

Інструмент, порошки, пасти

УДК 621.9.025:621:941.1:004.942

Xin Li¹, Fei Teng¹, A. С. Манохін^{2,*}, Junjie Zhang^{1,**},
С. А. Клименко², Tao Sun¹, С. Ан. Клименко²,
Ю. О. Мельничук², О. О. Пасічний²

¹Center for Precision Engineering,

Harbin Institute of Technology, Harbin, P.R. China

²Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ, Україна

*the.manokhin@gmail.com

**zhjj505@gmail.com

Експериментальне дослідження та моделювання процесу переривчастого різання сталі AISI 52100 інструментом з PcBN

Наведено результати експериментальних досліджень особливостей переривчастого різання загартованої сталі AISI 52100 інструментом з PcBN та з використанням моделювання методом кінцевих елементів проаналізовано процес обробки інструментом з PcBN з урахуванням полікристалічної структури та складу композита. З метою виявлення впливу складу композита PcBN на сили різання та зношування інструмента проведено експерименти з різцями, оснащеними двома типами матеріалів з різним вмістом cBN. Отримані експериментальні результати демонструють, що під час обробки загартованої сталі AISI 52100 зі швидкістю різання 210 м/хв в умовах переривчастого різання інструмент з PcBN з низьким вмістом cBN має порівнянну ефективність з інструментом з високим вмістом cBN. Отримані результати свідчать про перспективність та високі експлуатаційні можливості інструментів, оснащених композитами PcBN різного складу, відповідно до конкретних умов експлуатації.

Ключові слова: інструмент з PcBN, швидкість різання, переривчасте різання, кінцево-елементне моделювання, склад композитів PcBN

ВСТУП

Деталі з перемінно-повторювальним профілем, такими як зубчасті колеса, деталі зі шпонковими пазами, лисками та іншими подібними елементами широко використовують у різноманітних сучасних машинах та обладнанні. Попит на такі вироби з загартованих сталей має тенденцію до постійного зростання з розвитком таких галузей промисловості, як вітроенер-

гетика, виробництво обладнання для видобування корисних копалин, металургійне та машинобудівне виробництво [1–7]. Швидкісну лезову обробку широко використовують у разі обробки виробів з особливими конструктивними елементами, але переривчастий характер різання під час їх обробки викликає динамічне ударне навантаження на інструмент, і, отже, вносить нестабільність в процес обробки. Зокрема, через інтенсивний механічний і тепловий вплив у зоні різання в умовах швидкісної обробки різальний інструмент більш схильний до зношування та мікроруйнування у разі переривчастого різання, ніж під час безперервного різання, що згодом має суттєвий вплив на ефективність усього процесу виготовлення такого виробу. Тому розробка надійного зносостійкого різального інструмента є ключовим фактором для забезпечення продуктивності обробки виробів з переривчастим профілем робочих поверхонь.

Полікристалічні композити на основі кубічного нітриду бору (PcBN) знайшли широке застосування в різальних інструментах у разі високопродуктивної якісної механічної обробки виробів з матеріалів високої твердості, зокрема, загартованих сталей, у тому числі під час переривчастого різання. У [8, 9] встановлено, що різальні інструменти з PcBN, які мають різний вміст cBN, характеризуються різною інтенсивністю зношування за безперервного та переривчастого оброблення. В [10] досліджено характеристики зношування інструментів з PcBN з різним вмістом cBN у разі безперервного та переривчастого різання за технологією високошвидкісної обробки сталі M50 і виявлено, що зношування інструмента завжди більш інтенсивне під час переривчастого різання, що також сильно залежить від типу інструмента з PcBN. Тому дуже важливо визначити найбільш ефективні області використання інструментів з PcBN в залежності від наявності в матеріалі надтвердої складової.

Відповідно до стандарту ISO 513-2012, композити на основі кубічного нітриду бору розділяються на три групи за різною кількістю cBN, а саме група BL з вмістом cBN 40–65 %¹ в матриці на основі керамічних сполук Ti, C, N, Si; група BH з вмістом cBN 70–90 % переважно в металевій матриці на основі Co, Ni, Ti, Al; група BC – композит із захисним покриттям. Різні групи PcBN мають різне застосування в інструментах у разі обробки загартованих сталей, чавунів, жароміцних сплавів та інших важкооброблюваних сталей та сплавів у широкому діапазоні швидкостей різання. Зокрема, PcBN з високим вмістом бору (BH) мають високу теплопровідність і високу в'язкість руйнування, що робить їх придатними для оснащення інструментів для напівчистої обробки чавунів і загартованих сталей. PcBN з низьким (BL) вмістом бору мають нижчу, у порівнянні з попереднім типом композитів, теплопровідність, міцність і твердість, але вони ефективні для чистої обробки загартованої сталі. BC PcBN особливо підвищують стійкість інструмента до кратерного зносу на передній поверхні під дією високої температури [11] та, відповідно, за високої швидкості різання. Отже, перспективність використання інструментів, оснащених різними групами PcBN, пов'язана з матеріалом оброблюваного виробу, видом операції обробки, режимами різання, вимогами до якості виробу.

Фізико-механічні властивості PcBN різних груп визначаються розміром і вмістом частинок cBN, типом зв'язки (матриці). Як правило, різальні інструменти з BH-PcBN, які мають більш високі показники міцності, краще працю-

¹ Тут і далі вміст складу композитів наведено в % (за об'ємом).

