

УДК 621.97

Клименко С. Ан., Рижов Ю. Е., Бурикін В. В., Манохін А. С., к.т.н.  
 Інститут надтвердих матеріалів ім В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна

## ВПЛИВ ЗНОСОСТІЙКОГО ПОКРИТТЯ $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ ПНТМ НА ОСНОВІ КНБ

Klimenko S., Ryzhov Yu., Burykin V., Manohin A.  
 V. M. Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

### INFLUENCE $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$ WEAR-RESISTANT COATINGS ON THE PERFORMANCE OF THE CBN TOOLS

*Виготовлення деталей машин неможливе без використання інструментів з нових інструментальних композитів, які повинні мати високу стійкість, надійність, а також забезпечувати високу якість оброблених поверхонь, до таких композитів відносяться полікристалічні надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бору. Одним з ефективних шляхів підвищення працездатності різального інструменту із ПНТМ на основі КНБ являється нанесення на його робочі поверхні зносостійких покриттів. Наноконпозиційні покриття на основі  $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$  представляють собою нову генерацію матеріалів і потребують додаткових досліджень. З цією метою проведено дослідження впливу зносостійкого покриття  $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$  на працездатність різального інструменту із ПНТМ на основі КНБ. Досліджувалися такі параметри процесу, як температура різання, а також показники зносу різального інструменту. Дослідження показали, що використання покриття на основі  $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$  дає можливість зменшити температуру різання за рахунок того, що покриття знижує адгезійну взаємодію інструменту з оброблюваним матеріалом, тим самим зменшуючи коефіцієнт тертя і, як наслідок – температуру різання. Крім того зносостійке покриття  $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$  можна розглядати, як своєрідний проміжний технологічний шар між контактуючими поверхнями інструментального та оброблюваного матеріалу, через який можна керувати властивостями інструментального матеріалу, основними характеристиками різання, зношуванням і працездатністю інструменту, шляхом вибору складу, структури і будови покриття, типу його зв'язку з інструментальним матеріалом і технологічними умовами його отримання. Незважаючи на те, що покриття  $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$  має нижчі механічні характеристики ніж матеріал основи, але низький коефіцієнт тертя, стійкість до адгезійного зношення, дає можливість його використання на етапі припрацювання інструменту.*

*Ключові слова:* зносостійкі покриття, процес різання, інструменти із ПНТМ на основі КНБ, температура різання, працездатність

#### Вступ

Виготовлення деталей машин новітнього покоління і інших складних механічних систем неможливий без використання інструментів з нових інструментальних матеріалів, які повинні мати високу стійкість, надійність, а також забезпечувати високу якість оброблених поверхонь. Одним з ефективних шляхів підвищення працездатності різального інструменту являється нанесення на його робочі поверхні зносостійких покриттів.

Зносостійкі покриття повинні володіти: високою твердістю і зберігати її при температурах різання; інертністю до адгезії та високотемпературної корозії з оброблюваним матеріалом у всьому діапазоні температур різання; стабільністю механічних властивостей аж до температури теплостійкості інструментального матеріалу; інертністю до розчинення в оброблюваному матеріалі при високих температурах; опором до руйнування при значних коливаннях температур і напруг. Також властивості зносостійких покриттів бути сумісними з властивостями матеріалу інструменту. У цьому випадку матеріали покриття та інструменту повинні мати: спорідненість кристалохімічної будови, що обумовлює високу міцність їх адгезії; оптимальне співвідношення основних фізико-механічних і теплофізичних характеристик (модуль пружності, коефіцієнта Пуассона, лінійного розширення, тепло-і температуропровідності); малу схильність матеріалів до твердофазних дифузійних реакцій у всьому діапазоні температур і напружень в умовах процесу різання.

До загальних вимог, що ставляться до зносостійких покриттів, належать: висока щільність і суцільність покриття, що забезпечують захист матеріалу інструменту від взаємодії з оброблюваним матеріалом і навколишнім середовищем; стабільність властивостей покриття в часі; малі коливання товщини покриття в межах робочих поверхонь, що дозволяють зберегти високу геометричну точність інструменту, можливість отримання покриттів гранично простим і економічним способом [1].

