

- processes under glow discharge conditions. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 11, 77–81.
9. Liu, X., Chu, P.K., Ding, C. (2004). Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering R*, 47, 49–121.
  10. Kritsky, A. D. (1983). *Osobennosti razrabotki tverdospлавnykh deformiruyushchikh protyazhek dlya obrabotki otverstii v detalyakh iz trudnoobrabatyvayemykh detaley i сплавов [Features of the development of carbide deforming broaches for processing holes in parts made of difficult-to-machine parts and alloys]. [Extended abstract of candidate's thesis]. Kyiv [in Ukrainian].*
  11. Semenov, A. P. (1958). *Skhvatyvaniye metallov [Metal Seizure]. Mashhiz [in Russian].*

УДК 699.058

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-428-436

**С.А. Клименко**, член-кор. НАН України; **І.В. Бондар**, канд. техн. наук,  
**Г.Я. Жаровский**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,  
04074, Київ, e-mail: atmi@meta.ua*

## **МОДЕРНІЗОВАНА УСТАНОВКА ВУ 700 ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВАКУУМНИХ ПОКРИТТІВ**

*Проведено модернізацію вакуумної установки ВУ 700 для нанесення функціональних покриттів, у тому числі багатошарових та багатокомпонентних, із використанням системи мікроелектродугового розпилення, що включає три лінійні дуготрони та лінійний магнетрон. Установка обладнана системами катодно-іонного бомбардування поверхонь виробів перед нанесенням покриття, а також подачею потенціалу зміщення під час процесу напилення. Чотири катоди установки дозволяють отримувати покриття широкого спектру - від простих одношарових до багатошарових та багатокомпонентних. Показники роботи модернізованої установки досліджено під час формування покриттів із титану та багатокомпонентного жаростійкого сплаву. Для умов використання лінійного дуготрону з титану встановлено діапазон напруг зміщення, щільність іонного струму та показано вплив цієї напруги на імовірність виникнення мікродугових розрядів на поверхні виробу та її ерозію. Запропоновано використання імпульсного ВЧ-блоку зміщення. Для катоду зі сплаву NiCrAlY визначено оптимальне значення струму дуги (90–120 А) та досліджено швидкість сканування катодної плями при використанні встановленого обладнання.*

**Ключові слова:** покриття, модернізована вакуумна установка, мікроелектродугове розпилення, дуготрон, магнетрон, катодно-іонне бомбардування (КІБ).

### **Вступ**

Одним з найбільш поширених і ефективних методів модифікації поверхневого шару різноманітних виробів є нанесення захисних функціональних покриттів із застосуванням фізичних і хімічних методів осадження. За функціональним призначенням такі покриття можуть забезпечувати зниження швидкості хімічної взаємодії матеріалу виробу з навколишнім агресивним середовищем, підвищення механічних властивостей, надання поверхні виробу нових теплофізичних і електрофізичних властивостей та інше. Найбільшого

поширення в промисловості для отримання захисних покриттів отримали іонно-плазмові методи осадження, створені зокрема на основі вакуумно-дугового осадження та магнетронного розпилення [1–4].

Створене обладнання та інноваційні технології синтезу покриттів із різних матеріалів дало можливість використовувати їх в різних різальних інструментах [5, 6], при виготовленні авіаційних двигунів, наприклад у конструкціях турбінних лопаток [7, 8] та при виробництві інших виробів, які працюють із важким термобаричним навантаженням.

Не дивлячись на значне покращення за рахунок покриття експлуатаційних властивостей виробів, на даний час проблема вдосконалення покриттів залишається актуальною, що визначає доцільність подальших пошуків нових багатокомпонентних матеріалів, архітектури та властивостей покриттів, удосконалення методів і процесів осадження. Це найбільш актуально для методів вакуумного іонно-плазмового осадження покриттів (PVD-методи), які адаптивні для реалізації нових принципів формування покриттів різного призначення, відповідаючи концепціям градієнтних, метастабільних, дискретних, багатокомпонентних, багат шарових покриттів.

Метою цієї роботи є вдосконалення вакуумної установки ВУ 700 для нанесення широкої гама функціональних покриттів, у тому числі багат шарових та багатокомпонентних, та аналіз показників її роботи.

