

О. Д. ГРИШКЕВИЧ

ВИБІР ОПТИМАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕХНОЛОГІЧНОГО УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ПАР ТЕРТЯ

*Інститут технічної механіки**Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: Gryshkevych.O.D@nas.gov.ua*

Метою даної роботи є відбір та аналіз найбільш значущої науково-технічної інформації, необхідної для вирішення актуальних завдань істотного поліпшення функціональних і експлуатаційних характеристик машин і механізмів. Аналіз існуючих методів і способів зміцнення базується на визнанні принципової залежності фрикційних характеристик робочих поверхонь пар тертя від структурно-фазового стану поверхневого шару конструкційного матеріалу. Декларується твердження про те, що найбільш перспективні методи поверхневого зміцнення базуються на використанні ефектів фізичного впливу на поверхню концентрованими потоками енергетичних частинок. Стверджується, що найбільш перспективними методами модифікації фрикційних властивостей є іонно-плазмові і променеві технології поверхневого зміцнення. В роботі виконано порівняльний аналіз тринадцяти найбільш перспективних способів зміцнення поверхні і встановлена їх відносна ефективність для вирішення різних завдань поліпшення функціональних і експлуатаційних характеристик. Порівняльний аналіз формалізовано шляхом використання метода експертних оцінок. Розглянуто технології нанесення покриттів і технології дифузійної і імплантаційної модифікації структурно-фазового стану фрикційного шару. Розглянуто особливості плазмових технологічних пристроїв, придатних для реалізації різних способів поверхневого зміцнення. Розроблено рекомендації щодо раціонального застосування наявних технологій і технологічного обладнання. Особлива увага приділяється плазмовим технологічним пристроям для комплексного зміцнення. Пропонуються напрями подальшого розвитку поліфункціональних плазмових технологічних пристроїв. Рекомендації щодо вибору оптимальних плазмових пристроїв і реалізації різних плазмових технологій базуються на власному досвіді розроблення і застосування оригінальних плазмових пристроїв різних типів. Результати роботи можуть бути використані при розробці нового або модернізації наявного вакуумно-плазмового технологічного обладнання.

Ключові слова: *поверхнєве зміцнення, нанесення наноструктурних покриттів, модифікація структурно-фазового стану поверхневого шару, комплексні способи зміцнення поверхні, експертне оцінювання якості.*

The goal of this work is to select and analyze the most relevant scientific and technical information necessary to solve current problems of significantly improving the functional and operational characteristics of machines and mechanisms. The analysis of existing strengthening methods is based on the recognition of the fundamental dependence of the friction characteristics of friction pair work surfaces on the structural phase state of the structural material surface layer. It is stated that the most promising surface strengthening methods are based on the use of a physical action on the surface by concentrated flows of energetic particles. It is asserted that the most promising frictional property modification methods are ion-plasma and beam surface strengthening technologies. This paper presents a comparative analysis of the thirteen most promising surface strengthening methods and their efficiency in solving various problems of improvement of functional and operational characteristics. The comparative analysis is formalized by using a method of expert evaluations. Coating technologies and technologies of diffusion and implantation modification of the friction layer structural phase state are considered. The features of plasma process devices suitable for the implementation of various surface strengthening methods are considered. Recommendations on the optimal use of the available technologies and process equipment are given. Emphasis is given to plasma process devices for combined strengthening. Lines of further development of multifunctional plasma process devices are proposed. The recommendations on the choice of optimum plasma devices and the implementation of various plasma technologies are based on the author's experience in the development and application of proprietary plasma devices of different types. The results of this work may be used in the development of new, or in the upgrading of existing, vacuum-plasma process equipment.

Keywords: *surface hardening, nanostructured coating deposition, surface layer structural phase state modification, combined surface strengthening methods, expert evaluation of quality.*

Вступ, постановка задачі. Найбільш доступним резервом економії енергії, матеріалів та інших видів ресурсів в промисловості є підвищення ресурсних характеристик машин і механізмів. Ресурсні характеристики значною мірою визначаються зносостійкістю робочих поверхонь пар тертя. Основною умовою функціональної довговічності пар тертя є здатність конструкційного матеріалу протистояти різним видам зносу. Було встановлено [1], що головним фактором, який визначає опірність

© О. Д. Гришкевич, 2025

конструкційного матеріалу фрикційному зносу, є структурно-фазовий стан його поверхневого шару. Виходячи з цього, у світовій практиці знайшли застосування різноманітні технології локального (поверхневого) зміцнення фрикційних поверхонь деталей машин.

Широке впровадження прогресивних технологій і обладнання для поверхневого зміцнення сприяє отриманню істотних технічного і економічного ефектів, які можуть бути отримані не тільки в результаті поліпшення функціональності і підвищення довговічності деталей, що зношуються, але і завдяки можливості використання більш дешевших конструкційних матеріалів.

Переваги іонно-плазмових і променевих технологій поверхневого зміцнення, що позначаються як PVD (Physical Vapor Deposition), полягають в простоті управління технологічними процесами, в відтворюваності і контролюваності технологічних параметрів і в можливості локальної обробки. Використання для обробки частинок з енергією, яка перевищує енергію міжатомної взаємодії в твердих тілах, забезпечує можливість впливу на структурно-фазові перетворення в умовах, далеких від термодинамічно рівноважних, і, як наслідок, забезпечує можливість отримання поверхневих шарів з поліпшеними фізико-механічними властивостями і унікальною структурою.

