

С.Ан. Клименко, м.н.с.

С.А. Клименко, д.т.н., проф.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

М.О. Бондаренко, к.т.н., с.н.с., доц.

МННЦ «Мікротехнології та обладнання» Черкаського державного технологічного університету

В.С. Антонюк, д.т.н., проф.

Національний технічний університет України «КПІ»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОГРАФІЇ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ПНТМ НА ОСНОВІ КНБ

На прикладі інструменту з полікристалічного надтвердого матеріалу наведено результати досліджень топографії контактних ділянок на передній поверхні залежно від швидкості різання при точінні загартованої сталі. Головним чинником зміни ансамблю мікронерівностей на контактних ділянках інструменту є: в діапазоні швидкостей різання 0,5–1,5 м/с – вплив абразивних частинок в оброблюваному матеріалі; в діапазоні швидкостей 2,0–3,0 м/с – підвищення температури та інтенсивне протікання механохімічних процесів на передній поверхні інструменту.

**Ключові слова:** топографія; контактна поверхня; мікронерівність; механохімічні процеси.

**Вступ. Постановка проблеми.** Контакт будь-яких поверхонь в парі тертя відбувається, насамперед, по вершинах мікронерівностей. Розглядаючи таку специфічну пару тертя, як «різальний інструмент–стружка», можна сказати, що матеріал інструменту має набагато вищу твердість, ніж матеріал стружки, крім того, в початковий момент часу гребінці шорсткості є лише на контактній поверхні різального інструменту, рельєф поверхні стружки формується вже після безпосередньої взаємодії із поверхнею різального інструменту.

Зазначене багато в чому стосується й інструментів з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) на основі кубічного нітриду бору (КНБ), які ефективні при обробці загартованих залізвуглецевих сталей.

Виготовлення різального інструменту із ПНТМ на основі КНБ пов'язане із чистовим шліфуванням та доводкою всіх поверхонь алмазним інструментом з розміром зерна 40/28, 28/20, тому висотні параметри шорсткості поверхонь мають досить низькі значення [1].

У результаті контактної взаємодії зі стружкою параметри ансамблю мікронерівностей на контактних поверхнях інструмента зазнають суттєвих змін, що обумовлено термобаричним навантаженням інструменту та його стійкістю в процесі експлуатації.

**Мета.** Ця робота присвячена дослідженню зміни топографії контактних поверхонь інструментів із ПНТМ на основі КНБ у процесі різання у широкому діапазоні швидкостей різання.

**Викладення основного матеріалу.** Дослідження контактних поверхонь інструменту проводилося за допомогою атомно-силового мікроскопа у виділених областях на передній поверхні різального інструменту, що дозволило отримати профілограми розподілу мікронерівностей та розподіл латеральних сил тертя [2] на ділянці поверхні умовною площею  $S_{ум} = 169 \text{ мкм}^2$ .

Аналіз профілограм поверхні (рис. 1) дозволив встановити середньоарифметичне ( $Ra$ ) та середньостатистичне ( $Rq$ ) значення висоти мікронерівностей на поверхні інструменту, а також максимальну висоту профілю ( $R_{max}$ ), повну площу поверхні ( $S_n$ ), ступінь розвитку поверхні  $k = S_{ум}/S_n$ :  $Ra$  0,075;  $Rq$  0,11;  $R_{max}$  0,375;  $S_n = 0,173 \text{ мкм}^2$ ;  $k = 0,976$  (абсолютна похибка  $\pm 0,002 \text{ мкм}$ ).

Якщо коефіцієнт  $k > 1$ , то на ділянці поверхні, що досліджується, переважають виступи, якщо  $k < 1$  – западини.

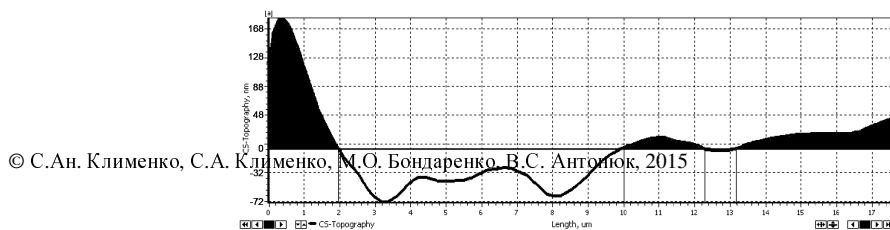


Рис. 1. Профілограма поверхні незношеної ділянки інструменту

За розподілом латеральних сил, які мають місце між індентором атомно-силового мікроскопа та поверхнею інструмента при її дослідженні було встановлено розподіл середньостатистичних значень сили тертя (в умовних одиницях) (рис. 2) – більш світлі фрагменти відповідають більшому значенню сили тертя.