### Методика досліджень

У процесі модернізації [9] вакуумної установки ВУ-700 (внутрішній діаметр та загальна висота камери 700 мм) до складових, які існували у вихідній комплектації, додано наступне:

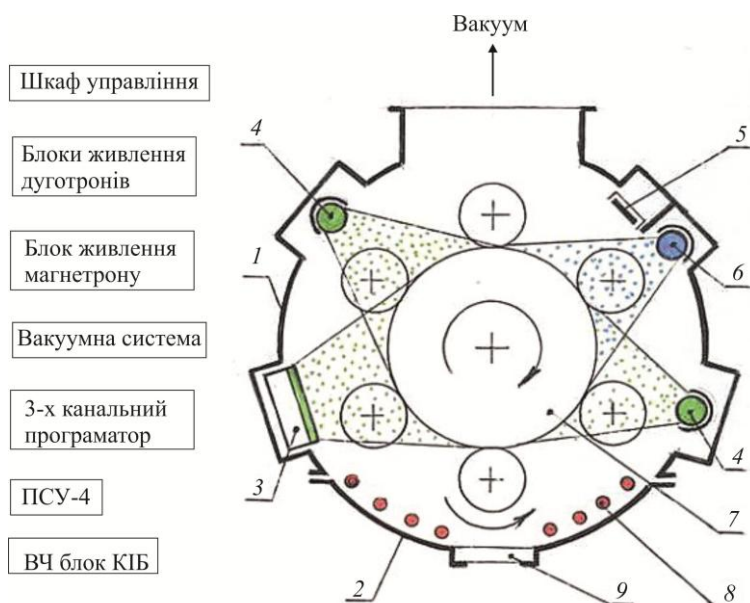


Рис. 1. Блок схема модернізованої установки ВУ-700 : 1 – вакуумна камера, 2 – двері; 3 – магнетрон; 4 – дугометр (№ 1, № 3); – 5 – катод тліючого розряду; 6 – дугометр (№ 2); 7 – експонуюча оснастка подвійного планетарного обертання; 8 – електронагрівач; 9 – оглядова система

лінійний магнетрон із прямим охолодженням мішені довжиною 500 мм, три лінійні дугометри довжиною 500 мм та катодний вузол для пасивного тліючого розряду із відповідним обладнанням для живлення таких систем, блок подачі імпульсного ВЧ (25 кГц) потенціалу зміщення на виробі для катодно-іонного бомбардування (КІБ) їх поверхонь перед нанесенням покриття і для подачі відповідного потенціалу зміщення при нанесенні покриття, блок живлення для активного тліючого розряду, 6-ти позиційна система подвійного планетарного обертання та електронагрівач.

Блок схема модернізованої установки приведена на рис.1.

У вікні, розміщеному на двері камери, встановлено систему для захисту від запилення в процесі нанесення покриттів. Для живлення лінійних дуготронів (довжина 500 мм) встановлено два блоки мікроелектродугового розряду, які включають системи ініціації мікродугового розряду і сканування катодної плями по всій довжині катоду при роботі дуготрону.

Наявність в установці чотирьох катодів, які можуть працювати як послідовно, так і одночасно, дозволяє отримувати покриття широкого спектру, як простих одношарових, так і багатшарових та багатокомпонентних.

Показники роботи вдосконаленої установки розглядалися при формуванні покриття з використанням катодів (лінійні дуготрони) із титану та багатокомпонентного жаростійкого сплаву NiCrAlY.

### **Результати досліджень та їх обговорення**

Перш за все розглянемо основи процесу мікроелектродугового вакуумного напилення, що визначають необхідність проведення модернізації обладнання. При нанесенні покриття поверхня виробу повинна бути ретельно очищеною. Для цього виробу миють в ультразвуковій ванні в спеціальному розчині, або ж, якщо вони достатньо чисті, то їх поверхні протирають спочатку бензином, а потім спиртом і чистою серветкою. Як показує практика, для того щоб покриття мали високу міцність з'єднання з поверхнею виробу така попередня обробка не є достатньою – на чисто вимитій поверхні має місце адсорбція молекул газів, які входять в склад повітря ( $O_2$ , CO,  $CO_2$ ), а також присутні атоми і молекул тих речовин, які контактували з поверхнею до того як її було вимито. При конденсації високоенергетичних атомів і іонів, які генеруються мікроелектродуговим розпиленням, вони будуть взаємодіяти в тому числі з атомами і молекулами, які присутні на поверхні, а не тільки з атомами виробу, що знижує міцність з'єднання покриття з поверхнею виробу. Тому перед напиленням функціонального покриття поверхня виробу піддається плазмохімічній і плазмофізичній дії тліючого розряду низького тиску при напрузі 1,6–3,0 кВ з невеликою щільністю іонного струму. А також для досягнення достатньої міцності з'єднання покриття з поверхнею виробу остання додатково обробляється бомбардуванням іонами металу значної щільності їх потоку. Це має місце в процесі КІБ-обробки іонами металу поверхні виробу під дією від'ємного потенціалу зміщення, який подається на виріб при мікроелектродуговому вакуумному розпиленні матеріалу катоду.