Необхідною умовою практичного застосування плазмових технологій поверхневого зміцнення є наявність промислових технологічних комплексів, що включають технології зміцнення і відповідне технологічне устаткування.

В даній роботі вирішувалось завдання визначення відносного технологічного потенціалу поширених в світовій технологічній практиці іонно-плазмових і іонно-променевих способів і технологічного устаткування для поверхневого зміцнення. Отриману інформацію може бути використано при створенні нових спеціалізованих технологічних комплексів поверхневого зміцнення на етапі прийняття рішень по оптимальному вибору способів зміцнення і формуванню оптимального складу технологічного устаткування.

Характеристика задачі оптимального вибору іонно-плазмових способів зміцнення поверхні. Технологічне устаткування для зміцнення поверхонь тертя іонно-плазмовими методами відноситься до категорії структурно складних технічних систем, тому що воно, як правило, складається з великої кількості структурних елементів і відрізняється різноманітністю технологічних операцій.

Основним завданням, що вирішується при створенні нового технічного об'єкта, є забезпечення високого технічного рівня, що визначає його відповідність науково-технічним досягненням в розвитку даного виду техніки і технології. Технічний рівень обладнання – це характеристика сукупності різних властивостей, що обумовлюють його придатність задовольняти певні потреби відповідно до його призначення. Технічний рівень може бути визначений на підставі порівняння показників технічної досконалості об'єкта, що створюється, з аналогічними характеристиками обраного базового зразка, що забезпечує отримання найкращих показників якості [2].

Рішення про вибір оптимального технічного рішення не є тривіальним, тому що за своєю суттю така задача є багатокритеріальною і повинна одночасно враховувати технічні, економічні та інші характеристики об'єкта розробки в порівнянні з прийнятим базовим зразком.

На етапі формування технічного завдання на розробку оцінка технічного рівня системи не може бути вирішена об'єктивними, формалізованими методами. У такій ситуації виникає необхідність використання методу експертних оцінок [3], тобто методу, заснованому на використанні накопиченого досвіду і знань, інтуїції фахівців в області, що досліджується, а також на даних про аналоги.

Результати експертної оцінки системи мають елементи невизначеності і необґрунтованості. Тому експертна оцінка є ненасиченою інформаційно і характеризує оцінюваний об'єкт, що оцінюється в першому наближенні, орієнтовно.

Відбір і характеристики перспективних методів поверхневого зміцнення. На даний час розроблено велику кількість методів і способів поверхневого зміцнення і число їх постійно збільшується [4]. Для вирішення завдань модернізації відомих і розробки нових способів зміцнення необхідний відбір, систематизація та аналіз відомих методів і способів, перспективних для вирішення конкретних технологічних завдань. Методи зміцнення характеризують принципові фізичні ознаки, що визначають основні параметри поверхонь, які зміцнюються. Способи зміцнення характеризують технічні можливості реалізації тих чи інших методів.

Для аналізу було відібрано методи зміцнення, які базуються на зовнішньому фізичному впливі енергетичних потоків заряджених частинок і плазми на поверхню, що зміцнюється. Розглядалися такі методи зміцнення: 1 – зміцнення конденсацією на поверхні тертя функціональних покриттів, які мають необхідні фізико-механічні споживчі властивості; 2 – зміцнення дифузійним, іонним або імплантаційним насиченням поверхні легуючими компонентами з метою модифікації її фізико-механічних споживчих характеристик. Було розглянуто також комбіновані методи зміцнення, що дозволяють використовувати в одному технологічному процесі різні способи зміцнення поверхні модифікацією і нанесенням покриттів.

При відборі враховувалось, що зміцнення нанесенням зносостійких покриттів методом конденсації забезпечує отримання широкого діапазону споживчих властивостей зміцненої поверхні. При цьому нанесенні покриттів неминуче супроводжується появою межі («інтерфейсу») між покриттям і основою деталі. Зв'язок між менш міцною (менш твердою) основою і твердим покриттям в області інтерфейсу зазвичай послаблений, що знижує міцність композиції основа–покриття [5]. При зміцненні поверхні модифікацією структурно-фазового стану поверхні, модифікований шар виявляється міцно пов'язаним з кристалічною ґраткою металевої основи. При послідовному застосуванні обох методів зміцнення (наприклад при дифузійному азотуванні і подальшому нанесенні зносостійкого покриття), реалізується комплексний метод зміцнення. При комплексному зміцненні властивості інтерфейсу поліпшуються через зближення показників міцності модифікованого шару основи і покриття. Комплексне зміцнення дозволяє отримувати зміцнений шар більшої товщини. При цьому поліпшуються адгезійні і втомні характеристики пари тертя, а також стійкість зміцненого шару щодо можливого «продавлювання».

Склад технологічної іонно-плазмової установки для зміцнення становить набір структурних елементів різного призначення. Плазмові процеси зміцнення, за визначенням, реалізуються тільки в розрідженій атмосфері робочого газу або в чистому вакуумі. Тому основою технологічної установки

є робоча вакуумна камера (реактор). Для подачі в реактор робочого газу служить система подачі і регулювання розходу газу. Для виконання допоміжних і основних зміцнюючих операцій технологічного процесу використовуються автономні плазмові технологічні пристрої різних типів. Роботу технологічних пристроїв забезпечують джерела живлення постійного або змінного струму. Якість зміцнення поверхні забезпечує автоматизована система управління параметрами технологічного процесу.

