

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**СЄЛІВЕРСТОВ ІГОР АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 537.533(075.8)

**ІОННО - ПЛАЗМОВЕ НАНЕСЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ПЛІВОК  
НА КЕРАМІЧНІ ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ  
ДЛЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ**

спеціальність 05.03.06 - зварювання та споріднені процеси і технології

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2010

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана на кафедрі „Відновлення деталей машин” Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Копилов Вячеслав Іванович,**  
Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, професор кафедри "Відновлення деталей машин".

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Малашенко Ігор Сергійович,**  
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, провідний науковий співробітник;

доктор технічних наук, доцент  
**Болотов Геннадій Павлович,**  
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, професор кафедри "Зварювальне виробництво".

Захист відбудеться 15.02. 2010 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.15 НТУУ „КПІ” за адресою: 03056, м. Київ-56, проспект Перемоги, 37, корпус 19, ауд. 435.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці НТУУ „КПІ” за адресою: 03056, Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 11.01.2010 р.

В.о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради Д26.002.15,  
д.т.н., професор

Кузнецов В.Д.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На даний час ефективним засобом для захисту деталей є застосування газотермічних композиційних покриттів з комплексом підвищених фізико-механічних властивостей. Для створення покриттів спеціального призначення (зносо-, жаро- і корозійностійкі) широко застосовують матеріали на основі кераміки. Однак, у багатьох випадках технологія нанесення покриттів з керамічних матеріалів не забезпечує належних властивостей покриттів, які обумовлюються сучасними умовами експлуатації.

Відповідно до останніх тенденцій технології газотермічного напилення істотно змінити і підвищити властивості керамічних покриттів можна шляхом застосування композиційних порошків, отриманих методом плакування і конгломерації, до складу яких входять мікро- і наноструктурні плівки і фази. Створення таких композиційних порошків вимагає розробки нових методів формування покриттів на порошках.

Однією з найбільш перспективною і універсальною технологією в нанесенні металевих плівок на поверхню порошків різного гранулометричного складу є формування покриттів з потоків металевої плазми вакуумної дуги в силу своїх конструктивних і інших можливостей. Однак іонно-плазмове плакування має свої особливості, що суттєво відрізняє його від інших вакуумно-конденсаційних методів. Насамперед, цей метод відрізняється специфічністю взаємодії високоенергетичного струменя металевої плазми з оброблюваною поверхнею, в тому числі, і частинками порошку, що призводить до суттєвих змін процесів формування і утворення структури покриття заданого складу.

Виходячи з цього, подальше розроблення покриттів, а також порошкових композиційних матеріалів визначає необхідність досліджень процесів у самій металевій плазмі, фізичних процесів на атомно-молекулярному рівні на поверхні частинок порошку при їх взаємодії з компонентами цієї плазми і, таким чином, обумовлює визначення раціональних технологічних режимів процесу плакування.

Таким чином, дослідження технологічних процесів іонно-плазмового вакуумно-конденсаційного осадження плівок на порошкові суміші, є актуальним і направлено на створення якісного нового композиційного плакованого порошкового матеріалу з метою одержання газотермічних покриттів з підвищеними фізико-механічними властивостями різноманітного функціонального призначення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота відповідає плану науково-дослідної роботи кафедри відновлення деталей машин зварювального факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» і виконана в рамках тем: 1. НДР №ДП/293–2003 «Розробка високоефективного технологічного

процесу реакційного розпилення для створення жароміцних покриттів» державний реєстраційний номер 0103U007806, у 2003–2006 роках.

2. Госпдоговір «Розробка складу ремонтної композиції та технології її плазмового напилення на поверхню дефектної ділянки склоемалевого покриття», державний реєстраційний номер 0108U006546 у 2008–2009 роках.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертації є вдосконалення процесів іонно-плазмового напилення на основі встановлення параметрів металевого плазмового потоку, що визначають оптимальні технологічні режими і умови формування металевих плівок на керамічних порошкових матеріалах різної дисперсності для підвищення якості композиційних газотермічних покриттів на їх основі.

Для досягнення поставленої мети в роботі поставлені такі **задачі**:

1. З використанням зондової методики, визначити основні параметри металеві плазми вздовж розповсюдження потоку від катоду до робочої поверхні в залежності від технологічних режимів роботи вакуумної установки.
2. Провести теоретичні і експериментальні дослідження по встановленню взаємозв'язку параметрів плазмового потоку з умовами конденсації металевого покриття на оброблюваній поверхні.
3. Розробити модель взаємодії потоків плазми з порошковим матеріалом в процесі осадження іонів металу і формування оболонки для аналізу і прогнозування поведінки частинок порошку різної фракції, в тому числі ультрадисперсних.
4. Провести комп'ютерне моделювання поведінки порошкового матеріалу під впливом плазмового потоку і інтенсивних вібраційних коливань в процесі вакуумної металізації при перемішуванні порошкової суміші. Вдосконалити вібропристрій для перемішування порошків.
5. Дослідити фізико-хімічні процеси на поверхні керамічних частинок в умовах вакуумної металізації, вивчивши контактну температуру, розчинність компонентів покриття, фазовий склад, структуру і властивості покриттів на порошках.
6. Провести фізико-механічні, металографічні дослідження порошкових плакованих керамічних матеріалів і газотермічних покриттів на їх основі.
7. Розробити технологічні рекомендації, щодо металізації іонно-плазмовим методом керамічних порошків різної фракції, для подальшого використання на прикладі напилення газотермічних покриттів.

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес іонно-плазмового напилення металевих покриттів.

**Предмет дослідження** – вплив параметрів технологічного процесу на формування плівок на керамічних порошкових матеріалах для газотермічних покриттів.

