

# Дослідження процесів обробки

---

УДК 621.941

**М. Є. Стахнів, Л. М. Девін\*, М. П. Беженар,  
Я. М. Романенко**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля  
НАН України, м. Київ  
\*ldevin350@gmail.com

## **Дослідження впливу швидкості різання на складові сили і температуру різання, шорсткість і хвилястість обробленої поверхні за чистового точіння загартованої сталі ХВГ різцями з РсВN**

*Досліджено вплив швидкості різання за чистового точіння загартованої сталі ХВГ на складові сили і температуру різання, шорсткість і хвилястість обробленої поверхні. Чистове точіння здійснювали різцями з механічним кріпленням квадратних чотирьохгранних пластин з кубічного нітриду бору, виготовлених в апаратах високого тиску з порошків сВN та алюмінію. Матеріали пластин відрізнялись за фазовим складом, дисперсністю структури, фізико-механічними характеристиками. Встановлено, що зі збільшенням швидкості різання від 0,8 до 5,5 м/с температура вершини різця в зоні різання нелінійно збільшується від 650 до 1100 °С, а середні значення складових і рівнодіючої сили різання, середньоквадратичні відхилення складових і рівнодіючої сили різання, амплітуда гармонічних коливань сили різання, параметри шорсткості і хвилястості обробленої поверхні зменшуються. Показано, що під час чистового точіння загартованої сталі ХВГ доцільно використовувати інструменти із зернистістю кубоніту 2/1, 3/2, 7/5 та фазовим складом сВN і АlN. Найкращі результати показали інструменти із зернистістю вихідного порошку сВN 7/5 і фазовим складом композита 87 % (за масою) сВN + 13 % (за масою) АlN.*

**Ключові слова:** *точіння, загартована сталь, різальна вставка з РсВN композитів, температура різання, сила різання, шорсткість, хвилястість, швидкість різання.*

Інструменти, оснащені полікристалічними надтвердими матеріалами – композитами на основі кубічного нітриду бору сВN (РсВN), представляють особливий інтерес для машинобудування. Саме такими інструментами, як показали дослідження, найбільш продуктивно і якісно можна вико-

нувати обробку важко оброблюваних сплавів. Найбільш перспективним напрямом лезової обробки є так зване “тверде точіння” – точіння матеріалів твердістю > 47 HRC інструментами, оснащеними PcBN, з досягненням якості обробленої поверхні на рівні шліфованої [1]. Але водночас процес різання загартованих сталей різцями на основі cBN супроводжується високою температурою в зоні різання [2], що негативно впливає на працездатність інструментів і якість обробленої поверхні [1, 3, 4].

Пошуки більш досконалого PcBN продовжуються і надалі. Для цього застосовують двостадійне реакційне спікання порошків кубічного нітриду бору з алюмінієм в умовах високого тиску, що дозволяє керувати фазовим складом, однорідністю структури та фізико-механічними характеристиками одержаних PcBN композитів [5, 6, 7]. На фазовий склад композитів впливають умови реакційної взаємодії cBN з Al, а саме тиск і температура в зоні взаємодії, та стан поверхні контакту твердої фази (cBN) і рідини (Al). Зі свого боку поверхня контакту твердої фази (cBN) визначається дисперсністю порошку кубічного нітриду бору. Було отримано нові лабораторні зразки PcBN, які відрізнялись дисперсністю структури та фазовим складом [7], а відповідно і різними фізико-механічними властивостями. Важливим у забезпеченні ефективності процесу механічної обробки є правильний вибір матеріалу різального інструмента, сфера застосування якого визначається його фізико-механічними і хімічними властивостями [1], але суттєве значення для правильного вибору різального інструмента мають показники (сила і температура різання, шорсткість і хвилястість обробленої поверхні та ін.) процесу обробки.

В даній роботі розглядали різні методи дослідження параметрів процесу чистового точіння загартованої сталі ХВГ різцями, оснащеними PcBN, які відрізняються структурними показниками – дисперсністю та фазовим складом. Метою роботи було дослідження впливу швидкості різання на силу і температуру різання, шорсткість і хвилястість під час чистового точіння загартованої сталі ХВГ різцями, оснащеними PcBN.

### **УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ, ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Враховуючи результати [7] для досліджень було виготовлено п’ять партій лабораторних зразків PcBN, які одержували шляхом спікання порошків cBN з алюмінієм за високого тиску. Вихідні порошки: cBN марки КМ зернистістю від 2/1 до 60/40 мкм виробництва концерну АЛКОН НАН України і порошок алюмінію марки АСД (фракція –40). Спікання проводили в дві стадії в сталевому апараті високого тиску “ковадло із заглибленням” з діаметром лунки 40 мм. Перша стадія відбувалася за тиску 2 ГПа і температури 1100 К з просочування стисненого порошку cBN рідким алюмінієм протягом 30 с; друга стадія – це реакційне спікання cBN з Al за тиску 4,5 ГПа і температури 1750 К протягом 4 хв. Кількість алюмінію в шихті становила 12,5 % (за об’ємом).