Для практичної реалізації технології зміцнення іонно-плазмовими і променевими методами використовуються різні плазмові способи зміцнення і технологічні плазмові пристрої для створення потоків матеріалу покриття, плазми і організації процесу їх взаємодії з поверхнею, що оброблюється. Сукупність відібраних способів зміцнення і плазмових пристроїв, в залежності від їх спеціалізації, представлена у вигляді структурної схеми, що представлена на рисунку 1. Найменування способів і плазмових пристроїв, які розглянуті в роботі, а також посилання на літературні джерела, що містять більш докладні їх характеристики, надані під рисунком.



Рис. 1 – Іонно-плазмові і іонно-променеві технології і технологічні пристрої для зміцнення робочих поверхонь пар тертя

1. Зміцнення нанесенням покриттів із використанням магнетронної розпилюючої системи (МРС) [6]:

- 1.1 – магнетрон із збалансованою магнітною системою і автономним джерелом енергетичних газових іонів [7];
- 1.2 – магнетрон з незбалансованою магнітною системою [8];
- 1.3 – магнетрон з імпульсно-періодичним розпилюючим розрядом [9, 10] (СІМР або НІРІМС) і з іонним асистуванням конденсації покриття [8].

2. Зміцнення нанесенням покриттів з використанням вакуумно-дугового випарника (ВДВ) [11]:

- 2.1 – зміцнення нанесенням покриттів вакуумно-дуговим пристроєм способом конденсації з іонним бомбардуванням (КІБ) [11];
- 2.2 – вакуумно-дуговий випарник з фільтрацією макрочастинок матеріалу покриття [11, 12, 13];
- 2.3 – ВДВ з високовольтним імпульсним зміщенням потенціалу поверхні, що оброблюється [14].

3. Модифікація поверхневого шару в плазмовому середовищі:

- 3.1 – азотування в тліючому розряді (АТР) [15];
- 3.2 – іммерсійне азотування в безводневій розрідженій плазмі стаціонарного несамотійного тліючого розряду [16];
- 3.3 – плазмово-іммерсійна іонна імплантація (ПІІ) [17].

4. *Іонно-променеві способи обробки поверхні* [18]:

- 4.1 – підготовка поверхні іонним бомбардуванням перед проведенням зміцнюючої обробки [18];
- 4.2 – іонне асистування конденсації покриття постійним струмом газових іонів [8];
- 4.3 – бомбардування поверхні енергетичними іонами з метою ущільнення і модифікації структури покриття [14, 19];
- 4.4 – високоінтенсивна низькоенергетична імплантація іонів [20].

5. *Комбіновані способи зміцнення поверхні* [21]:

- 5.1 – «дуплексна технологія» комплексного зміцнення поверхні [11];
- 5.2 – комбіновані способи зміцнення з випаровуванням [22] і атомно-іонним розпиленням (AIP) [23];
- 5.3 – комбінована обробка із застосуванням різних плазмових пристроїв і способів зміцнення в межах одного безперервного технологічного процесу.

У наведеному переліку представлено тринадцять основних іонно-плазмових і іонно-променевих способів зміцнення, що здійснюються автономними плазмовими пристроями та технологічними системами створення робочого плазмового середовища в вакуумному реакторі.

Розглянуто особливості методів, способів і робочих характеристик виділених технологічних плазмових пристроїв і систем зміцнення, які визначають їх технічний рівень.

Магнетронна технологія нанесення покриттів характеризується способом формування потоку частинок покриття іонним розпиленням. У класичній магнетронній розпилюючій системі планарного або циліндричного типу (ПлМРС або ЦМРС) [6] створюється відповідно вісесиметричний або радіальний потік електронейтральних атомних частинок матеріалу покриття (пари). Розпилення в МРС відбувається в аномальному тліючому розряді в поперечному магнітному полі з індукцією від 20 мТл до 60 мТл при тиску аргону в вакуумній камері від 0,1 Па до 1 Па. Густина розпилюючого іонного струму на катоді МРС в стаціонарному режимі досягає 200 мА/см² і більше.

Основні відмінні ознаки МРС: 1 – відсутність в генерованому потоці макрофракції (МФ) матеріалу покриття – що є позитивною якістю МРС; 2 – електронейтральний стан розпорошених частинок – фактор, що обмежує можливість отримання якісних наноструктурних покриттів в класичній конструкції МРС.

Для додання МРС властивостей, необхідних для формування якісних покриттів, конструкція магнетронної розпилюючої системи і технологічний процес зміцнення удосконалювалися.

По-перше: при осадженні покриття з електронейтрального потоку іонів асистування конденсату забезпечувалося застосуванням автономного іонного джерела енергетичних газових іонів [7] (що відповідає пункту 1.1 переліку на рис. 1). В якості джерела газових іонів використовувалось джерело з несамостійним розрядом торцьового холлівського типу (типу «end Hall»). Особливістю розряду такого типу є необхідність додаткового емітера електронів. Емітером електронів служить розжарена вольфрамова спіраль. Використання емітеру електронів такого типу виправдовувалось простотою і надійністю конструкції іонного джерела.

По-друге: в МРС створювалося незбалансоване магнітне поле [8], що надавало можливість використання розпилюючого магнетронного розряду в якості джерела газових іонів для асистування процесу конденсації покриття (що відповідає пункту 1.2 переліку).

