

УДК 621.9.025

**А.С. МАНОХІН**, канд. техн. наук,  
**С.А. КЛИМЕНКО**, д-р техн. наук,  
**М.Ю. КОПЕЙКІНА**, канд. техн. наук, Київ,  
**В.М. БЕРЕСНЄВ**, д-р техн. наук,  
**В.О. СТОЛБОВИЙ**, канд. техн. наук, Харків, Україна

## **ЗНОС ІНСТРУМЕНТІВ З PсBN ІЗ ПОКРИТТЯМИ (TiAlSiY)N, Mo<sub>2</sub>N/CrN**

Розглянуто знос інструментів з PсBN «борсиніт» із захисними покриттями – багатокомпонентним (TiAlSiY)N і багатошаровим, який складається з шарів Mo<sub>2</sub>N і CrN, при точінні загартованих сталей. Показано, що використання покриття системи Mo<sub>2</sub>N/CrN підвищує стійкість інструменту на 25%, а покриття (TiAlSiY)N – до 66%.

**Ключові слова:** захисні покриття, стійкість інструменту

Рассмотрен износ инструментов из PсBN «борсинит» с защитными покрытиями – многокомпонентным (TiAlSiY)N и многослойным, состоящим из слоев Mo<sub>2</sub>N и CrN, при точении закаленных сталей. Показано, что использование покрытия системы Mo<sub>2</sub>N/CrN повышает стойкость инструмента на 25%, а покрытия (TiAlSiY)N – до 66%.

**Ключевые слова:** защитные покрытия, стойкость инструмента

The wear of tools with PсBN "borcinit" with protective coatings – multicomponent (TiAlSiY) N and multilayer, consisting of layers Mo<sub>2</sub>N and CrN – at the turning of hardened steels is considered. It has been shown that the use of Mo<sub>2</sub>N / CrN coating increases the tool's lifetime by 25%, and the coating (TiAlSiY) N – up to 66%.

**Keywords:** protective coatings, tool's lifetime

### **Вступ**

Ефективними матеріалами для оснащення різальних інструментів, що забезпечують обробку виробів із загартованих сталей та сплавів твердістю 45–65 HRC при підвищених швидкостях різання із заданою якістю обробленої поверхні, є інструменти із полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору (PсBN) [1]. Збільшення в промисловості долі використання важкооброблюваних міцних сталей та сплавів обумовлює актуальність проведення досліджень, направлених на підвищення працездатності таких інструментів.

Перспективним підходом до цього є нанесення на робочі поверхні інструментів захисних покриттів.

Наявність на контактних поверхнях інструменту захисних покриттів призводить до зміни механіки та фізико-хімії контактної взаємодії інструменту і оброблюваного виробу. Перше зумовлено перерозподілом напружень на поверхнях інструменту, зміною коефіцієнта тертя і, як наслідок, сили і температури різання. Друге пов'язане з тим, що для

забезпечення найбільш оптимальних умов роботи різального інструменту в кожному конкретному випадку потрібно вибирати таке покриття, яке забезпечує мінімізацію або відсутність ефектів, що найбільш негативно впливають на працездатність різального інструменту. Захисне покриття може виконувати роль пасивного протектора, який перешкоджає безпосередньому контактуванню матеріалу інструмента та оброблюваного матеріалу в зоні різання, або грати «активну» роль [2], змінюючи умови хімічної взаємодії контактуючих матеріалів і елементів оточуючого середовища в зоні різання. У відповідності до цього перспективними для застосування є декілька типів покриттів – багатокомпонентні, багат шарові, складнолеговані, що знижують інтенсивність тертя на контактних ділянках інструменту, уповільнюють адгезійні й хімічні процеси в зоні різання, та такі, структура яких характеризується зменшеним рівнем внутрішніх напружень, які формуються у процесі осадження покриття.

