

УДК 621.91.02

**О.Б. Сорока, к.т.н., с.н.с.**

*Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України*

**С.А. Клименко, д.т.н., проф.**

**М.Ю. Копейкіна, к.т.н., с.н.с.**

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

## **ПЕРСПЕКТИВНІ КОНСТРУКТИВНІ СХЕМИ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ІНСТРУМЕНТІВ ТА ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

*Розглянуто сучасні підходи до формування зносостійких захисних покриттів різних конструктивних схем. Показано їх можливості та перспективи вдосконалення.*

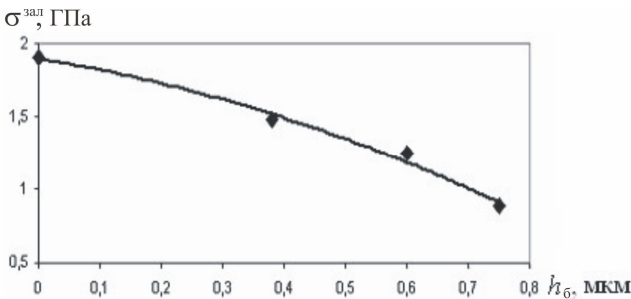
**Вступ.** Головними недоліками інструменту та деталей з покриттями є руйнування їх поверхонь шляхом відшарування покриття від основи (адгезійне руйнування), розтріскування покриття (когезійне руйнування), виривання шматків покриття внаслідок адгезійного схоплювання з оброблюваною поверхнею, контактне викришування. Це відбувається внаслідок надвисоких навантажень, що супроводжують процес експлуатації робочих поверхонь. Ефективні напруження в композиції «основа-покриття» можуть перевищувати експлуатаційні напруження за рахунок дії залишкових напружень, які є результатом процесу формування покриттів. В той же час, залишкові напруження протилежного до експлуатаційних напружень знаку можуть розглядатися як дієвий чинник зниження ефективних напружень.

**Мета.** Забезпечити стійкість покриттів до відшарування та розтріскування можна удосконаленням технології їх нанесення та створенням відповідної конструкції поверхні. Підійти до розв'язання поставленої задачі можливо з двох боків: покращити характеристики міцності системи «основа-покриття», врегулювати залишкові та зменшити експлуатаційні напруження в поверхневих шарах. До вдосконалень конструктивних схем поверхні відносять створення систем з проміжними та буферними прошарками, багат шарових покриттів, в тому числі мікро-, наноструктурних та наношарових, градієнтних систем та систем, отриманих на основі дуплексних технологій. Окремим класом поверхонь із вдосконаленою конструкцією, слід, вочевидь, вважати поверхні дискретного типу.

**Викладення основного матеріалу. Покриття з проміжними шарами.** Забезпечити адгезійну міцність в системі «основа-покриття» і підвищити товщину покриття можна, якщо між твердим PVD-покриттям та основою розташувати тонкі металеві прошарки.

Відзначається, що адгезія, яку забезпечують прошарки нахшталт Al, Ti або Cu, розміщені між твердим покриттям TiAlN та сталевією основою, покращується із зменшенням модуля пружності матеріалу прошарку. Важливими характеристиками покриттів з проміжними шарами є також співвідношення твердості і модуля пружності ( $H/E$ ) та квадрату твердості і модуля пружності ( $H^2/E$ ). Авторами при вивченні прошарків з різних металів (Ti, Cr, Al, W, Nb, Mo, Ag, Cu) виявлено, що для покриттів TiN на швидкорізальній сталі різниця в твердості шарів більше впливає на адгезійну міцність, ніж різниця в їх модулях пружності. Більш того, вища адгезійна міцність притаманна композиціям, в яких твердість проміжного шару є найближчою до твердості основного матеріалу [1].

Прошарок титану, названий буферним, ефективно розміщувати не тільки між покриттям і основою, а всередині самого покриття TiN. Залишкові напруження в покритті зменшуються із збільшенням товщини буферного шару (рис. 1) [2].



*Рис. 1. Залежність залишкових напружень стиску в покритті від товщини  $h_b$  буферного прошарку*

Такий прошарок поглинає енергію при ударному навантаженні, дозволяє підвищити загальну товщину захисного шару, збільшити межу витривалості системи основа-покриття, покращити адгезію в системі «основа-покриття» при одночасному збереженні високих показників твердості та зносостійкості, особливо в умовах корозійного та ерозійного зношування.