Під час обробки поверхні виробу в плазмі пасивного тліючого розряду низького тиску, що горить між окремо вмонтованим катодом і анодом, яким є камера, для інтенсифікації обробки до поверхні виробу підводиться від'ємний потенціал зміщення (50–150 В). Тліючий розряд горить при тиску 6–10 Па. При обробці в середовищі інертного газу аргону в плазмі відбувається інтенсифікація процесів очистки поверхні від абсорбованих атомів і молекул газів за рахунок вакууму і бомбардування її іонами аргону з невеликою щільністю іонного струму під дією потенціалу зміщення. Якщо обробка проводиться в активному середовищі, наприклад в середовищі повітря при тиску 6–10 Па, то при такому тиску метал не окислюється. Але за таких умов, окрім очистки від абсорбованих газів, відбувається також плазмохімічна очистка поверхні від залишків органічних речовин, які присутні на поверхні виробу після відмивання. Очистка відбувається за рахунок їх окислення при взаємодії з активними іонами кисню і подальшої відкачки продуктів окислення. Від'ємний потенціал зміщення на виробі значно прискорює процес окислення органічних речовин, так як поверхня виробу бомбардується в тому числі прискореними іонами кисню  $^+O$ , які генеруються в плазмі тліючого розряду. Щільність потоку іонів при тліючому розряді невисока, але їхня енергія достатня для того, щоб інтенсивно взаємодіяти з органічними молекулами, і являється не достатньою для окислення поверхні виробу.

При обробці поверхні виробу в плазмі аргону при активному тліючому розряді на виріб подається високий від'ємний потенціал (1,5–3,0 кВ), і тліючий розряд горить між поверхнею виробу (катод) і анодом, яким є камера. При цьому поверхня виробу бомбардується іонами аргону з енергією (1,5–3,0 кВ). Такої енергії іону не достатньо для того, щоб вибити атом металу з поверхні виробу при одиночному зіткненні з ним. Коефіцієнт розпилення у металів при даних значеннях потенціалу значно менше одиниці, а щільність потоку іонів  $^+Ar$  при тліючому розряді низького тиску (1,0–2,5 Па) не велика. Тому бомбардування одного атома металу на поверхні виробу декількома іонами аргону підряд при даній щільності іонного потоку малоімовірне і, відповідно, вибиття атома металу з поверхні також мало імовірне. Отже в даному випадку йде тільки подальша більш інтенсивна очистка поверхні виробу від абсорбованих атомів і молекул газів, без розпилення самої поверхні. Але даної енергії достатньо, наприклад, для розпилення менш міцних утворень, наприклад сольових залишків на поверхні виробу, які залишаються на ній після попередньої обробки та не видаляються при плазмохімічній чистці тліючим розрядом в атмосфері повітря.

Під час мікроелектродугового розпилення металу катода разом з кластерами і атомами металу генеруються також і іони металу. Тому при напиленні покриттів використовують

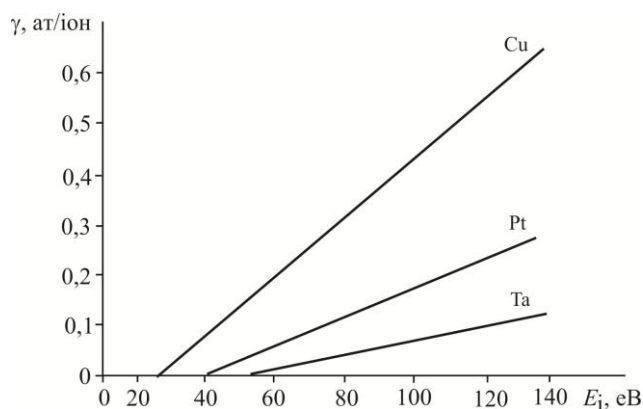


Рис. 2. Залежність коефіцієнту розпилення Cu, Pt, Ta від енергії іонів  $^+Ar$  в плазмі