Для підвищення долі заряджених частинок в потоці атомних частинок матеріалу покриття потужність розпилюючого магнетронного розряду істотно підвищувалась. Це призводило до іонізації розпилених частинок в магнетронному розряді. Для запобігання небезпеки переходу стаціонарного магнетронного розряду в дугову моду використовувався потужнострумівий імпульсно-періодичний режим живлення магнетронного розряду (СІМР або НІРІМС) [9, 10] (що відповідає пункту 1.3 переліку). Підвищення імпульсної потужності магнетронного розряду дозволило підвищити вміст іонів в потоці розпиленого матеріалу покриття до рівня більш 50 %.

Таким чином, незбалансована МРС (НБМРС) при роботі в режимі СІМР набувала технологічних можливостей, властивих ВДВ з фільтрованим потоком матеріалу покриття.

В [24, 25] повідомляється, що продуктивність нанесення покриттів в МРС може бути суттєво підвищена шляхом часткового або повного застосування термічного способу генерації потоку матеріалу покриття (випаровування). Такий режим генерації реалізується при суттєвому підвищенні питомої потужності магнетронного розряду до рівня, при якому доля пару матеріалу покриття зростає аж до моменту повного розплавлення поверхневого шару термоізолюваного катоду МРС. Використання такого режиму генерації потоку матеріалу покриття ефективно при нанесенні товстих покриттів легкоплавких металів або при використанні технології АІР ([23] дивись далі).

Технологія нанесення покриття вакуумно-дуговим випарником. Робоче середовище ВДВ – вакуум від 0.01 Па до 1 Па. Напруга дугового розряду в ВДВ дорівнює від 30 В до 40 В, при струмі розряду від 40 А до 200 А і вище. В області емісійної поверхні торцевого катоду ВДВ, за допомогою зовнішньої магнітної котушки, створюється поздовжнє магнітне поле з індукцією близько 4 мТл. Дуговий розряд контрагується на емісійній поверхні інтегрально холодного катода в так званих «катодних плямах». В плямах густина струму дорівнює 10^6 А/см², а температура досягає 5000°C. У цих умовах в катодних плямах відбувається вибуховий випар матеріалу катода. ВДВ генерує потік ерозійної плазми. Величина струму заряджених частинок в потоці плазми становить до 10 % від величини струму дуги ВДВ. Крім іонізованих атомних частинок матеріалу катода в потоці плазми присутні до 90 % макрофракції матеріалу катода (мікрокраплі) розміром від 0,1 мкм до 100 мкм. Типова швидкість конденсації покриття в системі з ВДВ становить від 1 мкм/хв до 3 мкм/хв.

Унікальною властивістю ВДВ є можливість генерації майже повністю іонізованого потоку частинок матеріалу покриття. Генерований ВДВ потік металевої плазми використовується для попереднього очищення, нагрівання і активації поверхні, що оброблюється, а також для асистування процесу конденсації покриття. Енергетичність технологічних операцій в ВДВ контролюється величиною негативного потенціалу зміщення на поверхні обробки. Зміщення негативного потенціалу на поверхні може бути

стаціонарним [8] або імпульсно-періодичним [14] (що відповідає пунктам 2.1 і 2.3 переліку).

Наявність в потоці металевої плазми крапельної макрофракції (МФ) є негативною особливістю класичного ВДВ. Наявність мікрровключень в покритті призводить до підвищеної шорсткості і пористості і унеможлиблює отримання якісних наноструктурних покриттів.

Розроблено велику кількість різних способів придушення мікрофракції в потоці ерозійної плазми ВДВ. Для придушення МФ використовуються додаткові електромагнітні пристрої, так звані «фільтри» МФ [11, 12, 13]. (Що відповідає способу 2.2 переліку). Застосування досить складних систем фільтрації МФ дозволило істотно знизити вміст крапель в покритті, але при цьому значно погіршувалась продуктивність процесу нанесення покриття (що відповідає пункту 2.2 переліку).

В [14] було показано, що при використанні постійного негативного потенціалу зміщення на поверхні від 200 В до 400 В з одночасним накладанням на прикатодне падіння негативних імпульсів напруги з амплітудою від 2 кВ до 10 кВ, тривалістю від 10 мкс до 60 мкс з частотою від 0,5 кГц до 25 кГц спостерігається істотне зниження доли МФ в покритті за рахунок їх випаровування під дією негативних імпульсів струму. При цьому одночасно відбувається також іонне ущільнення покриття і зниження його шорсткості. Цей ефект дозволяє виділити спосіб конденсації з імпульсним зміщенням як самостійний спосіб, що відповідає пункту 2.3 переліку.

Слід також зазначити, що всі способи зміцнення нанесенням покриттів не критичні щодо матеріалу поверхні, що зміцнюється.

Способи модифікації структурно-фазового стану поверхневого шару в плазмовому середовищі. Зміцнення азотуванням в тліючому розряді [15] широко застосовується в промисловості для поліпшення поверхневих властивостей конструкційних сталей. (Відповідає способу 3.1 з переліку).

При АТР дифузійне насичення поверхні металу азотом відбувається в плазмовому реакторі при тиску азоту близько 100 Па. Між виробами, які знаходяться під негативним потенціалом приблизно 500 В відносно стінок реактора, виникає самостійний тліючий розряд. У цих умовах катодне падіння тліючого розряду зосереджене на відстані близько 20 мм від поверхні, що оброблюється. У катодному падінні молекули азоту дисоціюють, іонізуються, прискорюються і бомбардують оброблювану поверхню. В розряді підтримується струм, необхідний для розігріву поверхні до температури, необхідної для термічного стимулювання дифузійного насичення поверхневого шару азотом.

