of 350 m/min, the machining process with a tool of PcBN group BH obtained from coated powders, compared to machining with a tool of PcBN group BH obtained from uncoated powders, is characterized by a 15–20% lower value of the cutting force components. During high-speed machining under dynamic shock loads, a tool equipped with BH PcBN obtained from coated cBN powders, unlike cutters made of BL PcBN, retains its performance at a feed rate of 0, 38 mm/rev - usually, working under such conditions leads to brittle fracture of the tool equipped with PcBN of group BL due to chipping of individual fragments of the cutting edge from the back surface, and on the tool equipped with PcBN (5% Ti), there are separate traces of microchipping. The obtained research results indicate the possibility of using tools equipped with PcBN of group BH, sintered from coated cBN powders, under high-speed cutting conditions, which is typical for tools made of PcBN of group BL, but in the presence of dynamic loading.

Keywords: PcBN of BH, BL groups; coating; components of cutting force; hardened steel; tool wear.

Вступ. Вдосконалення технологій механічної обробки виробів із сучасних конструкційних матеріалів пов’язано з підвищенням продуктивності та зниженням вартості обробки, що обумовлює необхідність створення різальних інструментів з використанням високоефективних композитів інструментального призначення, таких як надтверді матеріали (PcBN) на основі кубічного нітриду бору (cBN) [1]. На теперішній час, відповідно до стандарту ISO 513-2014, композити на основі cBN діляться на три групи: – керамо-матричні композити зі змістом 45–65% cBN у зв’язці на основі керамічних сполук Ti, C, N, B, Al, O (група BL); – зі змістом 70–95% cBN, переважно у металевої зв’язці, на основі Co і Ni (група ВН); – з захисним покриттям (група ВС).

Фізико-механічні та експлуатаційні властивості матеріалів різальних інструментів багато у чому визначаються їх хімічним складом та структурою. При цьому дуже важливим є забезпечення розподілу надтвердих компонентів та елементів матриці, яка виконує роль зв’язки.

В різальних елементах на основі cBN, які використовуються для обробки загартованої сталі необхідно забезпечити високогомогенну мікроструктуру з низьким ступенем агломерації зерен cBN-cBN, що достатньо важко забезпечити оскільки методи механічного змішування завжди призводять до того, що деякі ділянки є неоднорідними за своєю природою [2]. Неоднорідна мікроструктура призводить до утворення ділянок, які або не містять сполучних добавок, або ділянок, де сполучні матеріали відокремлюються під час процесу спікання.

Одним з підходів, що дозволяє досягти рівномірного розподілу складових в структурі композитів, а також регулювати товщину прошарків зв’язки є попереднє нанесення на вихідні порошки надтвердих компонентів покриття, яке в процесі спікання матеріалу відіграє роль зв’язки, розподіленої на міжзеренних границях наповнювача.

Високу ефективність у якості покриттів довели сполуки Ti, а саме нітрид титану.

В [3] порошки cBN з покриттям TiN були отримані методом рідкофазного осадження. Зносостійкість різального інструменту зі створеного композиту PcBN приблизно в чотири рази більша, ніж у різального інструменту, виготовленого з використанням чистого порошку cBN.

В [4] також запропоновано використовувати порошки cBN із покриттям TiN, ширина межі розподілу – приблизно 50 нм. Мікроструктура композитів, виготовлених із порошків cBN, покритих TiN, є однорідною – TiN рівномірно розподілений у мікроструктурі. Автори відмічають підвищення твердості для композитів, отриманих із порошків з покриттям. Зразки, спечені з порошку cBN з покриттям, мають вищі значення міцності під час згинання, ніж зразки з порошку cBN без покриття.

© С. А. Клименко, АП.С. Манохін, С.Ан. Клименко, А.О. Чумак, М.Ю. Копєйкіна, Ю.О. Мельнійчук, 2024

Порівняльні дослідження ефективності інструментів, виготовлених з використанням порошку із покриттям, продемонстрували зниження інтенсивності їх зношування при високошвидкісному різанні загартованої сталі у порівнянні з інструментом, оснащеним композитами PcBN, отриманими з порошків без покриттів [5].

Дослідження зносостійкості інструментів, виготовлених із композитів на основі cBN із покриттям TiN, продемонстрували кращу зносостійкість по задній поверхні та меншу шорсткість поверхні заготовки при точінні загартованої сталі.

