

УСТАНОВКА AVINIT ДЛЯ НАНЕСЕННЯ БАГАТОШАРОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

А.В. Сагалович, А.В. Кононихін, В.В. Попов, С.Ф. Дуднік, В.В. Сагалович
ВАТ "ФЕД" (Харків)
Україна

Надійшла до редакції 21.12.2010

Для нанесення функціональних багатошарових композиційних покриттів розроблено і створено експериментально-технологічне обладнання – автоматизована система AVINIT, яка дозволяє реалізувати **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. Проведена реконструкція технологічного обладнання на основі комп'ютеризації керування технологічним процесом і розроблені програмні продукти дозволяють наносити нано- і мікрошарові багатокомпонентні покриття на прецизійні поверхні високого класу чистоти для застосування в парах тертя прецизійних вузлів агрегатобудування.
Ключові слова: вакуумно-плазмові багатокомпонентні багатошарові, нанощарові покриття.

Для нанесения функциональных многослойных композиционных покрытий разработано и создано экспериментально-технологическое оборудование – автоматизированная система AVINIT, которая позволяет реализовать **комплексные** методы нанесения покрытий (плазмохимические CVD, вакуум-плазменные PVD (вакуумно-дуговые, магнетронные), процессы ионного насыщения и ионной обработки поверхности), объединенные в одном технологическом цикле. Проведена реконструкция технологического оборудования на основе компьютеризации управления технологическим процессом и разработанные программные продукты позволяют наносить нано- и микрослойные многокомпонентные покрытия на прецизионные поверхности высокого класса чистоты для применения в парах трения прецизионных узлов агрегатостроения.

Ключевые слова: вакуумно-плазменные многокомпонентные многослойные, нанослойные покрытия.

It was worked out and was made technological equipment an automotized system Avinit, wich gives possibility to realize complex coating depositiong methods (plasmachemical CVD, vacuum-plasma PVD (vacuum arc, magnetron), processes of ion saturation and ion surface processing), incorporated in one technological cycle. Reconstruction of technological equipment on the basis of the computerization of process control and developed software products allow to apply nano-and micro-layered multi-coating on the surface of high precision with low roughness for use in precision friction pairs of hydrulical units.

Keywords: vakuumno-plasma multicomponent multilayered, nanolayered covering.

ВСТУП

Постійно зростаючі вимоги сучасної техніки обумовлюють необхідність розробки нових прогресивних технологій і матеріалів з надвисокими функціональними характеристиками. Ці питання особливо гостро постають в тих галузях, які є визначальними для розвинутих країн у конкурентній боротьбі. Це, зокрема, стосується авіабудування, космічної галузі, машинобудування та деяких інших, в яких Україна ще має досить значний потенціал в конкурентній боротьбі з іншими країнами світу.

Вдовольнити вимогам, найчастіше суперечливим, до властивостей поверхні (висока твердість і зносостійкість, високі антифрикційні характеристики) та об'ємним властивостям (висока міцність та ударна в'язкість) можна шляхом створення композицій з пошаровим розміщенням матеріалів, які виконують різні функції.

Найбільш успішне вирішення цих проблем забезпечують технології модифікування поверхневих шарів контактуючих матеріалів і нанесення зносостійких та антифрикційних

покриттів для покращення триботехнічних характеристик пар тертя.

Без покриттів різного функціонального призначення не можна уявити сучасну техніку та подальший прогрес в усіх сферах її застосування. Все більш високі вимоги до властивостей матеріалів та комплексний характер цих вимог стимулює постійний пошук нових матеріалів та технологій їх отримання.

Нанесення покриттів на ті або інші матеріали не просто покращує їхні властивості, а приводить до створення нового композиційного матеріалу з властивим йому комплексом характеристик.

Найновіша тенденція у створенні нових сучасних матеріалів з рекордними характеристиками по шорсткості, зносостійкості, можливості працювати в екстремальних умовах пов'язана із дослідженнями та розробкою наноструктурних матеріалів та нанотехнологій. Це стосується і покриттів – одного з ефективних засобів розширення можливостей застосування тих чи інших матеріалів. Перехід до нанодіапазону дозволяє 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 за трибологічними та іншим властивостями.

В провідних країнах світу розробка надійних засобів створення наноматеріалів та нанооб'єктів з потрібними і програмованими властивостями, включаючи розробку нових і модернізацію існуючих методів, є найбільш інвестованим напрямком. Зокрема, це стосується літакобудування, двигунобудування та агрегатобудування, де в багатьох випадках традиційні матеріали та технології їх отримання вичерпали свої можливості в забезпеченні постійно зростаючих вимог до технічних характеристик нових агрегатів. У світовій практиці машинобудування провідні фірми США, Японії, Німеччини, Швеції, Швейцарії та ін. стрімко нарощують об'єми використання багатокомпонентних зміцнюючих наноструктурних покриттів, що забезпечує значне підвищення ресурсу та ефективності роботи машин та обладнання.

Серед методів нанесення покриттів особливе місце займають методи формування покриттів із іонізованих атомарних і молекулярних потоків. Можливість змінювати енергію іонізованих частинок потоку речовини, що конденсується, в широких межах (від одиниць до сотень і тисяч електрон-вольт) дозволяє ефективно впливати на більшість важливих у практичному застосуванні характеристик покриттів (щільність, адгезію, структуру та інші) і завдяки цьому досягати найвищих значень відповідних показників порівняно з іншими методами. Важлива особливість, що виділяє означені вище методи, є можливість створювати багатокомпонентні композиційні матеріали у нерівноважних умовах їх формування.

Дуже актуальна проблема створення нових матеріалів для агрегатобудування. 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.