**Методи дослідження** – зондові методики вимірів потенціалу плазми, температури електронів і позитивних іонів, концентрації зарядів і функції розподілу електронів по енергіях; металографічний і електронно - мікроскопічний аналіз, методи для виміру адгезійних, фізико-механічних і інших властивостей нанесених поверхневих шарів, згідно з державними стандартами.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Основний науковий результат дисертації полягає у вирішенні актуального науково-практичного завдання - вдосконалення процесів іонно-плазмового напилення металевих плівок на керамічні порошкові матеріали різної дисперсності для підвищення якості композиційних газотермічних покриттів на їх основі. При цьому отримані нові наукові результати:

1. Вперше на основі зондової методики встановлено взаємозв'язок між параметрами плазмового металевого потоку, що генерується з титанового, алюмінієвого, мідного катодів, і струмом вакуумного розряду, та отримані граничні значення сили струму вакуумної дуги при максимальній концентрації іонів: 100–140А для титанового; 90–120А для мідного; 80–100А для алюмінієвого катодів на відстані 180-320 мм до підложки.
2. Встановлено, що на формування покриттів переважний вплив мають величини струму дуги та іонна концентрація сформованого плазмового потоку. Запропоновано вдосконалену розрахунково-експериментальну методику обчислення концентрації нейтральних частинок металу в плазмовому потоці, встановлено її лінійний характер розподілу по дистанції напилення від струму вакуумно-дугового розряду, з мінімальним значенням 2–5% мас. при 60 А і при робочих режимах 3-6%, 8-13%, 12-25% відповідно для титану, міді та алюмінію на відстані 320 мм.
3. Розроблена модель ударної взаємодії іонів металу з частинками порошку, що враховує технологічні і фізичні параметри плазмового потоку, а також властивості матеріалу порошку, і вперше отримано аналітичну залежність дистанції відхилення оброблюваних частинок від концентрації плазмового потоку. Величина відхилення частинок порошку приймається за критерій, що визначає раціональні режими генерації металеві плазми в процесі плакування порошків. На основі теоретичних розрахунків і експериментальними дослідженнями доведено, що при напиленні на ультрадисперсні порошки діаметром менше 1 мкм, при яких відхилення таких частинок порошку буде неможливим або мінімальним, іонна концентрація потоку плазми не повинна перевищувати  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Тільки за цих умов порошок не буде розпорозуватися у вакуумній камері при робочому тиску  $10^{-2}$  –  $10^{-3}$  Па.
4. Вперше за допомогою комп'ютерного і фізичного моделювання встановлені оптимальні умови рівномірного віброперемішування порошку певної маси і фракції у вакуумі під впливом металевого плазмового потоку, які забезпечують швидкість вібротранспортування

порошку на рівні 2–4,5 см/с в стані віброкипіння при частоті вібрації 20–60Гц, амплітуді коливань 0,3–0,5 мм для шару порошку 2-5 мм на площі діаметром 300 мм і куті нахилу віброплатформи 40–45°.

5. З врахуванням швидкості випаровування і конденсації катодного матеріалу, швидкості росту товщини оболонки на частинках порошку, можна констатувати, що високий ступень взаємодії металевої оболонки з керамічним ядром оксидної кераміки є наслідком високих температур при конденсації іонів і атомів металу, це сприяє прискореній розчинності компонентів кераміки в адгезійно-активному металі покриття. Встановлені необхідні швидкості росту товщини оболонки на частинках порошку для отримання металевих конденсатів чистотою не нижче 98% на рівні 0,1; 0,5 і 1 мкм/хв відповідно для титану, міді та алюмінію у вакуумі  $10^{-3}$ Па.

6. Експериментально встановлено, що використання керамічних порошоків з металевими плівками товщиною 0,5–1 мкм для отримання покриттів плазмовим напиленням, дозволяє підвищити їх когезійну міцність і твердість у 1,5 – 2 рази при невеликому вмісті металевої частки 5–10% в порівнянні з застосуванням механічної суміші порошоків аналогічної системи компонентів при вмісті металевої частки 30–50%.

**Практичне значення отриманих результатів.** На основі проведених досліджень було вдосконалено процес іонно-плазмового плакування порошоків, що дозволяє формувати чисті металеві конденсати (до 98%) на порошках оксидної кераміки широкого спектру гранулометричного складу з мінімальними втратами часу.

Розроблено технологічні рекомендації, які дозволяють отримувати плаковані порошки з високим ступенем адгезії металевої оболонки з керамічним ядром, завдяки чому можуть успішно застосовуватись у нанесенні газотермічних покриттів, з комплексом підвищених фізико-механічних властивостей.

**Особистий внесок здобувача.** В дисертаційній роботі внесок автора полягає в проведенні досліджень металевої плазми і формуванні металевих плівок на порошкових матеріалах. Автору належить розробка методики вимірювання вольт-амперних характеристик (ВАХ) плазми дугового розряду. Автор брав активну участь у створенні вібропристрою для переміщення порошоків (патент №41184 «Пристрій для нанесення покриттів на порошок » від 12.05.2009 р.) і розробці технології напилення покриттів.

За особистою участю автора проведені експерименти по виміру швидкостей конденсації і витрат катодного матеріалу, дослідженні впливу параметрів іонно-плазмового плакування на морфологію поверхні, структуру і склад плакованих порошоків. Особисто здобувачеві належить підготовка і проведення експериментів по визначенню міцності зчеплення металевого покриття з поверхнею оксидної кераміки, обробці і аналізі отриманих результатів,

формулюванні висновків. Здобувачу також належать загальні висновки дисертаційної роботи і положення, які виносяться на захист:

- граничні умови максимальної концентрації іонної складової металевого потоку катодних матеріалів з Ti, Al, Cu на основі зондових вимірювань, що дозволило встановити оптимальні режими іонно-плазмового напилення, щодо вибору струму дуги і дистанції від катоду до оброблюваної поверхні;

- модель ударної взаємодії іонів і макрочастинок, яка враховує параметри плазмового потоку, а також властивості матеріалу порошку, що дозволило встановити закономірності відхилення оброблюваних частинок, а також робочі умови конденсації покриття;

- закономірності перемішування шарів порошку в умовах віброкипіння у вакуумі на основі комп'ютерного моделювання, які враховують одночасну дію зовнішньої вібрації і плазмового металевого потоку, певні розміри, форму і масу частинок порошку, а також конструкційні особливості вібропристрою;

- закономірності формування вакуумних покриттів Al, Ti, Cu на керамічній основі в залежності від швидкості випаровування і конденсації катодного матеріалу, а також поверхневих фізико-хімічних процесів;

- технологічні рекомендації для іонно-плазмового напилення, що включають групи факторів, відповідальні за процеси на різних етапах плакування порошкових керамічних матеріалів, на базі яких розроблені газотермічні покриття з підвищеними фізико-механічними і корозійно-захисними властивостями.