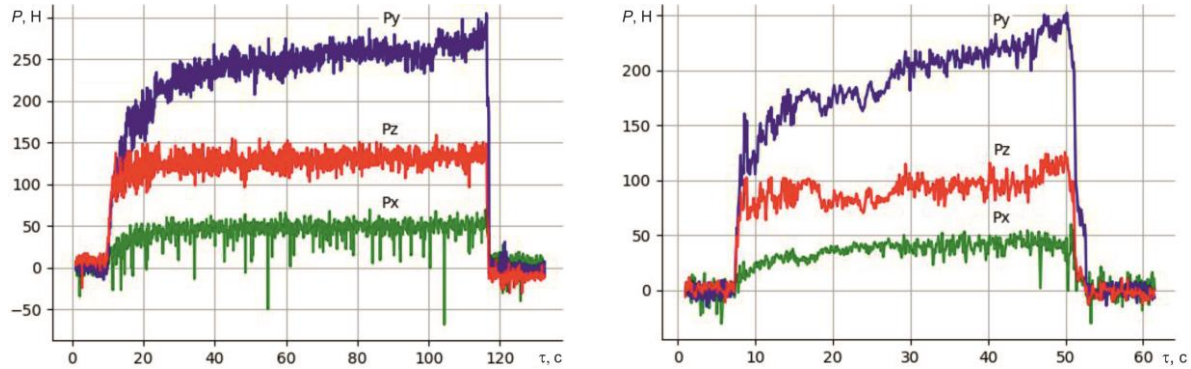
У той же час, аналіз технічної літератури свідчить про відсутність досліджень параметрів контактної взаємодії у зоні різання, а саме досліджень навантаження на різальному інструменті з PcBN, спеченими з порошків з покриттям, в різних умовах процесу різання загартованих сталей.

Мета дослідження. Вивчення складових сили різання під час точіння загартованої сталі в умовах стаціонарного різання і обробки з ударом та порівняння силових параметрів процесу різання для випадків використання інструментів, оснащених PcBN групи ВН, спечених з вихідних порошків з покриттям і без покриття, а також PcBN групи BL.

Методика. Покриття зі сполук Ti (кількість Ti – 3, 5 та 8 мас.% від маси порошку, склад покриття – TiN, TiB_2) наносилось на порошки cBN марки КМ 14/10 з використанням йодотранспортної реакції при температурах (1200–1300) К. З порошків з покриттям спечено композити PcBN (3% Ti), PcBN (5% Ti), PcBN (8% Ti) і виготовлено круглі пластини Ø 7 мм та товщиною 3,18 мм, які використані у різальному інструменті. Відповідно до стандарту ISO 513-2014, створений композит відноситься до групи ВН. Для порівняння використано інструменти, оснащені різальними пластинами аналогічного формо-розміру з композитів, спечених з порошків без покриття – PcBN групи ВН «борсиніт» і PcBN групи BL (60% cBN-35% TiC-5% Al).

Дослідження виконані інструментом з механічним кріпленням різальних пластин під час точіння загартованої сталі ХВГ (56–58 HRC) в умовах стаціонарного різання та обробки з ударом. Сили різання вимірювалися динамометром УДМ-600 із АЦП ADA-1406 при частоті опитувань по кожному каналу 1 кГц для різання без удару та 100 кГц при нестаціонарній обробці. Кожен прохід здійснювався гострими інструментами.

Експериментальні результати. На рис. 1 показаний приклад діаграми складових сили різання, зафіксованих за час одного проходу інструментом, оснащеним PcBN (3% Ti), при швидкостях різання 110 і 220 м/хв.



а *б*

Рис. 1. Складові сили різання при обробці інструментом з PcBN (3% Ti) при v = 110 м/хв. (*а*) і v = 220 м/хв. (*б*)

Порівняльна характеристика трибологічних властивостей композитів, якими оснащені інструменти, може бути отримана при аналізі діаграми на рис. 2, на якій наведено величини складових сили різання для інструментів із PcBN (3% Ti) і PcBN «борсиніт» при швидкості різання v = 110 м/хв, визначені після повного врізання інструменту (третя секунда різання), коли на робочих ділянках інструментів ще не сформовано початкові зони зношування.