Впродовж багатьох років нами проводяться інтенсивні дослідження і розробки багатокомпонентних багатофункціональних покриттів та методів їх нанесення на поверхні з прецизійною обробкою, яку потребують деталі вузлів сучасних агрегатів літакобудування, космічної техніки та інших галузей [1 – 6]. Такі поверхні мають шорсткість не гірше 12 класу чистоти обробки, допуски в розмірах на рівні 1 мкм і менше і у більшості випадків не можуть доопрацьовуватись після нанесення покриття, що потребує розробки спеціальних методів нанесення покриттів, які могли б забезпечити такі вимоги.

Багатокомпонентні багатошарові покриття продемонстрували більш високі показники зносостійкості та трибологічні характеристики порівняно з одношаровими покриттями на основі однієї сполуки. Найкращі трибологічні властивості (підвищення зносостійкості і зниження коефіцієнта тертя ковзання) показали розроблені нами багатокомпонентні багатошарові покриття типу AVINIT – пари багатошарові покриття AVINIT C/P 300 (на основі системи Ti-Al-N), та покриття AVINIT C/P 200 (на основі системи Mo-N).

На основі досвіду та результатів попередніх робіт у галузі отримання покриттів та плівкових матеріалів основна ідея полягає в тому, що

- досягнення поставленої мети передбачається за рахунок використання **комплексних** плазмохімічних та вакуум-плазмових процесів, активованих нерівноважною низькотемпературною плазмою, у сполученні із іонно-плазмовим модифікуванням поверхні;
- **перехід до нанодіапазону** для нанесення багатокомпонентних, в тому числі, багатошарових та наночарових покриттів, що зумовлено їхніми широкими можливостями формування покриттів із різних матеріалів у різному структурному стані, в тому числі наноструктурному, забезпечуючи при цьому одержання наноплівок з наперед заданими характеристиками максимальну щільність, адгезію та інші характеристики якості покриття.

Передбачається відпрацювати процеси отримання багатокомпонентних плівкових матеріалів з наночаровими наноконпозиційними покриттями, які мають величезний потенціал у створенні матеріалів з комплексом унікальних властивостей завдяки можливості поєднання в найрізноманітніших комбінаціях різних матеріалів та варіації товщини шарів. Правильний вибір індивідуальних матеріалів шарів, методів осадження та оптимізація параметрів створюють передумови синтезу матеріалів з унікальними електрофізичними, магнітними, фізико-хімічними властивостями, в т.ч. з виключно високою твердістю, міцністю, хімічною стабільністю, низьким коефіцієнтом тертя і підвищеною зносостійкістю.

Стратегічною перспективною метою даного комплексу робіт є створення **комплексними** плазмохімічними та вакуумно-плазмовими методами нових матеріалів та промислових технологій нанесення багатошарових та наночарових іонно-плазмових та плазмохімічних покриттів і впровадження їх у серійне виробництво нових виробів авіаційно-технічного призначення на ХМЗ “ФЕД” для поступового підвищення ресурсів виробів і підвищення надійності їх роботи шляхом використання розроблених нанотехнологій.

В серійному виробництві гідравлічних агрегатів запровадження у вузлах тертя наноструктурних та наночарових матеріалів здатне забезпечити високу надійність роботи серійних та нових конструкцій агрегатів і збільшити настановний і міжремонтний ресурс у 5 – 20 разів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ТА ПАТЕНТНО-ІНФОРМАЦІЙНИХ ДАНИХ

Аналіз літературних та патентно-інформаційних матеріалів показує, що існує доволі широкий спектр методів та обладнання, що застосовуються при нанесенні різного класу захисних та зміцнюючих покриттів. Так, для нанесення металевих покриттів різного технологічного призначення розповсюджені методи, засновані на термічних процесах і використанні рідких середовищ. Суттєвими недоліками цих методів є недостатня адгезія покриття, наявність великої кількості рідких хімічно активних відходів, використання шкідливих хімічних реагентів, токсичність відлень, що виникають у процесі нанесення покриттів. Для усунення або зменшення шкідливого впливу токсичних відходів виробництва на організм людини та навколишнє середовище створюють потужні та вартісні вентиляційні системи, очисні споруди.

Інші методи нанесення покриттів, такі як плазмотронний, детонаційний, термохімічний стосовно задач, що вирішуються також мають ряд недоліків, зокрема, низьку щільність покриттів, неможливість отримання складних покриттів на основі тугоплавких матеріалів, із заданою структурою покриттів та поганою керованістю процесом нанесення покриттів.

Найбільш перспективними альтернативними методами осадження покриттів з заданими властивостями є вакуумно-плазмові методи (іонно-плазмові та плазмохімічні), які характеризуються високою ефективністю, екологічною чистотою, достатньою продуктивністю та керованістю процесом нанесення покриттів, які дозволяють створювати необхідну структуру для забезпечення суттєвого підвищення експлуатаційних властивостей виробів з покриттями.

Таблиця 2

Провідне місце у багатьох сферах промислового виробництва різноманітних виробів сучасної техніки, яке посіли вакуумні технології нанесення покриттів, стало можливим завдяки успіхам як в розробці технології формування високоякісних покриттів різного функціонального призначення (захисних, зносостійких, оптичних та інших), так і створенню відповідного промислового обладнання для нанесення покриттів.

Подальший прогрес у застосуванні вакуумних покриттів пов'язаний із розробкою технологій та обладнання, які б забезпечували можливість одержання багатофункціональних складних покриттів з високою однорідністю, відтворюваністю за складом та іншими характеристиками.

В табл. 1 наведені основні технічні дані промислових установок, що реалізують способи магнетронного розпилення, реактивного електронно-плазмового напилення, конденсації з металеві плазми при іонному бомбардуванні, що випускаються в країнах СНД.