В якості матеріалів для покриття на різальних інструментах використовують карбіди, нітриди, карбонітриди,

бориди і силіциди тугоплавких металів (титан, цирконій, ванадій, хром, вольфрам), а також алмазоподібні матеріали на основі вуглецю, які завдяки високій твердості і температурі плавлення зменшують адгезійну взаємодію з оброблюваним матеріалом, оксид алюмінію  $Al_2O_3$  – для зменшення окислювальних процесів на робочих поверхнях інструментів.

Вибір покриття здійснюється в залежності від типу оброблюваного матеріалу і області його застосування [2]. На теперішній час все більше застосування знаходять композиційні і багат шарові покриття, які в максимальній мірі здатні задовольнити складному комплексу вимог, що пред'являється до покриттів на різальному інструменті. В цьому випадку з'являється можливість використання систем матеріалів здатних зберігати високу твердість при високих температурах і при цьому мати підвищену пасивність по відношенню до оброблюваного матеріалу. До таких систем можна віднести деякі оксиди (особливо  $Al_2O_3$ ), бориди ( $NbB_2$ ,  $TaB_2$ ) та нітриди ( $Si_3N_4$ ) [3]. Найбільш доцільно їх використання як бар'єрний шар, так як це дозволяє ефективно стримувати дифузійні процеси, знижує схильність матеріалу інструмента до окислення при високих температурах.

Для успішного гальмування тріщин, що з'являються в інструменті під час роботи, багат шарові покриття, повинні включати до свого складу шари з високою тріщиностійкістю і поєднувати шари змінної твердості.

Покриття на різальному інструменті дозволяють значно підвищити його стійкість. Проте на різних технологічних операціях обробки різанням ефективність інструменту з покриттям неоднакова. Зокрема, при переході від безперервного до переривчастого різання ефективність застосування зносостійких покриттів знижується. Покриття  $TiN$ ,  $TiC$ ,  $Al_2O_3$  на інструментах з швидкорізальних сталей і твердих сплавів знижують (до 20%) сили різання і потужності тепловиділень зони різання. Значне зниження сил і температур різання на 20-40%, дозволяє підвищити стійкість різального інструмента в 2 і вище раз, або збільшити швидкість різання від 20 до 60% і значно покращити шорсткість обробленої поверхні [4].

#### Мета роботи

Зносостійкі покриття переважно наносять на інструменти з швидкорізальної сталі, твердосплавні і керамічні інструменти. Стосовно ж застосуванню даних покриттів до інструментів із ПНТМ на основі КНБ, а також вивченню механізму дії даних покриттів, приділено відносно мало уваги. У той же час це один з перспективних шляхів управління працездатністю інструментів, оснащених такими матеріалами. Враховуючи, що процес різання інструментами із ПНТМ на основі КНБ супроводжується значними температурами, однією з основних функцій зносостійких покриттів, на робочих поверхнях інструменту, є зниження температури різання.

Метою нашого дослідження являється оцінка впливу зносостійкого покриття  $n-TiC/\alpha-C$  стосовно інструментів із ПНТМ на основі КНБ на стійкість та тепловий стан різального інструменту, а також визначення перспектив його застосування.

#### Результати досліджень

Враховуючи те, що більшість покриттів має нижчі характеристики, ніж інструментальний матеріал на основі КНБ, зносостійкі покриття доцільно використовувати в період припрацювання інструменту, що дозволяє підвищити надійність інструменту в період динамічного навантаження.

Надтверді нанокомпозиційні покриття на основі  $n-TiC/\alpha-C$  представляють собою нову генерацію матеріалів. Вони складаються, як мінімум, з двох фаз з нанокристалічною і аморфною структурою. Внаслідок малого розміру зерна ( $\leq 10$  нм) і більш значної ролі граничних зон, які оточують окремі зерна, ведуть себе по різному в порівнянні з матеріалами з розміром зерна більше 100 нм. і демонструють абсолютно інші властивості. Таким чином саме нанокомпозити являються найбільш перспективними матеріалами для створення зносостійких покриттів для різального інструменту.