Користуючись уявленнями щодо впливу коефіцієнту тертя на силу різання, можна дати оцінку величини даного параметра для зазначених умов обробки. З урахуванням виразу для апроксимації даних, отриманих при моделюванні контактної взаємодії в зоні різання загартованої сталі інструментом, оснащеним PcBN – Pz = 79,17+138,9f, наведеного в [6], визначимо коефіцієнти тертя для PcBN «борсиніт» і PcBN (3% Ti) – f = 0,34 та f = 0,21 відповідно. Дещо нижчі значення складових сили різання і коефіцієнта тертя у створеного композиту з найбільшою ймовірністю обумовлені наявністю в їх складі фаз TiN і TiB_2, окислення яких відбувається при температурах 400–700 ºС і супроводжується формуванням TiO_2 і B_2O_3, що володіють антифрикційними властивостями і є твердими змазками.

Зі збільшенням швидкості різання до 220 м/хв. значення коефіцієнту тертя для обох інструментів з PcBN становить вже f = 0,16–0,18. Низьке (менше 0,20) значення коефіцієнту тертя пояснюється тим, що при високошвидкісній обробці загартованої сталі на контактної ділянці стружка-інструмент з PcBN частково має місце тертя в умовах наявності рідкої фази [7]. Даний фактор має визначальний вплив на параметри процесу різання, вплив трибологічних властивостей конкретного інструментального матеріалу в даному випадку обмежений.

Зазначене пояснює близькі значення величин сил різання (рис. 3), що спостерігаються вже на 30-й секунді обробки для всіх досліджуваних композитів. Враховуючи значення довірчих інтервалів (Pz = ±12 Н, Py = ±14 Н), можна зробити висновок, що вплив трибологічних властивостей матеріалу інструменту на сили різання при високих швидкостях різання і після появи початкового зносу в умовах даного експерименту статистично не значимий.

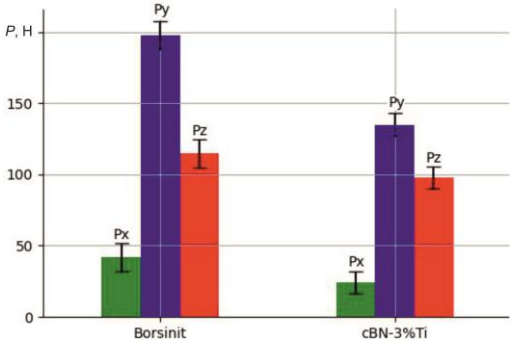


Рис. 2. Складові сили різання при обробці інструментами з PcBN(c) (3% Ti) и PcBN «борсиніт» у початковий момент різання (v = 110 м/хв.)

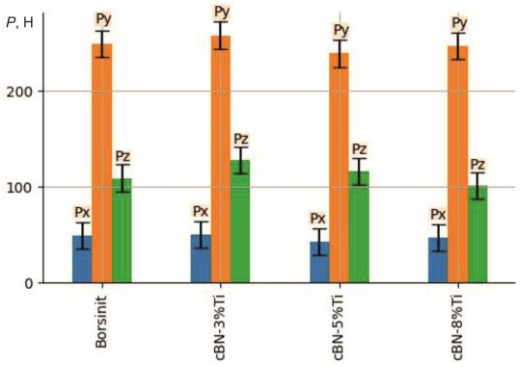
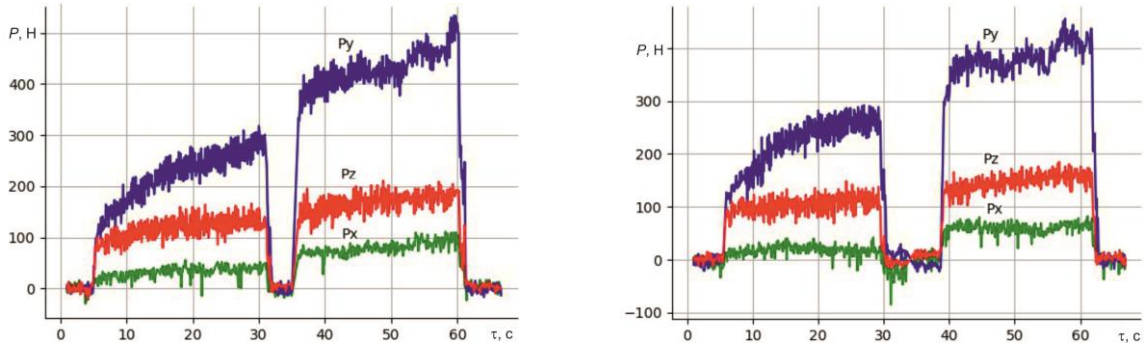


Рис. 3 – Складові сили різання при обробці інструментами, оснащеними оснащеними PcBN «борсиніт», PcBN (3% Ti), PcBN (5% Ti) PcBN (8% Ti) при 220 м/хв.