**Апробація результатів дисертації.** Робота виконувалась на кафедрі „Відновлення деталей машин” Національного технічного університету України „Київський політехнічний інститут”. Основні наукові положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: X- Міжнародній науково-технічній конференції „Машиностроение и техносфера XXI века, ( Севастополь, 2004 р.); 7-й Международной. научно–технической конференции „Инженерия поверхности и реновация изделий”.(Киев, 2007); Конференції науковців зварювального факультету „Досконалість зварювання – комплексний підхід”.(Київ, 2007); Международной научно-технической конференции „Материаловедение тугоплавких соединений: достижения и проблемы”(Киев, 2008); Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів, аспірантів і молодих науковців „Зварювання та споріднені процеси і технології” (Миколаїв, 2008); Дев'ятій щорічній міжнародній промисловій конференції „Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях” ”(Київ, 2009); V- Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”(Київ, 2009).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи викладено у 15 опублікованих роботах: 6 статей у провідних фахових виданнях, 1 патент України, 8 тез доповідей на науково-

технічних конференціях.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списків використаних джерел. Роботу викладено на 195 сторінках машинописного тексту, вона містить 87 рисунків, 9 таблиць, список використаних джерел налічує 149 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** подано загальну характеристику роботи. Розкрито сутність і стан наукової проблеми та її визначення, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, встановлено наукове і практичне значення одержаних результатів.

**У першому розділі** за результатами аналізу опублікованих у наукових виданнях робіт досліджено сучасний стан проблеми щодо розробки нових композиційних матеріалів з метою підвищення фізико-механічних властивостей газотермічних покриттів.

Проведений аналіз способів і методів отримання покриттів на порошкових матеріалах, виявлені переваги і недоліки кожного з методів.

В результаті аналізу традиційних методів нанесення покриттів, визначено, що іонно-плазмовий метод нанесення покриттів на порошкові матеріали є досить перспективним і менш вивченим, тому у розділі подано аналіз плакування порошків в вакуумі, розкрито сутність процесів випару, переносу і конденсації катодного матеріалу на поверхні об'єктів і виявлено найбільш вагомні недоліки методу та методи їх усунення.

**У другому розділі** наведені матеріали та обладнання для іонно-плазмового та газотермічного напилення плівок і покриттів, а також методики, які були використані при проведенні експериментальних досліджень. Розроблений вібропристрій, захищений патентом України, який необхідний для ефективного перемішування порошкових матеріалів і одержання рівномірних покриттів. Викладено основні методи теоретичних і експериментальних досліджень, зокрема зондовий метод діагностики плазми і методика визначення параметрів плазми, а саме температури і концентрації іонів та електронів ( $T_i$ ,  $T_e$ ,  $n_i$ ) плазми за вольт-амперними характеристиками зонду. Наведена методика виміру тиску металеві плазми, яка генерується вакуумною дугою з алюмінієвого, титанового і мідного катодів. Випробування покриттів на міцність зчеплення з основою здійснювались за клейовою методикою відповідно до вимог діючих стандартів. Для визначення реальної адгезії вакуумних плівок на кераміці і когезійної міцності плазмових покриттів застосовувався метод склерометрії на базі приладу «АИ2.280.005ПС». Дослідження складу, морфології частинок плакованого порошку і плазмових покриттів здійснювалось методом локального мікро - рентгеноспектрального аналізу на растрових електронних мікроскопах Camscan-4DV та ZEISS EVO 50XVP, з застосуванням енергодисперсійного рентгенівського

мікроаналізатора в розширеному діапазоні детектованих елементів з використанням каліброваних зразків, який оснащено системою мікроаналізу «Link 860/500» ( $U = 20$  кВ,  $I = 10^{-1} \dots 10^{-7}$  А). Зображення одержували в режимі вторинних електронів. Для проведення експериментального дослідження зразків з плазмовими покриттями на згин використовувалася установка для згину KOGEL з датчиками установки зі спеціально розробленою електричною схемою, яка побудована на базі АЦП ADC121S021

У третьому розділі наведено результати досліджень плазмового металевго потоку, який генерується катодною плямою вакуумної дуги з Ti, Al і Cu катодів, проведені дослідження впливу режимів іонно-плазмового розпилення на процес конденсації покриттів.

За допомогою ВАХ були побудовані залежності іонного струму зонду від відстані напилювання  $L$  при різних режимних параметрах нанесення покриття: струму дуги і напруги зміщення (рис.1), а також розраховані концентрації іонів Ti, Al і Cu по осі плазмового потоку на відстані від 20 до 320мм (рис.2).

Рис. 1. Залежність іонного струму від дистанції напилювання  $L$  при різних струмах дуги та потенціалах зміщення для катодів з Ti (а) і Al (б)

Отримані данні свідчать про збільшення струму на зонді при підвищенні струму дуги, що веде до збільшення, як позитивних, так і негативних носіїв заряду.

На основі експериментальних кривих, наведених на рис.1, можна зробити висновок про різний характер випаровування титану і алюмінію. Так, при однакових умовах генерації плазми з катоду із алюмінію спостерігається більш інтенсивне зниження іонного струму, що свідчить про зменшення концентрації іонів. При розпиленні титану, спостерігається перерозподіл струмів на зонді при струмі дугового розряду 140А і відстані 300 мм. При розпиленні алюмінію перерозподіл струмів спостерігається вже при струмі дуги 80 А на дистанції 210 мм.

Температури електронів і іонів відповідно до наведеної методики були розраховані згідно електронної температури, результати розрахунків наведено в табл.1

Таблиця 1

Залежність електронної і іонної температури металевго плазми (алюміній, титан, мідь) від струму дуги

Ti					
I, A	60	80	100	140	200
$T_e, eV$	1	1,65	2	2,75	3
$T_i, eV$	0,06	0,083	0,11	0,157	0,16

Al					
$T_e, eV$	2	3	4	6	6,7
$T_i, eV$	0,12	0,173	0,24	0,0325	0,38
Cu					
$T_e, eV$	2,3	2,5	3	3,5	4,2
$T_i, eV$	0,09	0,12	0,15	0,19	0,22

Рис. 2 Залежність концентрації іонів титану ( ) і алюмінію( ) в залежності від дистанції напилення для різних струмів дуги.

— ..... —

На основі побудованих залежностей (рис.1), розрахунків температур і концентрації по осі плазмового потоку (рис.2), зроблені відповідні висновки щодо визначення раціональних режимів випаровування і конденсації катодного матеріалу. Встановлено, що генерацію максимальної кількості іонів і мінімальної кількості нейтральних частинок забезпечують граничні значення сили струму вакуумної дуги : 100–140А для титанового; 90–120А, для мідного; 80–100А для алюмінієвого катодів на відстані 180-320 мм до поверхні виробу при потенціалі зміщення 50 В.

Збільшення струму дуги вище граничного значення, призводить до зменшення іонної концентрації і значного підвищення температур конденсації, які приблизно можуть бути визначені за температурою на поверхні зонду (рис. 3).