Залежно від матеріалу, що оброблюється, швидкість насичення поверхні азотом дорівнює від 20 мкм/год до 25 мкм/год. Товщина зміцненого шару може досягати 300 мкм. Тривалість технологічного процесу АТР досягає 12 годин і більше. При цьому твердість поверхневого шару сталі може досягати 12 ГПа. Тривалість процесу азотування компенсується величиною разового завантаження реактора деталями і досягає 15000 кг.

Для підвищення продуктивності азотування в тліючому розряді робочий процес було інтенсифіковано шляхом підвищення енергії іонів, що бомбардують поверхню. З цією метою в реакторі створювались умови для збільшення величини катодного падіння тліючого розряду. Це досягалось зниженням робочого тиску в реакторі. При зниженні тиску в реакторі

тліючий розряд втрачає самостійність і потребує створення спеціальних умов для своєї ініціації. Такими умовами є використання джерел електронів з температурою більше (10 – 15) еВ. Такими джерелами може бути автономний генератор щільної плазми [26] або автономне плазмове джерело електронів.

В несамостійному тліючому розряді збільшується енергія іонів, що бомбардують поверхню, яка піддається обробці. Такий процес [16] іменується іонним азотуванням з радіаційно-стимульованою дифузією (що відповідає способу 3.2 переліку).

Подальше форсування температурного чинника дифузійного процесу обмежується температурою фазових переходів в металі, що створює небезпеку втрати його міцності. Альтернативою температурному стимулюванню дифузії є підвищення рівня енергетичного стимулювання процесу дифузії іонів. При подальшому підвищенні енергії іонів превалює більш ефективний імплантаційний механізм насичення поверхні азотом.

Іонна імплантація виконується при бомбардуванні поверхні енергетичними іонами азоту. Бомбардування утворює вакансії в поверхневих шарах металу, що прискорює дифузію азоту. Для створення дефектного шару завтовшки в декілька атомних шарів енергія іонів повинна в 5 – 10 разів перевищувати енергію зв'язку атомів в кристалічній ґратці металу, густина потоку іонів повинна дорівнювати від 10^{18} с/м² до 10^{19} с/м². Для цього необхідна і достатня густина струму іонів від 50 мА/см² до 160 мА/см². Мінімальною умовою імплантаційного насичення поверхні азотом є проникнення атомних частинок на глибину не менше трьох міжатомних відстаней.

Слід зауважити, що фундаментальною властивістю плазми є можливість емітування заряджених частинок. Ця властивість плазми використовується для отримання технологічних потоків заряджених частинок. Негативним зміщенням напруги на підкладці з плазми екстрагуються іони, які виконують різні технологічні функції. При цьому величина густини іонного струму на підкладку обмежується законом Чайльда–Ленгмюра («законом $3/2$ »). Відповідно до цього густина іонного струму визначається як:

$$j = 4\epsilon_0 / 9d^2 \times (2e / m)^{1/2} \times U^{3/2},$$

де d – довжина прикатодного падіння потенціалу; U – прикатодне падіння потенціалу; e/m – питомий заряд електрона.

Спосіб зміцнюючої обробки поверхні при повному зануренні оброблюваної деталі в середовище однорідної розрідженої плазми іменується «іммерсійною обробкою». Такий режим обробки дозволяє виконувати зміцнюючу обробку виробів з дрібномасштабною 3-d конфігурацією оброблюваної поверхні.

Найбільш ефективним різновидом іммерсійного способу обробки є плазмово-іммерсійна іонна імплантація ПІІ (Plasma Immersion Ion Implantation - РІІ) [17].

Фізичний принцип ПІІ полягає в використанні в якості джерела іонів плазмової оболонки, що формується навколо поверхні, яка знаходиться під негативним потенціалом. При прикладенні до поверхні високої негативної напруги, електрони відбиваються від неї за час порядку зворотної величини електронної плазмової частоти – $f = 0,9 \cdot 10^4 \times \sqrt{n}$ [Гц], де: n – густина електронів в плазмі. При цьому іони в плазмі, внаслідок більшої інерційності, залишаються на своїх місцях, формуючи іонну оболонку. З цієї

оболонки іони можуть екстрагуватись на поверхню, що знаходиться під негативним потенціалом. При цьому обмеження Чайльда–Ленгмюра на густину іонного струму не працює. В [18] повідомляється, що для ефективної імплантації іонів при ППІ необхідна імпульсна плазма із густиною від 10^9 см⁻³ до 10^{12} см⁻³. Плазма низької густини формується в ВЧ-розряді або іншими способами. (Спосіб ППІ відповідає способу 3.3 переліку).

Іонно-променеві способи модифікації поверхні [20]. Плазмово-імерсійна технологія доцільна при груповому способі обробки великої кількості відносно дрібних виробів. У технологічній практиці зазвичай виникають завдання локальної обробки обмеженої ділянки поверхні виробу. В цьому випадку альтернативою способу зміцнення із зануренням в плазму стає локальний спосіб іонно-променевого зміцнення поверхні [27].