Таблиця 1

Характеристики іонно-плазмових установок СНД

Характеристики	ННВ 6.6-И1	ННВ 9.5-И1	ИЭТ 8-И2	Юнион	Пуск 81-1	Булат	ВУ-1Б
Розміри робочої камери: Діаметр, мм Довжина, мм	600 600	900 500	900 500	700 500	360 460	700 500	600 510
Кількість випаровувачів, шт.	3	4	2	2	1×2	3	1
Розміри деталей, що покриваються Діаметр, мм Довжина, мм	200 250	200 250	200 250	150 250	200 200	200 250	60 200
Швидкість осадження покриттів, мкм/г	10 ÷ 30	10 ÷ 30	10 ÷ 30	–	40	6 ÷ 10	6
Маса установки, т	3,4	3,0	1,9	3,15	1,5	2,8	–
Площа для розміщення, м ²	15	–	24	17,5	30	30	24

Провідні організації та фірми, що спеціалізуються в сфері обладнання для іонно-плазмового нанесення покриттів, наведені в табл. 2.

Найменування організації, фірми з визначенням країни	Науково-технічний довідок (номер охоронного документу)	Технічна сутність нових рішень та очікуєме покращення показників об'єкту
IBM Corp., USA	Патент США 4448802	Спосіб та установка для осадження матеріалу у вакуумі із застосуванням дугового розряду і пучка електронів. Установка має вакуумовану випарювальну камеру, пристрій для генерування низьковольтної дуги між катодом та анодом, електронну гармату для бомбардування матеріалу електронами. Установка анода, катода і гармати забезпечує проходження дуги та електронів між камерами, причому траєкторія розряду охоплює пучок електронів.
IBM Corp., USA	Патент США 4439057 Патент-аналог заявка ЕПВ 0068087	Спосіб випарювання з використанням точкового джерела випромінювання відрізняється використанням променевої енергії для нагрівання верхньої частини металеві маси.
Varran Associates Inc., USA	Патент США 4416759	Установка для напилення з захисним екраном для визначення товщини напилюємих плівок. Захисний екран складається з первинного екрану, встановленого між катодом та підтримувачем підкладинки, і допоміжного утворюючого продовження первинного екрану в напрямку підтримувача підкладинки. Допоміжний екран призначений для захисту від поперекового руху розпилюємих атомів, які знову спрямовуються в зону дії первинного екрана за рахунок зіткнення, що веде до розсіювання газу.
Varran Associates Inc., USA	Патент США 4238525	Спосіб та пристрій для нанесення у вакуумі тонкошарових покриттів з використанням електронних променів. Нагрів здійснюють за допомогою електронів, відбитих поверхнею ванни, заповненої випарюємих матеріалом. З цієї метою у коротких сторін тигля генерують як мінімум два електронних проміння і спрямовують їх під кутом 80° на половину поверхні ванни.
Leybold Heracus GmbH, Germany	Заявка ФРГ № 3228311 Патенти-аналогі: Заявка Великобританії № 2126255, Заявка Франції № 2531104	Випарювальний тигель для установки вакуумного напилення являє собою металеві елемент з заглибленням для матеріалу, що випаровується, причому металеві елемент має канал охолодження. Для того, щоб ефективно запобігти погіршенню тепловіддачі в тиглі запропоновано розмістити в каналі по меншій мірі один спрямовуючий пристрій, що забезпечує турбулізацію потоку заповнюючої канал охолодження рідини.
Siemens AG, Germany	Патент ФРГ № 2624005	Спосіб нанесення тонких покриттів на підкладинки іонним напиленням передбачає випарювання наносимого в якості покриття матеріалу з тигля з використанням електронно-променевого випарювача, причому між матеріалом, що знаходиться в тиглі, та підкладинкою створюють високу різницю потенціалів. Спосіб відрізняється тим, що в просторі між тиглем з матеріалом, що випаровується та підкладинкою частинки матеріалу іонізуються високочастотним електричним полем.

Продовження таблиці 2

Таблиця 3

Siemens AG, Germany	Заявка ФРГ № 2930373 Патенти-аналоги: Заявка Великобританії № 2054659, Заявка Франції № 2462487	Спосіб отримання прозорих електропровідних шарів з оксиду індію на чутливих до нагріву підкладках катодним розпиленням, суть якого в тому, що напилення ведуть в атмосфері водяної пари, що є газоподібним реагентом, тиск якого складає 10^{-3} – 10^3 мбар. Підкладки, чутливі до дії температури при нанесенні шарів, охолоджують водою. Спосіб може бути використаний для нанесення покриттів на різні підкладки, навіть термічно нестабільні.
Мапусита денкі сангьо К.К., Японія	Заявка Японії 57-2150	Пристрій для іонного напилення. Над джерелом парів речовини розміщена камера генерування плазми. Для спрямування іонів речовини, що напилюється застосовують пристрій для формування спрямовуючого електричного або магнітного поля.
Мапусита денкі сангьо К.К., Японія	Заявка Японії 59-29107	Спосіб та пристрій для формування плівки з тонкоподрібнених частинок, отримуваних при дії на осаджуємий матеріал потоку газу, збуджуємого із застосуванням високочастотної котушки в середовищі газу з тиском 0,1 – 10 мм.рт.ст.
Міцубиси денкі К.К., Японія	Патент Японії 58-77570	Спосіб вакуумного напилення. Пропонується проводити попередній розігрів речовини, що випаровується в середовищі водневої плазми або в плазмі суміші газів, які містять водень. Така плазма є потужним відновлювачем, підвищує чистоту поверхні розплаву.
К.К. Хітаті Сей акусьо, Японія	Заявка Японії 59-1799778	Випарювач для вакуумного напилення. Метою винаходу є підвищення рівномірності та однорідності тонких плівок, що наносяться на підкладку. Пропонований випарювач складається з 3-х розмішених одна під одною пластин. Нижня пластина, що має форму човника, містить випарюємий матеріал. Середня та верхня пластини служать екранами.
Baltzers AG, Швейцарія	Патент Швейцарії № 645137 Патенти-аналоги Заявка ФРН 3206882 Заявка Франції 2501725 Заявка Франції № 2551458	Пристрій для випарювання матеріалів у вакуумі, в якому нагрів матеріалу, що випаровується здійснюється електронним бомбардуванням. Джерелом електронів є дуговий розряд, що збуджується за допомогою допоміжного термоелектронного джерела. Випарювальна камера для нанесення на підкладки тонких шарів осадження у вакуумі. Виділення парів регулюють за допомогою механічного елемента, діючого на отвір для виходу парів. Механічний елемент являє собою заглушку отвору для виходу парів.