ють в умовах переривчастого різання, ніж інструменти, оснащені BL-PcBN, оскільки переривчасте різання висуває високі вимоги до міцності композита, яка визначається станом міжфазних та міжзеренних зв'язків компонентів зв'язки між собою та з cBN. У [12] продемонстровано, що різальний інструмент з ВН- і BL-PcBN придатний для роботи в умовах переривчастого різання і безперервного точіння відповідно. В [13] повідомлено, що різальний інструмент з PcBN з 90 % cBN зі зв'язкою Co-Ni має найбільшу працездатність під час швидкісного різання загартованої сталі AISI 4340 (52 HRC), ніж два інших інструмента з 50 % cBN зі зв'язкою TiC і 65 % cBN зі зв'язкою TiCN. Водночас у [14] виявлено, що різальний інструмент із BL-PcBN показує набагато більшу стійкість під час токарної обробки загартованої сталі, ніж інструмент із ВН-PcBN. В [15] продемонстровано переваги різального інструмента, оснащеного BL-PcBN, під час чистовій обробці сплавів EN31, M2 і SKD11 перед інструментом із ВН-PcBN.

Оскільки інструменти із BL-PcBN характеризуються більшою ефективністю у разі швидкісної обробки загартованих сталей, актуальними є дослідження, спрямовані на визначення їхньої працездатності саме в умовах швидкісного різання із ударним навантаженням.

Зношування і руйнування різальних інструментів тісно пов'язані зі значенням сили різання, яку визначають не тільки за параметрами процесу обробки, але і за особливостями використаного в інструменті робочого композита. Можна припустити, що для різальних інструментів із PcBN, що використовують в умовах переривчастого різання з ударним навантаженням, розподіл напружень на структурних компонентах композита є одним з ключових факторів, що впливають на стійкість інструмента. За такої умови напружено-деформовані характеристики всередині робочого елемента з композита в інструменті повинні бути збалансовані. Наприклад, більш дрібний розмір або більш рівномірний розподіл частинок cBN може забезпечити високу міцність композита BL-PcBN, але це потребує ретельної перевірки напружено-деформованих характеристик всередині робочого елемента інструмента в процесі різання.

Таки дослідження можуть бути ефективно виконані з використанням моделювання методом скінченних елементів [16–18]. Однак попередні роботи із моделювання процесу швидкісного різання, в основному, були зосереджені на особливостях деформування матеріалу заготовки, а різальний інструмент задають у більшості випадків як абсолютно жорстке тіло, що унеможливує виявлення напружено-деформованих характеристик частинок cBN всередині робочого елемента інструмента. Отже, для наближення результатів дослідження процесу переривчастого різання інструментом з PcBN до реального стану необхідно проводити скінченно-елементне моделювання з урахуванням наявності та розподілу частинок cBN в полікристалічній структурі PcBN.

В даній роботі проведено експериментальне дослідження та виконано моделювання процесу переривчастого швидкісного різання загартованої сталі AISI 52100 різальним інструментом, оснащеним PcBN, з урахування впливу полікристалічної структури інструментального композита на показники процесу різання – сили різання, профіль стружки, знос інструмента.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експерименти виконано на токарному верстаті ФТ11 з максимальною потужністю 11 кВт і максимальною швидкістю обертання шпинделя 1600 об/хв. Обробляли заготовку з загартованої сталі AISI 52100 твердістю 60–62 HRC.

Обробку виконували інструментами, оснащеними PcBN груп ВН та BL, які розроблено для обробки різанням загартованих сталей. В табл. 1 і 2 наведено склади і властивості PcBN.

Таблиця 1. Склад PcBN

Група	Склад, %			
	cBN	TiC	Si ₃ N ₄	Al
ВН	96,4	–	3,6	–
BL	60	35	–	5

Таблиця 2. Механічні властивості PcBN

Група	HV ₁₀ , ГПа	E, ГПа	K _{IC} , МПа·м ^{1/2}	ρ, кг/м ³
ВН	36,2±2,6	860	11,7±1,5	3,465±0,005
BL	28,3±1,2	600	5,8±0,6	3,935±0,005

Для реалізації переривчастого різання на заготовці виконано шість поздовжніх канавок шириною 10 мм та глибиною 10 мм (рис. 1). Швидкість різання під час обробки (подача $S = 0,1$ мм/об, глибина різання $t = 0,2$ мм): $v = 113$ м/хв для інструмента з PcBN групи ВН, $v = 210$ м/хв для інструмента з PcBN групи BL.