Отримані зразки механічно обробляли (шліфували вільним і зв’язаним абразивом) для очищення поверхні, отримання необхідної форми і розмірів. Пластини після механічної обробки мали форму прямої чотирикутної призми (основа – квадрат). Фазовий склад одержаних зразків визначали методом рентгеноструктурного аналізу. В табл. 1 показано зернистість вихідних порошків cBN і фазовий склад одержаних з них PcBN.

**Таблиця 1. Зернистість вихідного порошку cBN і фазовий склад композита, спечених за  $p = 4,2$  ГПа;  $T = 1750$  К,  $\tau = 4$  хв**

Зразок	Зернистість вихідного порошку cBN	Фазовий склад композита, % (за масою)
1	2/1	90BN+10AlN
2	3/2	90BN+10AlN
3	7/5	87BN+13AlN
4	10/7	88cBN + 10AlN + 1AlB <sub>2</sub> + 1Al
5	60/40	86,7cBN + 10AlN + 3AlB <sub>2</sub> + 0,3Al

Як видно з табл. 1, за фазовим складом композити можна розділити на дві групи: перша – двофазні композити, зразки 1, 2, 3; друга – багатофазні композити, зразки 4 і 5, в складі яких крім cBN і AlN фіксували ще AlB<sub>2</sub> і Al. В табл. 2 приведено фізико-механічні характеристики зразків PcBN.

**Таблиця 2. Фізико-механічні характеристики зразків PcBN**

Зразок	1	2	3	4	5
Питома поверхня вихідної шихти, м <sup>2</sup> /г	2,80	2,2	1,46	0,71	0,11
Твердість за Кнупом, ГПа	25	26	27	27	28
Міцність на розтяг, МПа	357	487	581	404	408
СКВ міцності, МПа	52	63	20	76	80
Логарифмічний декремент коливань $\delta$	8,4	8,7	10,7	11,1	11,2
Модуль пружності $E$ , ГПа	670	660	670	640	600

Примітка. СКВ – середньоквадратичні відхилення.

Працездатність різців з PcBN вивчали на автоматизованому стенді на базі токарного верстата з ЧПК мод. ТПК 125BM [8]. Експериментальні дослідження виконували під час чистового точіння зразка (діаметром  $d = 55$ – $56$  мм) із загартованої сталі ХВГ (C – 1 %, Cr – 1 %, W – 1,4 %, Mn – 1 %, Si – 0.3 %, інше – Fe [9])<sup>1</sup> твердістю 58–60 HRC. Різець з механічним кріпленням квадратної різальної пластини з композиту мав передній кут  $\gamma = -10^\circ$ , задній кут  $\alpha = 10^\circ$ .

Експериментальна серія для інструмента з кожною пластиною складалася з шести дослідів. Подача на оборот  $S$  і глибина різання  $t$  у всіх дослідях були фіксовані:  $S = 0,1$  мм/об;  $t = 0,1$  мм. Використовували дискретні значення швидкості різання в діапазоні  $v = 0,8$ – $5,5$  м/с. Зміна швидкості різання обумовлює широке різноманіття динамічних явищ під час обробки, а також різні значення температури в зоні різання. Складові сили різання  $P_x$ ,  $P_y$  і  $P_z$  вимірювали за допомогою динамометра УДМ-100. Для вимірювання температури різання в державку різця було вбудовано хромель-алюмель термопару. Сигнали від динамометра по трьох каналах через підсилювач надходили на АЦП ADA-1406. По четвертому каналу через підсилювач надходив сигнал від термопари, яка знаходилася під різальною пластиною. Керування АЦП ADA-1406 здійснювали за допомогою програми Power Graph.

<sup>1</sup> Тут і далі склад наведено в % (за масою).

Для кожного виконаного досліду для складових сили різання  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , проводили корекцію даних (виключення похибок вимірювань). В отриманих даних містилася інформація про врізання різця в заготовку, про стаціонарний процес різання і про вихід інструмента із заготовки. Для подальшого аналізу з усього масиву програмно видалялися ті дані, які не мали відношення до стаціонарного процесу різання.

Під час визначення температури різання використовували градування різця з термопарою, отримані формули розрахунку температури в зоні різання описано в [10].

Для дослідження шорсткості і хвилястості обробленої поверхні застосовували прилад Surtronic-3 (фірма "Rank Taylor Hobson", Великобританія), який був за допомогою АЦП з'єднаний з ПК.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Відповідно до методики, описаною у [10], було поміряно середню температуру на вершині різця в зоні контакту з поверхнею заготовки і стружкою. Як показали дослідження, в процесі різання протягом одного експерименту (один прохід різця) термопара внаслідок інерційності не фіксувала спалахів температур в зоні різання, тому коливання показань температури в зоні різання були незначні, так визначали середнє значення температури на вершині різця.

На рис. 1 наведено залежності впливу швидкості різання  $v$  на температуру в зоні різання  $T$  під час точіння загартованої сталі ХВГ різцями з РсВН. На рис. 1 і наступних рисунках різці позначено у відповідності з даними табл. 1.