**Багатшарові та багатоконпонентні покриття.** Багатшарові покриття дозволяють покращити механічні і трибологічні властивості та створити ефективні композиції з точки зору поєднання різних

характеристик, таких як міцність, низький коефіцієнт тертя, блокування теплових потоків, низька schoплюваність з оброблюваним матеріалом. Наприклад, автори [3] пропонують багатошарові багатофункціональні композиції, в яких для покращення адгезії з основою використано тонкі шари металу, наприклад Ti, Cr, Al або шар нітриду TiN. Більш товсті проміжні шари різного функціонального призначення (триболопастивні, зносостійкі) на основі Ti-N, Cr-N, Ti-Al-N, Ti-Cr-N, Ti -Al-Cr-N наносили для отримання композиційних покриттів із загальною товщиною, яка відповідає умовам застосування покриття в цілому. В верхній частині композиції, як правило, розміщують тверді корозійностійкі шари, що дозволяють зменшити тертя, блокувати теплові потоки та дифузію елементів з оброблюваного матеріалу в інструментальний і навпаки.

Багатошаровість дозволяє також регулювати рівень залишкових напружень в покритті і отримувати, таким чином, покриття більшої товщини без втрат для адгезійної міцності. Водночас, в роботі [4] показано, що шари TiN багатошарового покриття TiN/(Ti,Al)N мають значення залишкових напружень, які значно перевищують величини залишкових напружень одношарового покриття TiN.

На основі скінчено-елементного моделювання виявлено також, що при однаковій товщині покриття та однаковому співвідношенні модулів пружності зовнішнього шару покриття та основи в умовах нормального навантаження поверхні без та з тангенціальною складовою напруження розтягу на поверхні значно знижуються із зростанням кількості шарів покриття [5].

Тим не менш, існують дані, що зразки з багатошаровими покриттями на демонструють меншу величину границі витривалості, ніж зразки з одношаровим покриттям [6].

В роботі [7] запропоновано принцип створення багатофункціональних багатокомпонентних покриттів на основі легування елементами-донорами. Ці покриття, на відміну від відомих, що є сумішами хімічних сполук різних елементів, є однофазними твердими розчинами легувальних елементів в нітриді титану: Ti-Cr-N, Ti-Al-N, Ti-Nb-N, Ti-Mo-N. Зміна концентрації легувальних елементів дозволяє керувати властивостями покриттів.

Одним з найбільш багатообіцяючих напрямків удосконалення функціональних покриттів є концепція покриттів з нанорозмірними зернами та багатошарових покриттів з мікро- та нанорозмірними зернами та нанотовщинами шарів. Зниження рівня залишкових напружень і одночасне підвищення опору ерозійному зношуванню наноструктурного покриття TiN відповідає мінімальному розміру

кристалітів (9 нм) [8]. Багатошарові наноструктурні покриття задовольняють вимогам, що часто протирічать одна одній: висока зносостійкість при високій адгезійній міжшаровій міцності, зниженні рівня залишкових напружень, збалансованості твердості та в'язкості.

Формування нанорозмірних покриттів з чергуванням стовпчастої та дрібнозернистої структури окремих шарів покриття дозволяє запобігати наскрізному росту тріщини та успішно застосовувати інструменти з такими покриттями для операцій як переривчастої, так і безперервної обробки [3]. Періодично перервати стовпчасту структуру покриття TiN і запобігти тріщиноутворенню по границям кристалітів пропонується введенням аморфного нан шару SiN<sub>x</sub>. Багатошарове покриття з нан шарамі TiN (2 нм) та SiN<sub>x</sub> (0,5 нм) демонструє зниження коефіцієнта тертя та підвищення адгезійної міцності порівняно з покриттям TiN. Зазначено, що довговічність вольниць кочення з покриттям TiN/SiN<sub>x</sub> загальною товщиною 0,75 мкм в 10 разів перевищує довговічність непокритої деталі та в 5 разів – деталі із одношаровим TiN [9].

