

## ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ЙОННО-ПЛАЗМОВИМ НАПИЛЕННЯМ

В.М. Голубець, О.Б. Гасій

*Національний лісотехнічний університет України,  
вул. ген. Чупринки, 103, м. Львів, 79057*

**Анотація.** Проаналізовано результати останніх досліджень у сфері нанесення покриттів йонно-плазмовим напиленням. Розглянуто основні напрями вдосконалення цієї технології, сформульовано задачі, які потребують подальшого розв'язання.

**Ключові слова:** йонно-плазмове напилення, зносотривкість, фазовий склад, наноструктурні покриття

### Вступ

Електрофізичні методи є одними з найбільш високотехнологічних та екологічно чистих методів нанесення покриттів. Із групи вакуумних технологій на практиці переважно використовуються технології осадження покриттів із парів та плазми металів, отриманих шляхом термічного розпилення, катодного розпилення, реактивного електронно-променевого плазмового напилення (РЕП), активованого реактивного напилення (ARE), магнетронного напилення, реактивного іонізаційного напилення (Sputtering), йонно-плазмового напилення в умовах йонного бомбардування (КІБ) [1].

### Аналіз основних тенденцій розвитку технології

Особливість еволюції електрофізичних методів полягає в тому, що кожний наступний метод є результатом вдосконалення попередніх з використанням сучасних на той час технологій. Зокрема, принципово метод КІБ, аналогічно до інших, ґрунтується на осадженні на поверхню оброблюваної деталі напилюваного матеріалу із плазми в умовах іонного бомбардування. Суть процесу полягає в тому, що між корпусом камери і холодним катодом із матеріалу, що напилюється, запалюється вакуумна дуга за допомогою додаткового електромагнітного електрода. Згенеровані із дугового розряду пари металу іонізуються і прискорюються за рахунок різниці потенціалів між підкладкою (деталлю) і корпусом камери, величина якої значно перевищує напругу вакуумної дуги; вступають при цьому у плазмохімічні реакції з реактивним газом (найчастіше – азотом і ацетиленом) і конденсуються на деталі у вигляді чистих металів чи хімічних сполук (нітридів, карбідів та інших – залежно від складу реактивного газу).

Переваги методу КІБ такі:

- можливість нанесення на поверхню деталі практично будь-яких струмопровідних матеріалів;
- доволі проста конфігурація установки;
- можливість одержання багатоконпонентних і багат шарових покриттів шляхом використання кількох випаровувачів;
- можливість керування режимними параметрами процесу і за їх рахунок структурою і властивостями покриттів;
- висока ефективність процесу внаслідок того, що коефіцієнт іонізації плазмоутворюючого газу може досягати 90...100 %, що дає змогу ефективніше управляти потоком плазми;
- можливість нанесення покриттів на деталі складної конфігурації;
- низька шорсткість покриття, яке практично відтворює геометрію поверхні деталі;
- висока мікротвердість: до  $H_{\mu} = 18 \div 25$  ГПа;
- висока корозійна тривкість;
- висока зносотривкість як пар тертя, так і різального інструменту, яка збільшується в 1,5...2,5 рази залежно від структури покриття (рис. 1), можливість широкого регулювання

- зносотривкості за рахунок впливу на фізико-хімічні процеси у зоні тертя застосуванням покриттів різного складу;
- коефіцієнт суцільності одержаного покриття сягає практично 100 %.

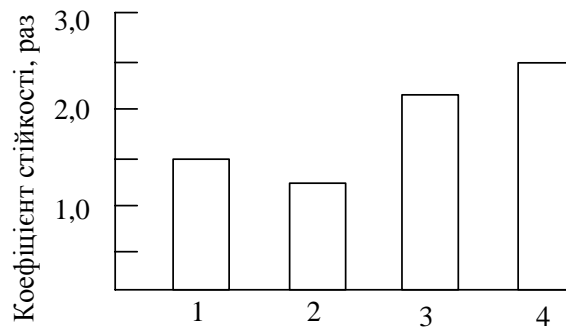


Рис. 1. Стійкість модульних фрез із сталі Р6М5 із покриттями при обробці сталі 20 ХНЗА:  
 1 – покриття TiC; 2 – покриття TiN; 3 – двошарове покриття TiC + TiN;  
 4 – двошарове композиційне покриття (TiN + Me) – TiN