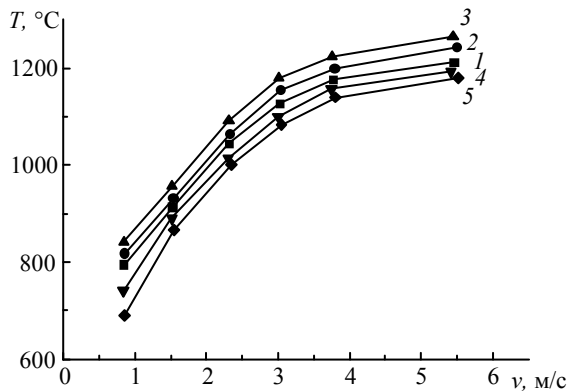


Рис. 1. Зміна температури в зоні різання в залежності від швидкості різання.

З аналізу кривих на рис. 1 випливає:

– за чистового точіння загартованої сталі ХВГ зі збільшенням швидкості різання  $v$  від 0,8 до 5,5 м/с середня температура на вершині різця  $T$  нелінійно збільшується від 650–850 до 1100–1200 °C;

– найнижчу середню температуру на вершині різця  $T$  забезпечували інструменти з РсВН, які мали багатофазний склад (зразки 4 і 5, див. табл. 1);

– найвищу середню температуру на вершині різця  $T$  показали інструменти з РсВН, які мали двохфазний склад (зразки 1, 2 і 3, див. табл. 1);

Середня температура в зоні різання  $T$ , отримана в даній роботі, дещо нижча ніж температура, яка наведена в [2] під час обробки загартованої сталі інструментом з РсВН. Це пов'язано з тим, що у досліджуваних РсВН теплопровідність нижча в порівнянні з РсВН, які використовували в [2], що обумов-

лює інший перерозподіл температурних полів в зоні різання. Водночас до більш високої температури нагрівається стружка, а відповідно меншої температури, яка фіксується термопарою, досягає тіло різця, що і знаходить своє відображення в отриманих експериментальних даних.

### ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛИ РІЗАННЯ

В результаті проведених досліджень для кожного експерименту отримано осцилограми складових сили різання  $P_x(\tau)$ ,  $P_y(\tau)$ ,  $P_z(\tau)$  і рівнодіючої  $R(\tau)$  для стаціонарного процесу різання (рис. 2, *a*, *б*), де  $\tau$  – час.

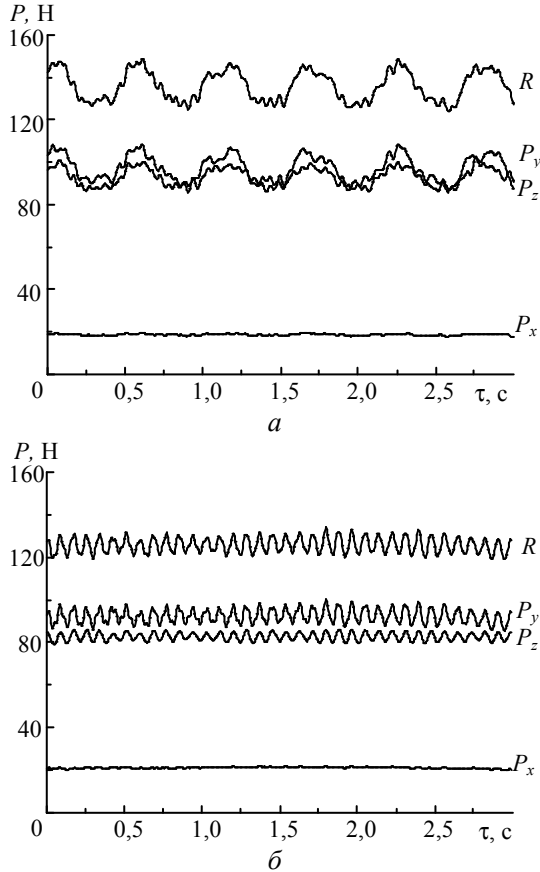


Рис. 2. Осцилограми складових сили різання  $P_x(\tau)$ ,  $P_y(\tau)$ ,  $P_z(\tau)$  і рівнодіючої  $R(\tau)$  для стаціонарного процесу різання під час точіння інструментом PcBN (зразок 5, див. табл. 1) зі швидкістю різання 0,8 (*a*) і 5,4 (*б*) м/с.

Із приведених на рис. 2 осцилограм можна зробити висновок, що для стаціонарного процесу різання в залежності від швидкості різання  $v$  міняється середнє значення і діапазон коливань рівнодіючої сили різання  $R$ . Також міняється співвідношення між складовими силами різання  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , що вказує на зміну напрямку дії рівнодіючої сили різання  $R$ . Спостерігали (див. рис. 2, *a*, *б*), що в залежності від швидкості різання міняється характер, діапазон і частота коливань рівнодіючої сили різання  $R$ .