також обробку їхньої поверхні іонами, які генеруються в процесі розпилення катода (процес КІБ). Процент іонів від загального потоку для різних металів різний, а щільність іонного потоку при мікроелектродуговому розпиленні доволі значна [10], тому важливо розглянути процеси, які відбуваються при КІБ поверхні виробу при значній щільності іонного потоку. В умовах високої щільності іонного потоку при бомбардуванні поверхні металу, наприклад іонами  $^+Ar$ , має місце розпилення атомів металу з поверхні

виробу і при відносно невеликих значеннях потенціалу прискорення. На рис. 2 (побудовано за даними [11]) показано залежність коефіцієнту розпилення для міді (Cu), платини (Pt) і танталу (Ta) від енергії іонів  $^+Ar$  в плазмі. Розпилення поверхні виробу відбувається за рахунок декількох підряд один за одним бомбардувань прискореними іонами і накачування атомів поверхні виробу необхідною кількістю енергії для розриву зв'язків з іншими атомами і подальшого їх «випаровування» з поверхні. Для даного процесу характерним являється те, що чим вище температура плавлення металу виробу, тим необхідна більша кількість підряд один за одним бомбардувань прискореними іонами і, відповідно, у даного металу менша швидкість розпилення.

Виходячи із показаного вище, при КІБ поверхні виробу перед напиленням покриття на ряду з розігрівом виробу важливим є очищення його поверхні за рахунок розпилення декількох поверхневих атомних шарів до атомно-чистого стану. В той же час, при КІБ поверхні виробу іонами металу, які генеруються з катода при мікроелектродуговому вакуумному розпиленні матеріалу катода, мають місце і інші процеси. На ряду з процесом розпилення поверхні виробу іонами, які прискорюються потенціалом зміщення, має місце також і процес конденсації на цій поверхні іонів, нейтральних атомів і кластерів металу, що

генеруються катодом. А також в процесі конденсації покриття має місце часткове його розпилення при бомбардуванні іонами металу, прискореними потенціалом зміщення.

Вплив розглянутих процесів на формування покриття при мікроелектродуговому вакуумному розпиленні на модернізованій установці ВУ700 було досліджено з використанням титанового катода.

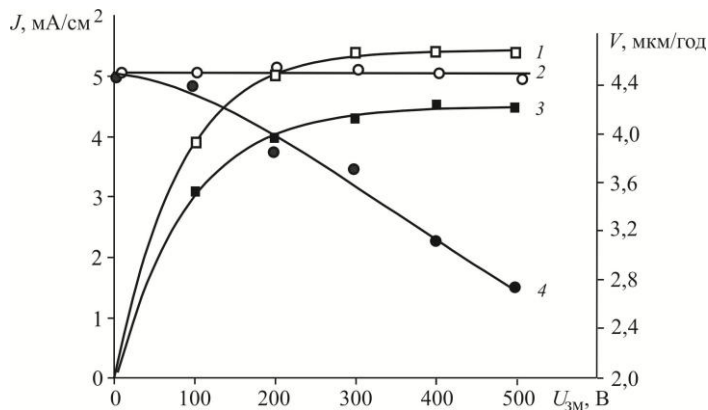


Рис. 3. Вплив величини від'ємного імпульсного потенціалу зміщення на величину щільності струму бомбардуючих іонів (1, 3) (1 – для відстані від катода 135 мм; 2 – для відстані від катода 335 мм), вплив імпульсного (25 кГц) від'ємного потенціалу зміщення на швидкість конденсації покриття при мікроелектрод-дуговому вакуумному розпиленні титанового катода лінійним дуготроном (2, 4) (2 – зразок ізольований від потенціалу зміщення; 4 – зразок під потенціалом зміщення)

титанового катода.