Аналіз публікацій, наприклад, [3–4] з використання різальних інструментів із PсBN не виявив будь-яких типів покриттів, рекомендованих для даного типу інструменту. Виходячи з особливостей контактної взаємодії з оброблюваним матеріалом – найбільш часто застосовуються композиції на основі складного нітриду TiAlN. Дослідження, проведені в [5], показали, що крім цієї системи доцільним є застосування також покриттів, які мають у своєму складі нітриди Mo і Cr. Але порівняльні дослідження працездатності інструментів з такими покриттями не виконувалося.

Викликає інтерес експериментальне опробування різних нітридних покриттів, нанесених на різальні інструменти із PсBN, з метою пошуку найбільш перспективних складів покриттів для підвищення стійкості інструменту. Це й було метою виконаної роботи.

### **Методика досліджень**

Експерименти проводилися в умовах точіння заготовок із сталі ХВГ, загартованих до твердості 60–62 HRC та 48–52 HRC. Режими різання:  $t = 0,15$  мм;  $S = 0,08$  мм/об;  $v = 75, 85, 136–132$  м/хв. Геометричні параметри інструменту:  $\gamma = -10^\circ$ ;  $\alpha = 10^\circ$ . Застосовувалися різальні інструменти, оснащені пластинами RNMN 070300 із PсBN «борсініт» (ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України).

Перевірялися експлуатаційні властивості інструментів з такими покриттями:

– багатокомпонентне покриття (TiAlSiY)N з однофазною структурою з ГЦК атомною ґраткою, яка легована добавкою Y [6]. Твердість покриття  $HV_{0,5} = 49,5$  ГПа, товщина  $\sim 5$  мкм.

– багат шарове покриття, яке складається з шарів Mo<sub>2</sub>N і CrN, що чергуються (товщина кожного шару близько 10 нм) [5]. Твердість покриття  $HV_{0,5} = 38$  ГПа, товщина  $\sim 4,8$  мкм.

Знос інструментів по задній поверхні вивчався з використанням комп'ютеризованого мікроскопу «Cooling Tech» (Китай). Шорсткість обробленої

поверхні оцінювалася профілометром-профілографом мод. 170311 заводу «Калібр». Електронно-мікроскопічні дослідження виконувались на приладі Zeiss EVO 50 XVP (Німеччина).

### Експериментальні результати

На рис. 1 представлені фаски зносу на задній поверхні інструменту із покриттям, починаючи з 30-ї секунди різання. Характерною рисою контактних поверхонь інструменту є, насамперед, руйнування покриття, а не поступове стирання інструменту з утворенням ділянки зносу, яка захоплює основу вже в період припрацювання (0,5–1,5 хв. різання). Це обумовлено високими значеннями напружень в контактній зоні при різанні. Руйнування, ймовірно, відбувається шляхом сколювання шару покриття аж до основи на ділянці, що прилягає до різальної кромки. Можливе також утворення тріщин в покритті на задній поверхні інструменту, паралельних різальній кромці (рис. 2).

