

Сагалович О.В.<sup>1</sup>, Кононихін О.В.<sup>1</sup>, Попов В.В.<sup>1</sup>, Дуднік С.Ф.<sup>2</sup>, Сагалович В.В.<sup>1</sup><sup>1</sup> ОАО «ФЭД». Україна, г. Харків<sup>2</sup> ННЦ «ХФТІ». Україна, г. ХарківТЕХНОЛОГІЧНІ СХЕМИ ФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ  
ПОКРИТТІВ «AVINIT».

## Анотація

Сформульовані вимоги до технології отримання багатошарових покриттів в залежності від їх функціонального призначення, зокрема, для зміцнюючих, надтвердих, зносостійких і антифрикційних покриттів.

Для формування багатошарових багатокомпонентних покриттів запропоновані основні технологічні схеми та їх варіації в залежності від типу підкладки (рухома або нерухома), складу багатошарових та нанощарових багатокомпонентних покриттів та особливостей застосування цих схем з урахуванням вимог щодо забезпечення необхідних властивостей покриттів в залежності від їх функціонального призначення.

З використанням запропонованих технологічних схем отримані багатошарові покриття «Avinit» різного складу і будови для дослідження їх властивостей, зокрема, трибологічних характеристик в різних парах тертя та з'ясування можливостей їх застосування у якості зносостійких та антифрикційних покриттів для пар тертя прецизійних вузлів агрегатобудування та двигунобудування.

## Abstract

*The requirements to technology of multilayer coatings, depending on their functional purpose, in particular for the reinforcement hardening, wear-proof and antifrictional coatings.*

*Basic technological schemas and their variations were proposed for obtaining of multilayered multicomponent coatings taking in account substrate type (moving or static), multilayered multicomponent coatings composition coating and peculiarities of such shemas utilization fro obtaining necessary coatings properties upon their function.*

*Utilizing proposed technological schemas were obtained multilayered coatings «Avinit» of different composition and structure for their properties investigation in particular tribological properties in different tribological pairs and clarification possibitilies of their application as wearproof and antifrictional coatings for tribological matches of precision pairs of untis of machinebuilding.*

Сучасні дослідження в галузі створення нових матеріалів з рекордними характеристиками по шорсткості, зносостійкості, можливості працювати в екстремальних умовах пов'язані з напрямком нанотехнологій, що дозволяють формувати багатокомпонентні композиції із структурними елементами, які мають розміри від декількох сотень до одиниць нанометрів. Такі матеріали порівняно із матеріалами такого ж складу із звичайною структурою можуть мати в декілька разів вищі відповідні характеристики по трибологічним та іншим властивостям.

Дуже актуальна проблема створення нових матеріалів для агрегатобудування та двигунобудування. Перехід до виробництва нових конструкцій і агрегатів потребує суттєвого підвищення надійності і ресурсу цих систем, що неможливо без створення нових матеріалів із значно підвищеними характеристиками, перш за все, трибологічними властивостями.

Найбільш успішне вирішення цих проблем забезпечують технології модифікування поверхневих шарів контактуючих матеріалів і нанесення зносостійких та антифрикційних покриттів для покращення триботехнічних характеристик пар тертя.

Серед методів нанесення покриттів особливе місце займають методи формування покриттів з іонізованих атомарних та молекулярних потоків. Можливість змінювати енергію іонізованих часток потоку конденсованої речовини в широких межах (від одиниць до сотень тисяч еВ) дозволяє ефективно впливати на більшість важливих у практичному відношенні характеристик покриттів (щільність, адгезію, структуру тощо) і завдяки цьому досягати високих значень цих показників.

Попередні наші дослідження [1-4] показують, що найбільш перспективний напрямок – розроблюємі нами комплексні методи нанесення покриттів (плазмохімічні CVD, вакуум-плазмові PVD (вакуум-дугові, магнетронні), процеси іонного насичення та іонної обробки поверхні) об'єднані в одному технологічному циклі. Ці методи дають змогу спрямувати основні зусилля на формуванні нано- та мікросхарових багатокомпонентних покриттів як найбільш перспективних для досягнення необхідних функціональних характеристик.

Наношарові наноконпозиційні покриття (практично з будь-яких елементів, тугоплавкі оксиди, карбіди, нітриди, металокерамічні композиції на основі тугоплавких металів і оксидів) мають великий потенціал у створенні матеріалів з унікальними властивостями, в т.ч. виключною твердістю, міцністю, хімічною стабільністю, низьким коефіцієнтом тертя та високою зносостійкістю завдяки можливості сполучення у різноманітних комбінаціях різних матеріалів і варіювання товщини шарів.

В даній роботі основна увага зосереджена на розгляді технологічних особливостей і технологічних схем отримання багатокомпонентних багатошарових покриттів.