Для досліджень щільності струму зміщення при роботі лінійного дуготрона було демонтовано експонуючу оснастку подвійного планетарного обертання. Це дозволило не враховувати її поверхню при вимірюванні щільності струму зміщення. Пластина розміром 120×100 мм із сталі Х18Н9Т закріплювалась перед дуготроном на заданій відстані і до неї підводилась напруга зміщення у вигляді імпульсів із частотою 25 кГц. На рис. 3 наведено залежність величини щільності іонного струму зміщення від величини імпульсів напруги зміщення.

Крива 1 показує величину щільності іонного струму зміщення на відстані від катода 135 мм. Це відстань, на якій проходять сателіти перед катодом в процесі сканування. Крива 2 показує величину щільності, яка має місце на відстані від катода 335 мм, а саме, в центрі камери. Як видно, при збільшенні напруги зміщення щільність іонного струму збільшується і при 200 В наступає насичення, коли всі іони, які генеруються катодом в напрямку зразка, бомбардують його поверхню. Подальше збільшення потенціалу зміщення в даному діапазоні його значень самостійно не генерує додаткові іони і щільність струму практично не зростає. Як видно з рис. 2, при енергії іонного потоку 55 еВ і більше має місце процес розпилення поверхні навіть для такого тугоплавкого металу як тантал. Тому всі інші метали будуть також розпилятися.

На рис. 3 показано також вплив імпульсного (25 кГц) від'ємного потенціалу зміщення на швидкість конденсації покриття при мікродуговому вакуумному розпиленні титанового катода (лінійний дуготрон). Крива 2 показує швидкість осадження покриття на пластину, яка експонується на сателіті і підвищена через ізолятор. Вона напиляється одночасно з пластиною, яка висить на сателіті і знаходиться під ВЦ потенціалом зміщення – крива 4. Як видно, швидкість осадження покриття на пластині, яка висить на сателіті через ізолятор, практично не змінюється (крива 2). Дана пластина не знаходиться під дією потенціалу зміщення і тому постійна швидкість конденсації покриття на неї характеризує також швидкість розпилення матеріалу катода. Крива 4 показує, що при незмінній швидкості розпилення катода швидкість осадження на пластині під потенціалом зміщення зменшується при збільшенні величини потенціалу. Різниця у швидкості напилення при заданих значеннях напруги зміщення показує вплив процесу реконденсації під дією іонів титану, які бомбардують поверхню зразка в процесі конденсації на неї покриття.

Також досліджено вплив на напilenня покриття постійної і ВЧ напруги зміщення та кореляція їх параметрів між собою. Величина струму мікро-електродугового розряду – 150 А, коефіцієнт заповнення імпульсі ВЧ – 50%.

На рис. 4 показано вплив постійної напруги (криві 1, 3) і діючої величини ВЧ напруги зміщення (криві 2, 4) на швидкість конденсації покриття. Пластини під напilenня підвищували

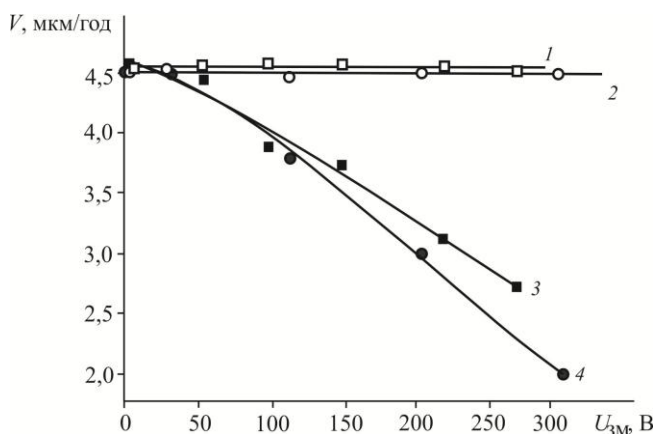


Рис. 4 – Вплив величини постійної напруги зміщення на швидкість конденсації покриття при мікроелектродуговому вакуумному розпиленні титанового катода лінійним дуготроном (1, 3) (1 – зразок, ізолюваний від потенціалу зміщення; 3 – зразок під потенціалом зміщення; вплив діючої величини напруги зміщення на зразку, яка подається з частотою 25 кГц, на швидкість конденсації покриття при мікроелектрод-дуговому вакуумному розпиленні титанового катода лінійним дуготроном (2, 4) (2 – зразок, ізолюваний від потенціалу зміщення; 4 – зразок під імпульсним (25 кГц) потенціалом зміщення)