Розробки в галузі плазмохімічного способу осадження представлені в табл. 3.

Проведений аналіз патентних та науково-технічних матеріалів підтверджує перспективність застосування вакуум-плазмових та плазмохімічних процесів для нанесення функціональних покриттів при умові розробки спеціалізованого обладнання.

Організація, фірма, країна	Найменування та характеристика розробки
Plasma-Therm, Inc., USA	Установки моделі РК-1231 РД, РК-2430 РД. Плазмоактивоване осадження. Діаметр камер відповідно 300, 650 мм, висота 200 мм, діаметр електродів 250 та 550 мм, максимальна кількість пластин діаметром 75 мм, відповідно 4 та 28 шт. Високочастотний генератор використовується на стадії плазмохімічного очищення і осадження покриттів. Загальна потужність генератора досягає 500 Вт (РК-12) і 3 кВт (РК-24), робоча частота 13,5 МГц. Швидкість осадження до 500 А/хв.
Elmatec. Electronics, GB	В установках передбачена розвинена система ліній газонапуску. По центру камер створюється зона рівномірного нагріву довжиною 560 мм. Для установок LPCVD/110 и LPCVD/127 характеристики діаметрів камер завантаження 105 мм та 163 мм відповідно, кількість пластин діаметром 77 мм - 100 та діаметром 125 мм - 200 шт.
Tegal Corp., USA	Установка "Plasmader-300". Реакційна камера має розміри 840×660×240 мм. Ємність – 88 пластин діаметром 50 мм. Швидкість осадження нітриду кремнію до 800 А/хв.
Ulva Corp., Japan	Установка серії "СР" для плазмохімічного осадження. Швидкість осадження шарів нітриду кремнію біля 200 А/хв. Розміри CPD-1114 наступні: 1650×1220×1440 мм, потужність живлення головного блоку 10 кВА, а високочастотної системи 2 кВА.
Advanced Semiconductor Materials America Inc., USA	Реалізуються процеси отримання плівок нітриду кремнію із швидкістю осадження до 300 А/хв. Ємність – 108 пластин діаметром 75 мм.
AST-Elektro-nik GmbH, Germany	Установка для нанесення покриттів в плазмосередовищі. Ємність камери: 160 пластин діаметром 75 мм. Габарити установки 5200×900×1900 мм. Швидкість осадження 200 А/хв нітриду кремнію з необхідними легуючими домішками. Розроблені установки для отримання епітаксціальних шарів кремнію, нітриду кремнію. Детальні відомості про параметри процесу осадження та характеристиках установок не приводяться.
Baltzers, Ліхтенштейн	Установки серії VIS 100, 350, 750. Усі установки модульного типу. Робочі модулі включають магнетронні та хімічні способи осадження.
Leybald AG, Germany	В установках типу А400 и А800 в єдиній виробничій ланці суміщені камери різного призначення як для реактивного та неактивного магнетронного розпилення, так і хімічного осадження. Розміри камер 400×800 та 800×1200 мм. Камери відкачуються до вакууму не гірше 10^{-6} мбар. Цикл нанесення покриттів до 90 сек.

Беручи до уваги важливість практичної реалізації результатів досліджень, при виборі методів і обладнання для нанесення покриттів віддали перевагу тим, які пройшли достатньо широку апробацію та мають промислові

аналоги або можуть бути доведені до промислового використання з мінімальними витратами коштів і часу.

З урахуванням поставлених задач в якості базових вибрані методи, які реалізують вакуум-дугове, магнетронне та плазмохімічне осадження, та відповідне обладнання для їх реалізації.

УСТАНОВКА “AVINIT” ДЛЯ НАНЕСЕННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ КОМПЛЕКСНИМИ ІОННО-ПЛАЗМОВИМИ ТА ПЛАЗМОХІМІЧНИМИ МЕТОДАМИ

Згідно загальних вимог установка “AVINIT” повинна забезпечити отримання багатошарових композиційних функціональних покриттів на деталі з поверхнями різної геометрії з прецизійною обробкою за рахунок використання комплексних CVD та PVD методів з можливістю проведення в одному технологічному циклі іонно-плазмового модифікування поверхні.

У зв'язку з цим мета даної роботи складалася у розробці експериментально-технологічного обладнання для нанесення багатошарових покриттів з використанням іонно-плазмових та плазмохімічних методів шляхом модернізації існуючого промислового обладнання іонно-стимульованого осадження та обладнання діагностики нанорозмірних покриттів за рахунок введення в склад обладнання нових мікропроцесорних системи живлення, синхронізації та управління процесами синтезу і діагностики і розробки комплексу методів контролю технологічних параметрів в процесі нанесення покриттів для цілеспрямованого керування технологічним процесом.

Створене нами комплексне іонно-плазмове та плазмохімічне обладнання “AVINIT” для одержання багатокомпонентних багатошарових матеріалів та покриттів являє собою складний високовакуумний агрегат з високою енергетичною насиченістю джерелами живлення різного типу (газофазні та вакуум-дугові випарювачі, джерела магнетронного розпилювання постійного та ВЧ струму, резистивного нагріву, пристрою іонного травлення та очищення).