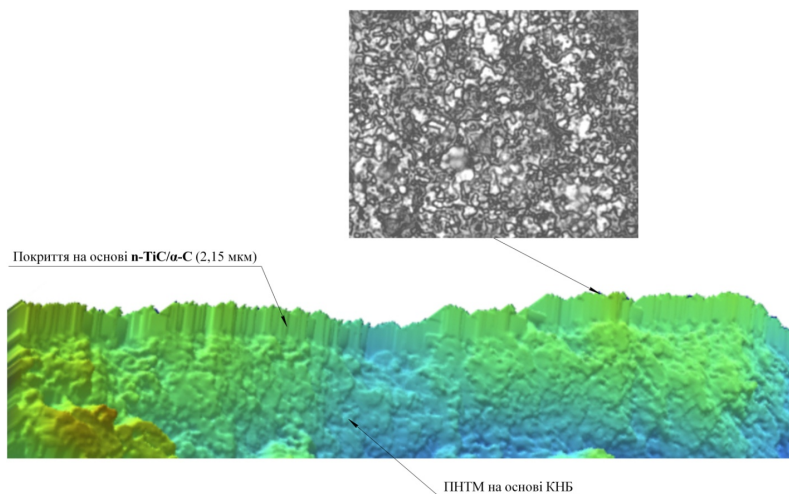


Рис. 1. Архітектура та зовнішній вигляд поверхні покриття  $n-TiC/\alpha-C$  нанесеного на робочі поверхні різальної пластини із ПНТМ на основі КНБ

Механічні характеристики покриття n-TiC/α-C наведені в табл. 1.

Для проведення досліджень використовувалися інструмент з різальними пластинами із ПНТМ на основі КНБ з покриттям n-TiC/α-C товщиною 2,15 мкм (рис. 1), при обробці сталі ШХ15 твердістю 62–64 HRC.

Таблиця 1

Механічні характеристики покриття n-TiC/α-C

Покриття	$H$ , ГПа	$E$ , ГПа	$\varepsilon$ , %
n-TiC/α-C TiC $\delta = 0,15$ мкм + TiC/α-C $\delta = 2$ мкм	26	296	2,694

Так як інструменти із ПНТМ на основі КНБ мають низьку електропровідність, визначення температури різання методом природної термопари неможливе, тому для визначення температури використовувалася штучна хромель-алюмелева термопара, яка встановлювалася у державку інструменту. Дані вимірювань фіксувалися за допомогою ПК оснащеного АЦП.

Температура різання визначалась на основі експериментально-розрахункового підходу з використанням рішення зворотної задачі теплопровідності. Такий підхід дозволяє отримати експериментальні та розрахункові дані, які залежать від вхідних параметрів процесу обробки. В нашому випадку вихідним параметром являється температура різання ( $T_r$ ), а також геометричні параметри контактних ділянок інструменту. Невідомий вхідний параметр  $T_r$  можна визначити в ході рішення зворотної задачі теплопровідності на основі даних експериментальних вимірювань.

Для рішення зворотної задачі теплопровідності методом кінцевих елементів використовувалась 3-D модель інструменту, яка включає в себе державку, різальну пластину із ПНТМ на основі КНБ та підложку із твердого сплаву ВК8. Теплофізичні властивості матеріалів, що використовувалися в конструкції наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Теплофізичні властивості елементів 3-D моделі

Матеріал	ВК8	ПНТМ на основі КНБ	Сталь 45
$\lambda$ , Вт/м·°C	52	100	40
$C_p$ , Дж/кг·°C	470	670	500

При моделюванні вирішувалася лінійна нестационарна задача теплопровідності, яка визначається рівнянням:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Розбивка на елементи твердотільної моделі різця і його контактних ділянок при моделюванні приведена на рис. 2, розподіл температур на поверхнях інструменту в процесі моделювання на рис. 3.