Променева обробка енергетичними іонами ефективна при виконанні необхідної і загальної для всіх способів поверхневого зміцнення операції попередньої іонної обробки поверхні. Іонне травлення дозволяє ефективно видаляти поверхневі забруднення, що покращує показник адгезії покриття до підкладки. Відомо, що в розряді на розпилення поверхневого шару витрачається менше 5 % енергії. Майже вся енергія іонного пучка витрачається на нагрів підкладки, що і використовується в технологічних цілях (це відповідає пункту 4.1 переліку). У технологічній практиці встановлено, що оптимальна доза іонного опромінення поверхні, яка забезпечує високий рівень адгезії покриття, повинна становити від $1,5 \times 10^{18}$ см⁻² до $2,5 \times 10^{18}$ см⁻².

Існує ряд способів модифікації структури конденсованих покриттів. Однією з таких технологій є бомбардування поверхні покриттів в процесі їх конденсації високоенергетичними іонами. Залежно від енергії іонів відбувається подрібнення зерна, аморфізація структури покриття, утворення нових хімічних сполук, деформаційне зміцнення [18, 20] (що відповідає пункту 4.2 переліку). Такий спосіб модифікації структури поверхневого шару при конденсації покриття називається «іонним асистуванням». Для асистування постійним струмом використовуються іони з енергією від 50 еВ до 100 еВ і вище. Ефективна для асистування густина іонного струму становить 2 мА/см².

З підвищенням енергії іонів відбувається модифікація поверхневих шарів металу поверхні. Це явище обумовлює можливість цілеспрямованого формування нових експлуатаційних характеристик поверхні. З підвищенням енергії іонів і густини струму зростає небезпека перегріву поверхні. У такому разі застосовують імпульсно-періодичний режим зміцнення (що відповідає пункту 4.3 переліку).

Варто відзначити, що принципово не існує чіткої межі між процесами очищення поверхні та її модифікування. Навіть при тих низьких енергіях іонів, що притаманні процесам очищення поверхні перед осадженням покриттів, в приповерхневих шарах поверхні відбуваються процеси, що мають враховуватись при прогнозуванні характеристик системи покриття–основа.

В [20] було показано, що для насичення поверхні азотом досить ефективним є спосіб високоінтенсивної низькоенергетичної імплантації іонів азоту. Визначено, що для досягнення структурних перетворень в оброблюваній поверхні, для перетворення міжкристалічних границь і утворення вторинних фаз на поверхні металу, енергія енергетичних іонів

повинна бути не менше 1 кеВ при дозі іонного опромінення від 10^{20}см^{-2} до 10^{21}см^{-2} . При цьому величина густини потужності потоку іонів повинна перебувати в діапазоні від 3 Вт/см² до 12 Вт/см². Це відповідає умовам іонного бомбардування із густиною струму іонів близько 2 мА/см².

Іонно-променева технологія реалізується з використанням автономного іонно-променевого пристрою для формування пучка енергетичних іонів. Типовим представником іонно-променевого пристрою є прискорювач газових іонів з анодним шаром (ПАШ) [28]. Одноступеневий прискорювач цього типу характеризується простотою конструкції і можливістю формувати вісесиметричні сфокусовані пучки газових іонів з енергією, рівною приблизно половині прикладеної в ПАШ розрядної напруги. В ПАШ можливе одержання пучків іонів з енергією до 10 кеВ. У фокусі іонного пучка густина іонного струму може досягати величини більше 10 мА/см², якої досить для ефективної іонної обробки поверхні.

Способи комбінованої обробки поверхні. Значним технологічним потенціалом володіють комбіновані способи зміцнення поверхні [21]. Принцип комбінованого зміцнення полягає в послідовному використанні в одному технологічному циклі принципово різних методів і способів зміцнення.

Ефектним прикладом комбінованого, або комплексного, зміцнення є розроблений в [11] «дуплексний» спосіб зміцнення поверхні (що відповідає пункту 5.1 переліку). Суть дуплексного способу зміцнення полягає в попередній модифікації поверхні іонним азотуванням з подальшим нанесенням зносостійкого покриття. Обробка виконується за допомогою одного поворотного ВДВ. При цьому використовується ефект стислого вакуумно-дугового розряду (СВДР) [28], який дозволяє підвищити температуру електронів в плазмі і реалізувати режим подвійного вакуумно-дугового розряду [30]. Дуплексний спосіб зміцнення проводиться в вакуумі 0,3 Па, густина струму іонів азоту при азотуванні дорівнює 2 мА/см². Швидкість обробки складає близько 20 мкм/хв. Товщина зміцненого шару близько 100 мкм. Час обробки 3 години.

Очевидно, що продуктивність нанесення покриттів пропорційна величині потоку розпиленого матеріалу покриття на підкладку. З цієї причини найбільш продуктивними способами є способи, які використовують термічне випаровування матеріалу. Це індукційні, електронно-променеві і лазерні способи випаровування [22]. Для поліпшення фізико-механічних властивостей таких покриттів використовується імпульсно-періодичне асистуюче іонне бомбардування конденсату, яке підвищує густину покриття до значення густини об'ємного матеріалу при енергії іонів близько 200 еВ. Цей ефект відомий як «іонне ущільнення».

Для іонізації пари використовується високочастотний, дуговий або аномальний тліючий розряд, а також способи іонізації в аномальному тліючому розряді і в розряді на основі ефекту «порожнинного катода». Способи зміцнення з іонізацією пари матеріалу покриття в плазмовому розряді отримали назву атомно-іонного розпилення – АІР [23] (спосіб відповідає пункту 5.2 переліку).