Рис. 3 Температура на оброблюваній поверхні в залежності від розрядного струму дуги при різних концентраціях плазми.

На наступному етапі досліджень була проведена серія експериментів по визначенню швидкості конденсації катодного матеріалу з урахуванням основних технологічних параметрів і коефіцієнту використання матеріалу.

Дослідження швидкостей конденсації для вказаних металів повністю підтверджують данні про значення граничних струмів дуги, які були отримані за допомогою зондової методики.

**У четвертому розділі** Розглянута взаємодія плазмових потоків з частинками порошку в залежності від технологічних режимів напилення, проведено моделювання умов перемішування порошків з урахуванням специфічних властивостей об'єктів металізації та

визначені основні механічні властивості вакуумних металевих покриттів(плівок) на кераміці залежно від параметрів технологічного процесу.

При взаємодії (ударі) з потоком заряджених частинок (іонів титану, алюмінію, міді) макрочастинки порошку оксиду алюмінію, на які наноситься оболонка, можуть за рахунок передачі їм кінетичної енергії відхилитися (розсіюватися) від початкового положення на деяку відстань  $l$ .

З технологічної точки зору важливо знайти умови, при яких таке відхилення було би не можливим, або мінімальним.

Виходячи з законів збереження енергії і імпульсу було отримано рівняння для визначення  $l$ :

$$l = \int_{m_0}^{m_j} \frac{2V^2}{F} \frac{m}{m+M} dm. \quad (1)$$

У рівнянні (1)  $m_j$  – повний (максимальний) потік іонів, що падає на макро-частинку і визначається співвідношенням  $m_j = \frac{n_i^{2/3} m_0 \pi d}{4}$ ,

де  $n_i$  – концентрація іонів,  $\text{см}^{-3}$ ;  $m_0$ ,  $M$  – маса одного іона і частинки порошку відповідно;  $v$  – швидкість руху іонів;  $d$  – діаметр частинки.

Для знаходження відстані відхилення  $l$  необхідно знати швидкість іонів і силу  $F$ , з якою вони діють на макрочастинки.

Рис. 4. Залежність швидкості руху іонів від струму дуги

Швидкість іонів у рівнянні (1), що розрахована за даними електронної температури, в залежності від струму дуги для різних катодних матеріалів наведена на рис.4. За результатами розрахунків зі збільшенням струму дуги спостерігається зростання швидкості іонів розпиленних металів.

Значення сили  $F$ , що діє на частинку при плакуванні були розраховані на основі експериментальних даних по визначенню тиску плазмового потоку  $p$  за допомогою розробленого спеціального пристрою.

Отримані експериментальні і розрахункові данні свідчать про залежність основних параметрів плазмового потоку, насамперед, від струму дуги, а саме —  $\Phi(v, m_j, F) = f(I)$ .

Враховуючи цю залежність параметрів потоку, були отримані результати розрахунків за рівнянням (1) величин розльоту (відхилення) макрочастинок певного діаметру  $D$ , на які наноситься оболонка з іонів катодного матеріалу при відповідних параметрах осадження, в залежності від діаметру цих частинок (рис. 5).

Наведені параметри плакування можна вважати оптимальними для порошків, діаметром 40–60 мкм, коли експериментально не помічалось розпорошення порошку. В той же час при випробуванні суміші порошків, які містять ультрадисперсні складові (діаметр  $\leq 1,0$  мкм), встановлено розліт певної маси частинок за межі робочої ємності (віброплатформи), де перемішувався порошок. В цьому випадку розліт частинок становить більше 60 см, тобто перевищував розміри металізаційної камери, і тому виникає необхідність зміни параметрів плазмового потоку і режимів плакування.

Рис. 5. Величини відхилення частинок порошку  $Al_2O_3$  в залежності від розміру фракції макрочастинок (1–100 мкм) і параметрів бомбардування потоком іонів для титану.

Таким чином, відхилення (розліт) частинок порошку, який плакується, може бути прийнято, як критерій для визначення оптимальних режимів генерації металеві плазми, а також процесів формування покриттів для конкретних розроблюваних систем (частинка – оболонка).

Невід'ємним етапом вакуумної металізації є процес перемішування порошкової маси, який пов'язаний з необхідністю нанесення покриття на порошок з великою питомою поверхнею. Тому для забезпечення заданої товщини оболонки на кожній частинці необхідно значно збільшити тривалість металізації і застосувати спеціальні способи перемішування порошків. У зв'язку з цим було проведено попереднє чисельне моделювання поведінки порошкового матеріалу на віброуючих поверхнях. Зазначений аналіз процесів, які відбуваються при вібраційному спонуканні порошку, було проведено за допомогою програмного продукту «Виброслой 1.0». В результаті комп'ютерного моделювання знайдені оптимальні режими перемішування частинок залежно від їхньої маси і щільності, визначено, що на загальний характер руху впливають адгезійні і когезійні характеристики самих порошків, встановлені оптимальні умови рівномірного віброперемішування порошку під впливом металеві плазмового потоку, які забезпечують швидкість вібротранспортування

порошку на рівні 2–4,5 см/с в стані віброкипіння при частоті вібрації 20–60Гц, амплітуді коливань 0,3–0,5 мм для шару порошку 2-5 мм на площі діаметром 400 мм і куті нахилу віброплатформи 40–45°

В ході подальших досліджень були визначені основні властивості вакуумних плівок (покриттів) на оксидній кераміці ( $Al_2O_3$ ). Для цього проведені дослідження міцності зчеплення металевої оболонки з керамічним ядром за двома методиками: методом нормального відриву і склерометричними випробуваннями, у якості зразків використовувалися - пластинки плавленого корунду.

Було встановлено, що найбільша адгезійна міцність плівок забезпечується за рахунок ефективного очищення поверхні порошку у тліючому розряді, а нагрів порошку до високих температур не призводить до повного очищення і значного збільшення міцності зчеплення (рис. 6).

За допомогою склерометричних випробувань (рис. 7) керамічних зразків з покриттям реалізовано порівняльний аналіз вакуумних покриттів з Al, Ti і Cu з використанням коефіцієнта адгезії  $A$ . Було визначено реальну адгезію плівок, товщина яких не перевищувала 10 мкм.

Рис. 6. Вплив попередньої обробки на адгезійну міцність вакуумних металевих покриттів

Рис. 7. Залежності коефіцієнта адгезії  $A$  плівок Al, Ti і Cu від товщини плівки і струму дугового розряду ( $I$ ), залишковий тиск у камері  $10^{-3}$  Па.