Механічні, трибологічні характеристики і різальні властивості багатошарових наноструктурних покриттів залежать від періоду покриттів та товщини одиничних шарів. Зносостійкість, твердість, коефіцієнт тертя та кількість циклів до адгезійного відшарування при циклічному нормальному контакті на поверхні з інструментальної сталі із наноструктурним багатошаровим покриттям TiN/TiBN залежать від товщини бі-шару і загальної кількості бі-шарів [10].

**Гرادієнтні системи.** Оптимізувати напружено-деформований стан в системі «основа-покриття» можливо завдяки градієнтним властивостям фізико-механічних характеристик основи, покриття чи системи основа-покриття в цілому. При індентуванні з тертям відповідний градієнт модуля пружності основи призводить до зниження еквівалентних напружень на поверхні контакту та на інтерфейсі, а градієнт границі плинності дає можливість збільшити несівну здатність системи в 3–12 разів [11]. Градієнтна конструкція покриття забезпечує плавну зміни показників – від надійного зчеплення з основою до спеціальних властивостей на поверхні. Покриття з додатним градієнтом, в яких модулі пружності зменшуються поступово від поверхні покриття до основи, значно знижують не тільки величини напружень поблизу інтерфейсу, а й градієнт напружень по товщині в умовах контактного навантаження з тертям [12].

Повідомляється [13] про створення градієнтного покриття TiAlCN, якому притаманні високі в'язкість, твердість, теплостійкість та низький

коефіцієнт тертя. Застосування такого градієнтного покриття на розточувальній головці дозволило без підналагодження на розмір обробити ту ж кількість деталей, яку було оброблено пластиною з покриттям TiAlN з трьома підналагодженнями і в 1,5 раза більше деталей, ніж було оброблено пластиною з покриттям TiN з чотирма підналагодженнями.

Зміна опорного потенціалу при формуванні вакуум-плазмового покриття (Ti,Al)N призводить до зміни процентного складу алюмінію, і таким чином, покриття набуває градієнтних властивостей [14]. Як наслідок, покращується адгезія покриття з твердосплавною основою і підвищується довговічність твердосплавного різального інструменту з покриттям.

Концепція градієнтних покриттів перспективна для зміцнення поверхонь інструментів та деталей машин відповідно епюрі їх експлуатаційного навантаження якщо створювати таке покриття вздовж контактної поверхні виробу.

**Дуплексні системи.** Покращити властивості системи «основа-покриття» можна в результаті застосування комбінованих (дуплексних) технологій.

У зв'язку з тим, що в багатьох випадках руйнування системи «основа-покриття» починається з мікропластичної або пластичної деформації основи в зоні адгезійного контакту «основа-покриття», зрозуміло, що достатньо товстий шар, якому притаманні висока твердість, теплостійкість та тріщиностійкість, буде підвищувати опір навантаженню. Створення такого шару з подальшим нанесенням твердого покриття реалізується застосуванням дуплексної технології – нанесення PVD-покриттів на попередньо азотовані сталі [3]. Застосування дуплексної обробки знижує вірогідність пластичної деформації основи в умовах контактного навантаження і забезпечує таким чином несівну здатність системи основа-покриття.

Відомо також, що азотований шар характеризується, окрім високої твердості, наявністю значних (до 1 ГПа) залишкових напружень стиску. Отримано що в при поверхневих шарах композиції «незміцнена основа – PVD-покриття» діють як залишкові напруження стиску (в покритті), так і залишкові напруження розтягу (в основі), а для дуплексної системи «азотована основа – PVD-покриття» приповерхневі шари характеризуються залишковими напруженнями стиску як в покритті, так і в основі. Такий напружений стан дуплексної композиції є сприятливим з точки зору підвищення опору зносу та втомному навантаженню. Чисельне моделювання показало також, що при контактному навантаженні дотичні напруження на поверхні адгезійного контакту в дуплексній композиції є

нижчими за напруження на поверхні контакту покриття з незміщеною основою. Дослідно-промислові випробування, проведені в умовах Норильського гірничо-металургійного комбінату, показали [15], що поліпшення ерозійно-корозійних властивостей сталі 12X18H10T після іонноплазменного термоциклічного азотування з подальшим нанесенням покриття TiN дозволило збільшити стійкість голчастих клапанів запорної арматури більш ніж в 10 разів.