Слід зауважити, для всіх способів, що аналізувались, існує спільне обмеження на габарити оброблюваних виробів. Обмеження визначається розмірами реактора і продуктивністю вакуумної системи.

Оцінювання технічного рівня плазмових технологічних пристроїв.

Експертному оцінюванню піддавалася відібрана науково-технічна та патентна інформація по темі. Для порівняльних оцінок технічного рівня об'єкта, що створюється, в якості базового зразка (прототипу) вибирався об'єкт, який використовується у виробничій практиці і має відомі експлуатаційні характеристики.

Для отримання експертної оцінки нами використовувався перехід від суб'єктивних оцінок до експертних. Експертні оцінки представлялися безрозмірними бальними оцінками в частках від величини оцінки базового об'єкта порівняння. Оцінки всіх показників призначення прототипів приймалися рівними одиниці.

Оцінювалися такі показники призначення технологічних пристроїв: 1 – технічна складність технологічного пристрою, включаючи систему його електроживлення, газопостачання та управління; 2 – витрати при виконанні технологічної функції об'єкта; 3 – ступінь поліпшення якості продукції в порівнянні з прототипом і потенційний позитивний ефект від збільшення продуктивності обробки.

Інтегральним економічним показником технічного рівня об'єкта приймалася оцінка, виражена відношенням експертної оцінки потенційної вигоди до оцінки величини витрат.

Істинний корисний технічний і економічний ефект може бути визначений тільки експериментальним способом для функціонуючої технологічної системи як відношення отриманого технічного або економічного ефекту до собівартості виробництва.

Для оцінки технічного рівня технологічної установки методом експертного оцінювання використовувались показники призначення основних технологічних операцій зміцнення. Вважаючи на суб'єктивний характер, невизначеність і необґрунтованість експертного методу, замість терміну «технічний рівень» доцільно вживати термін «відносний технологічний потенціал».

Оцінка відносного технологічного потенціалу відібраних плазмових технологічних способів і пристроїв. Витрати на розробку, виготовлення і введення в експлуатацію оцінювались показником, що пропорційний очікуваній технічній складності створюваного технологічного обладнання. Виробничі витрати оцінювались на підставі порівняльного аналізу аналогічних даних для прототипу. Аналогічним чином отримувались дані про споживчі якості продукції і про продуктивність її виробництва.

Експертні оцінки були зведені в таблицю 1. У таблиці способи зміцнення представлені у відповідності до класифікації, що представлена на рис. 1.

Таблиця 1 – Результати експертного оцінювання технічного рівня плазмових і променевих пристроїв для зміцнення поверхні.

Оцінки відносного технологічного потенціалу		Способи нанесення покриттів – МРС			Способи нанесення покриттів – ВДВ		
		1,1	1,2	1,3	2,1	2,2	2,3
Витрати	Розробки	1	1,25	1,25	1	1,5	1,3
	Виробництва	1	1,25	1,25	1	1,5	1,3
Вигоди	Якість	1	3,0	5,0	1	3,0	4,0

	Кількість	1	1,0	1,0	1	0,25	1,0
Підсумкова оцінка		1	1,6	2,4	1	1,1	1,2

Продовження таблиці 1

Оцінки відносного технологічного потенціалу		Іонно-плазмові способи зміцнення			Іонно-променеві способи зміцнення			
		3,1	3,2	3,3	4, 1	4,2	4,3	4,4
Витрати	Розробки	1	1,2	1,0	1	1,0	2,0	3,5
	Виробництва	1	1,2	1,5	1	1,0	1,5	1,0
Вигоди	Якість	1	2,0	4,0	1	1,5	4,0	3,0
	Кількість	1	2,0	3,0	1	1,0	1,0	1,0
Підсумкова оцінка		1	1,7	2,0	1	1,2	1,4	1,5

Висновки. З аналізу відібраних способів і пристроїв для поверхневого зміцнення видно, що існуючі техніко-технологічні рішення відповідають вимогам забезпечення широкого діапазону споживчих характеристик зміцненого шару. Можливо відзначити, що показник рівня енергетичності зміцнюючих процесів на поверхні задовільно характеризує ефективність способів зміцнення і технічний рівень відповідних плазмових технологічних пристроїв. Необхідно також зазначити, що ускладнення технологічного обладнання для проведення процесів комплексного зміцнення цілком виправдовується можливістю отримання підвищених технічних і економічних ефектів. У науково-технічній літературі [21] показано, що об'єднання в одному технологічному циклі найбільш продуктивних і ефективних методів і способів зміцнення призводить до отримання найкращих споживчих властивостей поверхневого зміцнення. Однак на цьому шляху є перешкоди у вигляді поганої сумісності оптимальних умов функціонування для різних типів технологічних пристроїв. Це ставить завдання вдосконалення сумісності плазмових пристроїв і завдання створення ефективних поліфункціональних технологічних плазмових пристроїв, що можуть забезпечувати проведення всього комплексу технологічних операцій зміцнення в єдиному технологічному циклі одним плазмовим пристроєм.