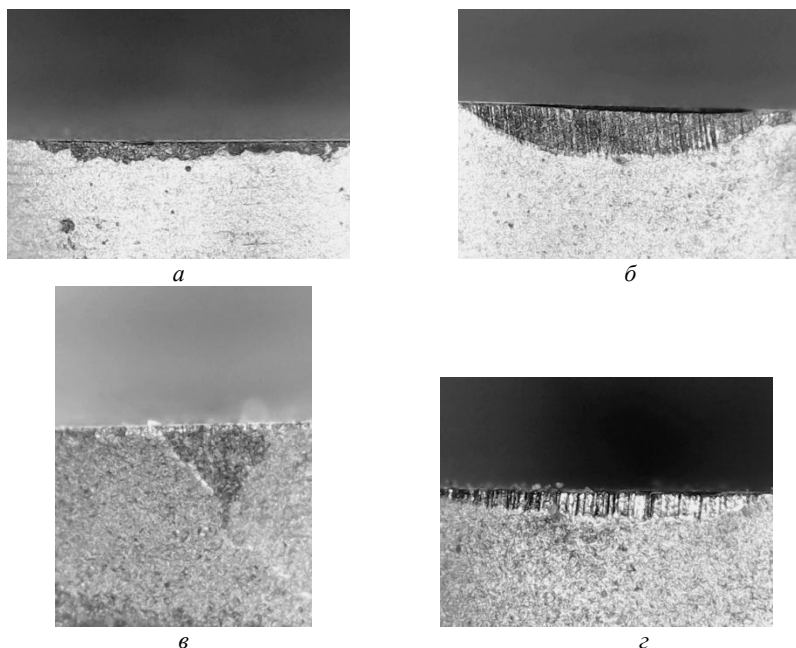


Рисунок 1 – Фаска зносу на задній поверхні різця із покриттями  $\text{Mo}_2\text{N/CrN}$  (а, б),  $(\text{TiAlSiY})\text{N}$  (в, г) в процесі припрацювання (а, в) і після 10 хв. різання (б, г)

Сколювання покриття до самої основи в перші секунди різання носить ймовірнісний характер, про що свідчить вид зруйнованої ділянки покриття (рис. 2). Область руйнування покриття у інструмента, який відпрацював 30 с, більше в порівнянні з інструментом після 1 хв. різання. Для порівняння, на

рис. 1 (в, г) представлені фото, що характеризують кінетику зношування різального інструменту із покриттям (TiAlSiY)N.

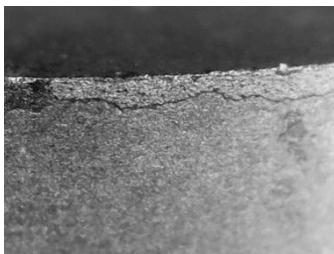
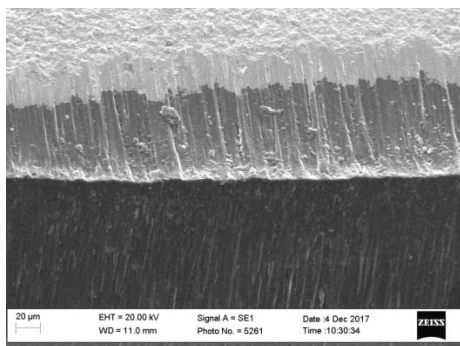
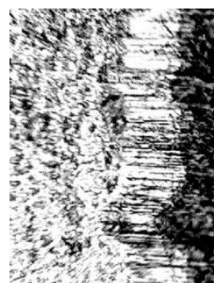


Рисунок 2 – Тріщина в покритті (TiAlSiY)N після 30 с різання

Характерною особливістю зношування інструменту з покриттям в зазначених умовах різання є також наявність перехідної зони між власне фаскою зносу на основі (надтвердому композиті) та поверхнею із покриттям, що не піддавалася тертю. Вона з'являється внаслідок когезійного руйнування покриття і його стирання. У зв'язку з практично повною руйнацією покриття дані перехідні зони є єдиними ділянками, на яких покриття все ж зберігається в межах контактних поверхонь. Очевидно, інтенсивністю руйнування матеріалу в цих перехідних зонах (рис. 3) і визначається швидкість розширення лунки на передній і фаски на задній поверхнях інструменту, тобто інтенсивність зношування інструменту.



*a*



*b*

Рисунок 3 – Контактні ділянки інструменту із покриттям  $\text{Mo}_2\text{N/CrN}$ :  
*a* – передня поверхня; *b* – задня поверхня

Першочерговим фактором, що визначає працездатність покриття, є адгезійна міцність його зчеплення з основою. При недостатній адгезійній міцності спостерігається відшарування значних областей покриття на

контактних ділянках різця (рис. 4) і стійкість інструменту обумовлена зношуванням основи інструменту з PсBN. Необхідно відзначити, що адгезійна міцність покриття, що містить Mo і Cr достатньо висока, так як руйнування покриття фіксувалося тільки в області, прилеглої до різальної кромки, відшаровування ж покриття по всій площі контактних ділянок не спостерігалось. У загальному випадку для запобігання адгезійного відшаровування покриттів на PсBN рекомендується попереднє нанесення підшару Ti [7] товщиною  $\sim 100$  нм.