Як видно із 3-D зображення та профілограми, поверхня інструменту після чистової обробки шліфуванням, має низьку шорсткість ( $Ra\ 0,075$ ), на поверхні відсутні різкі переходи між западинами та виступами, ступінь розвитку поверхні  $k < 1$ , що вказує на те, що у профілі поверхні переважають западини.

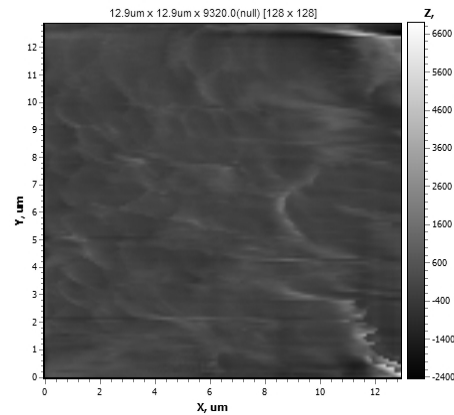


Рис. 2. Розподіл умовних сил тертя по поверхні зразка

Розподіл значень сили тертя по поверхні зразка достатньо однорідний, з наявністю осередків дефектів зі збільшеним опором тертю, порівняно із середніми значеннями по поверхні. Ці дефекти викликані наявністю на поверхні западин або вершин нерівностей, які перевищують середні значення або налипанням інших матеріалів, що випадково потрапили на поверхню зразків. Наявність таких дефектів дає можливість зробити висновок, що коефіцієнт тертя на мікрорівні непостійний і може змінюватися залежно від того, з якою ділянкою інструменту контактує в даний момент стружка.

Під час безпосередньої роботи інструменту, його контактні поверхні піддаються зношуванню, що призводить до погіршення їх топографічних характеристик.

Аналіз поверхні зношених ділянок інструменту проводився після точіння загартованої сталі ШХ15 (60 HRC) зі швидкостями різання 0,5–3,0 м/с при значеннях подачі та глибини різання  $S = 0,14$  мм/об.;  $t = 0,2$  мм. Процес точіння здійснювався до досягнення фаскою зносу по задній поверхні значення 0,3 мм.

При швидкостях різання 0,5–1,5 м/с головним чинником, що формує геометричні параметри контактних поверхонь інструменту із ПНТМ на основі КНБ, є тверді включення в оброблюваному матеріалі (оксиди, карбіди та ін.).

При зустрічі різальної кромки інструменту із твердими включеннями в оброблюваному матеріалі, останні, маючи меншу твердість, ніж матеріал інструменту, з великою вірогідністю руйнуються мінімум на дві частини, одна з яких дряпає передню поверхню інструменту, залишаючись в тілі стружки, а інша частина – задню поверхню, залишаючись в тілі заготовки. Окрім абразивних частинок, формування топографії контактних ділянок інструменту в оброблюваному матеріалі у вказаному діапазоні швидкостей різання відбувається за рахунок вільних зерен інструментального матеріалу, які відриваються від тіла інструмента в процесі роботи. Внаслідок вказаного, на контактних ділянках інструменту на передній та задній поверхнях формується система чітких та взаємопов'язаних та западин (рис. 3).

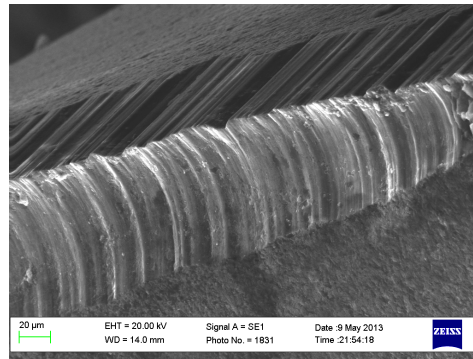


Рис. 3. Контактні ділянки інструменту із ПНТМ на основі КНБ після точіння сталі ШХ15 60HRC ( $v = 1,0$  м/с;  $S = 0,14$  мм/об.;  $t = 0,2$  мм)

При точінні зі швидкістю різання 0,5 м/с контактні ділянки інструменту піддаються абразивному зношуванню, внаслідок чого висота мікронерівностей у поперечному напрямку зростає до  $Ra$  0,108 (рис. 4, табл. 1). На поверхні інструменту мають місце чітко виражені періодичні западини та виступи, які мають достатньо малі поперечні радіуси заокруглення, що пов'язано із характером контакту твердих включень в оброблюваному матеріалі із передньою поверхнею інструменту. Коефіцієнт розвитку поверхні  $k > 1$  – в профілі ділянки контакту інструменту переважають виступи.