Іонне азотування з подальшим нанесенням покриттів TiN та TiAlN збільшує несівну здатність та стійкість до абразивного зношування [16]. Покриття TiN/TiCN, нанесене на азотовану сталеву поверхню, дозволяє підвищити стійкість до ерозійного зношування [17]. Азотування титанового сплаву Ti-6Al-4V з подальшим нанесенням PVD-покриттів TiN та CrN дозволяє підвищити навантажувальну здатність системи «основа-покриття», покращити триботехнічні характеристики та опір абразивному зношуванню, як в порівнянні з основою без покриттів, так і в порівнянні з основою з покриттями TiN та CrN без попереднього азотування [18]. Відмічається також підвищення границі витривалості після дуплексної обробки.

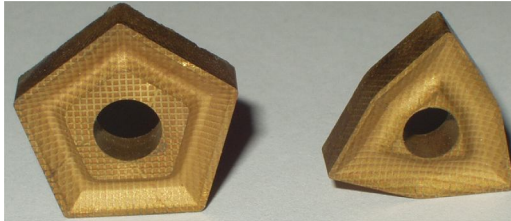
До дуплексних належать також покриття, створені з заснованням комплексу процесів їх формування. Наприклад, нанокомпозитні захисні покриття товщиною 80...110 мкм, наприклад TiCrN/NiCr(Fe, Si, B) та TiAlN/NiCr(Fe, Si, B) або Ti-Si-N/WC-Co-Cr; Ti-Si-N/ Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni-NiCr отримані з використанням комбінації детонаційного або плазмово-детонаційного методів та одного з методів PVD [19].

**Покриття дискретного типу.** Відомо, що для підвищення зносостійкості деталей на поверхнях різної форми згідно із принципом Шарпі створюють регулярні ділянки з компактним розміщенням більш твердих матеріалів, ніж матеріал основи, та регулярним рельєфом, геометричні параметри якого можуть змінюватись в широких межах. Підхід щодо створення поверхонь з дискретною топографією, коли створюється рельєф з відповідною орієнтацією, наприклад в напрямку ковзання, широко застосовується при формуванні поверхонь пар тертя із змащенням. Для деталей, які працюють у важких умовах, широко застосовуються захисні покриття дискретного типу і створені на їх основі композиційні структури з мінімальним зносом. Для створення дискретної топографії традиційно широко застосовується електроіскрове легування, плазмова обробка, коли плазмовим променем сканується лише частина поверхні. Широке використання набувають методи локального зміцнення на основі лазерної обробки, іонної імплантації, дискретного точкового загартування. Дискретну конструктивну схему поверхні можна створити

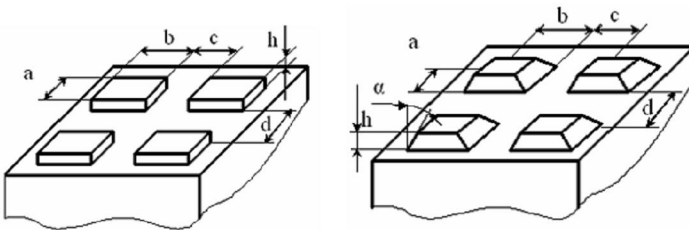
також застосуванням фасонного електроду при нанесенні покриттів методом електроконтактного припикання порошків.

Цілеспрямована заміна суцільного шару покриття переривчастим (фрагментованим) шаром становить ідею принципу формування покриттів дискретного типу, який запропоновано і розроблено в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України під керівництвом проф. Б. А. Ляшенка [20]. Важливо, що ефективність застосування покриттів з дискретною топографією досягається шляхом управління технологічними параметрами або за рахунок вибору параметрів топографії поверхні, або, врешті решт, поєднанням цих шляхів. Створення дискретних покриттів на основі застосування сітчастих екранів успішно реалізовано для PVD-покриттів, зокрема для покриттів, отриманих методом катодно-іонного бомбардування (рис. 2).

Параметри покриттів (рис. 3) є предметом вибору і обираються на основі аналізу залишкових напружень та напружено-деформованого стану в умовах експлуатаційного навантаження таким чином, щоб уникнути когезійного розтріскування покриття та адгезійного руйнування в системі «основа-покриття» та створити стійку природну конструкцію покриттів.