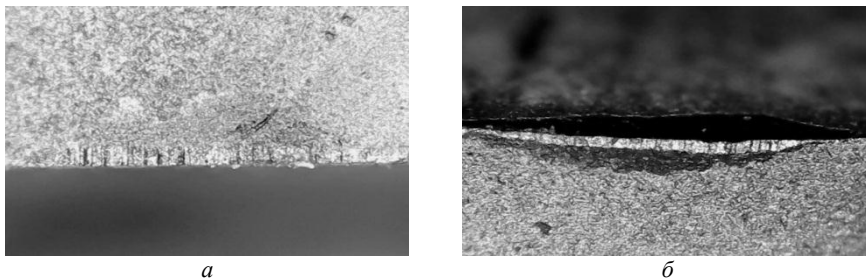


Рисунок 4 – Адгезійне відшарування покриття (TiAlSiY)N на різці з PсBN:  
а – передня поверхня; б – задня поверхня

Для порівняння ефективності двох досліджуваних покриттів, при проведенні експериментів величина зносу різального інструменту по задній поверхні вимірювалася в різні моменти часу так, щоб можна було екстраполювати криву зносу до критерію стійкості інструменту  $h_z = 0,3$  мм. Як видно з рис. 5, мінімальний знос після 10 хв. різання спостерігається у різальних інструментів з PсBN-(TiAlSiY)N і становить 0,14 мм ( $v = 85$  м/хв.). Для різців з PсBN -Mo<sub>2</sub>N/CrN величина  $h_z$  при  $T = 10$  хв. дорівнює 0,20 мм ( $v = 75$  м/хв.). Для порівняння, знос інструменту з PсBN без покриття при зазначених швидкостях в контрольний момент часу досягав 0,24 і 0,20 мм відповідно. На підставі екстраполяції можна припустити, що коефіцієнт підвищення стійкості по відношенню до інструменту з базовим PсBN «борсініт» для інструментів з першим і другим покриттями досягне 1,25 і 1,66 рази відповідно.

Отримані результати свідчать про особливу перспективність використання покриття (TiAlSiY)N. При цьому необхідно підкреслити, що в даному випадку потрібна додаткова верифікація експериментальних даних з метою виключення випадкових факторів, а також збільшення загального шляху різання для визначення реальної кінетики зношування інструменту без використання екстраполяції експериментальних результатів.

Для цього виконана серія експериментів при точінні сталі ХВГ, яка була термооброблена до твердості 48–52 HRC. Режими різання:  $t = 0,15$  мм;  $S = 0,12$  мм/об;  $v = 136$ – $132$  м/хв. Вимірювання величини зношування інструменту здійснювалося за допомогою мікроскопа, закріпленого на станині верстата.

Проходи різцями із покриттям і без здійснювалися поперемінно. Це дозволило забезпечити максимальну однорідність умов випробувань двох інструментів із покриттям за швидкістю різання і твердістю заготовки, так як обидва ці чинники залежать від діаметра заготовки, що впливає на результат експериментів при великій кількості проходів.