### Технологічні схеми формування багатошарових покриттів.

Технологічні схеми формування багатошарових багатокомпонентних покриттів в даному випадку слід розглядати як сукупність дій та режимів роботи обладнання, які можуть забезпечити формування багатошарових та наношарових покриттів з урахуванням специфічних вимог до покриттів. Це питання будемо розглядати з прив'язкою до характеристик технологічного обладнання «Avinit», наведених у роботі [5].

Формування багатошарових покриттів може відбуватися різними шляхами в залежності від можливостей обладнання, складу окремих шарів, їхньої послідовності, розмірів, періоду повторюваності або деяких інших специфічних вимог до покриття.

Одна з найпростіших схем формування наношарових покриттів, які являють собою послідовність з однокомпонентних шарів з того чи іншого елемента, потребує обладнання, яке повинно мати кількість джерел напilenня відповідно до кількості різних елементів, з яких формуються окремі наношари, і схему керування їх роботою з заданою послідовністю та інтервалами циклу «робота-пауза», синхронізованою між собою у часі. В такій схемі розрахункова товщина окремого шару буде визначатися співвідношенням  $v_i t_i$ , де  $v_i$  - швидкість росту покриття при роботі  $i$ -го джерела напilenня,  $t_i$  - інтервал роботи цього джерела. Швидкість росту покриття в залежності від типу джерела напilenня, відстані від джерела до підкладки та інших параметрів має широкі межі своїх значень від одиниць до сотень мкм/год. Відповідно товщини наношару 2-5 нм, які приводяться в експериментальних дослідженнях по наношаровим покриттям і який можна з певним допуском розглядати ще як мономатеріал, мінімальний час роботи для формування наношару зазначеної вище величини може складати від 0,1 до 10 сек.

При формуванні покриттів за описаною схемою на обладнання можуть накладатися додаткові вимоги щодо просторового розміщення джерел напilenня в залежності від того, рухається (обертається) підкладка або нерухома.

Якщо підкладка обертається, то джерела не обов'язково розміщувати в одній площині по відношенню до поверхні підкладки або, в крайньому випадку, в секторі з кутом  $< 180^\circ$ , як це потрібно в разі нерухокої підкладки. Разом з тим при обертанні підкладки треба враховувати частоту обертів і скважність сигналів керування роботою окремих джерел. Обертання підкладки само по собі теж може розглядатися як один із прийомів, що дозволяє формувати шарові покриття. Якщо наношари представляють собою багатокомпонентний матеріал, то тут можуть використовуватися декілька схем їх формування в залежності від способу досягнення заданого складу наношарів. При використанні вихідних матеріалів (мішеней) в джерелах напilenня, що відповідають заданому складу наношарів, схема та вимоги до системи керування обладнанням формування наношарів в цьому випадку не відрізняються від випадку формування однокомпонентних наношарів. Такий спосіб має ряд позитивних рис, але він потребує виготовлення катодів чи мішеней відповідного складу, і при проведенні, наприклад, досліджень залежності характеристик покриттів від складу наношарів це потребує наявності цілого ряду мішеней різного складу. Іншим обмеженням використання такого способу є неможливість металургійним чи іншим прийнятним способом виготовити катод (мішень) з заданим вмістом компонент та відповідної якості, як у випадку, наприклад, метал-оксидних, метал-нітридних і т.п. композиційних матеріалів. Формування покриттів з таких композиційних матеріалів значно простіше реалізувати з залученням плазмохімічних способів при реакційному способі нанесення покриттів. В цьому випадку система керування процесом формування нанопокриттів повинна забезпечити скориговану у часі роботу як джерел напilenня, так і системи напуску одного або декількох газів до заданого рівня тиску з періодичністю та часом у відповідності до зроблених вище оцінок при розгляді схеми формування однокомпонентних шарів. Тут треба мати на увазі тільки той факт, що, якщо тиск в вакуумній камері можна збільшити з рівня  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  Па, наприклад, для вакуум-дугового методу напilenня однокомпонентних металевих покриттів, до рівня на 2-3 порядки більшого, характерного для реактивного напilenня, можна за час  $< 0,1$  сек, то для поновлення тиску до початкової величини потрібно значно більше часу, який буде визначатися об'ємом





вакуумної камери та потужністю засобів відкачки:

$$\tau = V_k \frac{p}{p_0} / V$$

де  $\tau$  час відкачки в сек.,  $V_k$  — об'єм вакуумної камери,  $p_0$  — тиск до напуску реакційного газу,  $p$  — тиск після напуску реакційного газу в вакуумну камеру,  $V$  — швидкість відкачки вакуумної камери в л/с.

Тому, якщо є потреба при формуванні наноструктурних покриттів уникнути між шарами прошарків із змінною концентрацією внаслідок зміни тиску в вакуумній камері газової компоненти, слід витримувати належну паузу в роботі джерел наплення при переході в процес формування від одного шару до іншого.