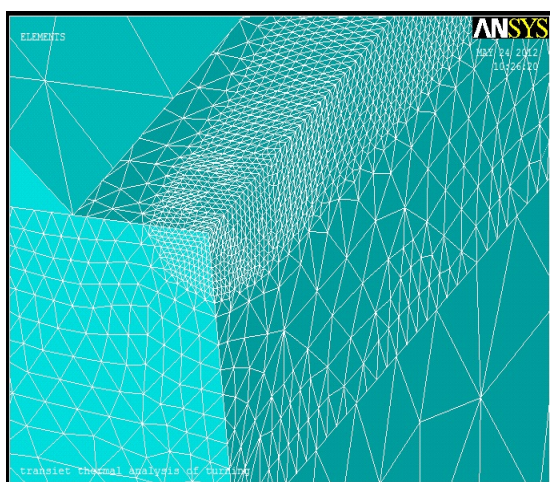


Рис. 2. Розбивка контактних поверхень моделі різця

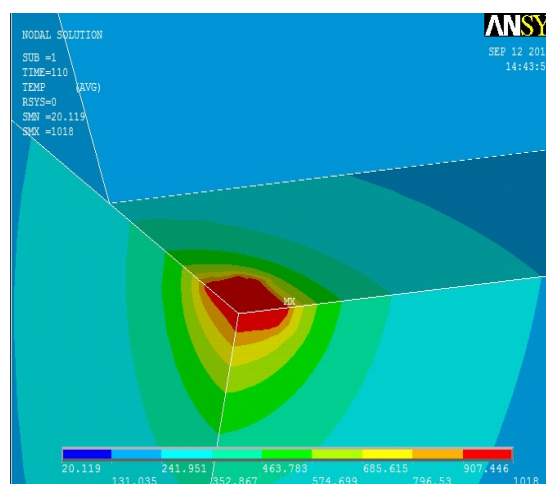


Рис. 3. Розподіл температури різання по контактним ділянкам різця в процесі моделювання

В процесі визначення температури різання було застосовано метод планування експерименту. Це дозволило отримати математичну модель, що описує залежність температури в контрольній точці інструменту від умов обробки, суттєво знижуючи час розрахунку. Отримана наступна залежність температури в контрольній точці встановлення від змінюваних факторів:

$$T_c = -4,79 + 89,1962 C - 86,8571 C^2 + 0,166 T_p + 0,2005 C T_p; \quad (2)$$

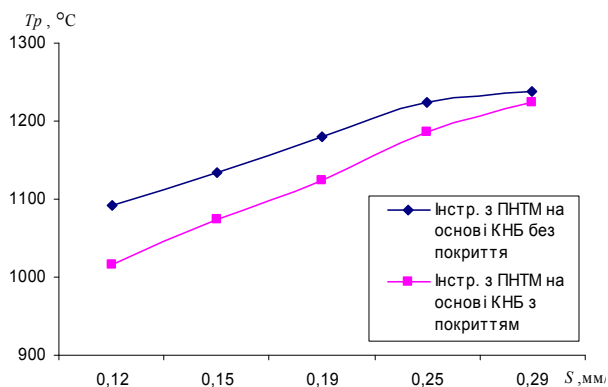
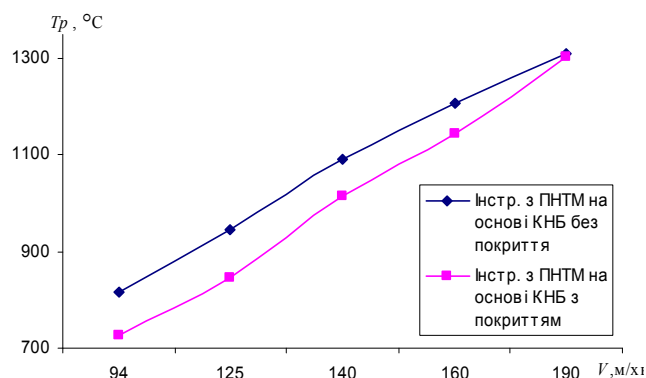
де  $C = a \cdot \zeta^{0,1} [\zeta(1-tgy) + secy] + (0,4-0,56)$  – довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструменту;  $T_r$  – температура різання;  $T_c$  – температура в контрольній точці.