Відчутним недоліком цієї технології є мала швидкість осадження покриттів (від 3 до 10 мкм·год<sup>-1</sup>), але, зокрема, для ріжучого інструменту занадто велика товщина покриття може істотно змінити геометрію ріжучої кромки і є недоцільною.

Фізика процесу йонно-плазмового напилення та вплив покриттів на експлуатаційні характеристики матеріалів досліджуються у роботах В.Г. Падалки, А.А. Етінганга, А.І. Анікєєва, В.П. Табакова, В.А. Синопальникова, І.І. Аксьонова, А.А. Андрєєва, В.М. Шулаєва та інших.

Найвдалішим і класичним покриттям на твердосплавному інструменті WC-Co була композиція TiC – Ti(CN) – TiN (рис. 2), розроблена фірмою “Sandvik Koromant” (Швеція) ще у шістдесятих роках ХХ століття.

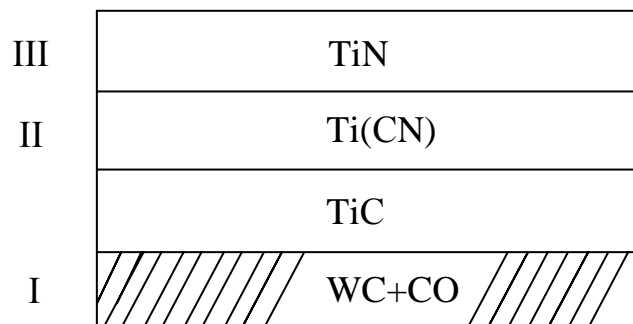


Рис. 2. Модель йонно-плазмового покриття

Різні шари покриття мають таке функціональне призначення: I шар слугує для міцного зчеплення покриття з основою; II – для забезпечення еластичності, запобігання росту наскрізних тріщин та узгодження теплофізичних характеристик робочого (III) та адгезійного (I) шарів; III – для надання високої механічної стійкості, зносотривкості, інертності стосовно оброблюваного матеріалу в умовах різання та покращання інших експлуатаційних характеристик.

Основним матеріалом робочих шарів існуючих йонно-плазмових покриттів залишається TiN, який має задовільні фізико-механічні і зносотривкі властивості при високих температурах, є хімічно інертним, добре наноситься плазмовим напиленням. За малого тиску азоту покриття складається з фаз Ti<sub>2</sub>N з гексагональною ґраткою та TiN з ГЦК-ґраткою. В такому вигляді покриття є дуже твердим (до 50 ГПа) і крихким. Оскільки область гомогенності Ti<sub>2</sub>N доволі вузька, то вже при тиску азоту 1 Па утворюється монофазне покриття TiN з мікротвердістю до 25 ГПа, яке має мінімальний вміст крапельної фази і володіє максимальною зносотривкістю. Завдяки хімічній пасивності TiN зменшується адгезійна взаємодія з матеріалом заготовки, що призводить до

зниження температури в зоні контакту, зменшення пластичної деформації, адгезійного зношування, схильності до наростуоутворення [2].

Карбонітрид титану Ti(CN) має більший вміст крапельної фази, ніж TiN, але може ефективно використовуватись як демпферний шар між ним і TiC, нівелюючи різницю в їх теплофізичних та міцнісних характеристиках за рахунок можливості дифузії атомів вуглецю та азоту внаслідок подібності фазового складу. Водночас є результати, які свідчать, що Ti(CN) має кращу зносотривкість порівняно з TiN, зокрема, по контргтілу з Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в 1,7 раза) та твердого сплаву WC83Co17 (в 1,2 раза) [3].