*Рис. 2. Дискретне покриття на твердосплавних різальних пластинах*



*Рис. 3. Схеми дискретних покриттів*

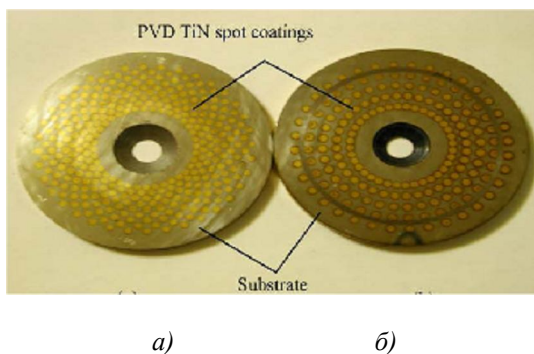
Застосування покриттів дискретного типу на різальному інструменті показало їх високу ефективність. При обробці суцільновальцьованих залізничних коліс різальні інструменти, оснащені твердосплавними пластинами T14K8 з покриттями TiN дискретного типу, в порівнянні з інструментами, оснащеним пластинами з суцільними покриттями, мають стійкість вищу на 70 %. При обробці вальцювальних валків зі сталей 60X2СМФ, 75X2МФ, 80X5МФ, 90ХФ отримано, що стійкість інструменту з суцільним покриттям TiN зростає в 2,5 рази порівняно з інструментом без покриття, а стійкість інструменту з покриттям дискретного типу того ж складу збільшується в 3,7 рази та в 1,45 рази порівняно з інструментом без покриття та з суцільним покриттям відповідно [21].

В роботі [22] розвинута ідея формування покриттів дискретного типу методами фізичного осадження, зокрема, комбінованим методом, коли на основі з матеріалу, що проводить струм, спочатку методом реактивно-електронно-плазмового напилення (РЕП) формуються одиничні ділянки з чистого металу (титану), які потім в розряді реактивного газу модифікуються в хімічні сполуки (азотування титанового покриття). Отримане таким чином «горбкувате покриття» в 2,5...3 рази підвищує зносостійкість твердосплавних пластин порівняно з пластинами з суцільним покриттям, а параметр шорсткості поверхні, обробленої інструментом з "горбкуватим покриттям", в 1,5...2,0 рази нижче, ніж при обробці інструментом з суцільним покриттям. Таке дискретне РЕП-покриття, що складається з нітридної фази  $\epsilon\epsilon\text{-Ti}_2\text{N}$ , на різцях із швидкорізальної сталі дозволяє на 46 % підвищити стійкість та на декілька відсотків знизити силу різання порівняно з інструментом із суцільним покриттям.

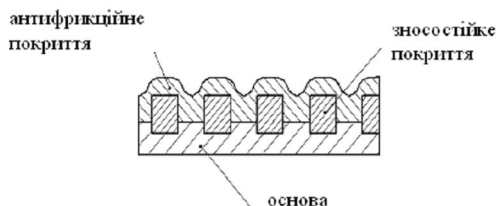
В роботі [23] візерункове точкове PVD TiN-покриття створювалось на дисках з швидкорізальної сталі за допомогою масок-щитків з циліндричними отворами діаметром 2 мм. Островки покриття товщиною 2...3 мкм розташовували у вигляді двох візерунків – в шаховому порядку та вздовж радіусів кола (рис. 4).

В роботі [24] пропонується створювати покриття (рис. 5) на основі мозаїчно-дискретних планарних структур, в яких елементами мозаїки слугують ділянки твердого зносостійкого покриття (TiN, BN, TiCN, TiAlN, TiBN, TiSiBN, TiCrBN) та ділянки антифрикційних покриттів (MoS<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>). Покриття формуються за допомогою комплексу технологічних методів – фотолітографії, використання металічних масок, лазерної обробки.





*Рис. 4. Точкове покриття з візерунком: а – в шаховому порядку; б – вздовж радіусів кола*



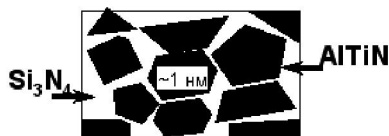
*Рис. 5. Схема мозаїчного дискретного покриття*

Деякі варіанти схем з покриттями дискретного типу, які формуються на базі так званих функціонально-орієнтованих технологій, які забезпечують нові локальні властивості виробу з покриттям, пропонуються в роботі [25]. Пропонуються, зокрема, покриття з ділянками різної форми та товщини, які мають забезпечити, наприклад, різні схеми припрацювання поверхонь пари тертя, а також нетрадиційні характеристики при експлуатації різноманітних елементів машин.