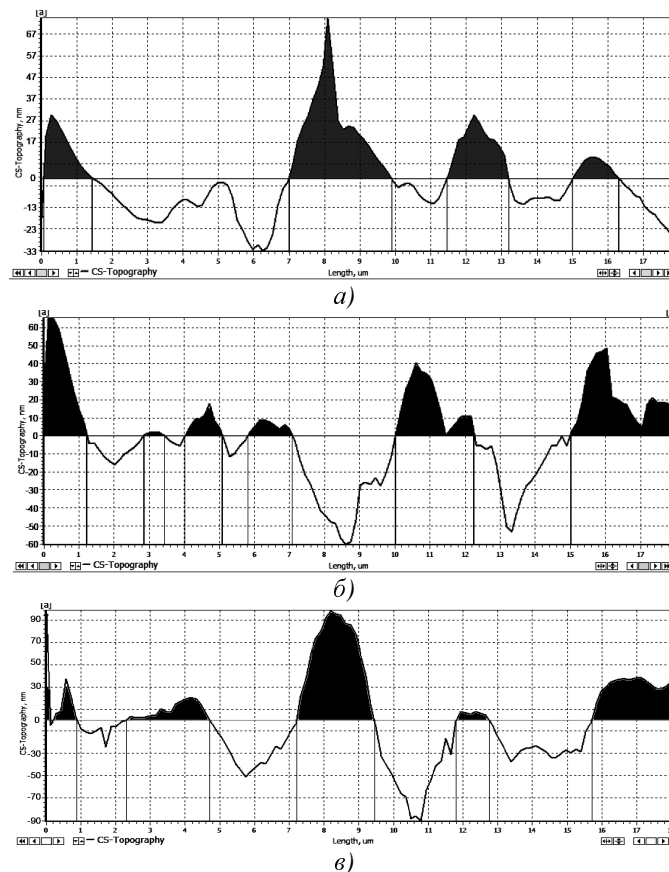


Рис. 4. Профілограма зношеної ділянки інструменту по передній поверхні:  
а)  $v = 0,5$  м/с; б)  $v = 1,0$  м/с; в)  $v = 1,5$  м/с

Збільшення швидкості різання до 1,0 м/с призводить до збільшення напружень на контактних ділянках інструмента. При цьому мікронерівності поверхні руйнуються та стираються, набуваючи вигляду окремих локальних виступів розміром 0,02–0,05 мкм, а висота мікронерівностей за параметром  $Ra$  зростає до 0,142 за рахунок збільшення глибини впадин (рис. 4, табл. 1).

Коефіцієнт розвитку поверхні  $k < 1$ . Подальше збільшення швидкості різання до 1,5 м/с призводить до ще більшого розвитку поверхні ( $k < 1$ ), збільшення кількості мікронерівностей та їх висоти до  $Ra = 0,190$  (рис. 4, табл. 1).

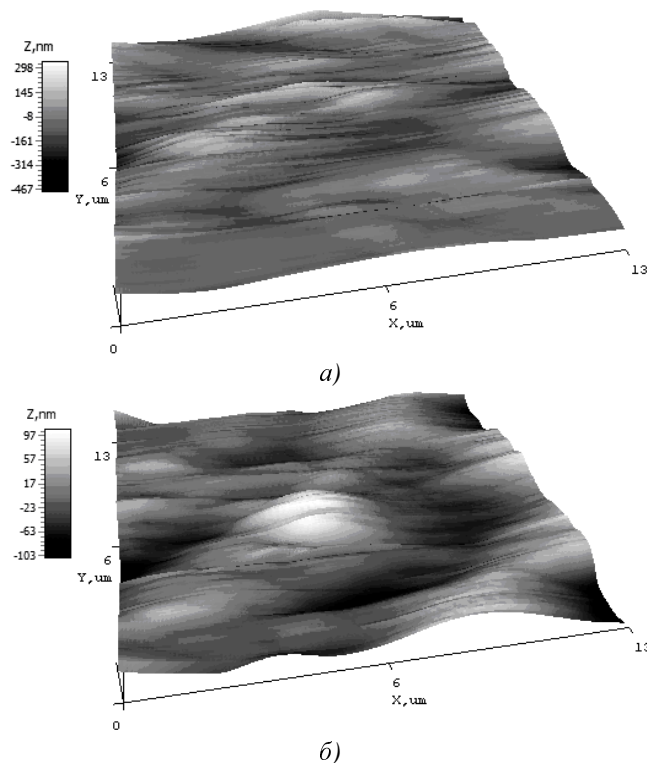
На рисунку 5 наведені 3-D зображення ділянок на передній поверхні інструменту, які показують їх еволюцію при різних швидкостях різання – збільшення швидкості різання викликає подрібнення та збільшення величини мікронерівностей.