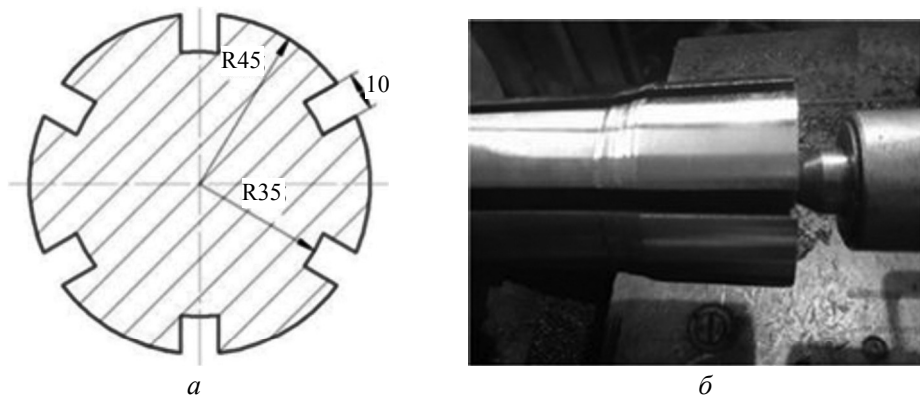


Рис. 1. Поперечний переріз (а) заготовки та її установка на верстаті (б).

Сили різання вимірювали з використанням динамометра УДМ-600 з АЦП ADA-1406. Частота збору даних (частота дискретизації) для кожного з трьох каналів становила 100 кГц, що дозволяло системі реєструвати ударні імпульси під час переривчастого різання заготовок з канавками в широкому діапазоні частот обертання.

Використано різцеву державку TRDNN 2525M07 з різальною пластиною RNMN 070400T. Кріплення пластини здійснювали механічним способом. Геометричні параметри інструмента: ширина фаски $b_g = 0,2$ мм, кут фаски $g_f = 20^\circ$, передній кут $\gamma = -10^\circ$, задній кут $\alpha = 10^\circ$.

Зовнішній вид різальної кромки інструмента та профіль стружки оцінювали за допомогою оптичного мікроскопа зі збільшенням $\times 100$.

Зокрема, PcBN групи ВН є виробом під торговою маркою “Borsinit”, а групи BL – дослідний композит, зі структурою і хімічним складом, які оптимізовані, виходячи з вимоги підвищення механічних властивостей матеріалу.

На рис. 2 наведено SEM-зображення та результати EDX-аналізу PcBN груп BL та BH. Видно (див. рис. 2, *a*), що в структурі PcBN групи BL присутні зерна частинок керамічної зв'язки з чітко вираженими границями (світлий колір). Спостерігали значний вміст Ti та C, що відповідає наявності агломерованої фази TiC , яка локальними ділянками оточує зерна cBN , що обумовлює рівномірний розподіл складових у внутрішньої мікроструктурі BL композита (рис. 2, *б*). Зернистість порошоків, які використовували під час спікання композита, складала $7/5$ мкм для cBN та $5/3$ мкм для TiC .

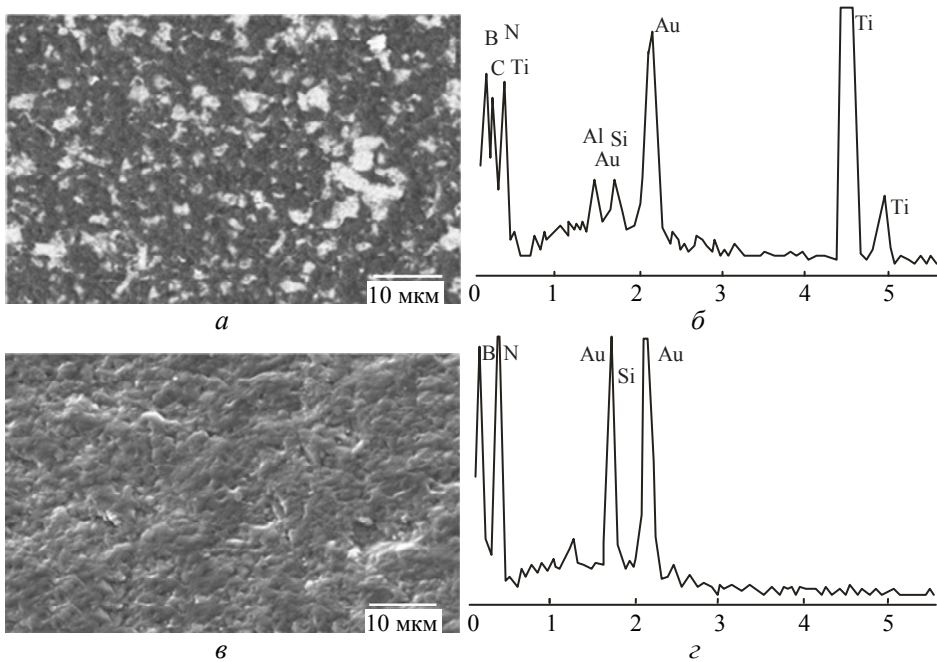


Рис. 2. SEM-зображення структури (*a*, *в*) і результати EDX-аналізу (*б*, *з*) PcBN групи BL (*a*, *б*) і групи BH (*в*, *з*).

На відміну від PcBN групи BL, структура BH-композита складається з набагато більш гладких зерен, які досить складно відокремити (рис. 2, *в*). У хімічному складі BH-композита можна визначити Si (рис. 2, *з*), що відповідає фазі Si_3N_4 , яка знаходиться між зернами cBN , вихідна зернистість яких становила $7/5$ мкм. Щільна структура PcBN групи BH є результатом дії надзвичайно високого ($7,7$ ГПа) тиску, що застосовують в процесі виготовлення матеріалу.