1. Сулима В. А., Шулов В. А., Ягодин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
2. Мишин В. М. Управление качеством. М.: Изд-во ЮНИТИ-ДАНА, 2005. 463 с.
3. Орлов А. И. Организационно-экономическое моделирование. Ч. 2: Экспертные оценки. М.: Изд.-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 486 с.
4. Степанова Т. Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. 64 с.
5. Панин В. Е., Сергеев В. П., Панин А. В. Наноструктурирование поверхностных слоев конструкционных материалов и нанесение наноструктурных покрытий. Томск: Изд-во Томского политех. Универ., 2010. 254 с.
6. Кузьмичев А. И. Магнетронные распылительные системы. Киев, Аверс, 2008. 244 с.
7. Визирь А. В., Окс Е. М., Щанин П. М. Несамостоятельный тлеющий разряд с полым катодом для широкоапертурных ионных источников. ЖТФ. 1997. Т. 67, № 6. С. 611-614. <https://doi.org/10.1134/1.1258586>

8. Сватковский И. В. Направления развития магнетронных распылительных систем. Доклады БГУИР. 2007. № 2(18). С. 112–121.
9. Мозгрин Д. В., Фетисов И. К., Ходаченко Г. В. Экспериментальное исследование сильноточечных форм квазистационарного разряда низкого давления в магнитном поле. Физика плазмы. 1995. Т. 21, № 5. С. 422–433.
10. Кузьмичев А. И. Импульсные магнетронные распылительные системы. Сб. трудов Харьковской научной ассамблеи ISTFE-14. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2014. С. 221–244.
11. Аксенов И. И., Андреев А. А., Белоус В. А. и др. Вакуумная дуга: источники плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование. Киев: Наукова думка, 2012. 727 с.
12. Карпов Д. А., Кузнецов В. С., Литуновский В. Н. Снижение содержания макрофракций в вакуумно-дуговом осаждении покрытий. Препринт НИИЭФА П-0998. СПб.: ФГУП «НИИЭФА Д.В. Ефремова». 2011. 56 с.
13. Андреев А. О., Павленко В. М., Сисоев Ю. О. Технологія машинобудування. Основи отримання вакуумно-дугових покриттів. Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. С. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2018. 288 с.
14. Шулаев В. М., Андреев А. А., Горбань В. Ф. Сопоставление характеристик вакуумно-дуговых наноструктурных покрытий, осаждаемых при подаче на подложку высоковольтных импульсов. Физ. и инж. поверхности. 2007. Т. 5, № 1-2. С. 94–97.
15. Арзамасов Б. Н., Братухин Б. Н., Елисеев Ю. С. и др. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 400 с.
16. Каплун В. Г., Каплун П. В. Ионное азотирование в безводородных средах. Хмельницький: ХНУ, 2015. 318 с.
17. Карпов Д. А., Литуновский В. Н. Плазменно-иммерсионная ионная имплантация (ПИИИ): физические основы, использование в технологиях. СПб.: ФГУП, 2009. 62 с.
18. Кадыржанов К. К. Ион.-луч. и ион.-плаз. модификация материалов. М.: изд. МГУ, 2005. 40 с.
19. Белый А. В. и др. Физические и технологические основы ионно-лучевой обработки материалов. Новополюцк: ПГУ, 2010. 84 с.
20. Белый А. В., Кукареко В. А., Лободаева О. В. и др. Ионно-лучевая обработка металлов, сплавов и керамических материалов. Минск: ФТИ, 1998. 218 с.
21. Бойцов А. Г., Машков Н. В., Смоленцев В. Л. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. М.: Машиностроение, 1991. 144 с.
22. Мовчан Б. А., Малащенко. И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наукова думка, 1983. 232 с.
23. Картазов Г. Н., Поляков Ю. И., Слепцов С. Н. Покрытия, полученные атомно-ионным распылением в условиях электродуговой и высокочастотной ионизации. Харьков: Вопросы атомной науки и техники. 2011. № 2. С. 167–173.
24. Тумаркин А. В., Ходаченко Г. В. Магнетронный разряд с расплавленным катодом. Физика плазмы и плазменные методы. М.: НИЯУ «МИФИ», 2013. С. 276–282.
25. Блейхер Г. А., Кривокозов В. П., Третьяков Р. С. Модель эрозии поверхности жидкофазных мишеней магнетронных распылительных систем. Известия ВУЗов. Физика. 2011. Т. 11, Вып. 2. С. 148–153.
26. Борисов Д. П. и др. Вакуумный технологический комплекс «СПРУТ» для формирования высококачественных упрочняющих поверхностных структур изделий плазменными магнетронно-дуговыми методами. Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 8-ой междунар. конф., 23 – 25 сентября 2009. Минск. С. 299–301.
27. Берлин Е. В., Двинин С. А., Сейдман Л. А. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. Москва: Техносфера, 2007. 176 с.
28. Машиев Ю. П., Виноградов М. И. Вакуумные процессы и оборудование ионно- и электронно-лучевой технологии. М.: Машиностроение, 1989. 56 с.
29. Саблев Л. П., Андреев А. А., Картазов Г. Н. Некоторые характеристики сжатого дугового газового разряда с плазменным катодом. Сб. докл. Харьковской наноассамблеи. Харьков. 2006. С.158–162.
30. Саблев Л. П., Ломино Н. С., Ступак Р. И. Двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд: характеристики и методы создания. Оборудование и технологи термической обработки металлов и сплавов. Сб. докл. VI Международ. конф. Харьков, 2005. Ч. 2. С. 159–169.

Отримано 24.04.2025,
в остаточному варіанті 28.05.2025