Таблиця 1

Параметри шорсткості зношених ділянок інструментів із ПНТМ на основі КНБ

Режими різання	Параметри нерівностей	
	$v, \text{ м/с}$	$S, \text{ м/об}$
		.

Аналіз розподілу умовних сил тертя по зношеній ділянці інструменту (рис. 6) при збільшенні швидкості різання до 1,0–1,5 м/с показує збільшення опору тертю поверхнею контакту з її зношуванням, що пов'язано зі збільшенням ступеня розвитку поверхні, утворенням нових мікронерівностей та зміною їхньої форми. Як видно з отриманих результатів, на мікрорівні коефіцієнт тертя на окремих ділянках контакту не постійний, наявні зони з погіршеними умовами тертя (западини, виступи, дефекти, утворені при обробці інструментальної поверхні, а також налипи оброблюваного матеріалу, які сприяють інтенсифікації протікання адгезійних процесів схоплювання між матеріалом інструмента та оброблюваним матеріалом).



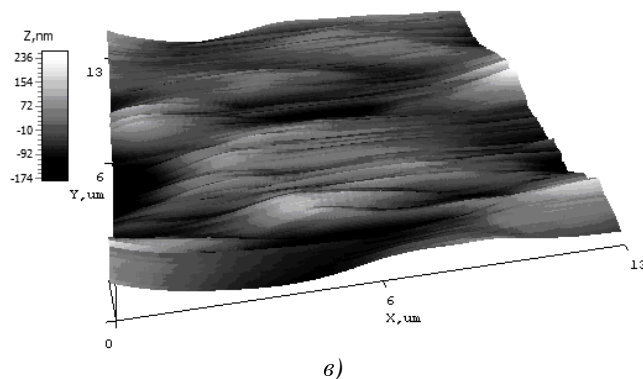


Рис. 5. 3-D зображення зношених ділянок інструменту:  
а)  $v = 0,5$  м/с; б)  $v = 1,0$  м/с; в)  $v = 1,5$  м/с