Разом з тим, внаслідок дифузійних процесів між окремими наночастинами, так чи інакше буде перехідна зона з плавним градієнтом концентрацій елементів, що входять до складу наночастинок. Розмір цієї зони буде визначатися умовами формування наночастинок, та їх складом. В процесі експлуатації таких покриттів дифузійна взаємодія між наночастинами є одним із факторів, що може спричинити небажану, часом швидко зміну вихідних характеристик покриття. Тому щоб підвищити стабільність у часі наночастинок покриттів, в ряді випадків, бажано цілеспрямовано створювати міжшарові прошарки з наперед заданими концентраційним градієнтом компонентів. Для реалізації такої конструкції наночастинок покриттів система автоматичного керування роботою обладнання «Avinit» дозволить керувати не тільки часом та послідовністю роботи джерел наплення, а й співвідношенням у інтенсивності атомарних потоків від цих джерел, спрямованих на підкладку. Для вакуум-дугового методу наплення це досягається за рахунок керування потужністю розряду, величини електромагнітного поля плазмооптичних систем, додатковою частотною модуляцією сигналу керування роботою того чи іншого джерела наплення.

При наявності таких можливостей системи керування обладнанням можна формувати багатокомпонентні наночастинок покриття з самим різноманітним співвідношенням елементів, що входять до складу шарів і без використання багатокомпонентних мішеней, тобто така система керування має найширші можливості у формуванні наночастинок покриттів різного складу та конструкції. І, наприкінці, приймаючи до уваги той факт, що саме можливість в вакуум-плазмових процесах керувати енергією іонів дозволяє впливати в широких межах на процеси зародкоутворення, росту покриття, а значить, його структуру, рівень внутрішніх напружень та інші характеристики.

Система керування обладнанням «Avinit» для нанесення наночастинок покриттів забезпечує можливість в автоматичному режимі змінювати потенціал, що подається на підкладку у відповідності до вибраного алгоритму формування наночастинок структури покриття.

#### Технологічні схеми формування твердих та надтвердих покриттів

При нанесенні твердих та надтвердих покриттів на основі формування моношарових гетерофазних наноконструкцій можна застосувати декілька схем реалізації цього процесу в залежності від технічних можливостей обладнання та геометрії поверхні, на яку наноситься покриття. При наявності тільки одного джерела наплення для формування наноконструкційного покриття потрібно мати мішень (катод) з наперед заданим співвідношенням компонент, при якому можливе досягнення ефекту надтвердості даної композиції. Мішень з заданим співвідношенням компонент може виготовлятися різними металургійними методами, або шляхом формування композиційного (мозаїчного) катоду з елементів, що входять до складу покриття. При цьому формування твердих фаз в покритті може відбуватися за рахунок ще однієї компоненти, яка не входить до складу мішені, якщо процес наплення відбувається в атмосфері реакційного газу. Прикладом може слугувати процес формування наноструктурних покриттів на основі нітридів титану та кремнію. У разі формування наноструктурного покриття, яке складається з твердої і м'якої фази, застосування схеми з напленням в середовищі реакційного газу можливе лише для композицій, в яких м'яка компонента не утворює з'єднань, або твердих розчинів з компонентами реакційного газу.

При наявності декількох джерел наплення і розміщених так, що діаграми спрямованості плазмових потоків мають спільний центр в площині підкладки і невеликий кут поміж собою (рис. 1), можливе застосування більш гнучкої схеми формування наноконструкційного покриття, яка дозволяє в певних межах змінювати співвідношення компонент без зміни катодів, з яких йде наплення, в тому числі, і під час наплення. Це досягається за рахунок використання різних катодів, один з яких має склад, що відповідає приблизно половинному значенню відношення основної компоненти до компоненти, що входить до міжзернового прошарку в наноструктурному покритті, а до складу іншого входить тільки основна компонента.

При такій схемі кінцевий склад покриття буде визначатися співвідношеннями в потужності одночасно працюючих джерел наплення, яке може змінюватися в досить широких межах. На такому принципі можна будувати схеми з використанням більшого числа одночасно працюючих

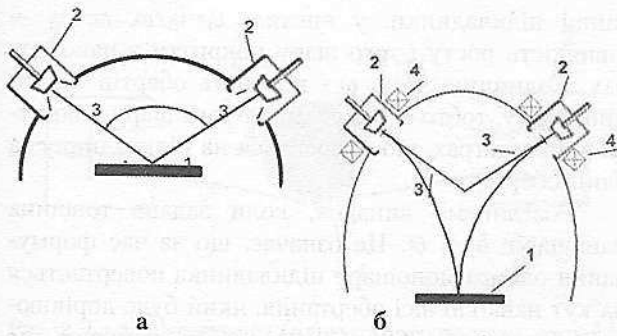


Рис. 1. Схема розміщення джерел напилення при формуванні моношарових надтвердих наноструктурних покриттів. 1 – підкладинка, 2 – джерело напилення, 3 – вісь діаграм спрямованості плазмового потоку, 4 – котушка відхилення плазмового потоку.