Комбіновані методи нанесення покриттів “Hi-Tech”, реалізовані в установці “AVINIT”

Газовозний плазмохімічний
Вакуумно-дуговий
Магнетронний
Вакуумне дифузійне насичення
Іонне насичення (азотування, цементация)
Імплантація
Іонне травлення
Іонне очищення
Іонне полірування

Основні технічні характеристики обладнання “AVINIT” для нанесення покриттів наступні:

Габарити	4000×2500×3000 мм
Маса	не більше 3000 кг
температура прогріву камери	80 °С
кількість газофазних джерел	1
кількість дугових джерел	3
кількість магнетронних джерел	2
кількість реакційних газів	4
найбільша електрична потужність не більше	70 КвТ
максимальний розмір оброблюємих деталей	400×400×800 мм
швидкість осадження покриттів	від 1 до 50 мкм/год

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА НАНЕСЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ УСТАНОВКИ “AVINIT”

Багатоцільова комплексна установка “AVINIT” забезпечує режим роботи при використанні будь-яких випарюючих пристроїв, систем та приладів контролю, що входять до її складу, при цьому допускається одночасна робота усіх однотипних випарювачів або почергова (в будь-якій послідовності) різнотипних випарюючих пристроїв. Вирішення задачі одержання багатофункціональних покриттів з необхідними характеристиками багато в чому пов'язано з забезпеченням можливості найбільш повного контролю технологічних параметрів та їх підтримання і керування в автоматичному режимі. При розробці конструкції установки “AVINIT” та її вузлів передбачена можливість дистанційного керування і контролю за їх станом (положенням) за допомогою відповідних приводів і датчиків.

Установка “AVINIT” орієнтована не тільки на якийсь конкретний технологічний процес, а передбачає можливість реалізації різних технологічних процесів, в яких можуть вико-

ристовуватися різні методи нанесення покриттів і засоби попередньої обробки підкладки.

Для реалізації процесів контрольованого формування багатокомпонентних нано- та мікроструктурних покриттів необхідна багатопараметрична система керування роботою технологічного обладнання.

Формування наношарових покриттів з розмірами одиночних шарів на рівні від декількох нанометрів та стабільність їх відтворення потребує як наскрізної синхронізації в керуванні та підтримці на заданому рівні всіх параметрів процесу нанесення покриттів, так і їх невинної реєстрації, чого не можна забезпечити без відповідної системи керування та контролю за параметрами роботи обладнання.

Серійне обладнання для вакуум-плазмового напилення, розповсюджене в країнах СНД (“МИР”, “Булат-3”, “Булат-6”, “Булат-9”, ВУ-2МБС, ННВ-6.6И1 тощо), має систему керування роботою дугових джерел напилення, яка дозволяє вести процес в постійному або періодичному режимі роботи дугових джерел. Періодичний режим здійснюється за допомогою електронно-релейної схеми з таймерами, які задають час роботи і паузи джерел. Проміжки цих інтервалів складають від 1 – 3 секунд до 30 – 60 секунд. При нанесенні багатокомпонентних покриттів з двох або трьох дугових джерел така система керування, в принципі, дозволяє задавати середнє значення у співвідношенні компонентів матеріалів у покритті за рахунок різного співвідношення часу роботи і паузи відповідних дугових джерел напилення. Але робота таймерів, які задають проміжки часу, не має між собою синхронізації, тому на макрорівні склад покриття в той чи інший момент росту покриття абсолютно некерований і має випадковий характер. Цей недолік системи керування не дозволяє формувати в імпульсному режимі композиційні покриття типу “метал-металоїд” з використанням плазмохімічних процесів, якщо створення металоїду проходить за рахунок взаємодії металу з атмосферою реакційного газу, оскільки система напуску і підтримки заданого рівня тиску реакційного газу у вакуумній камері також не має синхро-

нізації з системою керування роботою дугових джерел напилення.

Для нанесення функціональних наношарових композиційних покриттів нами розроблена експериментально-технологічне обладнання – автоматизована система AVINIT, створена шляхом модернізації існуючого промислового обладнання іонно-стимульованого осадження та обладнання діагностики нанорозмірних покриттів за рахунок введення в склад обладнання нових мікропроцесорних систем живлення, синхронізації та управління процесами синтезу і діагностики і розробки комплексу методів контролю технологічних параметрів в процесі нанесення покриттів для цілеспрямованого керування технологічним процесом.

Найбільш прийнятною, з точки зору можливості формування багатокомпонентних нано- та мікроструктурних покриттів з контрольованим складом з використанням вакуум-плазмових та плазмохімічних процесів, є розроблена нами технологія наскрізної синхронізації роботи джерел напилення, джерел подачі прискорюючого потенціалу до виробу, що покривається, та системи напуску реакційних газів та інших систем установки по заданій програмі з використанням ЕОМ для керування технологічним процесом осадження покриттів і вести протоколювання всіх важливих параметрів роботи установки впродовж усього технологічного циклу.

В даній роботі вимоги до модернізованої системи керування та контролю технологічних параметрів визначались з урахуванням конкретних технічних характеристик наявного обладнання AVINIT, формування багатокомпонентних нано- та мікроструктурних покриттів з контрольованим складом з використанням вакуум-плазмових та плазмохімічних процесів.

Для забезпечення вимог до системи керування параметрів обладнання для нанесення наношарових покриттів була передбачена розробка допоміжних систем керування роботою високовольтного та дугових джерел живлення установки, блоку подачі реакційного газу в вакуумну камеру, деяких інших блоків та створити модуль дистанційного автоматизованого керування роботою всіх сис-

тем та виконуючих механізмів установки. Для створення системи контролю параметрів роботою установки була розроблена система збору, передачі, реєстрації, накопичування та обробки інформації від усіх систем та механізмів установки. Природно, що всі перераховані вимоги до системи керування та контролю параметрів установки можна задовольнити тільки на базі застосування мікропроцесорної техніки. З урахуванням цього при модернізації наявного обладнання замість штатної електронно-релейної схеми з таймерами було використано, з одного боку, релейну схему з комп'ютерним керуванням з широким спектром можливостей керуванням як періодами, так і порядком роботи джерел напilenня та, з іншого боку, мікропроцесорним керуючим пристроєм, що дозволяє більш точно регулювати параметри кожного з джерел напilenня. Мікропроцесорна частина і комп'ютерна система керування мають протокол обміну і можуть бути синхронізовані у часі, можливість регулювання параметрів джерел напilenня дає змогу отримувати градієнтні покриття. Під керуванням комп'ютерної ж системи знаходиться і напуск реакційних газів у вакуумну камеру. Система напуску газів і система керування джерелами напilenня також можуть синхронізуватися у часі. Щодо інших можливостей мікропроцесорної підсистеми то вони включають в себе керування системою відкачування вакуумного об'єму (як ручний, так і автоматичний режими), керування високовольтним джерелом потенціалу зміщення (як ступенево, так і плавно), а також керування системою дугогасіння для високовольтного джерела потенціалу зміщення (що забезпечує швидкий < 20 мсек рівень реагування на дуговий розряд, і залишає підкладинку неушкодженою).