Рішаючи в подальшому рівняння (2) відносно  $T_r$ , знаходимо середню температуру різання для інструменту з покриттям і без, шляхом зміни розрахованої температури в контрольній точці  $T_c$ . Отриманні дані представлені в табл. 3 та рис. 4, 5.

Таблиця 3

## Результати досліджень температури різання при точінні сталі ШХ15

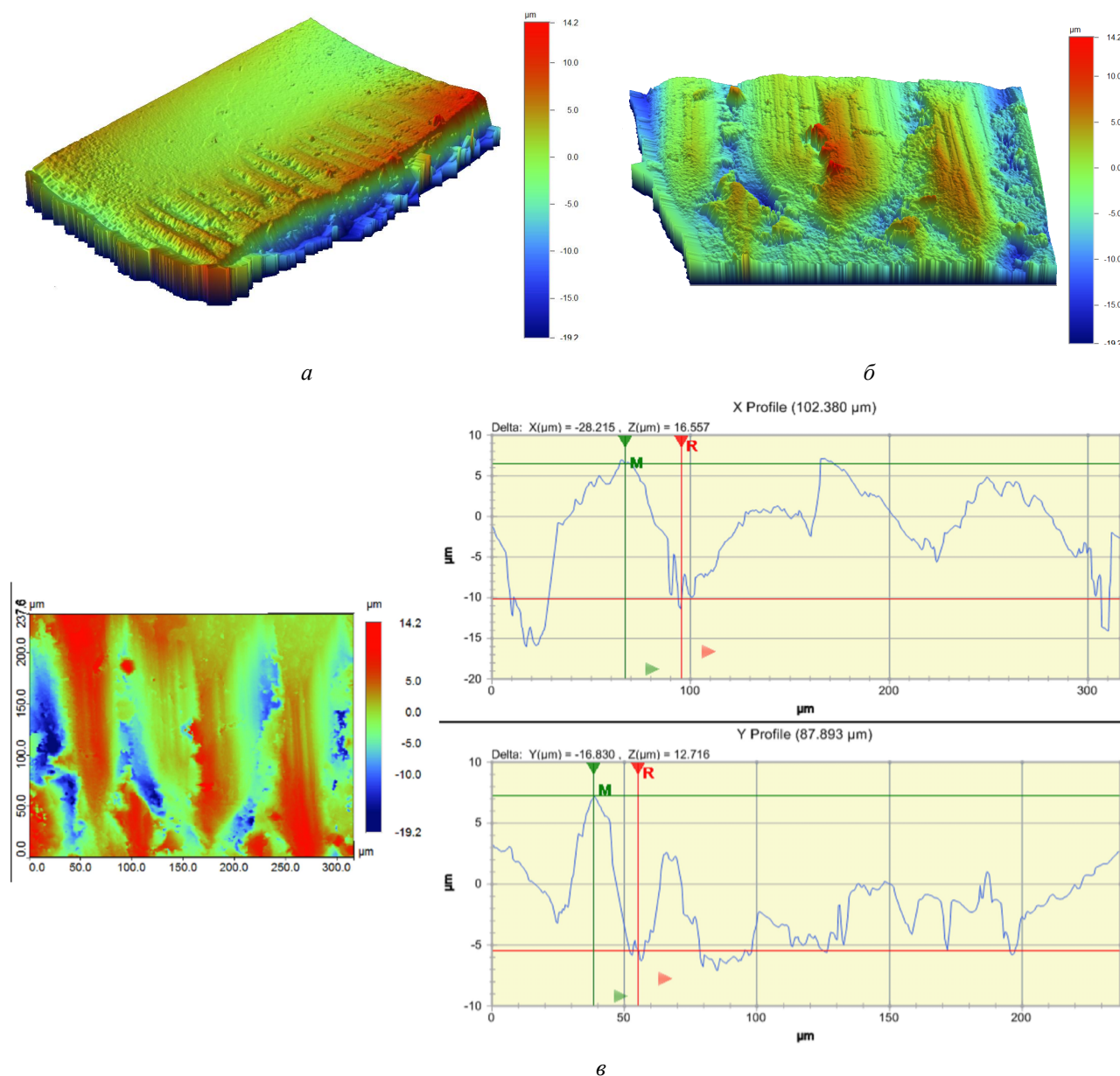
$v$ , м/хв	$S$ , мм/об	$T_{\text{експ.}}$ , °C	$T_r$ , °C	
Без покриття				
94	0,12	198	815	
125			944	
140			275	1092
160				1207
190			324	1310
140	0,12	275	1092	
	0,15		1135	
	0,19	295	1181	
	0,25		1225	
	0,29	308	1238	
З покриттям				
94	0,12	170	726	
125			847	
140			258	1016
160				1143
190			310	1305
140	0,12	258	1016	
	0,15		1075	
	0,19	278	1125	
	0,25		1187	
	0,29	305	1224	