Враховуючи вище сказане, для кожного експерименту було проведено статистичну обробку даних, розраховано середні значення  $R$  і СКВ  $\sigma_R$  рівно-

діючої сили різання. Для врахування зміни напрямку дії рівнодіючої сили різання  $R$  розраховували кут прикладання сили різання [11]:

$$v = \operatorname{arctg} \left( \frac{P_z}{\sqrt{P_x^2 + P_e^2}} \right).$$

Як видно на рис. 2, діапазон коливання сили різання  $R$  складає 7–15 % від її середнього значення, тому було проведено кореляційний і спектральний аналіз рівнодіючої сили різання  $R(\tau)$ .

Розраховані середні значення  $R$  і СКВ рівнодіючої сили різання  $\sigma_R$  в залежності від швидкості різання  $v$  приведено на рис. 3.

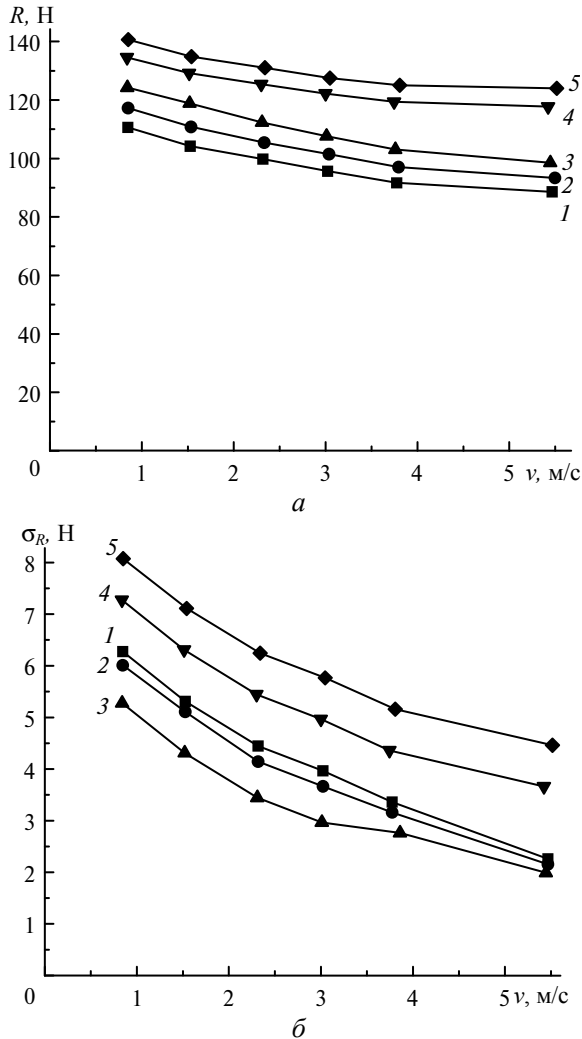


Рис. 3. Зміна середніх значень  $R$  (а) і СКВ рівнодіючої сили різання  $\sigma_R$  (б) в залежності від швидкості різання для різних зразків (див. табл. 1).

Встановлено, що у разі збільшення швидкості різання  $v$  від 0,8 до 5,5 м/с середні значення  $R$  (див. рис. 3, а) і СКВ рівнодіючої сили різання  $\sigma_R$  (див. рис. 3, б) для різальних інструментів оснащених двофазними та багатофаз-

ними композитами зменшуються. Водночас слід зауважити, що найнижчий рівень середніх значення  $R$  і СКВ рівнодіючої сили різання  $\sigma_R$  забезпечували різальні інструменти з двофазними PcBN (зразки 1, 2 і 3, див. табл. 1), а найвищий рівень середніх значень  $R$  і СКВ рівнодіючої сили різання  $\sigma_R$  – різальні інструменти, оснащені багатофазними PcBN (зразки 4 і 5, див. табл. 1). Обумовлено дані особливості тим, що у разі точіння різцями, оснащеними двофазними PcBN температура в зоні різання більша (див. рис. 1), а також тим, що твердість за Кнупом цих PcBN менша (див. табл. 2).

Для врахування напрямку дії рівнодіючої сили різання на рис. 4 наведено залежності зміни кута  $\psi$  прикладання сили різання від швидкості різання  $v$ .

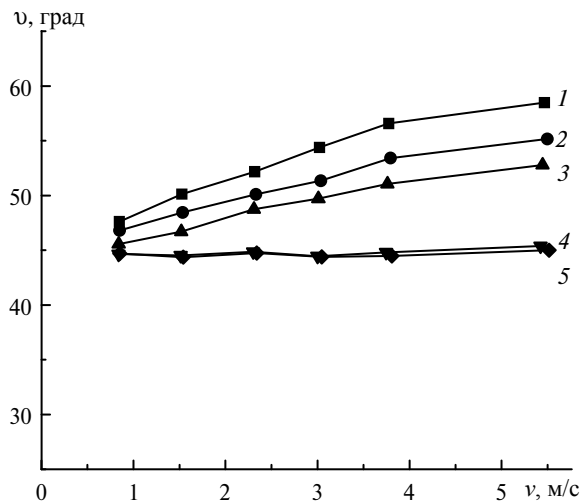


Рис. 4. Залежність зміни кута  $\psi$  прикладання сили різання від швидкості різання для різних зразків (див. табл. 1).