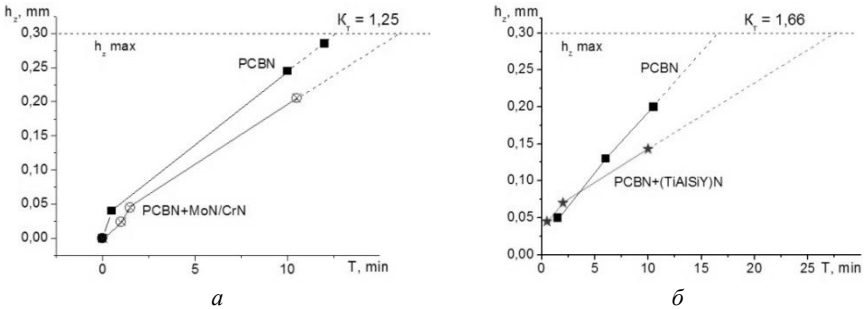


Рисунок 5 – Криві зносу інструментів з PCBN із покриттям:  
 $a$  –  $\text{Mo}_2\text{N}/\text{CrN}$  ( $v = 85$  м/хв.);  $b$  –  $(\text{TiAlSiY})\text{N}$  ( $v = 75$  м/хв.)

Фаски зносу на задніх поверхнях інструментів представлені на рис. 6.

Стійкість інструменту обмежена швидкою деградацією контактних поверхонь і наростанням ширини фаски зносу на задній поверхні різця або відколами і втратою різальною кромкою прямолінійності, що обумовлює зростання висоти мікронерівностей на оброблюваній поверхні. Так, в досліджуваному випадку різке збільшення шорсткості обробленої поверхні (від  $Ra$  0,35–0,40 до  $Ra$  0,55–0,60) має місце починаючи з 21 хв. різання, що пов'язане з інтенсивним мікрОВикришуванням різальної кромки інструменту.

У той же час, якість обробки інструментом з PCBN без покриття залишалася стабільною –  $Ra$  0,35. Це пов'язано з особливостями геометрії контактних ділянок на інструменті із покриттям. При зменшенні довжини контакту стружки з передньою поверхнею таких різців можливе більш інтенсивне лункоутворення на передній поверхні, що знижує міцність їх різальних кромок.

З метою визначення критерію стійкості різальних інструментів із покриттям був проведений експеримент з контролем зростання фаски зносу на інструменті, покриття на передній поверхні якого було видалене поліруванням.

МікрОВикришування матеріалу композиту на різальній кромці почалося, в даному випадку, трохи пізніше – після 27 хв. різання ( $h_z = 0,26$  мм), а катастрофічний знос різця по задній поверхні спостерігався на 35 хв. За результатами аналізу даних експерименту, відображених на рис. 7, в якості критерію стійкості інструменту рекомендується час різання до досягнення значень фаски зносу на задній поверхні 0,25–0,27 мм і 0,20–0,22 мм у випадку

наявності покриття тільки на задній поверхні та на задній і передній поверхнях відповідно.