На рис. 3 представлена скінченно-елементна модель процесу різання, яка включає пластично-деформівну заготовку зі сталі AISI 52100 та пружно-деформівний інструмент з PcBN . Для врахування механічних властивостей матеріалу робочої частини інструмента в моделі прийнято алгоритм перетворення системи координат, в якому різальний інструмент закріплений, а заготовці надано вектор швидкості, що відповідає швидкісному різанню [19]. Для опису пружно-пластичного деформування загартованої сталі AISI 52100 було використано рівняння Джонсона-Кука (J-C), а критерій пошкоджуваності J-C було прийнято для забезпечення умов досягнення відриву матеріалу та утворення стружки [20–22].

Оскільки PcBN є типовим полікристалічним матеріалом (рис. 4, *a*), для опису його кристалічної структури було використано діаграму Вороного [23].

За такої умови частинки cBN представлені нерегулярними багатокутниками з випадковими розмірами, а компонента, що зв'язує систему, розподілена між цими частинками (рис. 4, б). Між контактними ділянками частинок cBN та зв'язки має місце когезійна взаємодія, рівень якої обумовлює можливість зародження та поширення тріщин [24–27]. В даному випадку під час створення моделі інструмента розглядали зерна розміром 5–7 мкм.

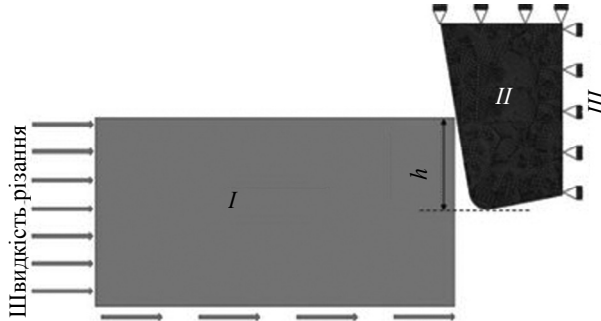


Рис. 3. Вихідна скінченно-елементна модель процесу різання: *I* – заготовка; *II* – інструмент; *III* – нерухома опора; *h* – глибина різання.

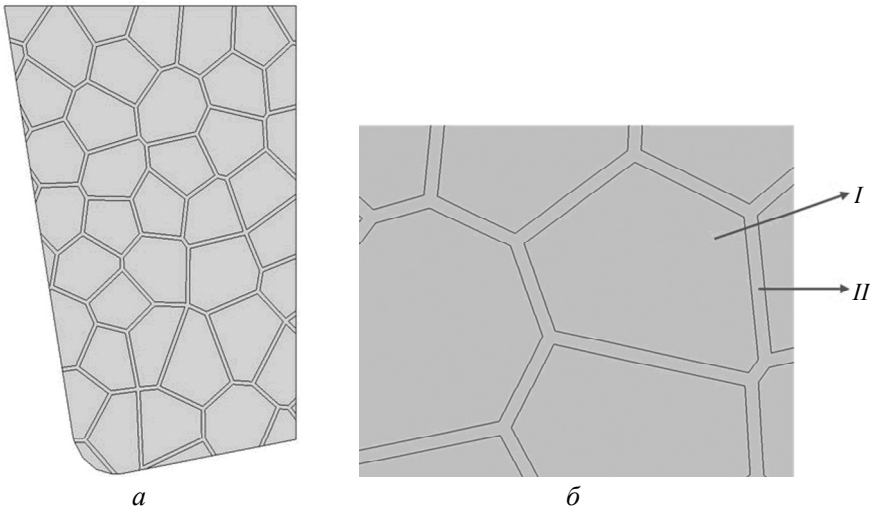


Рис. 4. 2D модель структури PcBN (*a*); збільшена структурна ділянка композита (*б*): *I* – частинка cBN; *II* – зв'язка.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

В ході досліджень було проведено експеримент з переривчастого різання загартованої сталі AISI 52100 інструментом, оснащеним PcBN групи ВН, метою якого було визначення показників процесу різання. На рис. 5, *a* наведено графіки зміни складових сили різання з часом, з яких видно, що усі складові мають періодичний характер. Крім того, розподіл кожної складової сили різання приблизно однаковий для кожного циклу, що вказує на те, що процес переривчастого різання складається з декількох незалежних безперервних подій.

Для з'ясування цього питання, було проведено 2D моделювання безперервного різання з тими самими умовами. На рис. 5, *б* представлено графік зміни тангенціальної сили різання P_z з часом, який показує наявність коливання сили навколо постійного значення, яке збігається з середнім експерименталь-

ним значенням. На рис. 5 видно, що постійна сила різання P_z , отримана при моделюванні, становить 150 Н (відхилення від експериментального значення 142 Н – 5,6 %), що свідчить про високу точність прогнозування за створеною моделлю різання з використанням інструмента з PcBN. На рис. 5, б видно, що змодельована сила різання P_z лінійно зростає на початку процесу різання, що свідчить про те, що відбувається лише пружне деформування у контактній зоні – сила різання різко зменшується, коли прикладене контактне навантаження в зоні різання досягає рівня, за якого напруження в матеріалі заготовки перевищує напруження за фон Мізесом.