на сателіті системи подвійного планетарного обертання. Криві 1, 2 показують швидкість осадження покриття на пластини в даних дослідженнях, які висять на ізоляторі і запиляються одночасно з пластинами, які знаходяться під потенціалом зміщення – криві 3, 4. Як видно, швидкість осадження покриття на пластини, які висять на сателіті через ізолятор практично не змінюється і однакова для двох досліджень. Криві 3, 4 показують, як впливає відповідно величина постійної напруги і діюча величина ВЧ напруги зміщення на швидкість осадження покриття. Звідси випливає, що при КІБ з імпульсним ВЧ потенціалом зміщення важлива не величина потенціалу зміщення в імпульсі (крива 4, рис. 3), а важливі діючі значення ВЧ напруги зміщення. Встановлено

також, що збільшення постійної напруги зміщення більше 300 В призводить до виникнення мікродугових розрядів на поверхні досліджуваної пластини, яка знаходилась під потенціалом, і сильної ерозії її поверхні. Чим більша площа у пластини і чим більша напруга зміщення, тим більша імовірність виникнення таких розрядів. З цих причин блок живлення постійної напруги зміщення був реконструйований в імпульсний ВЧ блок зміщення. Висока частота виключає виникнення мікродугових розрядів на поверхні виробу.

Також було досліджено особливості технології розпилення катода (лінійного дуготрону) із більш складного матеріалу – багатокомпонентного жаростійкого сплаву NiCrAlY [9].

Дослідження показали, що мікроелектродуговий розряд надійно горить і рівномірно сканує по довжині катода при величині струму дуги 90–120 А. Швидкість сканування катодної плями надійно управляється блоком сканування дуги. При зменшенні струму дугового розряду менше 90 А занадто часто гасне мікроелектродуговий розряд і спрацьовує система його ініціації. Збільшення струму дугового розряду зменшує частоту загасання, але при величині струму дуги до 120 А відбувається більш інтенсивний розігрів самого катода, і простору в середині камери, що сприяє самостійному зростанню тиску в камері через деякий час в процесі розпилення. Швидкість осадження покриття на поверхню зразків, які експонуються на каруселі з подвійним планетарним

обертанням, при величині струму дуги 90 А близька до 2 мкм/год. При цьому формується рівномірне по товщині покриття по всій довжині поверхні виробу.

### **Висновки**

Із врахуванням основних особливостей процесу мікроелектродугового вакуумного напилення проведено модернізацію вакуумної установки ВУ700: встановлено лінійний магнетрон довжиною 500 мм, три лінійні дуготрони (довжина 500 мм) та катод для пасивного тліючого розряду із відповідним обладнанням для їх живлення, блок живлення для подачі імпульсного ВЧ (25 кГц) потенціалу зміщення на вироби при для катодно-іонного бомбардування (КІБ) їх поверхонь перед нанесенням покриття і для подачі відповідного потенціалу зміщення при напиленні покриття, 6-ти позиційна система подвійного планетарного обертання та електронагрівач.

Для випадку використання титанового катода встановлено, що при збільшенні напруги зміщення щільність іонного струму збільшується і при 200 В наступає насичення, а при зростанні постійної напруги зміщення > 300 В виникають мікродугові розряди на поверхні виробу та її сильна ерозія. Для зменшення імовірності виникнення розрядів блок живлення постійної напруги зміщення замінено на імпульсний ВЧ блок зміщення. Доведено, що при КІБ імпульсним ВЧ потенціалом зміщення важлива не величина потенціалу зміщення в імпульсі, а значення діючої напруги зміщення.

При використанні лінійного дуготрону із багатокомпонентного сплаву NiCrAlY покриття надійно конденсується при величині струму дуги 90–120 А. Швидкість сканування катодної плями стало управляється блоком сканування дуги, при цьому формується рівномірне по товщині покриття по всій довжині поверхні виробу.