Крім цього, до системи керування джерелами напilenня входить плата аналого-цифрового перетворювача (з датчиками та з блоком відповідних нормалізаторів сигналів), який дозволяє збирати дані і вносити корективи у технологічний процес чи робити архів технологічних процесів.

Система збору даних реєструє наступні основні параметри: струм дуги дугових випарювачів, тиск у реакційному об'ємі (з термодинамічного і іонізаційного перетворювачів, темпе-

ратуру підкладинки (з ІЧ-пірометра), іонний струм, що тече крізь підкладинку, і звісно, потенціал зміщення. Блок-схема модернізованої установки AVINIT приведено на рис. 1.

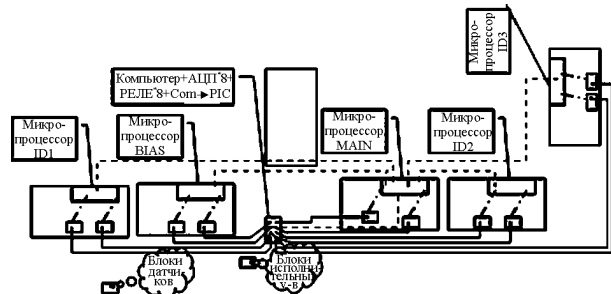


Рис. 1. Блок-схема установки AVINIT.

Датчиками для системи збору даних є датчики Холла (для реєстрації струму джерел напilenня), ІЧ пірометр зі спектральною чуттєвістю у діапазоні 8 – 14 мкм, іонізаційний та термодинамічний перетворювачі тиску, шунт та додатковий резистор для іонного току та напруги джерела високовольтного зміщення.

Кожен з мікропроцесорних блоків має свою систему збору оперативних даних, що не потрапляють до комп'ютерної системи збору і не зберігаються.

Система керування дозволяє операторові проводити процес як у покроковому режимі (відпрацювання), так і в програмному (автоматичному), і в тому, і в іншому режимі реєстрація даних безперервна.

У системі реалізовано як пакетний режим керування (автоматичний режим), так і інтерактивне керування за допомогою графічного інтерфейсу. Вигляд панелей керування наведено на рис. 2.

З урахуванням специфіки реалізуємих процесів осадження покриттів система збору даних та реєстрації забезпечує:

- оперативний контроль всіх значущих технологічних параметрів процесу нанесення покриттів впродовж проведення всього технологічного процесу;
- можливість візуалізації та контролю заданих технологічних параметрів, їх відхилення від заданих технологічних режимів і вивід цієї інформації на дисплей у вигляді, зручному для оператора;
- збереження інформації в пам'яті з можливістю виводу протоколу як всього процесу, так і в заданий момент часу на різних стадіях;

- архівування усіх процесів, що виконуються при нанесенні покриттів;
- широкі можливості по статистичній обробці інформації і представленню протоколів у графічному вигляді;
- можливість об'єктивної паспортизації технологічного процесу незалежно від оператора, що дозволяє використовувати протокол техпроцесу в якості документа, який підтверджує відповідність характеристик покриття вимогам, закладеним в карті технологічного процесу.

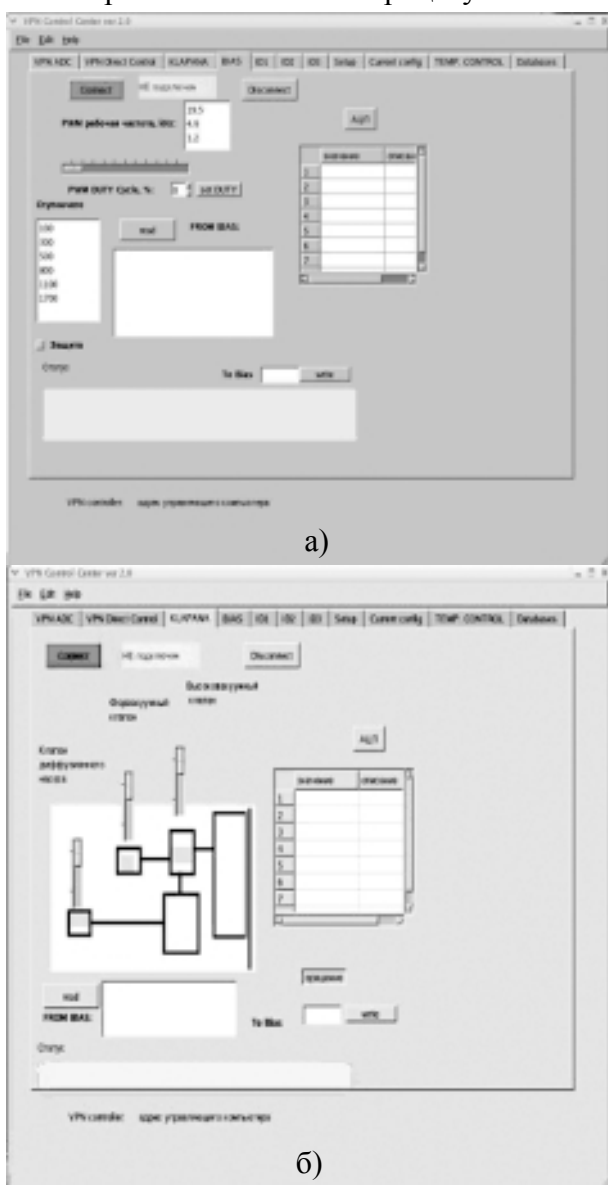


Рис. 2. а) – панель управління високовольтним джерелом струму; б) – панель управління системою відкачування.