Низькі значення коефіцієнта адгезії при малих швидкостях конденсації  $V_k$  пов'язані із впливом залишкових газів на структуру плівок. При більших швидкостях конденсації при струмі дугового розряду  $I > 140$  А відбувається зменшення концентрації іонів в плазмі, в плівку "замуровуються" нейтральні частки реакційного газу і металу, що також сприяє підвищенню концентрації дефектів кристалічних ґрат. Високі значення адгезійної міцності забезпечуються за рахунок багатьох факторів, основним з яких є процес взаємодії металевої оболонки з керамічним ядром. Встановлено, що висока адгезійна міцність є наслідком високих температур при конденсації іонів і атомів металу, і забезпечується за рахунок активної розчинності оксиду алюмінію в оболонці титану та інших металів і активних дифузійних процесів кисню в метал, що сприяє утворенню твердих розчинів. Оцінку взаємодії оксиду алюмінію з титаном, проводили, припускаючи, що ядро оксиду алюмінію розчиняється в оболонці титану, алюмінію і міді. Згідно з розрахунками, величини концентрації кисню та алюмінію в міді при температурі 573 К дуже малі в порівнянні з

розчинністю цих компонентів в титані, в результаті чого визначена роль титану, як адгезійно - активної складової багатошарових плакованих порошків.

Рис. 8. Електронна мікроскопія плакованого порошку  $Al_2O_3$  титаном і алюмінієм (x 1500)

Дослідження хімічного складу і морфології напилених покриттів свідчать про високу щільність і чистоту металевих конденсатів. Морфологію плакованого порошку наведено на рис. 8.

Крім основних параметрів вакуумної металізації при плакуванні порошків процес додатково характеризується ефективною швидкістю росту товщини оболонки на частках  $V_n$ :

$$V_n = \frac{S_{np}}{S_0} \cdot V_k = \frac{S_{np} \cdot \rho_n \cdot R \cdot k_0}{3M_n} \cdot V_k \quad (2)$$

де  $c_m$ ,  $c_n$  – відповідно густина матеріалів ядра частинки і покриття;  $V_k$  – швидкість конденсації;  $S_0 = \frac{3M_n}{R \cdot \rho_n}$  – питома поверхня сферичних частинок радіусом  $R$ ;  $M_n$  – кількість порошку;  $S_{np}$  – площа віброплатформи для порошку;  $k_0$  – коефіцієнт перекриття шару порошку.

За допомогою аналізу впливу залишкової атмосфери на чистоту вакуумного конденсату було визначено, що для одержання металевих покриттів чистотою не нижче 95% необхідно, щоб швидкість формування конденсату на частках була не нижче 0,1мкм/хв., необхідна швидкість росту товщини оболонки може бути забезпечена при певній масі порошку, що завантажується в пристрій і підтримці вакууму на рівні не вище  $10^{-2}$ Па.

Встановлені теоретичні залежності між швидкістю випаровування катодного матеріалу, швидкістю конденсації та швидкістю росту товщини оболонки на частинках порошку з урахуванням конструктивних особливостей металізаційного пристрою і геометричних параметрів порошків. На основі теоретичних розрахунків було визначено максимальну допустиму масу порошку для плакування (рис. 9). Час, необхідний для отримання певної товщини оболонки на частинках описується виразом:

$$\tau = \frac{S_0 \cdot h}{S_{np} \cdot k_0 \cdot V_k} = \frac{3M_n}{S_{np} \cdot k_0 \cdot V_k \cdot R \cdot \rho_n} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{R^3 (\rho_m + \rho_n \cdot y)}{\rho_m}} - R \right) \quad (3)$$

У рівнянні (3) параметр «у» є відносною масою оболонки до маси ядра частинки.

Рис. 9. Теоретичні залежності часу плакування від маси і радіуса частинок порошку.

**П'ятий розділ** присвячений дослідженню властивостей композиційних покриттів, отриманих плазмовим напиленням плакованих іонно-плазмовим методом порошків, наведені результати впровадження розробленої технології.

Напилення плакованих порошків здійснювали на плазмотроні з виносним анодом. За хімічним аналізом покриття (рис. 10) і (табл.2) встановлено, що застосування отриманого плакованого порошку забезпечує повний перенос металевої фази в процесі утворення плазмового покриття.

Рис. 10. Електронне зображення плазмового покриття на основі порошку  $Al_2O_3$  плакованого титаном і алюмінієм Ч 800:  
1 – матриця, 2 – покриття,

1

2

Таблиця 2

Хімічний аналіз покриття на основі порошку  $Al_2O_3$  плакованого титаном і алюмінієм

Спектри	O, % ваг	Al, % ваг	Ti, % ваг	Fe, % ваг	Всього
3–10					
Середнє	41.47	46.63	6.34	5.56	100.00
Макс.	52.09	64.4	7.50	26.38	
Мін.	21.77	36.6	5.08	0.21	

Аналіз випробувань плазмових покриттів на міцність зчеплення доводить про достатньо високі значення  $y_0$  на рівні 35 – 45 МПа, при значеннях металевої частки на рівні 7-12 %. Склерометричні дослідження виявили значне підвищення твердості  $HV$  і когезійної міцності  $HGV$  плазмових покриттів на основі плакованих порошків з подвійною оболонкою (Ti/Al, Ti/Cu) (рис. 11).

На основі проведених досліджень були видані технологічні рекомендації по іонно-плазмовому плакуванню порошків для газотермічних покриттів (табл. 3).

Рис. 11. Вплив товщини вакуумних плівок на твердість плазмових покриттів

Таблиця 3.

## Технологічні рекомендації для іонно-плазмового плакування порошків

Фракція порошку, мкм	Струм дуги, А.			Напруга зміщення, В	Відстань для нанесення, мм	Допустима маса порошку при плакуванні Al, Ti, Cu M <sub>п</sub> , кг	Час плакування, хв
	Al	Ti	Cu				
80 - 100	100 - 110	130 - 200	120 - 150	50 - 100	20 - 500	Al - 1,750 Ti - 0,980 Cu - 0,550	60-80
40 - 60	100 - 110	130 - 200	120 - 150	50 - 100	150 - 500	Al - 0,980 Ti - 0,600 Cu - 0,380	60-80
10 - 20	60 - 90	60 - 100	60-90	50	>200	Al - 0,850 Ti - 0,550 Cu - 0,320	120-180
<10 до ультрадисперсних	60 - 70	60 - 80	60-80	50	>300	0,300	220-260

Рис. 12. Загальний вид леза для відрізу скломаси з покриттям Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti/Al.