джерел для більш складних композицій. Але при цьому все ж таки практично неможливо обійтись тільки однокомпонентними катодами, з урахуванням реальної кількості джерел, яке використовується в обладнанні для нанесення покриттів, оскільки за рахунок зміни потужності при одночасній роботі джерел напилення не можна забезпечити оптимальні співвідношення компонент основної фази і компонент міжзеренних прошарків, що мають бути на рівні від 5 до 15 % до основної компоненти.

При застосуванні багатокатодної схеми формування моношарових гетерофазних наноконкомпозитів слід мати на увазі, що покриття, в залежності від площі, відстані до джерела напилення та робочих характеристик цих джерел, буде мати в своїй площині певну неоднорідність по складу. Ця обставина в деяких випадках може бути визначальною при виборі тієї чи іншої схеми формування моношарових гетерофазних наноконкомпозитів.

Розглянуті схеми можна застосовувати при нанесенні покриттів як на плоскі нерухомі підкладинки, так і підкладинки, що обертаються навколо своєї осі. В останньому випадку, при застосуванні багатокатодної схеми розміщення окремих джерел напилення, повинні задовольнятися вимоги щодо кута між вісями діаграм спрямованості плазмових потоків цих джерел та співпадіння їхніх центрів на вісі обертання підкладинки. Щодо вибору режимів нанесення покриттів, то тут важко і, скоріше неможливо, сформулювати узагальнюючі правила, які б стосувалися тільки формування моношарових гетерофазних наноконкомпозитів. З цього приводу, можливо, слід звернути увагу на правильний вибір температури підкладинки, яка має бути, з одного боку, достатньою для забезпечення умов протікання сінодального розпаду в покритті, який, як вважається, лежить в основі механізму формування гетерофазних наноконкомпозитів [6, 7], а з іншого боку, це досить висо-

кою, щоб запобігти формуванню гетерофазної структури з більшими розмірами, при яких не спрацьовують механізми, відповідальні за досягнення надтвердості покриття. На підставі даних, приведених в роботах з цього приводу, цей діапазон температур в більшості випадків повинен бути в межах ~ 200-500°C [6-9].

Формування надтвердих моношарових покриттів в залежності від складу шарів може відбуватися як за наявності одного джерела напилення так і декількох джерел напилення (як мінімум двох джерел напилення). При нанесенні покриття із декількох джерел на нерухому плоску підкладинку джерела напилення повинні бути розміщені так, як і у випадку формування моношарових гетерофазних наноконкомпозитів, щоб звести до мінімуму в площині покриття неоднорідність по товщині кожного з моношарів. Пошарове нанесення покриття з різних катодів відбувається в імпульсному режимі, товщина яких задається величиною потужності та тривалістю імпульсу роботи того чи іншого джерела напилення. Формування надтвердих моношарових покриттів може відбуватися без участі реакційних газів, якщо до складу катодів входять всі компоненти покриття, або ж, як і у випадку, що розглядався вище для формування моношарових гетерофазних наноконкомпозитів, за участі таких газів. Але при застосуванні реакційних газів в формуванні моношарових покриттів схеми реалізації таких процесів можуть бути більш різноманітними, ніж у випадку формування гетерофазних наноконкомпозитів.

Найбільш проста схема з застосуванням реакційного газу реалізується у випадку, коли окремі шари формуються із твердих з'єднань одного типу, наприклад, нітридів, або із твердого з'єднання і м'якого шару, при умові, що компоненти останнього не взаємодіють з реакційним газом. Така схема нічим не відрізняється від описаної вище без участі реакційного газу, тобто процес ведеться при постійному тиску газового середовища, якщо під останнім розуміти середовище залишкових газів, або реакційного газу. Якщо окремі шари формуються із твердих з'єднань різного, типу, наприклад, нітридів і карбідів, то потрібно вести процес з синхронізацією імпульсної роботи джерел та системи напуску відповідних реакційних газів. При цьому, для забезпечення формування чіткої міжфазної границі між окремими шарами програма керування таким процесом повинна передбачати паузи в роботі джерел напилення та системи напуску реакційних газів між циклами формування окремих моношарів на час, достатній для відкачування одного реакційного газу і напуску іншого до робочого тиску. Необхідність такої паузи між циклами напилення моношарів може ускладнювати формування моно-





шарової композиції з достатньою когезією поміж окремими шарами.