Розроблена і виготовлена нами система допускає суттєве масштабування і досить недороге і значне підвищення як швидкодії і точ-

ності, так і кількості каналів вимірювання/керування. На модернізованій установці “AVINIT” використовується система збору даних і керування в наступній конфігурації:

- шість мікропроцесорних блоків керування на всіх функціональних вузлах установки, кожний забезпечує 8 каналів 10-розрядного АЦП та до 40 каналів цифрового (релейного) керування, 2 канали ШИМ, а також компараторні входи, входи лічильників та годинник реального часу для синхронізації процесів (джерела живлення, відкачна система, система напуску газів, система керування). Мікропроцесорні блоки можуть здійснювати керування як по закладеній у них програмі керування, так і виконуючи команди в покроковому режимі від комп'ютера
- два 8-канальних 12-бітних АЦП до 100000 вибірок в секунду (збір та обробка основних параметрів процесів)
- один 1-канальний 16-бітний АЦП до 1000000 вибірок в секунду (калібровка та обробка критичних до часу процесів)
- один 8-канальний блок прямого керування найбільш критичними параметрами безпосередньо від комп'ютера.

Всі аналогові сигнали нормалізуються за допомогою блоків операційних підсилювачів/фільтрів. Всі канали керування мають гальванічну розв'язку з керованим пристроєм (частково твердотільні реле, частково релейну). Збір даних від усього комплексу АЦП і пристроїв цифрового вводу здійснюється в базу даних MySQL, яка працює в середовищі ОС Linux.

Оператор може проглядати дані як в реальному часу, так і з архіву. Аналогічні можливості мають по центральним моментам та іншим визначеним функціям, які можливо побудувати з набору контролюємих параметрів. Є можливість керувати доступними оператору функціональними можливостями установки (наприклад, точність керування потенціалом підкладинки біля 5 В в інтервалі 0 – 2000 В, струмом дуги 1 А в інтервалі 30 – 200 А). Розмежування доступних оператору параметрів здійснено на базі системи керування доступу до ресурсів OS Linux.

Зібрані дані про технологічний процес можуть бути відображені у графічному вигляді. На рис. 3 і рис. 4 наведені типові графічні залежності головних контролюємих параметрів процесу від часу.

На рис. 3, 4 наведені дані в “сирому” вигляді – після нормалізаторів і фільтрів, тобто у відносних одиницях (В). Їх калібровка виконується по показанням штатних приладів установки, а калібровочні коефіцієнти для відповідних величин зберігаються окремо.

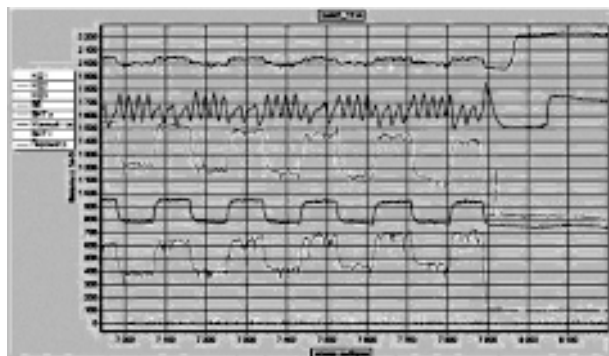


Рис. 3. Фрагмент протоколу тестового випробування системи керування та реєстрації основних технологічних параметрів.

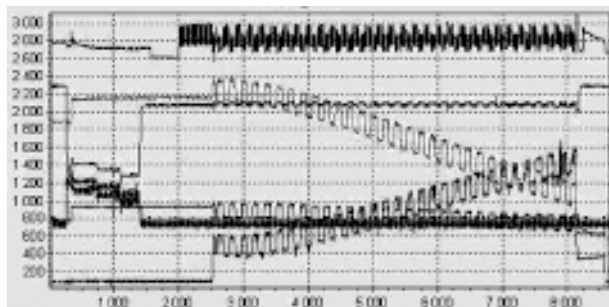


Рис. 4. Протокол автоматизованої системи реєстрації основних технологічних параметрів.

З рис. 3 і рис. 4 видно, що система керування забезпечує автоматичний режим керування джерелами наплення, потенціалом зміщення, системою напуску двох газів з наскрізною синхронізацією у часі і роздільною здатністю менше ніж 0,1 сек. На такому ж рівні, тобто 0,1 сек, і проводилась подальша обробка даних. На рис. 4 також присутні дані з ІЧ пірметра, та дані про іонний струм крізь підкладинку, які в даному разі є вторинними, тобто некерованими, але їх характер та значення відображають хід технологічного процесу.

Використання спеціальної автоматизованої системи реєстрації і керування основними технологічними параметрами процесів нане-

сення покриттів забезпечує ефективний контроль параметрів технологічного процесу на всіх стадіях, дозволяє керувати роботою джерел наплення, напуску та точного дозування реакційних газів, інших систем установки по довільній програмі, яка задається оператором, а також вести протоколювання всіх важливих параметрів роботи установки.

Застосування розробленої системи дозволяє вибрати найбільш оптимальні режими та методи обробки поверхні і нанесення покриттів або їх комбінації для досягнення максимального техніко-економічного ефекту при вирішенні конкретних задач, досягти строгого паспортизованого додержання технологічних режимів та досягти найкращих показників високої якості при нанесенні функціональних покриттів в умовах серійного виробництва.

Дана система доволі універсальна і може бути адаптована до інших промислових технологічних процесів термообробки та нанесення покриттів.

ВИСНОВКИ

1. Для нанесення функціональних багатшарових композиційних покриттів розроблено і створено експериментально-технологічне обладнання – автоматизована система AVINIT, яка дозволяє реалізувати **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.