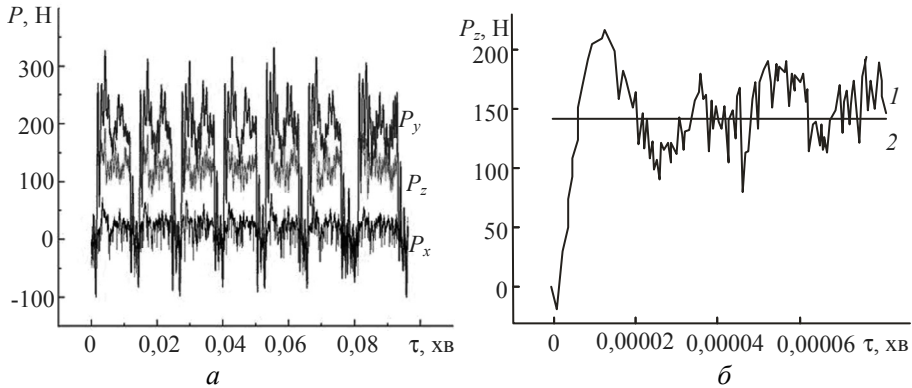


Рис. 5. Експериментальні залежності складових сили різання від часу переривчастого різання (а), зміна модельного значення тангенціальної сили різання P_z в межах одного циклу (б): модельне (1) і середнє (2) значення.

На рис. 6, а представлено профіль стружки, отриманий в результаті експерименту з переривчастого різання сталі AISI 52100 інструментом з PcBN групи ВН. Змодельована конфігурація стружки у зоні різання, яка відображає її схожість з отриманою в експерименті, наведено на рис. 6, б.

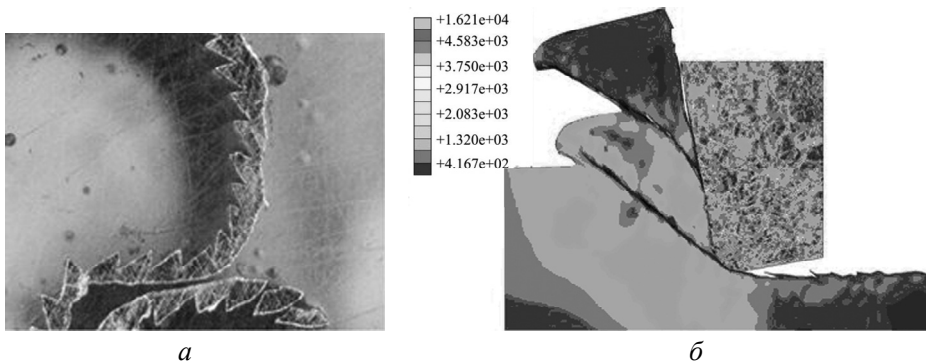


Рис. 6. Форма стружки в експерименті (а) та за результатом моделювання (б) у разі різання сталі AISI 52100 інструментом з PcBN.

Коливання сили різання тісно корелюють з процесами утворення стружки. Зокрема, кожному елементу такої стружки відповідає гребінь і западина хвилі. У разі утворення кожного елемента стружки сила різання різко змінюється, значно зменшуючись після його формування (рис. 5, б).

На рис. 7 представлено результати моделювання утворення стружки, які узгоджуються з уявленнями щодо процесу з позицій розвитку адіабатичного

зсуву. Формування суглобистої стружки в загальному випадку включає декілька етапів: 1 – в зоні зсуву поблизу різальної кромки інструмента утворюються дрібні тріщини; 2 – деформований фрагмент припуску відокремлюється від оброблюваної поверхні і починає формуватися рівномірно зрізана стружка; 3 – повільно формуються нові елементи суглобистої стружки; 4 – рівномірно зрізана стружка повністю сформована.

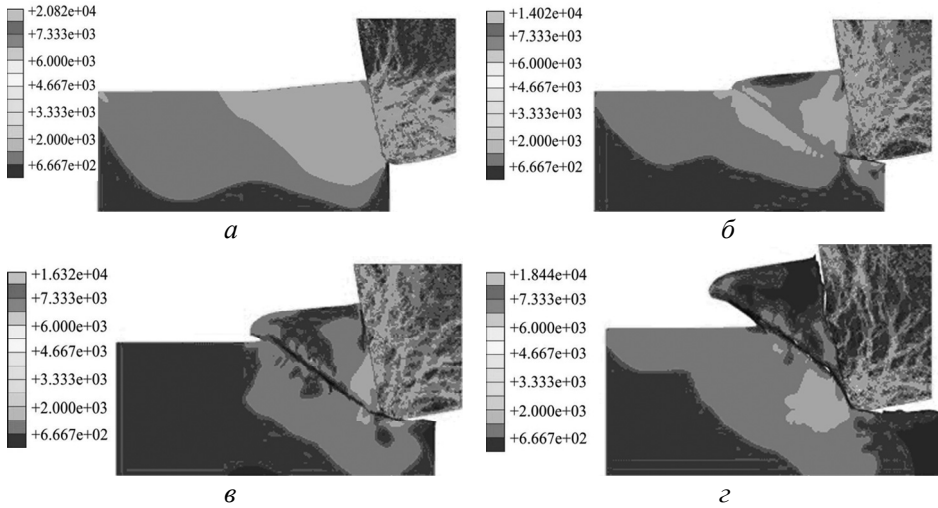


Рис. 7. Результати моделювання процесу формування суглобистої стружки, шлях різання: *a* – 0,011 мм; *б* – 0,020 мм; *в* – 0,030 мм; *г* – 0,047 мм.