Рис. 4. Залежність температури різання від подачі ( $v = 140$  м/хв;  $t = 0,3$  мм)Рис. 5. Залежність температури різання від швидкості різання ( $S = 0,12$  мм/об;  $t = 0,3$  мм)

Як видно з представлених даних, температура різання має дещо нижчі значення для інструменту з покриттям. Зв'язано це з тим, що покриття знижує адгезійну взаємодію інструменту з оброблюваним матеріалом, тим самим зменшуючи коефіцієнт тертя і, як наслідок – температуру різання. Ще одним можливим пояснення даного ефекту є те, що при зміні коефіцієнта тертя відбувається перерозподіл напруг на контактних

поверхнях інструменту, що також призводить до зменшення температури різання [5]. При інтенсифікації режимів різання, а також часу роботи інструменту температура збільшується і майже дорівнює температурі різання інструментом із ПНТМ на основі КНБ без покриття, це зв'язано з руйнуванням покриття.

Для того щоб отримати представлення про механізм зносу інструменту були проведені дослідження робочих поверхонь інструментів на 3D профілометрі Countour GT рис.6.



**Рис. 6.** Зовнішній вигляд зношеної ділянки різальної пластини після обробки сталі ШХ15 (а) при  $\times 5$  збільшенні; (б) при  $\times 20$  збільшенні та профілограма зношеної поверхні інструменту (в)

Проаналізувавши отримані дані можна сказати, що превалюючим при зносі інструменту є абразивно-адгезійний механізм. Тверді включення в оброблюваному матеріалі, втискуючись в контактні поверхні інструменту царапають їх діючи, як мікрорізці. На контактних ділянках інструменту виразно спостерігаються характерні борозни глибиною близько 13-16 мкм, які співпадають з напрямом швидкості різання. На профілограмі зношеної поверхні пластини (рис.6.в) можна спостерігати борозни відстань між яким порядку 28 мкм і глибиною близько 16 мкм. Збільшення температури різання інтенсифікує хімічну взаємодію інструментального матеріалу з оброблюваним та навколишнім середовищем, внаслідок чого утворюються відносно м'які з'єднання, які інтенсивно видаляються з контактних ділянок інструменту частинками оброблюваного матеріалу. В результаті дії адгезійного руйнування із контактних ділянок інструменту вирываються окремі зерна матеріалу утворюючи заглибини (рис.6.а, б) на поверхні, в подальшому дані зерна сприяють інтенсифікації абразивної взаємодії.

Проведені дослідження показують, що в порівнянні з надтвердими нанокompозитами на основі нітридів, покриття  $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$  має меншу стійкість до підвищення температури і окислювання, що обмежує їх використання для інструментів із ПНТМ на основі КНБ при сухому і швидкісному різанні. Для перевірки працездатності різальних інструментів з покриттями була проведена серія лабораторних експериментів при обробці сталі ШХ15. Результати досліджень представлені на рис.7. Можна констатувати, що абразивно-адгезійний механізм зносу інструменту включає дві складові.

По-перше відбувається мікроруйнування за рахунок втомно-механічної взаємодії на контактних поверхнях інструменту. На цьому етапі покриття зменшує адгезійну взаємодію інструменту з оброблюваним матеріалом в зоні різання, за рахунок чого досягається менша величина його зносу по задній поверхні в порівнянні з інструментом без покриття.