Експериментально показано, що газотермічним напиленням з порошкових сумішей на основі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, можна отримати зносостійке і корозійностійке покриття з високою когезійною і адгезійною міцністю. Плакування порошку Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> титаном, алюмінієм та міддю забезпечує підвищення зносостійкості покриття на їх основі у 7-8 разів. Ці ж покриття виявляють високу корозійну стійкість у 10- 30 % розчині

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. У результаті досліджень покриттів на основі плакованих порошків отримано висновок про їх високі механічні властивості, зокрема високу зносостійкість. Тому розроблені покриття рекомендовані для подальшого застосування для захисту деталей. Розроблена технологія була успішно застосована для нанесення покриттів на леза для відрізу крапель скломаси (рис. 12), які працюють в умовах теплових ударів, високих температур до 1100°C і інтенсивного зношування.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. У результаті проведених теоретичних та експериментально-розрахункових досліджень був розроблений зондовий метод діагностики металеві плазми, що генерується вакуумною дугою. Отримані дані дозволили визначити оптимальні технологічні параметри процесу нанесення металевих плівок на порошкові керамічні матеріали, що призначені для газотермічних покриттів.

2. Встановлено, що основні параметри плазми значно залежать від розрядного струму дуги і матеріалу катоду, а саме в діапазоні досліджуваних струмів (60 – 200 А) для алюмінію електронна температура становить  $T_e = 2,0\text{--}6,7$  еВ, іонна температура  $T_i = 0,12\text{--}0,38$  еВ; для міді  $T_e = 2,3\text{--}4,2$  еВ,  $T_i = 0,09\text{--}0,22$  еВ; для титану  $T_e = 1,0\text{--}3,0$  еВ,  $T_i = 0,06\text{--}0,16$  еВ. Збільшення розрядного струму супроводжується зростанням електронної температури за прямолінійним законом.

3. Встановлені граничні струми горіння дуги для кожного з матеріалів, титану, алюмінію і міді: 50–200А, 60–110А, 60–150А, відповідно, на основі дослідження вольт-амперної характеристики зонду і визначено, що найбільший вплив на зазначені параметри має зміна струму горіння дуги.

В результаті розрахунку швидкостей іонів металеві плазми показано, що їх середні величини мають надзвукові значення, при цьому найбільший вплив на формування плівки робить концентрація, а найменший швидкість руху іонів плазмового потоку.

4. Визначено, прямий взаємозв'язок між параметрами плазмового потоку і технологічними режимами вакуумної металізації, запропоновано вдосконалену розрахунково-експериментальну методику обчислення концентрації нейтральних частинок металу в плазмовому потоці, встановлено її лінійний характер розподілення по дистанції наплення від струму вакуумно-дугового розряду, з мінімальним значенням 2–5% мас. при 60 А і при робочих режимах 3–6%, 8–13%, 12–25% відповідно для титану, міді та алюмінію на відстані 320 мм.

5. Розроблена фізична модель взаємодії потоків плазми з частинками порошку, яка дозволяє визначити величину відхилення частинок порошку в залежності від параметрів плазмових потоків, а також дисперсності порошкового матеріалу і таким чином, визначити робочі умови конденсації покриття, при яких відхилення буде неможливим або мінімальним, що є дуже важливим з технологічної точки зору. На основі теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень встановлено, що при напленні на ультрадисперсні порошки діаметром менше 1 мкм, при яких відхилення таких частинок порошку буде неможливим або мінімальним, іонна концентрація потоку плазми не повинна перевищувати  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Тільки за цих умов порошок не буде розпорощуватися у вакуумній камері.

6. Визначено оптимальні умови рівномірного віброперемішування порошку залежно від їхньої маси, густини і параметрів з урахуванням конструктивних особливостей вібропристрою, що забезпечує швидкість вібротранспортування порошку на рівні 2–4,5 см/с в стані віброкипіння при частоті вібрації 20–60Гц, амплітуді коливань 0,3–0,5 мм для шару порошку 2-5 мм.

7. Показано, що величина і якість плакованого шару на порошках має щільний характер, і хімічний склад не відрізняється від складу катодного матеріалу, а плаковані порошки мають комплекс підвищених фізико - механічних властивостей. Високий ступінь адгезії металевому шару до керамічного ядра є наслідком високих температур при конденсації іонів і атомів металу, що сприяє прискореній розчинності компонентів кераміки в адгезійно-активному металі покриття. Визначена роль титану, як адгезійно - активної складової багатошарових плакованих порошків.

8. На основі результатів досліджень вироблені рекомендації щодо плакування порошків іонно-плазмовим методом. Встановлені необхідні швидкості росту товщини оболонки на частинках порошку на рівні 0,1; 0,5 і 1 мкм/хв відповідно для титану, міді та алюмінію у вакуумі  $10^{-3}$ Па. Це дозволяє формувати чисті конденсати (до 98%) з мінімальними втратами часу і матеріалу. Розроблена технологія може успішно застосовується для нанесення плазмових покриттів.

9. Встановлено, що плазмові покриття на основі отриманих композиційних порошків оксиду алюмінію з тонкими плівками титану, алюмінію та міді мають когезійну міцність і твердість у 1,5–2 рази більше в порівнянні з механічними сумішами порошків аналогічного складу при невеликому вмісті металевої частки 5–10%. Використання плакованих порошків оксиду алюмінію з двошаровими плівками Ti/Al та Ti/Cu для плазмового напилення захисних покриттів, забезпечує підвищення їх корозійної стійкості в розчинах сірчаної кислоти на 60%.

10. Показано, що застосування плакованих керамічних порошків з вакуумно-конденсаційними плівками титану та міді при газотермічному напиленні підвищує зносостійкість покриттів в 7–8 разів у порівнянні з неплакованими порошками.

На основі отриманих результатів дані покриття були застосовані для захисту деталей, що працюють в умовах інтенсивного зношування при теплоті до 1100°C.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Смирнов І.В. Фізико – хімічні аспекти іонно- плазмового плакування керамічних порошків / І.В. Смирнов, І. А. Селіверстов, В.І. Копилов // Прогресивные технологи

системы машиностроения Міжнародний збірник наукових праць. ДонНТУ. — 2005. — випуск 29. — С.171 —175.

*Здобувачеві належить аналіз впливу температури, що діє на поверхню частинок порошків.*

2. Копылов В.И. Исследования параметров плазменных потоков вакуумного дугового разряда при плакировании порошков / В.И. Копылов, И.В. Смирнов, И.А. Селиверстов, А.А. Давыдов // Проблемы техники. — 2008. — №1. — С.63-78.