Перспективним для захисту різальних інструментів є покриття з TiAlN. Зберігаючи високі фізико-механічні характеристики TiN, вони доповнюють їх за рахунок підвищеної зносотривкості. При нагріванні поверхня покривається шаром Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, який запобігає подальшому окисненню та взаємодії з оброблюваним матеріалом [2]. Структура таких покриттів при малому вмісті алюмінію являє собою тверді розчини заміщення на основі кубічної ґратки TiN. При збільшенні його вмісту ця структура трансформується у в'юртцитоподібну. За рахунок того, що радіус атомів алюмінію менший, ніж у титану (0,118 нм проти 0,134 нм), вони заміщують атоми титану у ґратці TiN. Внаслідок цього період ґратки сполуки зі стехіометричним співвідношенням Ti<sub>0,3</sub>Al<sub>0,7</sub>N зменшується з 0,426 нм до 0,416 нм, а розміри зерен – до 50 нм, що сприяє підвищенню міцнісних властивостей [4].

Для створення багатошарових композицій найчастіше використовуються такі системи: TiC-Ti(CN)-TiN, TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN, TiN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiC-Ti(CNO)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Основою більшості покриттів є TiN, але існує ряд розробок із заміни цієї сполуки на Mo<sub>2</sub>N, ZrN, HfN, ZrC, HfC та нітриди і карбіди інших перехідних металів IV–VI груп.

Важливим з погляду подальшого розвитку цієї технології є можливість її застосування до створення наноструктурних покриттів, які являють собою революційний прорив у сучасній науці. Подрібнення зерен здійснюється двома основними способами: змішуванням (або модифікуванням) і регулюванням параметрів йонного бомбардування [2]. Перший з них полягає у додаванні одного або декількох елементів до основного матеріалу покриття. Ці елементи, які є нерозчинними в основі, концентруються по границях зерен основного елемента у вигляді субмікрозернистого або аморфного шару. Другий спосіб має варіанти залежно від того, який параметр змінюється: потенціал підкладки, її температура чи тиск реактивного газу. Зокрема, під час нанесення покриття Mo<sub>2</sub>N за рахунок того, що у вакуумній дузі сповільнюється синтез низькотемпературної модифікації β-Mo<sub>2</sub>N при зростанні тиску азоту до 0,4 Па і вище інтенсивно утворюється високотемпературна модифікація γ-Mo<sub>2</sub>N з розмірами зерен до 30 нм. Порівняно з компактним полікристалом аналогічного хімічного складу тонкі плівки забезпечують істотний приріст основних фізико-механічних властивостей, зокрема твердості (рис. 3). Її зростання безпосередньо пов'язано з розмірами зерен, що впливає із співвідношення:

$$\Delta H = k_3 d_3^{-1/2} [5],$$

де  $\Delta H$  – приріст твердості;  $k_3$  – коефіцієнт зернограничного зміцнення, який залежить від матеріалу і стану границь;  $d_3$  – розмір зерна.

Роботи з розвитку технології йонно-плазмового напилення здійснюються у таких головних напрямках:

1. Вдосконалення конструкції установок.
2. Оптимізація режимних параметрів процесу.
3. Пошук нових матеріалів для одержання покриттів з кращими фізико-механічними властивостями та експлуатаційними характеристиками.
4. Фізико-хімічний вплив на підкладку.

Дослідження, що належать до першої групи, мають на меті:

- удосконалення конструкцій плазмотронів для збільшення їх продуктивності та зменшення вмісту крапельної фази;
- підвищення ступеня іонізації плазми та розширення можливостей керування плазмовим потоком;
- удосконалення систем регулювання плазмохімічних процесів та можливість широкого регулювання складу та будови конденсатів.