Питання досягнення достатньої міжшарової когезії взагалі є в багатьох випадках досить актуальним. Один із технологічних прийомів, що може бути застосований у разі необхідності для поліпшення когезії в даному випадку, зводиться до подачі на початку кожного циклу роботи джерела напилення на деякий час підвищеного потенціалу зміщення на підкладинку, достатнього для іонно-плазмового очищення та активації ростової поверхні покриття. Зрозуміло, що загальна програма керування таким процесом повинна вибиратися з урахуванням забезпечення необхідного температурного режиму формування покриття. Подібна схема та технологічні прийоми підходять і при формуванні наночарових композицій із твердого з'єднання і м'якого шару у разі, якщо компоненти останнього взаємодіють з реакційним газом. Вона дещо спрощується порівняно з попередньо розглянутою схемою за рахунок того, що цикл нанесення м'якого шару не потребує введення іншого реакційного газу, а тільки відкачки наявного, при цьому необхідність в паузах між роботою джерел для досягнення чіткої міжфазної границі між окремими шарами залишається.

У разі, якщо до складу твердого шару входить з'єднання, яке утворюється за рахунок взаємодії з реакційним газом, а м'який шар формується на основі тієї ж металевої компоненти, що входить до твердого шару, тоді відпадає необхідність у другому джерелі напилення, але вимога до введення паузи в роботі джерела напилення при переході від формування одного шару до іншого залишається.

При нанесенні покриттів на підкладинку, що рухається (обертається), формування наночарових структур має свої особливості. Це пов'язано з тим, що обертання підкладинки може бути само по собі при певних умовах засобом формування наночарових покриттів і розглядатися як один із параметрів технологічних схем в контексті даного розгляду. Тому логічно розгляд можливих технологічних схем формування наночарових структур у випадку обертання підкладинки почати саме з визначення параметрів, які впливають на вибір тієї чи іншої схеми.

Одним із параметрів, від якого залежить вибір конкретної схеми формування наночарових покриттів у випадку руху підкладинки, є, звичайно, період її обертання, але не сам по собі, а у співвідношенні зі швидкістю росту покриття. Для більшої зручності в подальшому розгляді особливостей в формуванні наночарових покриттів у випадку руху підкладинки введемо параметр  $\theta_i$ , який буде визначати співвідношення між швидкістю росту  $i$ -того шару покриття і швидкістю обер-

тання підкладинки, у вигляді  $\theta_i = v_i/\omega$ , де  $v_i$  – швидкість росту  $i$ -того шару покриття в нанометрах в одиницю часу,  $\omega$  – кількість обертів в одиницю часу, тобто  $\theta_i$  є товщина  $i$ -того шару покриття в нанометрах, що наноситься на підкладинку за один оберт.

Розглянемо випадок, коли задана товщина наночарів  $h_i < \theta_i$ . Це означає, що за час формування одного моношару підкладинка повертається на кут навколо вісі обертання, який буде дорівнювати величині  $360^\circ (h_i/\theta_i)$ , тобто наночар не покриває повністю поверхню підкладинки, і в цьому випадку не можна сформувати по товщині покриття структуру з послідовною зміною наночарів заданого складу з товщиною  $h_i$ .

У випадку, коли  $h_i > \theta_i$ , можна сформувати структуру з заданою товщиною  $i$ -того наночару з залученням всіх схем формування наночарових покриттів, які розглядалися вище для нерухомих підкладинок. При цьому вже не має обмежень щодо розміщення джерел напилення з відповідними вимогами до діаграм спрямованості плазмових потоків цих джерел. Але є певні застереження, які треба мати на увазі при користуванні цими схемами. По перше, такий шар за побудовою буде мати вигляд спіралі з шагом рівним  $\theta_i$ . Завдяки цьому при переході від одного шару до іншого за рахунок обриву цієї спіралі буде утворюватися сходинка висотою  $\theta_i/2$ . По друге, за рахунок періодичної зміни умов росту шару при обертанні підкладинки (зміни швидкості росту, співвідношення компонент, з яких формується покриття, та інше) наночар буде мати певну неоднорідність по товщині. Вплив цих факторів на кінцеві характеристики сформованих таким чином наноструктурних покриттів важко прогнозувати.

Розглянемо також випадок, коли  $h_i = \theta_i$ . Цей випадок цікавий тим, що можна застосувати досить просту схему реалізації наночарової структури покриття тільки за рахунок обертання підкладинки без необхідності мати систему керування роботою джерел напилення та напуску реакційного газу з наскрізною синхронізацією їх роботи у часі. Таку схему можна застосувати при одночасній роботі двох джерел напилення, які розміщені назустріч одне одному у випадках, якщо формування наночарів із різних матеріалів можна здійснювати в одному середовищі (з реакційним або без реакційного газу). Але при цьому, для забезпечення формування чіткої межі між наночарами, потрібно, щоб розміри підкладинки (виробу), що покривається, та її розміщення були такими, щоб не було геометричного перекриття зон формування покриття від різних джерел напилення (рис. 2) з урахуванням товщини дебаєвського шару в плазмі навколо підкладинки з потенціалом зміщення  $U$ , наявність якого призводить до