Порівнюючи експериментально отримані криві сила різання–час різання та результати моделювання, можна зробити висновок, що наявність пікових значень та коливання сили різання на кожному циклі різання з ударними імпульсами узгоджується з утворенням елементів суглобистої стружки [28].

На рис. 8, *a* представлено робочу ділянку різальної кромки інструмента з PcBN групи ВН з елементами руйнування після проведення експерименту. На рис. 8, *б* показано змодельований розподіл напружень в інструменті. Хоча створена модель не може змоделювати руйнування інструмента з PcBN через обмежений розмір досліджуваної ділянки, представлені дані з розподілу напружень в інструменті можуть бути використані під час обговорення причин викришування робочої ділянки інструмента.

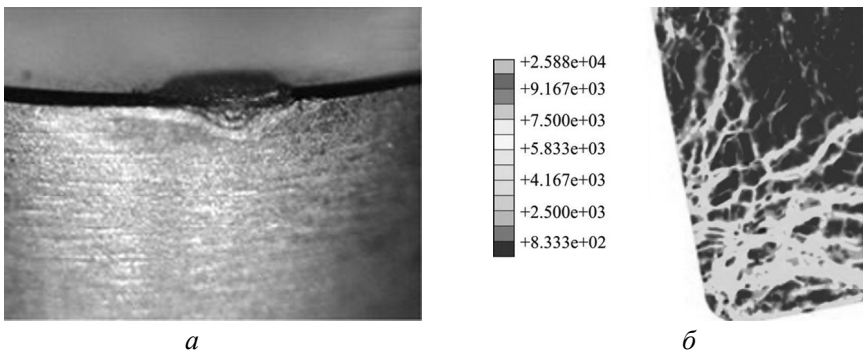


Рис. 8. Робоча ділянка різальної кромки інструмента (*a*) та розподіл напружень (*б*) в інструменті з PcBN групи ВН.

Наведені дані свідчать про концентрацію напружень поблизу різальної кромки інструмента, а також поширення напружень через межу поділу між зернами cBN. Також спостерігали значну концентрацію напружень на передній поверхні різального інструмента, викликану ковзанням стружки. Тобто можна зробити висновок, що в даній моделі окремі зерна PcBN виступають концентраторами напружень навіть в умовах дрібнозернистої рівномірної структури композита. В реальних композитах зі зв'язкою та чітко вираженими міжфазними границями це може впливати на появу зон концентрації напружень в ще більш значній мірі.

Для виявлення впливу складу композита на характер руйнування та зношування інструмента в умовах швидкісного переривчастого різання проведено експеримент з використанням інструмента PcBN групи BL. На рис. 9 наведено графіки залежності складових сили різання від часу переривчастого різання інструментами з PcBN груп BL і BH, отримані за швидкості різання $v = 210$ м/хв. Видно, що всі компоненти сили різання для обох інструментів мають періодичний характер через переривчастий характер різання. Зміна кожної складової сили різання в трьох напрямках для одного і того ж інструмента є послідовною, однак сили для двох інструментів, що розглядали, значно відрізняються за значеннями – зокрема, тангенціальна сила різання P_z для інструмента з PcBN групи BL значно менша у порівнянні з випадком обробки інструментом з PcBN групи BH. Слід зазначити, що радіальне зусилля P_y для інструмента з PcBN групи BH вище, ніж для інструмента з PcBN групи BL. Водночас осьове зусилля і радіальне зусилля для інструмента з PcBN групи BL практично однакові.

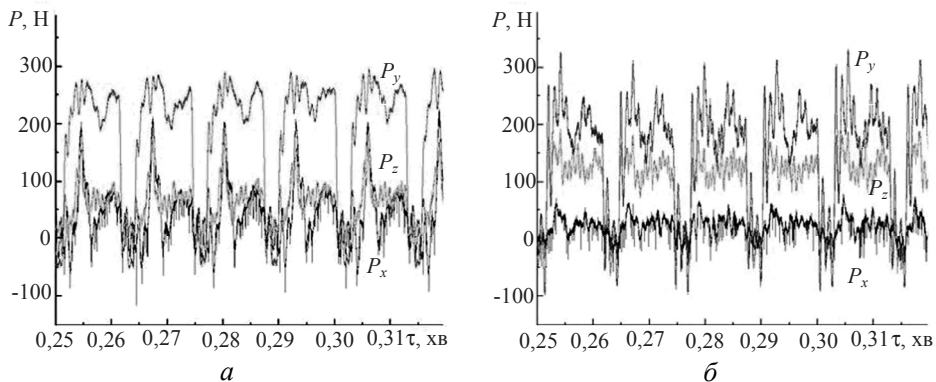


Рис. 9. Експериментальні залежності складових сили різання від часу переривчастого різання інструментами з PcBN груп BL (а) і BH (б) ($v = 210$ м/хв).