2. Для реалізації процесів контрольованого формування багатокомпонентних нано- та мікроструктурних покриттів з заданими характеристиками, проведена докорінна перебудова керування роботою усіх систем технологічного обладнання на базі технології наскрізної синхронізації роботи систем обладнання іонно-стимульованого осадження та обладнання діагностики нанорозмірних покриттів за рахунок введення в склад обладнання нових мікропроцесорних системи живлення, синхронізації та управління процесами синтезу і діагностики і розробки комплексу методів контролю технологічних пара-

метрів в процесі нанесення покриттів для цілеспрямованого керування технологічним процесом.

Проведена реконструкція технологічного обладнання на основі комп'ютеризації керування технологічним процесом і розроблені програмні продукти дозволили перейти до мікроконструювання функціональних покриттів та забезпечити отримання нано- і мікрошарових багатокомпонентних покриттів.

Структура шарів забезпечується програмованими узгодженими режимами роботи джерел плазми (як PVD, так і CVD), робочих газів (аргон та реакційноспроможні гази) і високого потенціалу, що прикладається до підкладки.

Програмованим змінюванням амплітуди та скважності імпульсів напруги, що прикладається до підкладки, вище або нижче нульової точки росту (в режимах розпилювання і осадження) при перервному рості не розвиваються крупнозеренні стовбчасті структури, а зароджуються нові центри кристалізації, при цьому реалізуються дуже дрібнозеренні структури навіть при осадженні однокомпонентних металевих покриттів, що забезпечує покращення їх механічних та інших характеристик.

3. В рамках даної роботи виконано ряд апаратних та технологічних розробок (застосування вдосконалених сепаруючих пристроїв, покращення діагностики плазмових та газових потоків, вдосконалення ІЧ вимірювань (в інфрачервоному діапазоні) температурних полів виробів, що покривають, застосування в технологічному ланцюжку мас-спектрометрії газових і плазмових потоків, значно підвищені параметри обладнання для керування технологічним процесом в нанорежимах). При застосуванні традиційного PVD осадження при одночасній роботі однокомпонентних катодів (Me та C) в імпульсному або постійному режимі проведено вдосконалення механічних та електронних систем захисту від мікродуг і модернізація катодних вузлів та системи керування, що дозволило суттєво розширити можливості технологічного обладнання і забезпечити нанесення якісних покриттів на прецизійні поверхні.

Покриття типу "AVINIT" осаджуються на прецизійні поверхні високого класу чистоти до 12 – 13 класу без зниження класу чистоти поверхні. Це досягається можливістю використання в розроблюваних технологіях ефективних технологій очищення поверхні – очищення в тліючому розряді Ar, очищення в двоступеневому вакуум-дуговому розряді (ДВДР) та очищення металевими іонами при напрузі вище нульової точки росту, а також попередженням пошкодження поверхні мікродугами, для чого в установці "AVINIT" передбачена трьохрівнева (механічна, електрична та електронна) система дугогасіння, що забезпечує високу якість очищення поверхні від оксидів і інших забруднень без виникнення електричних пробоїв. Використано і вдосконалено стосовно задачі, що розв'язується прямолінійний сепаратор, який забезпечує формування плазмових потоків, очищених від мікрочастинок катодного матеріалу.

Розроблені методи осадження покриттів при низьких температурах, які не перевищують температур відпуску матеріалу основи, забезпечують збереження механічних характеристик виробів, що покриваються.

4. Ці вдосконалення дозволили вийти на якісно новий рівень подальшого модифікування та вдосконалення конструкцій покриттів типу AVINIT, стабільності технологій і підвищення контролю якості при нанесенні таких покриттів для використання в деталях прецизійних пар тертя в агрегатобудуванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сагалович А., Дудник С., Сагалович В., Кононыхин А., Попов В., Любченко А., Олейник А. Разработка многокомпонентных покрытий для повышения износостойкости поверхностей пар трения в прецизионных узлах //Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5, № 3-4. – С. 155-164.
2. Сагалович А.В., Дудник С.Ф., Сагалович В.В. Автоматизированная система нанесения функциональных нанопокровий //Оборудование и инструмент. – 2005. – Т. 12. – С. 2-3.
3. Дудник С.Ф., Сагалович А.В., Сагалович В.В., Любченко А.П., Олейник А.К. Исследование характеристик трения и износа ионно-плазменных покрытий, полученных на алюминии

- евом сплаве//Физическая инженерия поверхности. – 2004. – Т. 2, № 1-2. – С.110-114.
4. Сагалович А., Сагалович В., Дудник С., Богославцев В., Кононыхин А., Попов В., Любченко А., Олейник А. Отработка процессов нанесения упрочняющих и антифрикционных покрытий и проведение трибологических испытаний образцов с покрытиями. Изготовление опытных образцов деталей//Совместный научно-технический отчет НТЦ “Нанотехнология” и НПК “Корпорация ФЭД” № НАН 12.12.06. – 2006. – 48 с.
 5. Сагалович А., Сагалович В., Дудник С., Богославцев В., Кононыхин А., Попов В., Любченко А., Олейник А. Проведение испытаний на износ бронзы Бр.010С2НЗ, обработанной по ИТ 25.60-2003, с образцом ИГПЗ1.603, имеющим покрытие (Ti-Al-N)//Совместный отчет НТЦ “Нанотехнология” и НПК “Корпорация ФЭД” № НАН 02.25.07. – 2007. – 22 с.
 6. Сагалович А., Сагалович В., Дудник С., Богославцев В., Кононыхин А., Попов В., Любченко А., Олейник А. Отработка процессов нанесения упрочняющих и антифрикционных покрытий и проведение трибологических испытаний образцов с покрытиями//Совместный отчет НТЦ “Нанотехнология” и НПК “Корпорация ФЭД” № НАН 4.2.08. – 2008. –146 с.