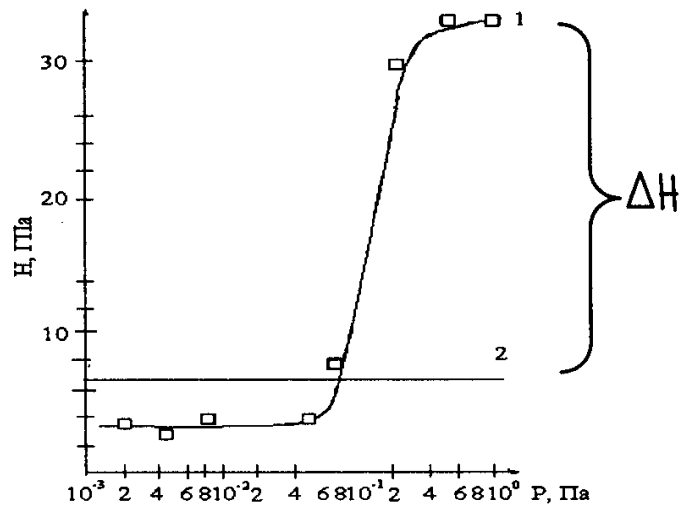


Рис. 3. Залежність мікротвердості покриттів від тиску азоту при температурі підкладки 420 °С [5]

Ці роботи виконуються, зокрема, на НВО “Новатех” [6–10]. Найцікавішими є такі конструктивні рішення:

- застосування довгого катода, який проходить через всю камеру з контролем поточного положення катодної плями, що дає змогу підтримувати стабільність горіння дуги;
- розробка пристрою для двоступеневого вакуумного розряду для зменшення частки крапельної фази;
- виготовлення катодів у вигляді смуг, що дає змогу оперативно керувати режимними параметрами.

Оптимізація режимних параметрів, зокрема таких, як тиск плазмоутворюючого газу і магнітна індукція [11], дає змогу керувати такими властивостями нітридів Cr, Zr, Mo, як мікротвердість, зносотривкість, коефіцієнт тертя. Зменшенню в плазмовому потоці твердих частинок матеріалу катода сприяє підпал вакуумної дуги тоді, коли температура катода досягне температури, при якій струм термоелектронної емісії буде не меншим за струм дуги, а концентрація насичуючої пари перевищить  $10^{14} \text{см}^{-3}$  [12].

До третьої групи напрямів належить розробка порошкових TiN- і TiC- катодів з пористістю 8–10 % [13]. Неоднорідність і рельєфність структури катода зумовлює підвищення швидкості ерозії, а за наявності реактивного газу ( $\text{N}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ) – підвищення інтенсивності синтезу тугоплавких хімічних сполук порівняно з монолітними катодами, що дає змогу одержати однорідніші покриття.

Вплив на підложку шляхом її попереднього нагріву з подальшим нанесенням підшару Al-Fe-Se, як показано у роботі [14], сприяє покращанню адгезії напиленого шару з основою.

Крім робіт в окремих напрямках розвитку цієї технології, робляться також спроби моделювання фазового складу йонно-плазмових покриттів. Зокрема, в роботі [15] прогнозується фазовий склад залежно від температури підкладки, тиску реактивного газу, швидкості плазмового потоку, співвідношення потоків іонів металів на основі термодинамічного методу визначення характеристик гетерогенних систем, виходячи із принципу максимальної ентропії.

### Висновки

Проаналізовані роботи, безумовно, дають змогу поглибити знання про процес йонно-плазмового напилення. Однак очевидно, що подальші роботи з розроблення нових складів покриттів, які б могли знайти широке застосування, залежать від вирішення таких вузлових проблем:

- дослідження механізму виникнення внутрішніх залишкових напружень у конденсатах та розроблення складу і будови покриттів із мінімальним значенням таких напружень;
- збільшення в плазмовому потоці частки йонної фази порівняно з крапельною і паровою;
- зменшення захоплення поверхонь покриття інструментів з оброблюваним матеріалом в умовах різання;
- розроблення покриттів з меншим падінням твердості зі зростанням температури.