**S. Klymenko, I. Bondar, G. Zharovsky**

*V. Bakul Institute of Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine*

### **MODERNIZED VU 700 INSTALLATION FOR SPUTTERING FUNCTIONAL VACUUM COATINGS**

*Improvement of the VU 700 vacuum unit for applying a wide range of coatings, including multilayer and multicomponent coatings, and analysis of its performance indicators.*

*The installation includes a linear magnetron, three linear arc tubes, a cathode power supply for glow discharge and supplying a constant bias potential to products for CIB and supplying a bias potential during coating deposition, a 6-position double planetary rotation system, an electric heater, and a system for protecting the viewing window from dust during the coating process. The performance of the installation was evaluated during the formation of coatings using linear arcrons made of titanium and NiCrAlY alloy.*

*Taking into account the main features of the microelectroarc vacuum deposition process, the VU 700 vacuum unit was upgraded. It has been shown that during the condensation of the coating in micro-electro-arc vacuum spraying of a titanium cathode using high-frequency displacement potential, it is not the value of the displacement potential in the pulse that is important, but the value of the effective high-frequency displacement voltage. When using a linear arc tube made of a multicomponent NiCrAlY alloy, the coating is reliable at an arc current of 90–120 A.*

*The results of the work are relevant for the development of technologies for applying functional coatings with different structures – simple single-layer and multi-component multi-layer coatings. Future research may focus on optimizing the chemical composition of coatings for a specific area of application.*

*The study shows that the modernized installation can be effectively used to obtain a wide range of coatings for various purposes. The originality of the development is associated with the hybrid design of the installation and the presence of four cathodes in it.*

**Key words:** coating, modernized vacuum installation, microelectroarc spraying, arc tube, magnetron, cathode ion bombardment (CIB).

### Література

1. Pogrebnyak A.D., Beresnev V.M. Hard Nanocomposite Coatings, Their Structure and Properties. *Nanocomposites – new trends and developments*. Croatia: Intech, 2012. P. 123–160.
2. Азаренков Н.О., Неклюдов І.М., Береснев В.М., Воєводін В.М., Погребняк О.Д., Ковтун Г.П., Соборль О.В., Удовицький В.Г., Литовченко С.В., Турбін П.В., Чишкала В.О. Наноматеріали і нанотехнології. Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2014. 316 с.
3. Shi F. Magnetron Sputtering. London: IntechOpen, 2018.
4. Green J. *An Overview of Sputtering Deposition*. URL: <https://www.sputtertargets.net/blog/an-overview-of-sputtering-deposition.html>. 2024.
5. Манохін А.С., Клименко С.А., Береснев В.М., Клименко С.Ан., Копейкіна М.Ю., Столбовий В.О., Литовченко С.В. Різальні інструменти з композитів на основі кубічного нітриду бору з покриттям. Київ: Наук. думка, 2023. 176 с.
6. Мазур М.П., Внуков Ю.М., Грабченко А.І., Доброскок В.Л., Залога В.О. Основи теорії різання матеріалів. Львів: Новий Світ-2000, 2025. 457 с.
7. Yang S., Wu B., Gao S., Xue W., Duan D. Protective coatings for aeroengine blade tips : a review. *Journal of Materials Science*. 2024. Vol. 59. P. 19424–19449.
8. Grilli M. L., Valerini D., Slobozeanu A. E., Postolnyi B. O., Balos S., Rizzo A., Piticescu R. R. Critical Raw Materials Saving by Protective Coatings under Extreme Conditions : A Review of Last Trends in Alloys and Coatings for Aerospace Engine Applications. *Materials*. 2021. Vol. 14. P. 1656.
9. Бондар І.В., Жаровский Г.Я. Модернізована установка ВУ700 для напилення багаточарових покриттів на довгомірні вироби. *Якість, стандартизація, контроль : теорія та практика* : мат. наук.-техн. конф. Київ : АТМ України, 2025. – у друці.
10. Nasiry O.V. Розвиток технології вакуумного йонно-плазмового напилення та напрямки її вдосконалення. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2018. Vol. 28, N 10. P. 85–91.
11. Yamamura Y., Tawara H. Energy dependence of ion-induced sputtering yields from monatomic solids at normal incidence. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1996. Vol. 62, N 2. P. 149–253.