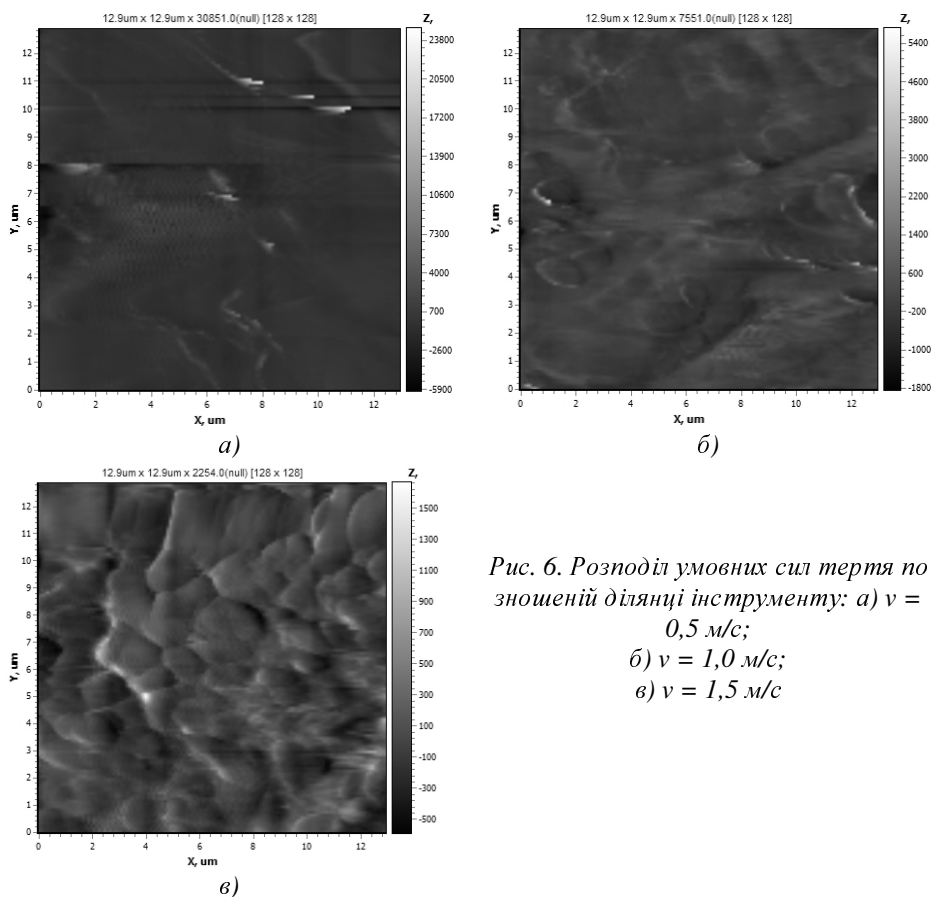


Рис. 6. Розподіл умовних сил тертя по зношеній ділянці інструменту: а)  $v = 0,5$  м/с;  
б)  $v = 1,0$  м/с;  
в)  $v = 1,5$  м/с

Зі збільшенням швидкості різання в діапазоні 2,0–3,0 м/с різальна кромка інструменту піддається, крім впливу твердих включень в оброблюваному матеріалі, ще й високому температурному впливу та протіканню хімічних реакцій взаємодії між матеріалом інструмента та оброблюваним матеріалом [3]. Протікання таких процесів на контактних поверхнях інструменту призводить до руйнування різальної кромки (рис. 7), що, безумовно, викликає погіршення шорсткості контактних поверхонь.

Для процесу різання, який відбувається при середніх та високих швидкостях різання (2,0–3,0 м/с) характерно високі температури –  $\sim 1200$  °С, зниження сил різання та довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструменту, що суттєво впливає на процес формування мікронерівностей на ділянці контакту інструменту із ПНТМ на основі КНБ (табл. 2, рис. 8).

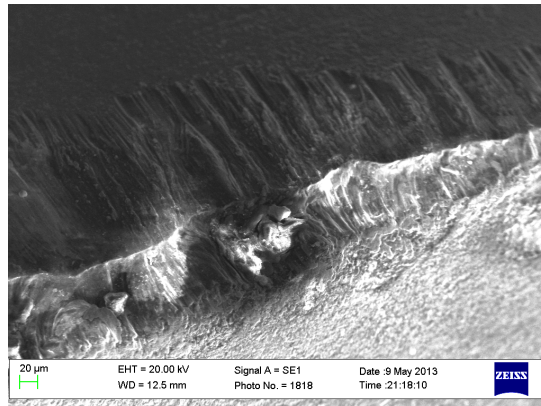


Рис. 7. Контактні ділянки інструменту із ПНТМ на основі КНБ після точіння сталі ШХ15 (60HRC) ( $v = 2,5$  м/с;  $S = 0,14$  мм/об.;  $t = 0,2$  мм)

Таблиця 2

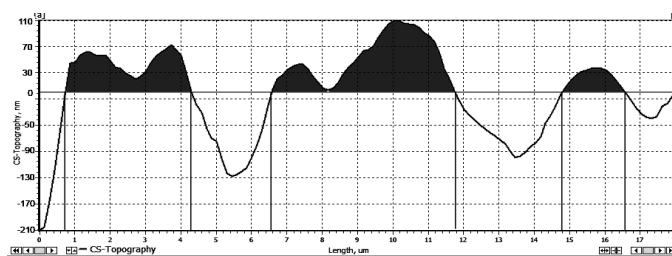
Топографічні параметри зношених ділянок інструментів із ПНТМ на основі КНБ