Додатково проведено тестування інструментів зі швидкістю різання 350 м/хв. (t = 0,2 мм, S = 0,1 мм/об). У цьому випадку інтенсивне зношування інструменту призводить до зростання складових сили різання, а нерівномірне зношування інструменту з PcBN «борсиніт» вже після 60 с різання обумовлює істотно вищі (на 15–20%, рис. 4) значення складових сили різання в порівнянні з інструментом, оснащеним PcBN (5% Ti).

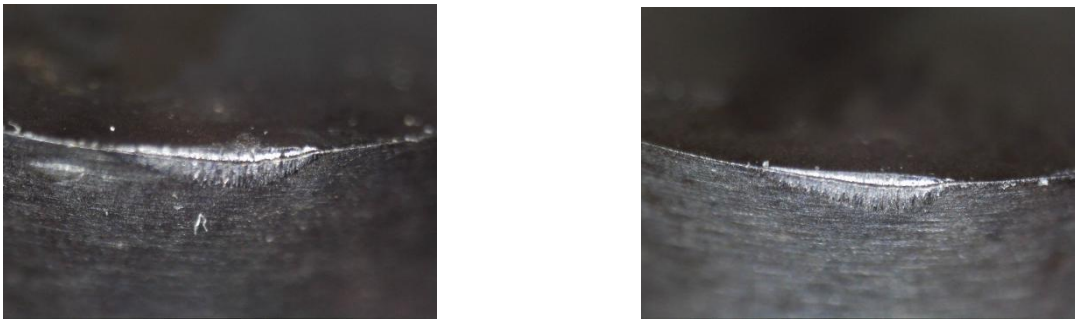


а *б*

Рис. 4 – Складові сили різання при обробці інструментами, оснащеними PcBN «борсиніт» (*а*) та PcBN (5% Ti) (*б*) (v = 350 м/хв. t = 0,2 мм, S = 0,1 мм/об)

Контактні ділянки інструментів, оснащених PcBN «борсиніт» і PcBN, отриманих з порошків з покриттям, після різання протягом 1 хв. 30 с при швидкості різання v = 350 м/хв. представлений на рис. 5. Максимальна величина фаски зносу на задній поверхні інструментів дорівнює 0,24 і 0,2 мм відповідно, що підтверджує більш високій опір зношуванню, характерний для інструментів, оснащених PcBN, отриманим з порошків з покриттям, в умовах високошвидкісного різання.