Результати порівняльної оцінки кінетики зношування для двох інструментів за швидкісного різання ($v = 210$ м/хв) в умовах імпульсних навантажень приведені на рис. 10. Видно, що обидва інструменти досягають стабільної стадії зносу, коли час різання становить 2 хв. Можна відзначити, що на цьому етапі роботи досліджувані інструменти з PcBN груп BL і BH мають близьку інтенсивність зношування. Хоча за міцністю композити з меншим вмістом cBN суттєво поступаються PcBN групи BH, зменшення сили різання у разі обробки зі швидкістю 210 м/хв сприяє створенню умов, в яких руйнування оснащеного ним інструмента не спостерігають.

Одночасно здатність композита групи BL протистояти високотемпературним явищам, що призводять до швидкого зношування в даних умовах обумо-

влює їхню ефективність. В цілому результати даного тесту показали можливість застосування інструментів з PcBN групи BL навіть під час різання з ударом, що обумовлює перспективність подальшої оптимізації композитів такого типу, у тому числі, із застосуванням продемонстрованого підходу до моделювання, в якому враховано вплив структурної будови матеріалу композита на значення і розподіл напружень в інструменті в процесі його експлуатації матеріалі.

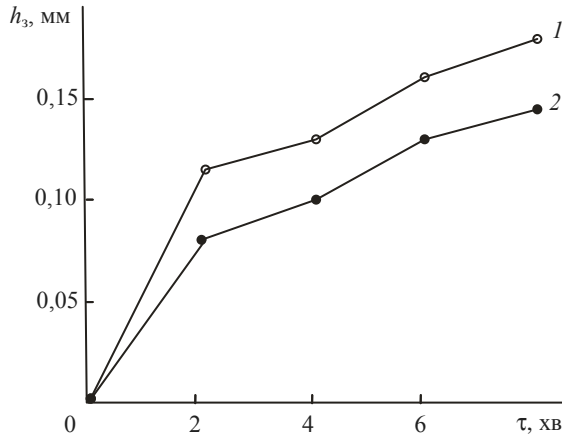


Рис. 10. Кінетика зносу інструментів з PcBN груп BL (1) і BH (2) в умовах переривчастого різання сталі AISI 52100.

ВИСНОВКИ

Експериментальні дослідження та моделювання методом скінченних елементів переривчастого різання загартованої сталі AISI 52100 інструментами з PcBN двох типів допомогли створити модель інструмента, яка враховує можливість деформування його робочого елемента інструмента з урахуванням полікристалічної структури композита. Ефективність моделі перевірено шляхом порівняння розрахованої сили різання з експериментально отриманою, а також порівнянням морфології реальної стружки з морфологією стружки, яка формується в результаті моделювання.

Результати експерименту та скінченно-елементного моделювання демонструють, що утворення суглобистої стружки є однією з причин коливання сили різання. Моделювання деформівного різального інструмента виявило наявність концентрації напружень на зернах cBN.

Встановлено, що PcBN групи BL (вміст cBN – 60 %) має рівномірний розподіл керамічної матриці, що створює структуру, яка обумовлює ефективність використання композита в різальному інструменті в умовах обробки загартованої сталі AISI 52100 з ударом за швидкості різання 210 м/хв.

ПОДЯКА

Автори висловлюють ширю вдячність за підтримку Національному фонду природничих наук Китаю (52275416).

Xin Li¹, Fei Teng¹, A. S. Manokhin², Junjie Zhang¹,
S. A. Klymenko², Tao Sun¹, S. An. Klymenko², Y. O. Melniychuk²,
O. O. Pasichny²

¹Center for Precision Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin, P.R. China

²Bakul Institute of Superhard Materials,
National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Experimental investigation and finite modeling of the process
of intermittent cutting of AISI 52100 steel with PcBN tool

High-speed machining under interrupted cutting conditions is widely utilized in machining of engineering products, for example, in the manufacture of gears, which imposes extremely high demands on the performance of the cutting tool. Tools made of composites based on cubic boron nitride (PcBN) are effectively used in the conditions of machining of products made of modern high-hard and high-strength materials, due to their unique physical and mechanical properties, and the prospects of their application are closely related to the cutting tool composition. In this paper, the results of experimental studies of the features of interrupted cutting of hardened steel AISI 52100 with PcBN tools are presented and the process of machining with PcBN tools is analyzed using the finite element modeling, taking into account the polycrystalline structure and composition of tool. In order to identify the effect of PcBN cutting tool composition on cutting forces and tool wear, experiments were conducted with tools equipped with two types of materials with different cBN content. In contrast to traditional ideas, according to which the area of use of tools made of PcBN with low cBN content is machining without dynamic loads, the experimental results show that when machining hardened steel AISI 52100 with a cutting speed of 210 m/min under interrupted cutting conditions, the tool made of PcBN with low cBN content has comparable efficiency with the tool with high cBN content. The results obtained indicate the prospects and high performance of tools equipped with PcBN tools of different composition, according to specific operating conditions.