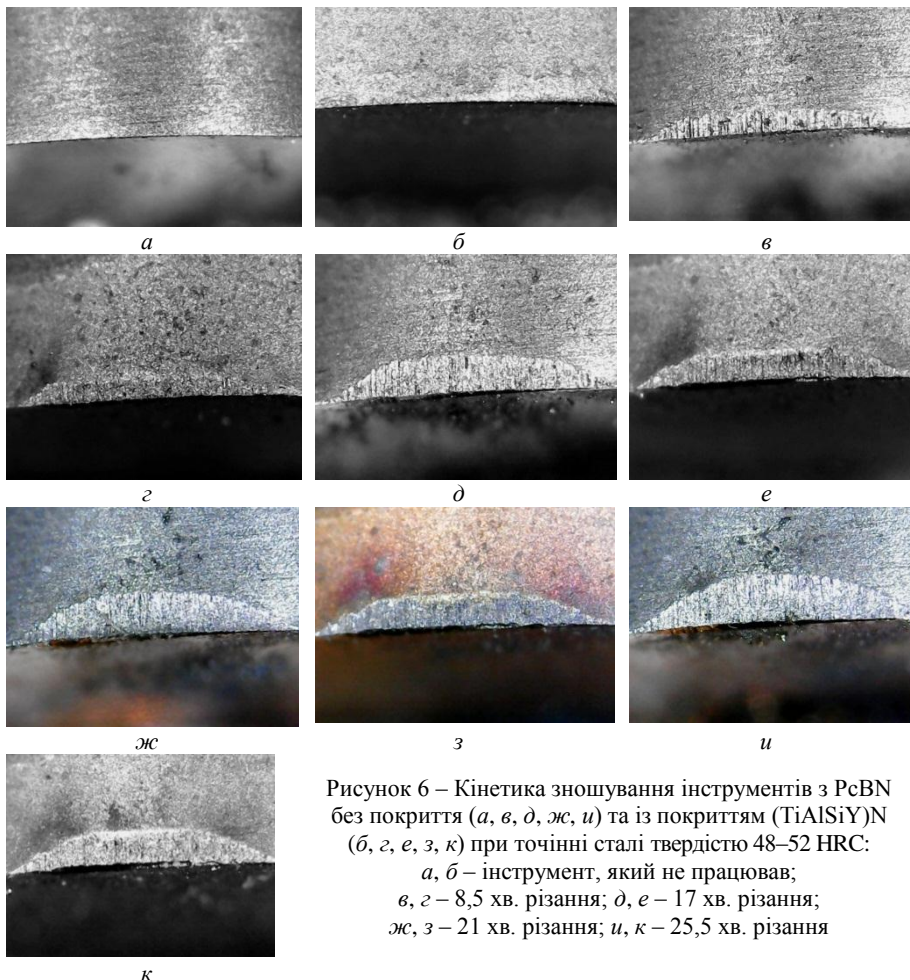


Рисунок 6 – Кінетика зношування інструментів з PcbN без покриття (а, в, д, ж, и) та із покриттям (TiAlSiY)N (б, г, е, з, к) при точінні сталі твердістю 48–52 HRC:

а, б – інструмент, який не працював;  
 в, г – 8,5 хв. різання; д, е – 17 хв. різання;  
 ж, з – 21 хв. різання; и, к – 25,5 хв. різання

### Висновки

Результати виконаних експериментальних досліджень закономірностей зношування інструментів з PcbN із нітридними покриттями двох типів показало, що при обробці заготованих сталей руйнування покриттів в контактних зонах відбувається в початковий період процесу різання – на етапі припрацювання інструменту.

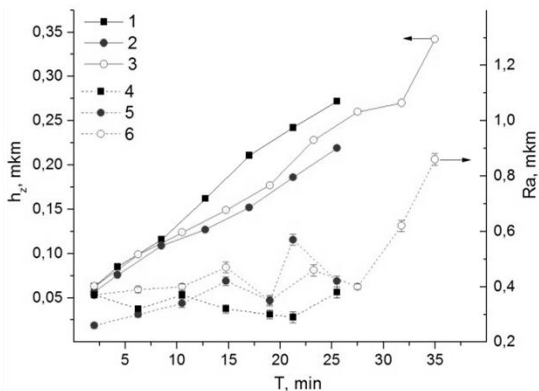


Рисунок 7 – Ширина фаски зносу на задній поверхні та шорсткість обробленої поверхні в залежності від часу різання: 1, 4 – інструмент без покриття; 2, 5 – інструмент із покриттям (TiAlSiY)N на передній та задній поверхнях; 3, 6 – інструмент із покриттям (TiAlSiY)N на задній поверхні

Досліджені типи покриттів знижують інтенсивність зношування інструментів з PcBN та збільшують його стійкість при точінні загартованих сталей. В умовах проведених дослідів інструмент з багатокомпонентним покриттям складу (TiAlSiY)N продемонстрував більш високу ефективність за критерієм зношування по задній поверхні у порівнянні з багатошаровим покриттям Mo<sub>2</sub>N/CrN.