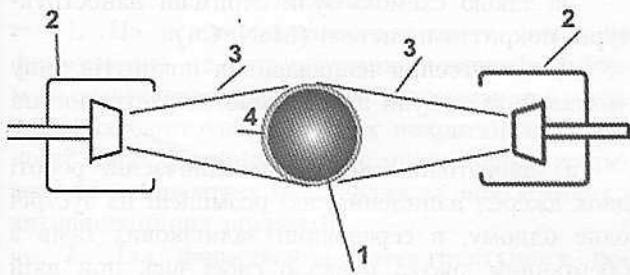


Рис. 2. Схема формування надтвердих наносферичних покриттів на підкладці з обертанням  $h_i = \theta_i$ . 1 – підкладка, 2 – джерело наплення, 3 – частина плазмового потоку, що попадає на підкладку, 4 – дебаєвський шар навколо підкладки.

розмиття межі геометричної тіні від джерела наплення.

### Технологічні схеми формування зносостійких та антифрикційних багатосферичних покриттів.

При формуванні зносостійких та антифрикційних покриттів можна застосовувати більшість із розглянутих схем для формування надтвердих покриттів з деякими поправками, пов'язаними з особливостями їх функціонального призначення. Так, при формуванні зносостійких моношарових наноструктурних покриттів, якщо на меті є досягнення оптимального співвідношення між твердістю покриття  $H$  та його модулем Юнга  $E$ , можуть бути послаблені вимоги, пов'язані з досягненням максимальних значень надтвердості, які стосуються співвідношення компонент основної фази і компонент міжзеренних прошарків та їх розмірів. Це стосується і вимог до формування зносостійких наносферичних покриттів у частині забезпечення якомога чітких меж між шарами та їхньої товщини.

У разі формування антифрикційних наноструктурних покриттів виконання вимог, що розглядались при отриманні надтвердих покриттів з застосуванням розглянутих схем, може бути в ряді випадків взагалі необов'язковим. Оскільки для антифрикційних покриттів низький коефіцієнт тертя у більшості випадків забезпечується матеріалом м'якої фази, а зносостійкість – матеріалом твердої фази, то для їх формування можуть застосовуватися саме схеми формування наноструктур із твердої і м'якої фаз, що розглядались вище.

### Нанесення багатосферичних та наносферичних покриттів на дослідні зразки за розробленими технологічними схемами.

Нанесення наноструктурних покриттів здійснювали на автоматизованому обладнанні «Avinit», характеристики якого та опис детально приведені в роботі [5], по заданій програмі з використанням однокомпонентних катодів в середовищі

реакційного газу і без нього. У якості плазмотворюючих матеріалів (катодів) використовували Мо, Ті, Сц, Al. Реакційним газом слугував азот. Основною домішкою в азоті був кисень, рівень якого не перевищував 0,04 ат. %. Склад залишкових газів і домішок в реакційному газі контролювався за допомогою мас-спектрометра МХ-7304А. Температура поверхні зразків контролювалась за допомогою інфрачервоного пірометра виробництва «Raytek» і на протязі експериментів не перевищувала 200-250°C. Час наплення в більшості випадків складав від однієї до трьох годин. Контроль всіх основних параметрів процесу нанесення покриттів здійснювався в автоматичному режимі.

Дослідні зразки розміщувалися в технологічній оснастці і могли здійснювати рух, в залежності від вибраної технологічної схеми, навкруги своєї вісі, рухатися навколо вісі, що проходить через центр вакуумної камери, або здійснювати планетарний рух з обертанням одночасно навколо своєї вісі і вісі камери. Зразки мали форму дисків діаметром 20 мм і товщиною 3 мм, або паралелопіпиду 5x10x20 мм, виготовлені із сталі Х12Ф1. Поверхня, на яку наносилось покриття, було відполіроване до шорсткості не нижче 10 класу по технологіям, які застосовуються на заводі ДП ХМЗ «ФЕД». Оскільки подальші дослідження трибологічних властивостей покриттів заплановано проводити на машині тертя по схемі «ролик - площа», то поряд із зазначеними вище зразками, покриття наносились відповідно на диски діаметром 50 мм і товщиною 12 мм та кубики із стороною 10 мм. Безпосередньо перед нанесенням покриттів зразки промивалися в органічних розчинниках (бензин Б-70 або уайт-спирит) і потім піддавались ультразвуковій обробці в розчині нейтральних миючих засобів. Після цього зразки промивалися в проточній питній воді с подальшим зануренням в дистильовану воду, видаленням рештки води після вилучення з дистильованої води серветками і заключним протиранням поверхні зразка батистовою серветкою, зволоженою петролейним ефіром або ацетоном.

Нанесення наносферичних покриттів відбувалось за такими схемами.