## Література

1. Гасій О.Б. До питання підвищення стійкості метало- і дереворізального інструменту йонно-плазмовим напиленням / О.Б. Гасій, Й.Л. Ацбергер // Науковий вісник УкрДЛТУ. – 2001. – Вип. 11.4. – С. 135 – 139.
2. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / [Андреев А.А., Саблев А.П., Шулаев В.М., Григорьев С.Н.]. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 240 с.
3. TiN, TiC and Ti(C,N) film characterization and its relationship behaviour / R. Bertoncello, A. Casagrande, M. Casarin [and oth.] // Surface and Interface Analysis. – 1992. – V. 18. – P. 525–531.
4. Properties of  $(Ti_{1-x}Al_x)N$  coatings for cutting tools prepared by the carbonic arc ion plating method / Y. Tanaka, T.M. Gur, M. Kelly [and oth.] // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1992. – V. A 10 (4). – P. 1749 – 1756.
5. Шулаев В.М. Эффект гигантского приросту твердости в нанокристаллических вакуумно-дуговых покрытиях / В.М. Шулаев, І.М. Неклюдов, А.А. Андреев // Обладнання та технології термічної обробки металів і сплавів: 7-а Міжнар. конф., 24 – 28 квітня 2006 р.: зб. доповідей. – Харків, 2006. – С. 6–13.
6. Пат. 2001159. Российская Федерация, МКИ5 с 23 с 8/00, с 23 с 14/32. Установка электродугового нанесения металлических покрытий в вакууме / Заявитель и патентообладатель НПО Новатех.
7. Пат. 2001970. Российская Федерация, МКИ5 с 23 с 14/32. Устройство электродугового испарения металлов / Заявитель и патентообладатель НПО Новатех.
8. Пат. 2001972. Российская Федерация, МКИ5 с 23 с 14/32. Установка для нанесения упрочняющих покрытий методом электродугового испарения / Заявитель и патентообладатель НПО Новатех.
9. Пат. 2001973. Российская Федерация, МКИ5 с 23 с 14/34. Устройство электродугового нанесения металлических покрытий в вакууме / Заявитель и патентообладатель НПО Новатех.
10. Пат. 2002853. Российская Федерация, МКИ5 с 23 с 14/32. Электродуговой испаритель металлов / Заявитель и патентообладатель НПО Новатех.
11. Влияние условий конденсации на характеристики ионно-плазменных покрытий (Cr, Zr, Mo) N / А.В. Коровкин, В.И. Васильев, О.В. Полунина, [и др.] // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 4. – С. 790–797.
12. А.с.1730864 СССР, МКИ5 с 23 с 14/32. Способ получения плазмы металлов с помощью вакуумной дуги: / Э.И. Асиновский, С.Я. Бронин, В.П. Полищук и др., Институт высоких температур АН СССР.
13. Косогор С.П. Процессы эрозии порошковых катодов и текстура вакуумно-плазменных пленок и покрытий / С.П. Косогор // Новые порошковые материалы и технологии. – Алтайский государственный университет. – Барнаул, 1993. – С. 97–102.
14. А.с.1827399 СССР, МКИ5 с 23 с 14/24. Способ получения покрытий в вакууме / В.И. Ульянов, Б.А. Мовчан, А.Ф. Манулик, Е.Б. Онопренко, Институт электросварки им. Е.О. Патона.
15. Карплан М.Г. Термодинамический расчет фазового состава нитридных ионно-плазменных покрытий / М.Г. Карплан, Р.Х.Сайдахмедов, Г.П.Фетисов // I собрание металлосварки России, 22–24 сент. 1993 г.: тезисы докл. – Пенза: Приволжский дом научн.-техн. пропаганды, 1993. – С. 41–42.

## RISING OF CUTTING TOOLS RESISTANCE BY ION-PLASMA EVAPORATION

V.M. Holubets, O.B. Hasiy

National Forestry University of Ukraine  
103, Gen. Chuprynka str., Lviv, 79057

**Abstract.** *The results of last researches in the sphere of ion-plasma evaporation were surveyed in the article. The main trends of this technology development were observed and further problems were formulated.*

**Key words:** *ion-plasma evaporation, wear resistance, phase composition, nanostructure covers.*