Особливістю зношування інструменту з моноблочним надтвердим покриттям (TiAlSiY)N є початок викришування різальної кромки при величині  $h_z \sim 0,2$  мм, в той час як у інструменту без покриття різальна кромка залишається прямолінійною.

**Список використаних джерел:** 1. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М.: Машиностроение, 2014. – 608 с.; 2. Kopeikina, M. Yu. Efficiency of cutting tools equipped with cBN-based polycrystalline superhard materials having vacuum-plasma coating / M.Yu. Kopeikina, S.A. Klimenko, Yu.A. Mel'niichuk, V.M. Beresnev // J. of Superhard Mat.– 2008.– vol. 30, № 5.– P. 355–362.; 3. M'Saoubi, R., Wear mechanisms of PVD-coated PCBN cutting tools / R. M'Saoubi, M.P. Johansson, J.M. Andersson // Wear. – 2013. – vol.302, № 1–2. – P. 1219–1229.; 4. Taylan, F. Investigation of TiN Coated CBN and CBN Cutting Tool Performance in Hard Milling Application / F. Taylan // J. of Mech. Eng. – 2011. – vol. 57, № 5. – P. 417–424.; 5. Superhard CrN/MoN coating with multilayer architecture / A.D. Pogrebnyak, B.M. Beresnev, O.V. Bondar et al. // Mat. and Design. – 2018; 6. Structure and mechanical properties of TiAlSiY vacuum-arc coatings deposited in nitrogen atmosphere / V.M. Beresnev, O.V. Sobol, A.D. Pogrebnyak et al. // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – Vol. 9, № 3. – P 410–417; 7. Верещака А.С. Наноразмерные многослойно-композиционные покрытия для повышения износостойкости и работоспособности твердосплавных концевых фрез / А.С. Верещака, А.А. Верещака, Ю.И. Бубликов, М.Г. Оганян // Резание и инструменты в технологических системах. – 2014. – Вып. 84. – С. 26–42.

**Bibliography (transliterated):** 1. Instrumenty iz sverhtverdyh materialov / pod. red. *N.V. Novikova, S.A. Klimenko*. – M.: Mashinostroenie, 2014. – 608 s.; 2. *Kopeikina, M. Yu.* Efficiency of cutting tools equipped with cBN-based polycrystalline superhard materials having vacuum–plasma coating / *M.Yu. Kopeikina, S.A. Klimenko, Yu.A. Mel'niichuk, V.M. Beresnev* // J. of Superhard Mat.– 2008.– vol. 30, № 5.– R. 355–362.; 3. *M'Saoubi, R.*, Wear mechanisms of PVD-coated PCBN cutting tools / *R. M'Saoubi, M.P. Johansson, J.M. Andersson* // Wear. – 2013. – vol.302, № 1–2. – R. 1219–1229.; 4. *Taylan, F.* Investigation of TiN Coated CBN and CBN Cutting Tool Performance in Hard Milling Application / *F. Taylan* // J. of Mech. Eng. – 2011. – vol. 57, № 5. – R. 417–424.; 5. Superhard CrN/MoN coating with multilayer architecture / *A.D. Pogrebnyak, B.M. Beresnev, O.V. Bondar* et al. // Mat. and Design. – 2018; 6. Structure and mechanical properties of TiAlSiY vacuum-arc coatings deposited in nitrogen atmosphere / *V.M. Beresnev, O.V. Sobol, A.D. Pogrebnyak* et al. // Inorganic Materials: Applied Research. – 2018. – Vol. 9, № 3. – R 410–417; 7. *Vereshhaka A.S.* Nanorazmernye mnogoslojno-kompozicionnye pokrytija dlja povysheniya iznosostojkosti i rabotosposobnosti tverdosplavnyh koncevnyh frez / *A.S. Vereshhaka, A.A. Vereshhaka, Ju.I. Bublikov, M.G. Oganjan* // Rezanie i instrumenty v tehnologicheskikh sistemah. – 2014. – Vyp. 84. – S. 26–42.