*Здобувачеві належить отримання даних про дослідження плазми, яка генерується вакуумною дугою.*

3. Селиверстов І.А. Вплив параметрів процесу вакуумно-дугової металізації на якість порошкового матеріалу / І. А. Селиверстов //Вестник Херсонського національного технічного університета. — 2008. — №3(32). — С.142 — 148.

*Здобувачем отриманні результати експериментальних досліджень по швидкості росту товщини оболонки на частинках порошку і розроблені теоретичні залежності, що дозволяють розрахувати технологічний цикл плакування.*

4. Смирнов І.В. Застосування композиційних порошків системи  $Al_2O_3$ —Ti—Cu для підвищення корозійної стійкості плазмових покриттів / І.В. Смирнов, А.В. Чорний, І.А. Калашникова, І. А. Селиверстов // Збірник наукових праць національного університету кораблебудування. — 2009. — №1. — С.74 — 81.

*Здобувачеві належить проведення термодинамічної оцінки взаємодії металевих оболонок з оксидним керамічним ядром.*

5. Копылов В.И. Процеси іонно-плазмового плакування порошків для газотермічних покриттів / В.И. Копылов, І.В.Смирнов, І.А.Селиверстов // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. — 2009. — №3(65). — С.11—20.

*Здобувачеві належить розробка моделі взаємодії плазмових потоків з частинками порошку в умовах віброкиплячих шарів.*

6. Селиверстов І.А. Анализ процесса вакуумной металлизации порошковых материалов в виброкипящем слое / И.А.Селиверстов, С.А. Русанов, И.В. Смирнов, В.И.Копылов // Вестник национального технического университета Украины „ Киевский политехнический институт” / Машиностроение. —2009. — № 57. — С 116 — 123.

*Здобувачеві належить розробка математичної моделі поведінки віброкиплячих шарів порошкових матеріалів в умовах вакууму.*

7. Пат. 41184 Україна, МПК (2009) B22F1/00. пристрій для нанесення покриттів на порошок / Копылов В.И., Степанчук А., Смирнов І. В., Селиверстов І. А. Чорний А. В.: заявник і власник Херсонський національний технічний університет. — № 41184; заявл. 05.12.08; опубл. 12.05.09, бюл. № 9.

*Здобувач брав участь у написанні формули патенту та оформленні заявки на винахід*

8. Смірнов І.В. Іонно- плазмове плакування керамічних порошків для газотермічних покриттів / І.В.Смірнов, І. А.Селіверстов, В.І.Копилов //Машиностроение и техносфера XXI века: міжнар. наук.-техн. конф.,6-10 вер. 2004р.: тези доп. - Севастопіль, 2004. – Т.3. – С. 131–135.

*Здобувачеві належить аналіз впливу температури діючу на поверхню часток порошків.*

9. Копылов В.И. Физическая модель контактного взаимодействия частиц гетерогенного потока в условиях газотермического и вакуумного напыления / В.И.Копылов, И.В.Смирнов, И.А. Селиверстов. //Инженерия поверхности и реновация изделий: 7 міжнар. наук.-техн. конф., 10 – 12 жовт. 2007р.: тези доп. – Київ, 2007.– С. 95–98.

*Здобувачеві належить оцінка впливу плазмових потоків на поверхню часток порошків.*

10. Смирнов І. А. Технологічні аспекти іонно-плазмового плакування порошків для газотермічного напилювання / І. А.Смирнов, В.І.Копилов, І.А.Селіверстов. // Досконалість зварювання – комплексний підхід: конф. науковців зварювального факультету, 19 лист. 2007р.:Тези доп. – Київ, 2007. – С.74-75.

*Здобувачеві належить аналіз фізичних факторів які впливають на якість плакованих порошків.*

11. Копылов В.И. Комбинированные способы получения порошковых смесей с нанокристаллическими составляющими для газотермических покрытий В.И.Копылов, И.В.Смирнов, И.А Селиверстов. // Материаловедение тугоплавких соединений: достижения и проблемы: Междунар. науч.–техн. конф., 19 жовт. 2008р.:тезисы докл. – Киев, 2008.– с. 196.

*Здобувачеві належить розробка технології отримання порошків з наноструктурними композиціями для нанесення ефективних газотермічних покриттів.*

12. Селіверстов І.А. Дослідження процесу плакування та властивостей композиційних порошків отриманих вакуумно – дуговим методом / І.А. Селіверстов, І.В. Смірнов, С.Р. Селіверстова // Зварювання та споріднені процеси і технології : всеукраїнська науково-технічна конф., 3—7 вер. 2008р. : тези докл. — Миколаїв, 2008. — С. 96-97.

*Здобувачем проведений аналіз факторів впливу на процес конденсації металевих плівок на частинки порошку з метою визначення максимальних швидкостей конденсації.*

13. Копилов В.І. Властивості газотермічних покриттів із порошків на основі  $Al_2O_3$ , плакованого  $Ti$  та  $Al$  / В.І.Копилов, В.В.Широков, Х.Б. Василів, І.В. Смирнов, Н.Б. Рацька, І.А.Селіверстов. // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях Материалы девятой ежегодной международной Промышленной конференции – Київ, 2009. - С. 47-49.

*Здобувачем проведено дослідження по корозійній стійкості плазмових покриттів.*

14. Копилов В.І. Властивості газотермічних покриттів із порошків на основі ПГ19М / В.І.Копилов, І.В. Смирнов, Х.Б.Василів, І.А Селіверстов, О.В.Широков. // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях Материалы девятой ежегодной международной Промышленной конференции – Київ, 2009. - С. 49-50.

*Здобувачем проведено дослідження по зносостійкості плазмових покриттів.*

15. Селиверстов И.А. Исследование процесса взаимодействия плазменных потоков с порошками при металлизации их в вакууме / И.А. Селиверстов // Зварювання та споріднені технології : V всеукраїнська науково-технічна конф. Молодих учених та спеціалістів, 27—29 травня 2009 р. : тези докл. — Київ, 2009. —С. 110

*Здобувачеві належать розрахунки взаємодії заряджених частинок плазмового потоку з частинками порошку від 100 мкм до ультра дисперсних.*

## АНОТАЦІЯ

**Селіверстов І.А.** Іонно - плазмове нанесення металевих плівок на керамічні порошкові матеріали для газотермічних покриттів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06.- зварювання та споріднені процеси і технології. - Національний технічний Університет України „Київський політехнічний інститут”, Київ, 2010.