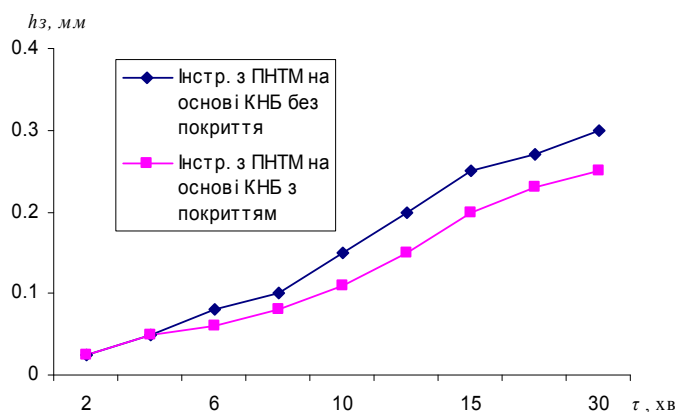


Рис. 7. Залежність ширини фаски зносу інструменту по задній поверхні від часу точіння сталі ШХ15 ( $v = 94$  м/хв.;  $S = 0,12$  мм/об;  $t = 0,3$  мм)

По-друге, зношення інструменту відбувається, коли покриття на контактних поверхнях частково видалено і взаємодія з матеріалом заготовки відбувається з основою ПНТМ, з утворенням на контактних поверхнях рідкої фази.

### Висновок

Ефективність використання зносостійких покриттів на інструментах із ПНТМ на основі КНБ, визначається багатьма факторами: твердістю і зносостійкістю покриття, малою адгезійною активністю по відношенню до оброблюваного матеріалу, міцністю зчеплення з інструментальним матеріалом, коефіцієнтом термічного розширення, теплопровідністю, здатністю зберігати основні властивості при високих температурах. Застосування даних покриттів змінює властивості інструментального матеріалу істотно впливаючи на характеристики процесу різання, збільшуючи опір контактних площадок макро- та мікроруйнування, що зумовлюють перерозподіл напруг, коефіцієнта тертя і, як наслідок, сил і температур різання. Таким чином зносостійкі покриття можна розглядати, як своєрідний проміжний технологічний шар між контактуючими поверхнями інструментального і оброблюваного матеріалу, через який можна керувати властивостями інструментального матеріалу, основними характеристиками різання, зношенням і працездатністю інструменту шляхом вибору складу, структури і будови покриття, типу його зв'язку з інструментальним матеріалом і технологічними умовами його отримання. Проаналізувавши отримані результати можна сказати, що покриття  $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$  дозволяє знизити температуру різання в початковий час процесу різання, зі збільшенням швидкості різання та часу роботи інструменту температура збільшується і майже дорівнює температурі різання для інструменту без покриття, що пов'язано із руйнуванням покриття. Зниження температури обумовлене зміною коефіцієнта тертя та зниженням адгезійної взаємодії. Незважаючи на те, що зносостійке покриття має нижчі механічні характеристики ніж матеріал основи його доцільно використовувати на етапі припрацювання інструменту, що дасть можливість підвищити стійкість на етапі динамічного навантаження.

**Анотація.** Изготовление деталей машин невозможно без использования инструментов из новых инструментальных композитов, которые должны иметь высокую стойкость, надежность, а также обеспечивать высокое качество обработанных поверхностей, к таким композитам относятся поликристаллические сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора. Одним из эффективных путей повышения работоспособности режущего инструмента с ПНТМ на основе КНБ является нанесение на его рабочие поверхности износостойких покрытий. Нанокomпозиционные покрытия на основе  $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$  представляют собой новое поколение материалов и требуют дополнительных исследований. С этой целью проведено исследование влияния износостойкого покрытия  $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$  на работоспособность режущего инструмента с ПНТМ на основе КНБ. Исследовались такие параметры процесса, как температура резания, а также показатели износа режущего инструмента. Исследования показали, что использование покрытия на основе  $n\text{-TiC}/\alpha\text{-C}$