Авторами [26] запропоновано принцип створення PVD-покриттів дискретного типу у вигляді каркасу або сітки з регулярними заглибленнями. Формування таких поверхонь реалізується за допомогою активних екрануючих паст

Відповідно до нової теоретичної концепції, тверді нанокристалічні наноконпозиційні покриття повинні складатися з вільних від дислокацій нанокристалів (твердих фаз) розміром 3...10 нм, які розділені прошарком аморфної фази розміром 1...3 нм. Таки покриття характеризуються стабільною нанотвердістю, яка є близькою до твердості кубічного нітриду бору. Почато виробництво таких

дискретних нанопокриттів, які представляють собою нанокристалічні зерна матеріалу покриття (Ti,Al)N, що занурені в аморфну матрицю Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (рис. 6) [27].



*Рис. 6. Нанокмпозитна дискретна структура*

**Висновок.** Проведений аналіз сучасного стану питання створення захисних покриттів дозволяє дійти висновку, що конструктивні схеми покриттів містять великий резерв забезпечення роботоздатності інструментів та деталей машин. Вони забезпечують можливість ефективно керувати зносостійкістю поверхонь виробів за рахунок забезпечення високої міцності системи «основа–покриття» та оптимізації напружено-деформованого стану.

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. *Gerth J.* The influence of metallic interlayers on the adhesion of PVD TiN coatings on high-speed steel / J. Gerth, U. Wiklund // *Wear.* – 2008. – V. 264, № 9–10. – P. 885–892.
2. *Kim G.S.* Effects of the thickness of Ti buffer layer on the mechanical properties of TiN coatings / G.S. Kim, S.Y. Lee, J.H. Hahn et al. // *Surface and Coatings Technology.* – 2002. – V. 171, № 1–3. – P.83–90.
3. *Верещака А.С.* Высокоэффективные многослойно-композиционные покрытия с наноразмерными слоями для режущего инструмента / А.С. Верещака, А.А. Верещака, Л.Г. Дюбнер // *Резание и инструмент в технологических системах.* – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – Вып. 69. – С. 21–36.
4. *Carvalho N.J.M.* Stress analysis and microstructure of PVD monolayer TiN and multilayer TiN/(Ti,Al)N coatings / N.J.M. Carvalho, E. Zoestbergen, B.J. Kooi et al. // *Thin Solid Films.* – 2003. – V.429, № 1–2. – P. 170–189.
5. *Djabella H.* Finite element comparative study of elastic stresses in single, double layer and multilayered coated systems / H. Djabella, R.D. Arnell // *Thin Solid Films.* – 1993. – V. 235, № 1–2. – P. 156–162.

6. *Su Y.L.* Influence of single- and multilayer TiN films on the axial tension and fatigue performance of AISI 1045 steel / Y.L. Su, S.H. Yao, C.S. Wei et al. // *Thin Solid Films*. – 1999. – V. 338, № 1–2. – P. 177–184.
7. *Береснев В.М.* Принципи створення іонно-плазмових багатокомпонентних багатofункціональних покриттів з високими експлуатаційними властивостями: автореф. дис...докт. техн. наук: 05.02.01. – Харків, 2006. – 32 с.
8. *Musil J.* Hard and superhard nanocomposite coatings / J. Musil // *Surface and Coatings Technology*. – 2000. – V.125. – P. 322–330.
9. *Chen Y.-H.* Tribological properties and rolling-contact-fatigue lives of TiN / SiN<sub>x</sub> multilayer coatings / Y.-H. Chen, I.A. Polonsky, Y.W. Chung et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – V.154. – P. 152–161.
10. *Chu K.* Mechanical and tribological properties of nanostructured TiN/TiBN multilayer films / K. Chu, Y.G. Shen // *Wear*. – 2008. – V. 265, № 3–4. – P. 516–524.
11. *Stephens S.* Finite element analysis of the initial yielding behavior of a hard coating/substrate system with functionally graded interface under indentation and friction / S. Stephens, Liu Yan, E.I. Meletis // *Trans. ASME. J. Tribol.* – 2000. – V. 122, № 2. – P. 381–387.
12. *Xinxiang Pan.* Elastic-plastic deformation analysis of multi-layer surface coating under sliding contact / Xinxiang Pan., Liu Yan, Jinjun Xu // *Thin Solid Films*. – 1999. –V. 354, №1–2. – P. 154–161.
13. *Локтев Д.В.* Основные виды износостойких покрытий / Д.В. Локтев // *Стружка*. – 2004. – № 5. – С. 6–11.
14. *Фадеев В.С.* Разработка принципов создания и получения слоистых материалов с заданным градиентом свойств при упрочнении и легировании режущего инструмента / В.С. Фадеев, А.Д. Верхогуров, Т.Б. Ершова и др. // *Тр. 2 Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата «Eurastrencold-2001»*, Якутск, 16–20 авг. 2001. Пленарные доклады. –Якутск: ЯФ Изд-во СО РАН, 2004. – С. 166–176.
15. *Сорока Е.Б.* Перспективы применения дуплексных технологий / Е.Б. Сорока, А.В. Рутковский, В.И. Калениченко // *Оборудование и инструмент для профессионалов*. – 2011. – № 4. – С. 18–20.