Значення кута  $\psi$  прикладання сили різання показує співвідношення складових сили різання, впливає на значення напружень на передній і задній поверхні різця, а також ймовірність руйнування різця [11]. З аналізу експериментальних даних (див. рис. 4) випливає, що для різальних інструментів з двофазними композитами (зразки 1, 2 і 3, див. табл. 1) кут  $\psi$  прикладання сили різання у разі збільшення швидкості різання  $v$  зростає, тобто напрямок рівнодіючої сили різання міняється, а для різальних інструментів з багатофазним PcBN (зразки 4 і 5, див. табл. 1) кут  $\psi$  залишається незмінним (напрямок рівнодіючої сили різання незмінний). Тобто, по характеру зміни кута  $\psi$  прикладання сили різання в залежності від швидкості різання  $v$  можна зробити висновок, яким різальним інструментом обробляли (двофазними або багатофазними композитами).

Кореляційний і спектральний аналіз рівнодіючої сили різання  $R(\tau)$  дозволив виявити домінуючі гармонійні коливання і встановити їхні частоти і амплітуди. Ці гармонійні коливання рівнодіючої сили різання впливали на хвилястість обробленої поверхні. Використання експериментальних даних і моделювання гармонійних коливань дозволили в сигналі  $R(\tau)$  виділити випадкові коливання, які обумовлені нерівномірністю фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, а також випадковими збуреннями сили різання внаслідок нерівномірності припуску. Ці випадкові коливання впливали на шорсткість обробленої поверхні. Пріоритет віддали тій пластині, в якій СКВ випадкових коливань сили різання було мінімальним.

Для всіх режимів обробки було виконано аналіз нормованих кореляційних функцій і нормованих спектральних густин рівнодіючої сили різання. На рис. 5 приведено нормовану спектральну густину рівнодіючої сили різання  $R$ .

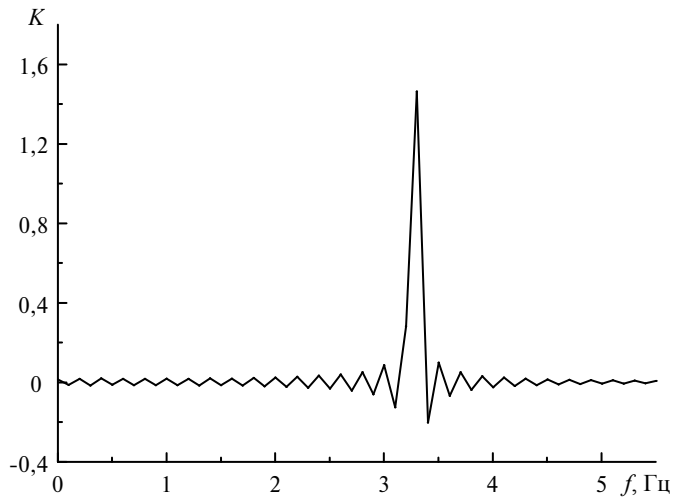


Рис. 5. Нормована спектральна густина рівнодіючої сили різання  $R$  у разі точіння різцем з PcBN (зразок 1, див. табл. 1) зі швидкістю різання  $v = 1,54$  м/с.

В результаті кореляційного і спектрального аналізу встановлено, що для кожного експерименту гармонійне коливання рівнодіючої сили різання має місце тільки на одній частоті  $f_R$  (див. рис. 5). Експериментально встановлено, що частота коливань  $f_R$  рівнодіючої сили різання пов'язана з частотою обертання шпинделя верстата  $f_{ш}$ :  $f_R \approx (0,36-0,38)f_{ш}$ , а амплітуда гармонічних коливань дорівнює  $A_R \approx (1,40-1,43)\sigma_R$ , де  $\sigma_R$  – СКВ рівнодіючої сили різання.

Отже, гармонійні коливання  $R_g(\tau)$  рівнодіючої сили різання моделювали залежністю

$$R_g(\tau) = A_R \sin(2\pi f_R \tau + \varphi_R),$$

де  $A_R$ ,  $f_R$  і  $\varphi_R$  – відповідно амплітуда, частота і фаза гармонічних коливань рівнодіючої сили різання.

Випадкові коливання сили  $R_s(\tau)$  різання визначали залежністю

$$R_s(\tau) = R_{ex}(\tau) - R_m - R_g(\tau) = R_{ex}(\tau) - R_m - A_R \sin(2\pi f_R \tau + \varphi_R),$$

де  $R_{ex}(\tau)$  – експериментальні дані зміни рівнодіючої сили різання;  $R_m$  – середнє значення рівнодіючої сили різання.

На рис. 6 наведено залежність СКВ  $\sigma_s$  випадкових коливань  $R_s(\tau)$  від швидкості різання  $v$ .