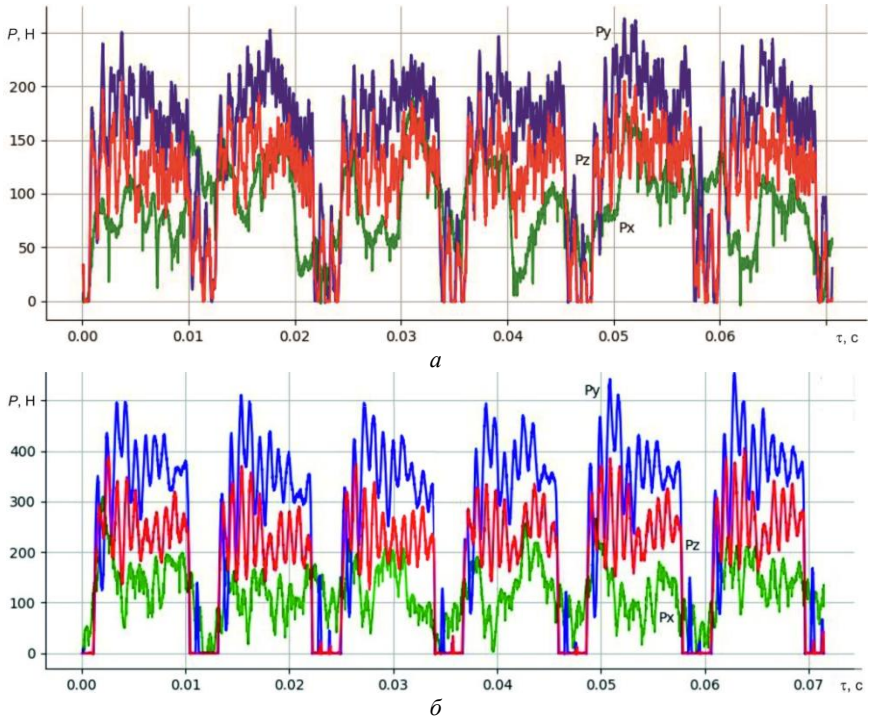
а *б*



в *г*

Рис. 5 – Контактні ділянки інструментів, оснащених PcBN «борсиніт» (*а*), PcBN (3% Ti) (*б*), PcBN (5% Ti) (*в*), PcBN (8% Ti) (*г*), після обробки при v = 350 м/хв. t = 0,2 мм, S = 0,1 мм/об

Сили різання в умовах динамічного навантаження інструментів розглядалися при обробці інструментами, оснащеними PcBN, отриманими з порошків з покриттям, і PcBN групи BL. Вивчався вплив динамічних імпульсних навантажень на характеристики сигналів, що відповідають складовим сили різання. У цих умовах ймовірність руйнування інструменту з пластинами із композиту PcBN групи BL дуже висока, тому для зміцнення інструменту на його різальної кромці виконувалася фаска шириною 0,2 мм і переднім кутом -20^0. Зовнішній вигляд імпульсів складових сили різання інструментом з такою геометрією при точінні з ударом (v = 220 м/хв.) показаний на фрагменті діаграми на рис. 6.



а

б

Рис. 6 – Сили різання при обробці різцем із композитом PcBN (5% Ti) при S = 0,38 мм/об (*а*), S = 0,1 мм/об (*б*)

Як показали тести, обробка з подачею 0,10 мм/об, що супроводжується імпульсами сил *Pz* і *Py* амплітудою до 200, 250 Н відбувається без руйнування зміцнених інструментів. Збільшення подачі до S = 0,38 мм/об зі зростанням амплітуди сил до 400, 550 Н викликає крихке руйнування інструменту, оснащеного PcBN-BL – з'являються сколи окремих фрагментів різальної кромки з боку задньої поверхні (рис. 7, *а*), інструмент з PcBN (5% Ti) при цьому зберігає працездатність при наявності на контактній поверхні окремих слідів мікровикришування (рис. 7, *б*).