Для нанесення наносферичних покриттів із твердих з'єднань було використано дві технологічні схеми, а саме:

а) двокатодна схема при одночасній роботі двох джерел наплення, які розміщені назустріч одне одному, в середовищі реакційного газу з обертанням зразка навколо своєї вісі, при якій виконується співвідношення  $h_i = \theta_i$ ;

б) двокатодна схема при імпульсній роботі двох джерел наплення, які розміщені назустріч одне одному, в середовищі реакційного газу з



обертанням зразка навколо своєї вісі, при якій виконується співвідношення  $h_i > \theta_i$ .

За такими схемами були отримані наноструктурні покриття в системі (TiN-AlN).

Для нанесення нан шарових покриттів, що побудовані із послідовності твердого і м'якого шарів було використано такі технологічні схеми:

а) однокатодна схема з неперервною роботою джерела напилення і імпульсною (періодичною) подачею реакційного газу, при цьому вона була реалізована у двох варіантах, з обертанням підкладинок навколо своєї вісі, коли покривалась вся поверхня зразка, і без обертання, коли покривалась тільки одна сторона зразка.

За такими схемами були отримані наноструктурні покриття в системі (TiN-Ti) і (MoN-Mo);

б) двокатодна схема при імпульсній роботі двох джерел напилення, які розміщені назустріч одне одному, і імпульсною подачею реакційного газу, синхронізованою у часі з роботою джерела напилення, що забезпечує формування твердого шару з обертанням зразка навколо своєї вісі, при якій виконується співвідношення  $h_i > \theta_i$ .

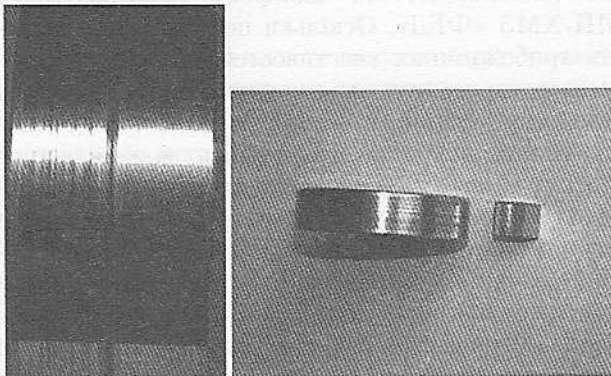


схема а)

схема б)

Рис. 3. Нан шарові покриття типу «метал-метал»  
схема а) метал-метал (Mo-Cu); схема б) метал-метал (Mo-Cu).

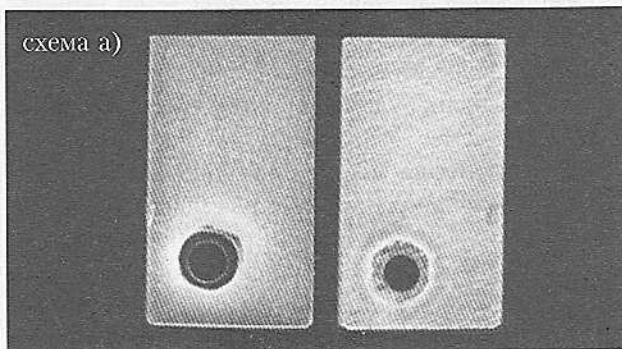


схема а)

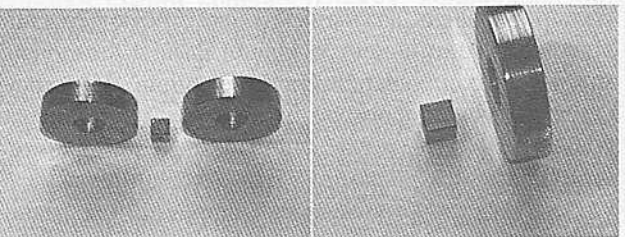


схема а)

схема б)

Рис. 4. Нан шарові покриття із твердих з'єднань (TiN-AlN).

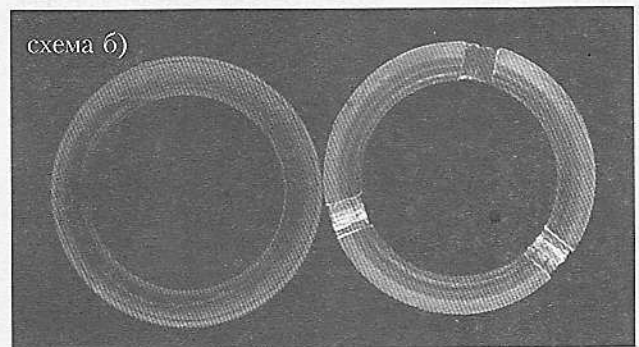


схема б)

Рис. 5. Нан шарові покриття, побудовані із послідовності твердого і м'якого шарів  
схема а) твердий - м'який шар (TiN-Ti);  
схема б) твердий - м'який шар (MoN-Mo).