*TiC/a-C* позволяет уменьшить температуру резания за счет того, что покрытие снижает адгезионное взаимодействие инструмента с обрабатываемым материалом, тем самым уменьшая коэффициент трения и, как следствие - температуру резания. Кроме того износостойкое покрытие *n-TiC/a-C* можно рассматривать как своеобразный промежуточный технологический слой между контактирующими поверхностями инструментального и обрабатываемого материала, через который можно управлять свойствами инструментального материала, основными характеристиками процесса резания, износом и работоспособностью инструмента, путем выбора состава, структуры и строения покрытия, типа его связи с инструментальным материалом и технологическими условиями его получения. Несмотря на то, что покрытие *n-TiC/a-C* имеет ниже механические характеристики чем материал основы, но вследствие низкого коэффициента трения, устойчивости к адгезионному износу, дает возможность его использовать на этапе приработки инструмента.

**Ключевые слова:** износостойкие покрытия, процесс резания, инструменты с ПСТМ на основе КНБ, температура резания, работоспособность.

**Abstract.** To optimize the processing conditions, it is necessary to create opportunities for the cutting temperature controlling, because for each pair of tools – detail materials there is an optimal value of this parameter. Machining with conditions that match the optimal cutting temperature ensures maximum tool life.

The practical solution of the problem is possible through the use of wear-resistant coatings. The presence of protective coatings at the contact surfaces of the instrument leads to the changes in mechanical, physical and chemical contact interaction between tool and the work piece. The nanocomposite coating, representing a new generation of materials, based on *n-TiC/a-C* was used at this paper. They consist of at least two phases of nanocrystalline and amorphous structure and have lower mechanical properties (hardness and elastic modulus) than the base material.

The results of experimental researches showed that using the tools with such coatings reduces the average cutting temperature. It is due to the fact that the coating reduces the adhesion interaction between tool and working material leading to the friction declination.

**Keywords:** wear resistant coatings, the turning, CBN cutting tools, cutting temperature, operability.

#### Бібліографічний список використаної літератури

1. Табаков В. П. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В.П. Табаков, А.В. Чихранов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 255 с.
2. Фоменко Р. Н. Исследование износостойких покрытий инструмента на различные параметры процесса резания при точении. – Уфа: УГАТУ, 2009. – Т. 12. – № 4(33). – С. 51–55.
3. Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 366 с.
4. Титов В. Б. Покрытия для режущего инструмента: состояние вопроса и перспективы. – Инструментальный портал «Внедрение инфо». – 2005. – С. 26-29.
5. Копейкина М. Ю. Работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ с вакуумно-плазменным покрытием / М.Ю. Копейкина, С.А. Клименко, Ю.А. Мельничук, В.М. Береснев // Сверхтвердые материалы, 2008. – № 5. – С. 87-97.

#### Reference

1. Tabakov V. P., Chihranov A.V. Iznosostojkie pokrytija rezhushhego instrumenta, rabotajushhego v uslovijah nepreryvnogo (Wear Resistant Coatings of cutting tools, working in continuous cutting rezanija). Ul'janovsk: UIGTU, 2007. 255 p.
2. Fomenko R. N. Issledovanie iznosostojkih pokrytij instrumenta na razlichnye parametry processa rezanija pri tochenii (Study of tool wear resistant coatings on various parameters of the cutting process in turning). Ufa: UGATU, 2009. T. 12. No 4(33). pp. 51–55.
3. Vereshhaka A. S. Rabotosposobnost' rezhushhego instrumenta s iznosostojkimi pokrytijami (The efficiency of cutting tool with wear-resistant coating). Moscow: Mashinostroenie, 1993. 366 p.
4. Titov V. B. Pokrytija dlja rezhushhego instrumenta: sostojanie voprosa i perspektivy (Coatings for cutting tools: status of the problem and prospects). Instrumental'nyj portal «Vnedrenie info». 2005. pp. 26-29.
5. Kopejkina M. Ju., Klimenko S.A., Mel'nijchuk Ju.A., Beresnev V.M. Rabotosposobnost' rezhushhego instrumenta, osnashhennogo PSTM na osnove KNB s vakuumno-plazmennym pokrytiem (The efficiency of CBN cutting tool equipped with vacuum plasma coating). Sverhtverdye materialy, 2008. No 5. pp. 87-97.

Подана до редакції 16.10.2013