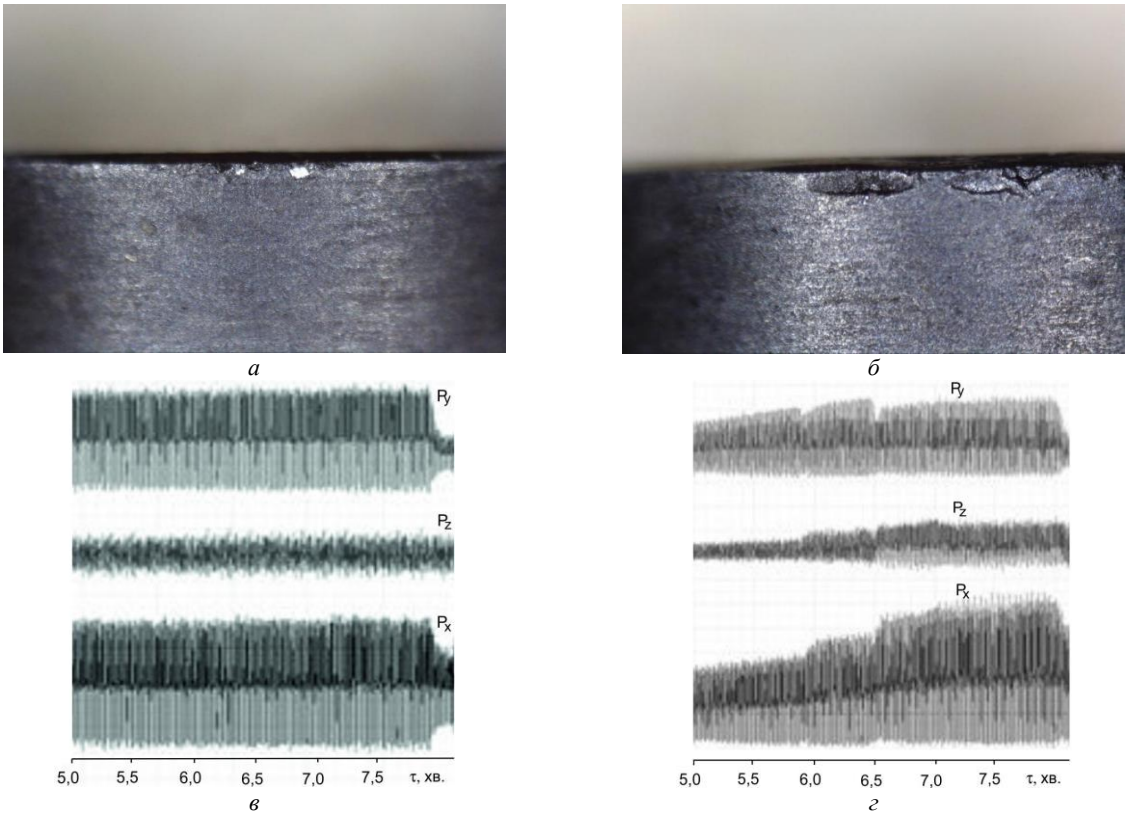


Рис. 7 – Контактні ділянки (*а*, *б*), загальний вигляд сигналів складових сили різання (*в*, *г*): інструмент, оснащений PcBN (5% Ti) (*а, в*), оснащений PcBN BL (*б, г*), (v = 220 м/хв., t = 0,2 мм, S = 0,38 мм/об)

На діаграмах показаний загальний вигляд сигналів складових сили різання при обробці вказаними інструментами, у випадках коли різання супроводжується руйнуванням різальної кромки різця (рис. 7, *в*) і під час точіння інструментом, різальна кромка якого залишається цілою (рис. 7, *г*).

Висновки. Визначені особливості процесу обробки загартованих сталей інструментами, оснащеними PcBN груп ВН і BL показали, що значний вплив на величині складових сили різання має зношування різального інструменту. Після 60 с різання зі швидкістю 350 м/хв. процес обробки інструментом з PcBN групи ВН, отриманим з порошків cBN з покриттям на основі сполук Ti, у порівнянні з обробкою інструментом з PcBN групи ВН «борсиніт», спеченим з порошків cBN без покриття, характеризується на 15–20% меншою величиною складових сили різання.

При швидкісній обробці в умовах динамічних ударних навантажень інструмент, оснащений PcBN групи ВН, отриманих з порошків cBN з покриттям, на відміну від різців з PcBN групи BL (зі зміцнювальною фаскою) зберігає працездатність при подачі 0,38 мм/об. При цьому робота в таких умовах призводить до крихкого руйнування інструменту, оснащеного PcBN групи BL, за рахунок сколювання окремих фрагментів різальної кромки з боку задньої поверхні, а на інструменті, оснащеному PcBN (5% Ti), спостерігаються окремі сліди мікровикришування.

Отримані результати досліджень свідчать про можливість використання інструментів, оснащених PcBN групи ВН, отриманих з порошків cBN з покриттям, в умовах високошвидкісного різання, що характерно для інструментів з PcBN групи BL, але при наявності динамічного навантаження.

Список літератури:

1. Клименко, С. А. Высокопроизводительная чистовая лезвийная обработка деталей из сталей высокой твердости / С.А. Клименко, А.С. Манохин, М.Ю. Копейкина, С.Ан. Клименко, Ю.А. Мельнийчук, А.А. Чумак; под ред. С.А. Клименко. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2018. – 304 с.

2. Umer, M. A. A sol–gel route to nanocrystalline TiN coated cubic boron nitride particles // M. A. Umer, H. S. Park, D. J. Lee, H. J. Ryu, S. H. Hong // J. of Alloys and Compounds. – 2011. – 509(41). – P. 9764–9769.

3. Lee, Y.-S. Improving wear resistance of cBN-based cutting tools using TiN coating on cBN powder surface / Y.-S. Lee, T.-W. Kang, S.-W. Shin, D.-W. Kim // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2021. – № 631. – P. 127758.

4. Umer, M. A. Polycrystalline cubic boron nitride sintered compacts prepared from nanocrystalline TiN coated cBN powder / M. A. Umer, P. H. Sub, D. J. Lee, H. J. Ryu, S. H. Hong // Mat. Sci. and Eng: A. – 2012. – 552. – P. 151–156.