СКВ  $\sigma_s$  випадкових коливань  $R_s(\tau)$  є важливою характеристикою. Ця величина показує, які були випадкові збурення сили різання внаслідок нерівномірності припуску і нерівномірності фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу.

З аналізу графіків випливає, що зі збільшенням швидкості різання СКВ  $\sigma_s$  випадкових коливань  $R_s(\tau)$  зменшуються, це вказує на доцільність обробки за швидкості різання  $v = 3,7-5,4$  м/с. Водночас встановлено, що для різальних інструментів з багатофазних композити (зразки 4 і 5, див. табл. 1) значення  $\sigma_s$  відносно високі (див. рис. 6), що вказує на суттєві випадкові збурення сили різання. Для різальних інструментів з двохфазних композитів (зразки 1, 2 і 3,



див. табл. 1) значення СКВ  $\sigma_s$  випадкових коливань  $R_s(\tau)$  менші. Тому пріоритет під час обробки слід віддати інструментам, які оснащені двофазними PcBN. Серед них найкращі результати показали PcBN, отримані з вихідного порошку cBN 7/5 та мали фазовий склад 87 % cBN + 13 % AlN.

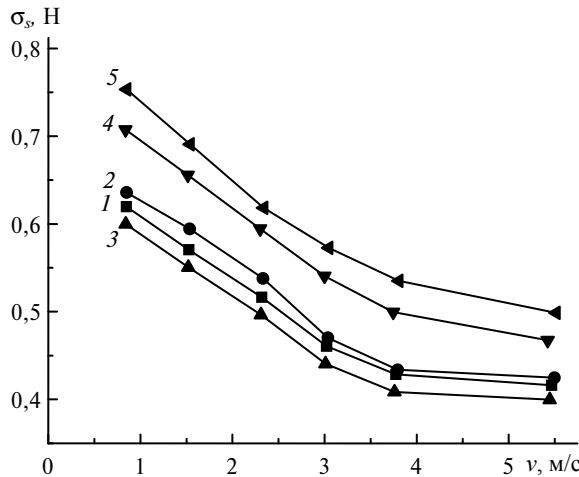


Рис. 6. Залежність СКВ  $\sigma_s$  випадкових коливань  $R_s(\tau)$  від швидкості різання для різних зразків (див. табл. 1).

### ДОСЛІДЖЕННЯ ШОРСТКОСТІ ТА ХВИЛЯСТОСТІ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

На рис. 7 наведено графіки зміни параметрів шорсткості  $Ra$  і хвилястості  $Raw$  обробленої поверхні в залежності від швидкості різання  $v$ .

Збільшення швидкості різання  $v$  зумовлює зменшення параметрів  $Ra$  і  $Raw$  обробленої поверхні. Для різальних інструментів з багатофазними композистами (зразки 4 і 5, див. табл. 1) параметри  $Ra$  і  $Raw$  є високими (див. рис. 7) в порівнянні з інструментами, оснащеними двофазними PcBN (зразки 1, 2 і 3, див. табл. 1). В свою чергу в цій групі слід виділити зразок 3 із зернистістю вихідного порошку cBN 7/5 і фазовим складом 87 % cBN + 13 % AlN, інструменти з якими показали найкращі результати за шорсткістю і хвилястістю обробленої поверхні.

Графік впливу швидкості різання  $v$  на параметр  $Ra$  (див. рис. 7, а) співставляли з графіком впливу швидкості різання на СКВ  $\sigma_s$  випадкових коливань (див. рис. 6), а графік впливу швидкості різання  $v$  на параметр  $Raw$  (див. рис. 7, б) з графіком впливу швидкості різання на СКВ  $\sigma_R$  рівнодіючої сили різання (див. рис. 2, б). Як видно з графіків, для даних інструментів тенденції змін  $Ra$  і  $\sigma_s$ , а також  $Raw$  і  $\sigma_R$  співпадають, що вказує на кореляційний зв'язок між параметрами, що розглядали.

Узагальнюючи результати виконаних досліджень слід зауважити, що для інструментів, які оснащені багатофазними композистами (зразки 4 і 5, див. табл. 1) з близькими значеннями фізико-механічних характеристик (див. табл. 2), показники процесу різання (температура  $T$ , рівнодіюча сила різання  $R$ , кут прикладання сили різання  $\nu$ , СКВ рівнодіючої сили різання  $\sigma_R$ , СКВ  $\sigma_s$  випадкових коливань рівнодіючої сили різання, параметра шорсткості  $Ra$  і параметра хвилястості  $Raw$  обробленої поверхні) близькі між собою, але відрізняються від показників для інструментів, оснащених двофазними PcBN (зразки 1, 2 і 3, див. табл. 1). Ця різниця обумовлена наявністю у їхній структурі додаткових фаз  $AlB_2$  та  $Al$ .