Keywords: PcBN tool; cutting speed; interrupted cutting; finite element modeling; PcBN composite composition

1. Feng K., Ji J.C., Ni Q., Beer M. A review of vibration-based gear wear monitoring and prediction techniques. *Mech. Syst. Signal Proc.* 2023. Vol. 182.
2. Salameh J.P., Cauet S., Etien E., Sakout A., Rambault L. Gearbox condition monitoring in wind turbines: A review. *Mech. Syst. Signal Proc.* 2018. Vol. 111. P. 251–264.
3. Liang X., Zuo M.J., Feng Z. Dynamic modeling of gearbox faults: A review. *Mech. Syst. Signal Proc.* 2018. Vol. 98. P. 852–876.
4. Chen Y., Liang X., Zuo M.J. Sparse time series modeling of the baseline vibration from a gearbox under time-varying speed condition. *Mech. Syst. Signal Proc.* 2019. Vol. 134. P. 106342.
5. Azamfar M., Singh J., Bravo I., Lee J. Multisensor data fusion for gearbox fault diagnosis using 2-D convolutional neural network and motor current signature analysis. *Mech. Syst. Signal Proc.* 2020. Vol. 144. P. 106861.
6. Moura E.P., Vieira A.P., Irmao M.A.S., Silva A.A. Applications of detrended-fluctuation analysis to gearbox fault diagnosis. *Mech. Syst. Signal Proc.* 2009. Vol. 23. P. 682–689.
7. Feng K., Wang K., Song L., Wang K. An order spectrum based selection method to Vold-Kalman filter bandwidth. *Jixie Gongcheng Xuebao, J. Vib, Eng.* 2017. Vol. 30. P. 319–324.
8. Halpin T., Byrne G., Barry J. The performance of PCBN in hard turning. *Ind. Diamond Rev.* 2005. Vol. 65. P. 52–60.
9. Halpin T., Byrne G., Barry J., Ahearne E. The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manufact.* 2009. Vol. 223. P. 947–953.
10. Chou Y.K. Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting. *Wear.* 2003. Vol. 255. P. 1388–1394.
11. Manokhin A.S., Klimenko S.A., Klimenko S.An., Beresnev V.M. Promising types of coatings for PCBN tools. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40. P. 424–431.
12. Diniz A.E., Gomes D.M., Braghini A. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *J. Mater. Proc. Technol.* 2005. Vol. 159. P. 240–248.
13. Halpin T., Byrne G., Barry J., Ahearne E. The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B: J. Eng. Manufact.* 2009. Vol. 223. P. 947–953.

14. Costes J. P., Guillet Y., Poulachon G., Dessoly M. Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 2007. Vol. 47. P. 1081–1087.
15. Hooper R.M., Shakib J.I., Brookes C.A. Microstructure and wear of TiC-cubic BN tools. *Mater. Sci. Eng. A.* 1988. Vol. 105–106. P. 429–433.
16. Tu L.Q., Lin L.L., Liu C. et al. Tool wear characteristics analysis of cBN cutting tools in high-speed turning of Inconel 718. *J. Mater. Proc. Technol.* 2017. Vol. 249. P. 291–301.
17. Wang Q.Q., Liu Z.Q., Yang D., Mohsan A.H. Metallurgical-based prediction of stress-temperature induced rapid heating and cooling phase transformations for high speed machining Ti-6Al-4V alloy. *Mater. Des.* 2017. Vol. 119. P. 208–218.
18. He Y., Zhang J., Qi Y.T. et al. Numerical study of microstructural effects on chip formation in high speed cutting of ductile iron with discrete element method. *J. Mater. Proc. Technol.* 2017. Vol. 249. P. 291–301.
19. Soliman H.A., Shash A.Y., El-Hossainy T.M., Abd-Rabou M. Cutting forces and crater wear prediction in orthogonal cutting using two approaches of finite element modeling. *Eng. Rep.* 2020. Vol. 2. P. 1–18.
20. Ramesh A., Melkote S.N. Modeling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardened AiSi52100 steel. *Int. J. Machine Tools Manufact.* 2008. Vol. 48. P. 402–414.
21. Guo Y.B., Barkey M.E. Modeling of rolling contact fatigue for hard machined components with process-induced residual stress. *Int. J. Fatigue.* 2004. Vol. 26, no. 6. P. 605–613.
22. Duan C., Kong W., Hao Q., Zhou F. Modeling of white layer thickness in high speed machining of hardened steel based on phase transformation mechanism. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2013. Vol. 69. P. 59–70.
23. Li H., Guo R. Extended Voronoi cell finite element methods for fracture analysis of composites. *Theor. Appl. Fract. Mech.* 2022. Vol. 117. P. 103165.
24. Fortune S. A sweepline algorithm for Voronoi diagrams. *Algorithmica.* 1987. Vol. 2. P. 153.
25. Li H., Guo R. Extended Voronoi cell finite element methods for fracture analysis of composites. *Theor. Appl. Fract. Mech.* 2020. Vol. 117. P. 103–165.
26. Gao J., Cao Y., Wang K., Guo F., Yin J., Lu L., Xie Z. Polycrystalline simulation and experimental study of spatiotemporal anisotropy aluminum alloy irradiated by nanosecond laser. *Optics & Laser Technol.* 2021. Vol. 142. art. 107244.
27. Sun C.T., Jin Z.H. Chapter 9. Cohesive Zone Model. *Fracture Mechanics.* Boston: Academic Press, 2012. P. 227–246.
28. Turley D.M., Doyle E.D., Ramalingam S. Calculation of shear strains in chip formation in titanium. *Mater. Sci. Eng.* 1982. Vol. 55. P. 45–48.

Надійшла до редакції 30.01.20

Після доопрацювання 02.06.20

Прийнята до опублікування 10.08.20