5. Манохін, А. С. Інструмент, виготовленний із порошків кубічного нітриду бору з CVD покриттям / А. С. Манохін, Ю. О. Мельнійчук, С. А. Клименко, М. П. Семенько, Г. А. Петасюк, А. Г. Филипович,

С. Ан. Клименко, Ю. Е. Рижов // Інструментальне матеріалознавство : зб. наук. праць. – К. : ІНМ НАН України, 2023. – Вип. 26. – С. 305–314.
6. Манохін, А. С. Вплив коефіцієнту тертя на параметри механіки контактної взаємодії у зоні різання загартованої сталі інструментом із PcBN / А. С. Манохін, С. А. Клименко, А. О. Чумак, Ю. Е. Рижов // Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті : мат. 24-го Міжнарод. наук.-техн. семінару, 26–27 березня 2024 р., м. Київ. – К. : АТМ України, 2024. – С.
7. Manokhin, A. S. Tribology of cutting by tools equipped with cBN-based PSHM /A. S. Manokhin, S. A. Klimenko, M. Yu. Kopeikina, S. An. Klimenko, V. V. Poshchupkin, M. M. Lyakhovitskii // J. Superhard Mat. – 2014. – Vol. 36, № 2. – P. 124–135.

References (transliterated):

1. Klymenko, S. A., Manokhin, A. S., Kopieikina, M. Ю., Klymenko, S.An., Melniychuk, Yu. A., Chumak, A. A. *Vysokoproizvoditel'naya chistovaya lezviynaya obrabotka detaley iz staley vysokoy tverdosti.* ISM im. V.N. Bakulya NAN Ukrainy. 304.
2. Umer, M. A. , Park, H. S. , Lee, D. J. , Ryu, H. J. , Hong, S. H. A sol–gel route to nanocrystalline TiN coated cubic boron nitride particles. (2011). *J. of Alloys and Compounds*. 509(41). 9764–9769.
3. Lee, Y.-S., Kang, T.-W. , Shin, S.-W., Kim, D.-W. (2021).Improving wear resistance of cBN-based cutting tools using TiN coating on cBN powder surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 631. 127758.
4. Umer, M. A., Sub, P. H., Lee, D. J., Ryu, H. J., Hong, S. H. (2012). Polycrystalline cubic boron nitride sintered compacts prepared from nanocrystalline TiN coated cBN powder. *Mat. Sci. and Eng: A.* 552. 151–156.
5. Manokhin, A. S., Melniychuk, Yu. O., Klymenko, S. A., Semen'ko, M. P., Petasyuk, F. A., Fylypovych, A. G., Klymenko, S. An., Ryzhov Yu/ E. (2023). Instrument, vygotovlenyy iz poroshkov kubichnogo natrylu boru z CVD pokryttyam. *Instrumental'ne materialoznavstvo*. 26. 305–314.
6. Manokhin, A. S., Klymenko, S. A., Chumak, A. A, Ryzhov, Yu. E. (2024). *Vplyv koefitsientu tertya na parametry mekhaniki kontaktnoi vzaemodii u zoni rizannya zagartovanoi stali instrumentom is PcBN*. Suchasni pytannya vyrobnytstva v promyslovosti ta na transporti : mat. 24 Mizhnarod. nauk.-tekhn. seminaru. ATM Ukrainy.
7. Manokhin, A. S., Klimenko, S. A., Kopeikina, M. Yu., Klimenko, S. An., Poshchupkin, V. V., Lyakhovitskii, M. M. (2014). Tribology of cutting by tools equipped with cBN-based PSHM. *J. Superhard Mat.* 36 (2), 124–135.

Відомості про авторів / Information About the Authors

Клименко Сергій Анатолійович (Klymenko Sergii) – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України з наукової роботи, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. https://orcid.org/0000-0003-1464-3771. E-mail:atmu@meta.ua.

Манохін Андрій Сергійович (Manokhin Andrii) – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. https://orcid.org/0000-0003-1479-8482. E-mail: the.manokhin@gmail.com

Клименко Сергій Анатолійович (Klymenko Serhii) – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, пр. Перемоги, 37, Україна. https://orcid.org/0000-0002-7913-5519. E-mail: alcon1202@ukr.net

Чумак Анатолій Олександрович (Chumak Anatolii) – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. https://orcid.org/0000-0001-9054-3196. E-mail: chumak1826ar@gmail.com

Копєйкіна Марина Юріївна (Kopieikina Maryna) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. https:// orcid.org/0000-0002-5956-5503. E-mail: atmu1@meta.ua

Мельнійчук Юрій Олексійович (Melniychuk Yurii) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. https://orcid.org/0000-0003-4529-2775. E-mail: en22@i.ua