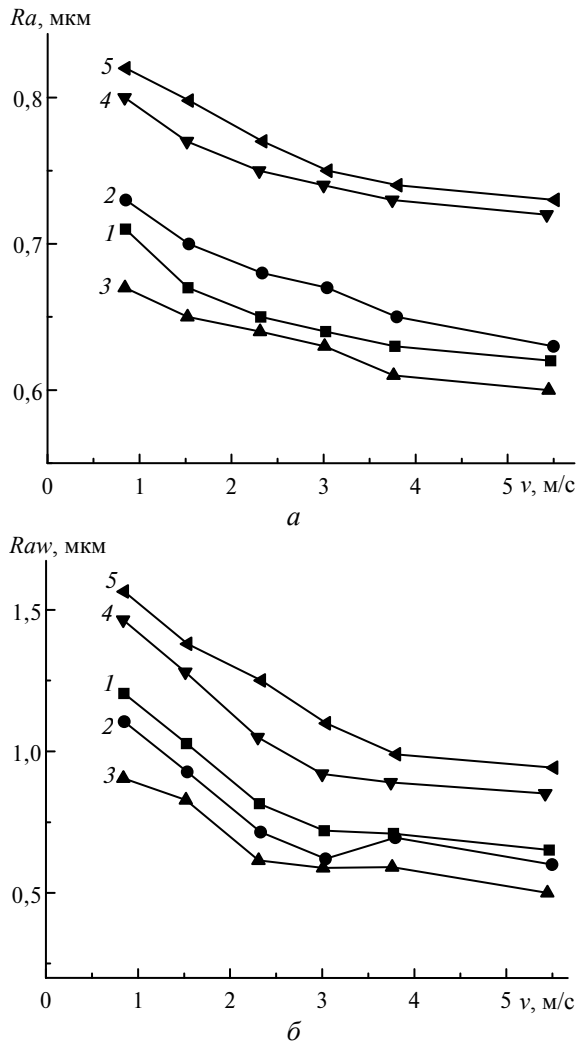


Рис. 7. Залежність параметрів шорсткості  $Ra$  (а) і хвилястості  $Raw$  (б) обробленої поверхні від швидкості різання для різних зразків (див. табл. 1).

Для інструментів, які оснащені двофазними композитами (зразки 1, 2 і 3, див. табл. 1) з близькими значеннями фізико-механічних характеристик (див. табл. 2), параметри процесу різання (температура  $T$ , рівнодіюча сила різання  $R$ , кута прикладання сили різання  $\nu$ , СКВ рівнодіючої сили різання  $\sigma_R$ , СКВ  $\sigma_s$  випадкових коливань рівнодіючої сили різання, параметра шорсткості  $Ra$  і параметра хвилястості  $Raw$  обробленої поверхні) також близькі між собою. Такі інструменти показали найкращі результати у разі точіння загартованої сталі ХВГ. Особливо слід виділити PcBN (зразок 3) з вихідного порошку cBN 7/5, який має фазовий склад 87 % cBN + 13 % AlN.

## ВИСНОВКИ

Спінанням порошків cBN з алюмінієм в умовах високого тиску, було отримано композити, які за фазовим складом і дисперсністю структури можна поділити на дві групи: перша – виготовлені з порошків cBN зернистістю < 7 мкм, які мали двофазовий склад (cBN і AlN); друга – виготовлені з по-

рошків cBN зернистістю  $> 7$  мкм, які мали багатофазний склад cBN, AlN, AlB<sub>2</sub> і Al.

У разі чистового точіння загартованої сталі ХВГ (твердістю 58–60 HRC) інструментами з PcBN, як для першої, так і для другої групи, зі збільшенням швидкості різання  $v$  від 0,8 до 5,5 м/с (за подачі  $S = 0,1$  мм/об і глибини різання  $t = 0,1$  мм) температура в зоні різання нелінійно збільшується від 650–850 до 1100–1200 °C; середні значення складових  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , і рівнодіючої  $R$  сили різання зменшуються; СКВ  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_R$  складових і рівнодіючої сили різання зменшуються; амплітуда гармонічних коливань  $A_R$  сили різання зменшується приблизно в 2 рази; СКВ  $\sigma_v$  випадкових коливань  $R_s(\tau)$  рівнодіючої сили різання зменшуються в 1,5 рази; параметри шорсткості  $Ra$  і хвилястості  $Raw$  обробленої поверхні зменшуються.

Для інструментів першої групи PcBN із зернистістю кубоніту 2/1, 3/2, 7/5, які мають двофазовий склад (cBN і AlN), середня температура в зоні різання більша, а складові  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  і рівнодіюча  $R$  сили різання, параметри шорсткості  $Ra$  і хвилястості  $Raw$  менші, ніж для інструментів з другою групою PcBN, із зернистістю кубоніту 10/7, 60/40, та які мають багатофазовий склад cBN, AlN, AlB<sub>2</sub> та Al.

У разі зростання швидкості різання для інструментів з PcBN першої групи кут прикладання сили різання зростає, а для інструментів з PcBN другої групи залишається стабільним.