Надійшла 09.09.25

### References

1. Pogrebnyak, A.D. & Beresnev V.M. (2012). Hard Nanocomposite Coatings, Their Structure and Properties. *Nanocomposites – new trends and developments*. Intech.
2. Azarenkov, N.O., Neklyudov, I.M., Beresnev, V.M., et al. (2014). *Nanomaterialy i nanotekhnologii [Nanomaterials and Nanotechnologies]*. V.N. Karazin Kharkiv National University [in Ukrainian].
3. Feng Shi. (2018). *Magnetron Sputtering*. IntechOpen.
4. Green, J. (2024). *An Overview of Sputtering Deposition*, <https://www.sputtertargets.net/blog/an-overview-of-sputtering-deposition.html>.
5. Manokhin, A.S., Klymenko, S.A., Beresnev, V.M., et al. (2023). *Rizalni instrumenty z kompozytiv na osnovi kubichnoho nitrydu boru z pokryttiam [Cutting tools made of coated cubic boron nitride composites]*. Naukova Dumka [in Ukrainian]. Mazur, M.P., Vnukov, Yu.M., Grabchenko, A.I., et al. (2025). *Osnovy teorii rizannia materialiv [Fundamentals of the theory of cutting materials]*. Novyi Svit-2000 [in Ukrainian].

6. Yang S., Wu B., Gao S., et al. (2024). Protective coatings for aeroengine blade tips: a review. *Journal of Materials Science*, 59, 19424–19449.
7. Grilli M. L., Valerini D., Slobozeanu A. E., et al. (2021). Critical Raw Materials Saving by Protective Coatings under Extreme Conditions: A Review of Latest Trends in Alloys and Coatings for Aerospace Engine Applications. *Materials*. 14. 1656.
8. Bondar, I.V. & Zharovsky, G.Ya. (2025). Modernizovana ustanovka VU700 dlia napylenia bahatosharovykh pokryttiv na dovhomirni vyroby [Modernized VU700 installation for spraying multilayer coatings on long products]. *Quality, standardization, control: theory and practice*. (s. 10–12). ATM Ukraine [in Ukrainian].
9. Hasiy, O.B. (2018). Development of vacuum ion-plasma sputtering technology and directions for its improvement. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(10). 85–91.
10. Yamamura, Y. & Tawara, H. (1996). Energy dependence of ion-induced sputtering yields from monatomic solids at normal incidence. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 62(2), 149–253.

УДК 678:66.08/.09

DOI: 10.33839/2708-731X-28-1-436-442

**Є. О. Пащенко**, д-р техн. наук; **О. В. Лажевська**, **Д. О. Савченко**, кандидати технічних наук; **О. М. Кайдаш**, д-р техн. наук; **С. А. Кухаренко**, канд. техн. наук; **Р. М. Курганов**, аспірант; **В. М. Бичихін**, **С. В. Скороход**, **Н. В. Єльцов**

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2, м. Київ, Україна, 04074, E-mail: lab6\_1@ukr.net*

## АДАПТИВНІ АБРАЗИВНІ КОМПОЗИТИ НА ФТАЛОНІТРИЛЬНІЙ ЗВ'ЯЗЦІ

*Запропоновано підхід до синтезу композитів, здатних до адаптивної поведінки в контактній зоні за механізмом зворотної зміни густини прищеплення функціональних груп полімерного зв'язуючого до поверхні частинок наповнювача. Досліджено вплив технологічних параметрів синтезу та дії зовнішніх чинників, зокрема ультразвукових коливань, на ступінь адсорбційного прищеплення, та, відповідно, на зворотну зміну жорсткості композиту, що забезпечує ефект реакційного армування, або ж адаптацію абразивного композита в процесі його роботи. Показано переваги отриманих адаптивних композитів порівняно з традиційними за такими показниками, як продуктивність інструмента, його зносостійкість та якість оброблених поверхонь.*

**Ключові слова:** адаптивні абразивні композити, адсорбція функціональних груп, полімерне зв'язуюче, оксидний наповнювач

Адаптивна поведінка абразивного композиційного матеріалу в процесі його контактної взаємодії з оброблюваним виробом проявляється як самовільна, зворотна та багаторазова трансформація структури і властивостей поверхневого шару відповідно до умов контактної зони. Останні можуть змінюватися як у керованому режимі (наприклад, при варіюванні параметрів обробки), так і випадковим чином (зокрема, унаслідок флуктуацій миттєвих значень силових параметрів по площі контакту інструментального та оброблюваного матеріалу) [1–3].

У дослідженні як полімерне зв'язуюче для виготовлення абразивного композиційного матеріалу застосовано фталонітрильний полімер на основі мономера з циклоїмідним ароматичним ядром, модифікованим прищепленими фрагментами динітрилу ортофталевої