Дисертаційна робота присвячена розробці методу високоефективного іонно – плазмового нанесення металевих плівок на керамічні порошкові матеріали різної дисперсності. В роботі вперше був досліджений металевий плазмовий струмінь, який генерується вакуумною дугою з титанового, алюмінієвого і мідного катодів.

За результатами досліджень визначені концентрації іонів та розподілення іонного струму в металевій плазмі титану, алюмінію та міді, що дає можливість здійснювати регулювання процесу конденсації у вакуумі металевих плівок на порошкові матеріали, встановлені граничні значення струму дугового розряду, які забезпечують максимальну швидкість формування рівномірної оболонки на частинках порошку.

Розглянута динаміка руху заряджених часток плазми і їх взаємодія з частками порошку, за допомогою чого розраховано і експериментально досліджено розліт – відхилення частинок порошку в процесі конденсації іонів металу і знайдені умови, при яких таке відхилення буде неможливим, або мінімальним. Розроблені технологічні рекомендації, які дозволяють отримувати плаковані порошки з високою адгезією металевої оболонки з

керамічним ядром, завдяки чому можуть успішно застосовуватись у нанесенні газотермічних покриттів, з комплексом підвищених фізико-механічних властивостей.

*Ключові слова:* вакуумна металізація, концентрація і температура металевого плазмового потоку, іонно-плазмове напилення, металеві плівки, плакований керамічний порошок, газотермічні покриття, адгезія, склерометрія.

## АННОТАЦІЯ

**Селиверстов И.А.** Ионно - плазменное нанесение металлических пленок на керамические порошковые материалы для газотермических покрытий. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06.- сварка и родственные процессы и технологии.- Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт”, Киев, 2010.

Диссертационная работа посвящена разработке метода высокоэффективного ионно-плазменного нанесения металлических пленок на керамические порошковые материалы разной дисперсности с целью дальнейшего использования таких порошков для нанесения газотермических покрытий.

В рамках диссертационной работы созданы методы и разработаны экспериментальные приспособления, которые позволяют получать равномерное вакуумное покрытие на поверхности отдельных керамических частиц.

В работе впервые был исследован металлический плазменный поток, генерируемый вакуумной дугой из титанового, алюминиевого и медного катодов. Проведенными исследованиями определены концентрации ионов и распределение ионного тока в металлической плазме титана алюминия и меди, что дает возможность осуществлять регулирование процесса конденсации в вакууме металлических пленок на порошковые материалы, в частности керамические. При этом установлены предельные значения тока дугового разряда, потенциала смещения, которые обеспечивают максимальную концентрацию ионов и формирование равномерной оболочки на частичках порошка при соответствующем расстоянии от катода. Результатами проведенных исследований доказано, что увеличение тока дуги приводит к уменьшению коэффициента использования катодного материала, уменьшению скоростей конденсации и увеличению температуры конденсации покрытия. Таким образом, ток дуги является важнейшим параметром в управлении технологическим процессом ионно-плазменного напыления материалов для получения качественных покрытий.

Рассмотрена динамика движения заряженных частиц плазмы и их взаимодействие с частицами порошка, с помощью чего рассчитан и экспериментально исследован разлет -

отклонение частичек порошка в процессе конденсации ионов металла при формировании оболочки, и найдены условия, при которых такое отклонение будет невозможным или минимальным, что является важным с технологической точки зрения. Отклонение (разлет) частичек порошка в процессе плакирования, может быть критерием для определения рациональных режимов генерации металлической плазмы при плакировании порошков, который обуславливает в дальнейшем эффективность процессов формирования газотермических покрытий.

По результатам проведенных экспериментально-теоретических исследований была установлена температура конденсации покрытия и рассмотрены основные поверхностные физико-химические процессы.

Приводятся результаты экспериментальных исследований свойств тонких вакуумных металлических пленок на керамике в зависимости от технологических режимов работы установки.

Полученные в результате исследований, данные, имеют практическую ценность для определения оптимальных режимов испарения и конденсации катодного материала для формирования, как оболочек на сферических поверхностях, так и покрытий вообще.

Разработаны технологические рекомендации, которые позволяют получать плакированные порошки с высокой адгезией металлической оболочки с керамическим ядром, благодаря чему могут успешно применяться в нанесении газотермических покрытий.

Установлено, что использование композиционных порошков оксида алюминия с тонкими пленками титана, алюминия и меди приводит к повышению физико-механических свойств и коррозионной стойкости плазменных покрытий по сравнению с применением механических смесей порошков аналогичного состава.

*Ключевые слова:* вакуумная металлизация, концентрация и температура металлического плазменного потока, ионно-плазменное напыление, металлические пленки, плакированный керамический порошок, газотермические покрытия, адгезия, склерометрия.

## ABSTRACT

**Seliverstov I.A.** Ionic - plasma drawing of metal films on ceramic powdered materials for plasma spray coverings. - Manuscript.

The dissertation for the degree of candidate technical sciences in speciality 05.03.06. weldings and allied processes and technics. - National Technical University of Ukraine „Kiev polytechnical institute”, Kiev, 2010.

Dissertational job is devoted working out of a method highly effective is ionic - plasma drawing of metal films on ceramic powdered materials for further use of such powders for drawing plasma spray coverings.

In dissertational job methods are created and experimental adaptations which allow to receive a uniform vacuum covering on a surface of separate ceramic parts are developed.

In job for the first time there was an investigated metal plasma stream which is generated by a vacuum arch from titanic, aluminium and copper cathodes. By the spent explorations concentration of ions and distribution of an ionic current in metal plasma of the titan of aluminium and cuprum are certain. Limiting values of a current of the arc category, potential of displacement which provide the maximum concentration of ions and formation of a uniform cover on powder parts are fixed. It is proved, that the increase in a current of an arch leads to reduction of operating ratio of a cathodic material, reduction of speeds of condensation and increase in a condensation point of a covering.

Dynamics of movement of the loaded particles of plasma and their interaction with powder particles is considered. Scattering - a deviation of parts of a powder in the course of condensation of ions of metal is calculated at cover formation, conditions at which such deviation will be not possible, or minimum are found.

Technological recommendations which allow to receive the plated powders with high adhesion of a metal cover with a ceramic kernel are developed, therefore can be applied successfully at drawing plasma spray coverings with a complex of the raised physicochemical properties.

*Keywords:* vacuum metallization, concentration and temperature of a metal plasma stream, ionic-plasma dusting, metal films, plated ceramic powder, thermal spraying coatings, adhesion, scratch hardness test.