Встановлено, що для інструментів з PcBN як першої, так і для другої групи рівнодіюча сила різання  $R(\tau)$  змінюється гармонійно  $A_R \sin(2\pi f_R \tau)$  з накладенням стохастичних збурень  $R_s(\tau)$  ( $A_R$  і  $f_R$  – амплітуда і частота коливань рівнодіючої сили різання,  $\tau$  – час), частота коливань  $f_R$  рівнодіючої сили різання пов'язана з частотою обертання шпинделя  $f_{ш}$ :  $f_R \approx (0,36–0,38)f_{ш}$ , а амплітуда гармонійних коливань  $A_R \approx (1,40–1,43)\sigma_R$ , де  $\sigma_R$  – СКВ рівнодіючої сили різання.

У разі чистового точіння загартованої сталі ХВГ (твердістю 58–60 HRC) доцільно використовувати інструменти з PcBN з кубоніту зернистістю 2/1, 3/2, 7/5, з фазовим складом cBN і AlN. Найкращі результати показав різальний інструмент з PcBN створений з вихідного порошку cBN 7/5, та який має фазовий склад 87 % cBN + 13 % AlN.

M. E. Stakhniv, L. M. Devin, M. P. Bezhenar, Ya. M. Romanenko  
Bakul Institute for Superhard Materials,  
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
Study of the effect of cutting speed on the cutting forces  
components and cutting temperature, roughness and waviness  
of the machined surface during finish turning of hardened HVG  
steel with PcBN cutters

*The effect of cutting speed during fine turning of hardened HVH steel on the force components and cutting temperature, roughness and waviness of the processed surface was studied. Finish turning was carried out with cutters with mechanical fastening of square tetrahedral plates made of cubic boron nitride, manufactured in high-pressure machines from cBN and aluminum powders. Plate materials differed in phase composition, structure dispersion, grain size, and physical and mechanical characteristics. It was established that with an increase in the cutting speed from 0.8 to 5.5 m/s, the temperature of the tip of the cutter in the cutting zone increases non-linearly from 650 to 1100 °C, and the average values of the components and the equivalent cutting force, the root mean square deviations of the components and the equivalent cutting force, the amplitude of harmonic oscillations of the cutting force, the parameters of*

*roughness and waviness of the treated surface decrease. It is shown that it is advisable to use tools with cubonite grain size 2/1, 3/2, 7/5 and the phase composition of cBN and AlN during the finishing turning of hardened HVH steel. The best results were shown by the tools with the grain size of the initial powder cBN 7/5 and the phase composition of the composite 87 wt % cBN + 13 wt % AlN.*

**Keywords:** turning, hardened steel, cutting insert made of PCBN composites, cutting temperature, cutting force, roughness, waviness.

1. 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. Київ: ИСМ им. В.Н. Бакуля; 2018. 304 с.
2. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова. Обработка материалов лезвийным инструментом / под ред. С.А. Клименко. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля; ИПЦ АЛКОН НАНУ, 2006. Т. 5. 316 с.
3. Stakhniv N.E., Devin L.N., Petrusha I.A., Osipov A.S. Dynamic phenomena in finish turning of hardened steels with cBN-based tools. *J. Superhard Mater.* 2009. Vol. 31, no. 3. P. 196–202.
4. Stakhniv N.E., Devin L.N. The study of the influence of wear of the cutting tool with an insert of cBN-based composite material on the tool vibrations in finish turning of hardened steels. *J. Superhard Mater.* 2012. Vol. 34, no. 3. P. 193–199.
5. Новіков М.В., Шульженко О.О., Беженар М.П., Божко С.А. Спосіб спікання композиційного матеріалу на основі кубічного нітриду бору: пат. 25281А Україна: МКІ С04В35/5831; заявл. 21.07.97; опубл. 25.12.98, Бюл. № 6.
6. Новиков Н.В., Шульженко А.А., Беженар Н.П., Божко С.А., Боримский А.И., Нагорный П.А. Киборит: получение, структура, свойства, применение. *Сверхтв. материалы.* 2001. № 2. С. 40 – 51.
7. Devin L.N., Bezhenar M.P., Rychev S.V., Romanenko Y.M. The Effect of charge grit on impact strength and damping characteristics of bn–al composite materials. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 3. P. 190–198.
8. Девин Л.Н., Стахнив Н.Е., Квасников В.П. Інформаційно-вимірювальна система для дослідження процесу різання. *Вісник Інженерної академії України.* Вип. № 2. Київ, 2013. С. 257–261.
9. Роскатов В.М., Чуенков В.С., Бессонова Н.Ф., Вейс Д.А. Машиностроительные материалы. Краткий справочник. Москва: Машиностроение, 1980. 511 с.
10. Devin L.N., Stakhniv N.E., Antoniuk A.S., Rychev S.V., Nechiporenko V.N. the influence of cutting speed on cutting temperatures and forces in fine turning of VT1-0 titanium alloy by a PCD tool. *J. Superhard Mater.* 2019. Vol. 41, no 2. P. 119–125.
11. Девин Л.Н. Прогнозирование работоспособности металлорежущего инструмента. Київ: Наук. думка, 1992. 131 с.

Надійшла до редакції 14.01.21

Після доопрацювання 18.05.22

Прийнята до опублікування 24.05.22