Режими різання	Параметри нерівностей
$v$ , м/с	$t$ , М М

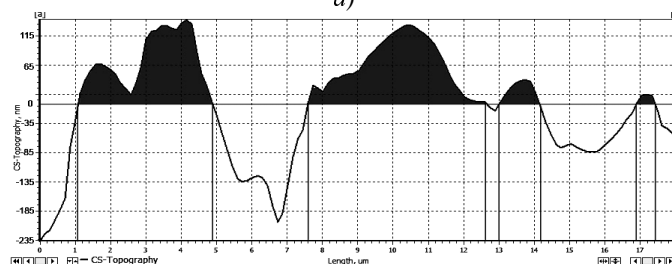
•

Аналіз профілограм (рис. 8) показує, що мікронерівності на контактних ділянках інструменту при швидкості різання 2,0 м/с руйнуються та стираються, утворюючи поверхню, яка представлена великою кількістю дрібних гострих виступів і западин, висота нерівностей відповідає  $Ra = 0,235$ , в коефіцієнт розвитку поверхні  $k > 1$ , оскільки в ансамблі мікронерівностей на поверхні контакту переважають вершини.

Зі збільшенням швидкості різання до 2,5–3,0 м/с на ділянку контакту інструмента, крім абразивного стирання, інтенсифікується дія температури різання. Ця дія призводить до зменшення твердості та міцності матеріалу інструмента та випадання окремих зерен нітриду бору, внаслідок чого на контактній ділянці різального інструменту утворюються мікрорельєф у вигляді окремих гострих виступів та впадин (рис. 8). При швидкості різання 3,0 м/с шорсткість контактної поверхні зростає до  $Ra = 0,265$ , а коефіцієнт розвитку поверхні  $k < 1$ , що свідчить про перевагу в ансамблі мікронерівностей на поверхні контакту западини.



а)



б)

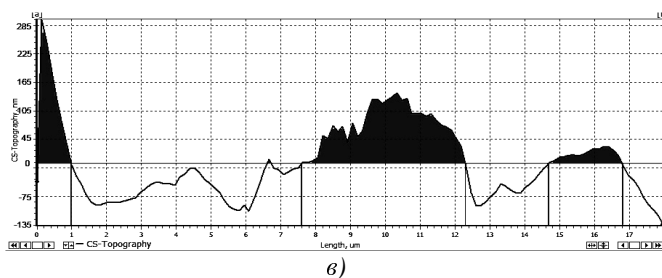


Рис. 8. Профілограма зношеної ділянки інструменту по передній поверхні:  
а)  $v = 2,0$  м/с; б)  $v = 2,5$  м/с; в)  $v = 3,0$  м/с

Розподіл умовних сил тертя по поверхні контакту (рис. 9) показує, що збільшення швидкості різання призводить до погіршення умов тертя на окремих ділянках контакту. Розподіл умовних сил тертя представлений сукупністю виступів та западин хвилоподібного вигляду або наявністю «луски» (рис. 9, в) у напрямку сходу стружки, наявність якої може пояснюватись мікроналипами оброблюваного матеріалу, що погіршує умови тертя на ділянці контакту.

Експериментальну криву, що описує зміну шорсткості поверхні в зоні контакту інструменту по передній поверхні від швидкості різання (рис. 10) можна апроксимувати виразом:

$$Ra = 0,062 + 0,114v + 0,0152v^2.$$

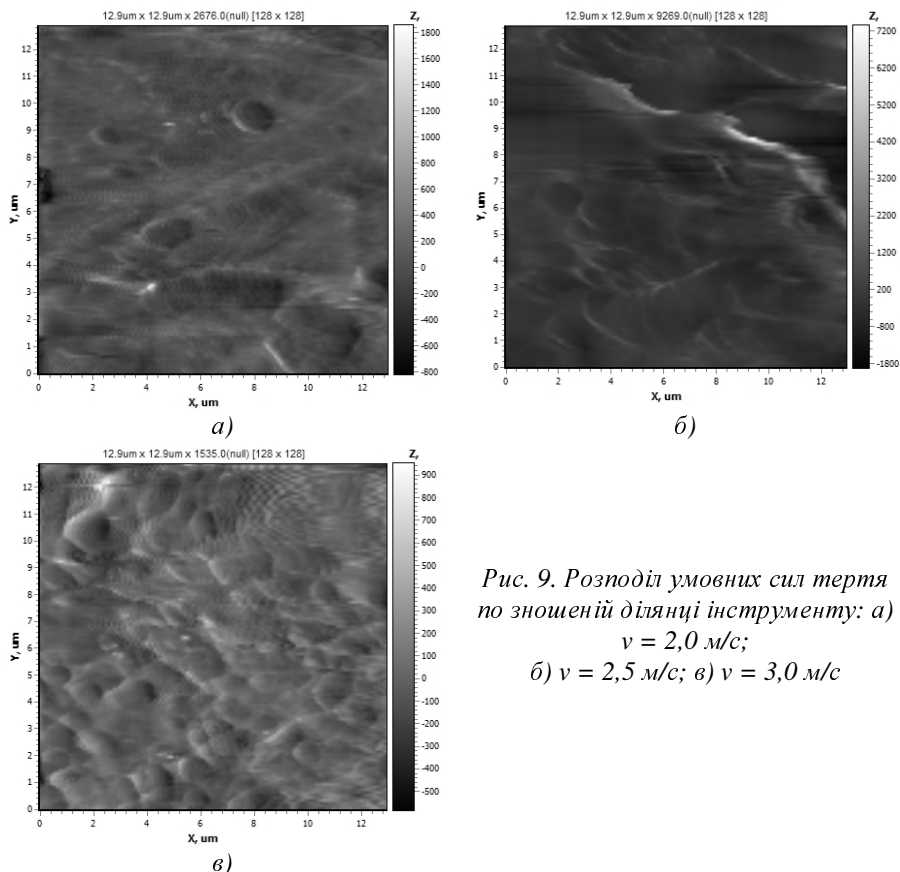


Рис. 9. Розподіл умовних сил тертя по зношеній ділянці інструменту: а)  $v = 2,0$  м/с;  
б)  $v = 2,5$  м/с; в)  $v = 3,0$  м/с

**Висновки.** Збільшення швидкості різання в діапазоні від 0,5 до 2,0 м/с призводить до монотонного збільшення висоти мікронерівностей в зоні контакту інструменту зі стружкою внаслідок збільшення навантаження на передню поверхню. В діапазоні швидкостей різання від 2,0 до 3,0 м/с висота мікронерівностей збільшується менш інтенсивно, що пов'язано із тим, що за таких швидкостей обробки, сили різання зменшуються більш інтенсивно, ніж довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструмента, що призводить до зменшення навантаження різальної кромки.

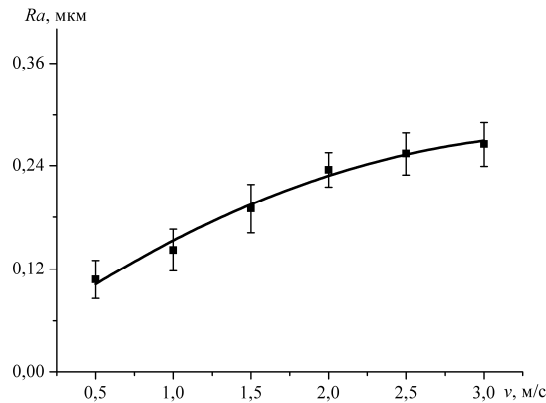


Рис. 10. Вплив швидкості різання при обробці сталі ШХ15 (60HRC) ( $S = 0,14$  мм/об.;  $t = 0,2$  мм) на висоту мікронерівностей в зоні контакту інструменту з ПНТМ зі стружкою

Головним фактором впливу на висоту мікронерівностей на контактних поверхнях інструменту при швидкостях різання 2,0–3,0 м/с є швидкість сходу стружки та підвищена температура на передній поверхні інструменту із ПНТМ на основі КНБ.

#### Список використаної літератури:

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014. – 608 с.
2. Электронный ресурс. – Режим доступа : [www.ntmdt.ru/spm-basics/view/lateral-forces](http://www.ntmdt.ru/spm-basics/view/lateral-forces).
3. Сверхтвердые материалы. Получение и применение : в 6 т. / под общ. ред. Н.В. Новикова. – Т. 5 : Обработка материалов лезвийным инструментом / под ред. С.А. Клименко. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАНУ, 2006. – 316 с.

КЛИМЕНКО Сергій Анатолійович – молодший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.Н. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- різальні інструменти.

КЛИМЕНКО Сергій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- різальні інструменти.

БОНДАРЕНКО Максим Олексійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент Міжнародного навчально-наукового центру «Мікронанотехнології та обладнання» Черкаського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- наукове приладобудування;
- дослідження мікро- та нанооб'єктів.

АНТОНЮК Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор, професор Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- наукове приладобудування.

Стаття надійшла до редакції 15.08.2015