16. *Batista J.C.A.* Micro-abrasive wear of PVD duplex and single-layered coatings / J.C.A. Batista, A. Matthews, C. Godoy // *Surface and Coatings Technology*. – 2001. – V. 142–144. – P. 1137–1143.
17. *Zukerman I.* Thermal stability and wear resistance of hard TiN/TiCN coatings on plasma nitrided PH15-5 steel / I. Zukerman, A. Raveh, H. Kalman et al. // *Wear*. – 2007. – V. 263, № 7–12. – P. 1249–1252.
18. *Wilson A.* A comparison of the wear and fatigue properties of plasma-assisted physical vapour deposition TiN, CrN and duplex coatings on Ti-6Al-4V/ A.Wilson, A.Matthews, J.Housden et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 1993. – V. 62, № 1–3. – P. 600–607.
19. *Погребняк А.Д.* Структура и физико-химические свойства комбинированных нанокompозитных защитных покрытий / А.Д. Погребняк, М.М. Даниленок, Ф.Ф. Комаров и др. // *ФИП*. – 2007. – Т. 5. – № 3–4. – С. 186–195.
20. *Ляшенко Б.А.* Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б.А. Ляшенко, А.Я. Мовшович, А.И. Долматов // *Технологические системы*. – 2001. – № 4 (10). – С. 17–25.
21. *Сорока О.Б.* Методологія оптимізації зносостійких покриттів за критеріями міцності і роботоздатності: автореф. дис...докт. техн. наук: 01.02.04. – К., 2011. – 36 с.
22. *Матвеев Н.В.* Получение в вакууме конденсационно-диффузионных сплошных и несплошных нитридтитановых покрытий / Н.В. Матвеев // *Сварочное производство*. – 2004. – № 7. – С. 30–35.
23. *Hua M.* Patterned PVD TiN spot coatings on M2 steel: Tribological behaviors under different sliding speeds / M. Hua, H.Y. Tam, H.Y. Ma, C.K. Mok // *Wear*. – 2006. – V. 260, № 11–12. – P. 1153–1165.
24. *Беликов А.И.* Упрочняющие тонкопленочные покрытия с повышенными трибологическими характеристиками / А.И. Беликов // *Инженерия поверхности и реновация изделий: Мат. 11-й Международ. науч.-техн. конф., 23–27 мая 2011 г., г. Ялта*. – К.: АТМ Украины, 2011. – С. 33–34.
25. *Михайлов А.Н.* Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
26. *Ляшенко Б.А.* Пат. 40289 України, С23С 14/32. Спосіб нанесення несучільних зносостійких покриттів / Б.А.

Ляшенко, А.В. Рутковський, В.І. Калініченко, Є.К. Солових.  
Опубл. 25.03.09, Бюл. № 6.

27. *Veprek S.* Possible role of oxygen impurities in degradation of nc-TiN/  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanocomposite / S. Veprek, P. Karankova, G.J. Maritz et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. – 2005. – 23, № 6. – P. L17–L21.

СОРОКА Олена Борисівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України.

Наукові інтереси:

- міцність матеріалів;
- напружено-деформований стан виробів.

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.

КОПЄЙКІНА Марина Юріївна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- різальні інструменти.

Подано 17.08.2011