За такою схемою були отримані наноструктурні покриття в системі (MoN-Cu).

Для нанесення нан шарових покриттів типу «метал-метал» було застосовано дві технологічні схеми:

а) двокатодна схема при одночасній роботі двох джерел напилення, які розміщені на зустріч одне одному, в середовищі залишкових газів з обертанням зразка навколо своєї вісі, при якій виконується співвідношення  $h_i = \theta_i$ ;

б) двокатодна схема при імпульсній роботі двох джерел напилення, які розміщені на зустріч одне одному, в середовищі залишкових газів з обертанням зразка навколо своєї вісі, при якій виконується співвідношення  $h_i > \theta_i$ .

За такою схемою були отримані наноструктурні покриття в системі (Mo-Cu).

На рис. 3-5 приведені фото зразків з покриттями різного складу, одержаними за приведеними вище технологічними схемами.

Таким чином, за розробленими технологічними схемами отримані покриття з нан шаровою структурою різного складу і будови, для проведення у подальшому досліджень їх властивостей, зокрема, трибологічних характеристик в різних парах тертя (в залежності від складу та співвідношення шарів) і можливості їх застосування у якості зносостійких і антифрикційних покриттів.

**Висновки**

1. На основі загального аналізу вимог до формування наноструктурних покриттів сформульовані вимоги до технології отримання багатшарових багатокомпонентних покриттів в залежності від їх функціонального призначення, зокрема, для зміцнюючих надтвердих та зносостійких і антифрикційних покриттів.

2. Для формування наноструктурних покриттів запропоновані основні технологічні схеми та їх варіації в залежності від типу підкладки (рухома або нерухома), складу наноструктурних покриттів та особливостей застосування цих схем з урахуванням вимог щодо забезпечення необхідних властивостей покриттів в залежності від їх функціонального призначення.

3. З використанням запропонованих технологічних схем отримані нанопарові покриття різного складу і будови для дослідження їх властивостей, зокрема, трибологічних характеристик в різних парах тертя та з'ясування можливостей їх застосування у якості зносостійких та антифрикційних покриттів.

4. Запропоновані технологічні схеми формування наноструктур з урахуванням вимог до покриттів в залежності від їх функціонального призначення та геометрії підкладок закладають фізичні основи розробки технологій нанесення нових багатшарових багатокомпонентних функціональних покриттів для пар тертя прецизійних вузлів агрегатобудування та двигунобудування.

**Литература**

1. Сагалович А.В. Разработка многокомпонентных покрытий для повышения износостойкости поверхностей пар трения в прецизионных узлах / [А.В. Сагалович, В.В. Сагалович, С.Ф. Дудник и др.]. // Физическая инженерия поверхности. — 2007. — т. 5. — № 3-4. — С. 154–165.

2. Сагалович А.В. Автоматизированная система нанесения функциональных нанопокровий / А.В. Сагалович, С.Ф. Дудник, В.В. Сагалович. // Оборудование и инструмент. — 2005. — т. 12. — С. 2-3.

3. Дудник С.Ф. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминиевом сплаве / [С.Ф. Дудник, А.В. Сагалович, В.В. Сагалович и др.]. // Физическая инженерия поверхности. — 2004. — т. 2. — № 1-2. — С. 110-114.

4. Сагалович А.В. Отработка процессов нанесения упрочняющих и антифрикционных покрытий и проведение трибологических испытаний образцов с покрытиями / [А.В. Сагалович, В.В. Сагалович, С.Ф. Дудник и др.]. :Совместный научно-технический отчет НТЦ «Нанотехнология» и НПК «Корпорация ФЭД». — 2008. — № НАН 4.2.08.—С. 146.

5. Сагалович О.В. Установка *Avinit* для нанесения багатшарових функціональних покриттів / [О.В. Сагалович, О.В. Кононихін, В.В. Попов та ін.]. // Физическая инженерия поверхности.— 2010. — т. 8. — № 4. — С. 336–347.

6. Veprek S. Concept for the design of novel superhard coatings / S. Veprek, S. Reiprich. // Thin Solid Films.—1995.—v. 268.—P. 64-67.

7. Veprek S. The search for novel, superhard materials / S. Veprek. //J. Vac. Sci. Technol. — 1999. — A17(5). — P. 2401–2420.

8. 3. 11. Haurt R. From alloying to nanocomposites – improved performance of hard coatings / R. Haurt, J. Patscheider. // Advanced Engineering Materials. — 2000. — v. 2. — № 5. — P. 247–259.

9. 4. 12. Veprek S. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites / [Veprek S., Veprek-Heijman M., Karvankova P., Prochazka J.]. // Thin Solid Films. — 2005. — v. 476. — P. 1–29.