

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФУРМАН В'ЯЧЕСЛАВ КОСТЯНТИНОВИЧ

УДК 621.791.927.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАЗМОВИХ
ПОКРИТТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НАНОДИСПЕРСНИХ ПОРОШКІВ**

Спеціальність 05.03.06 – зварювання та споріднені процеси і технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертація є рукописом

Роботу виконано на кафедрі інженерії поверхні Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Смирнов Ігор Володимирович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри «Інженерії поверхні»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Петров Станіслав Володимирович
Інститут газу НАН України, провідний науковий співробітник

кандидат технічних наук

Яровицин Олександр Валентинович
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, старший науковий співробітник

Захист відбудеться «26» червня 2018 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 КПІ ім. Ігоря Сікорського, за адресою: м. Київ-56, проспект Перемоги, 37, корп. 19, ауд.435.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка КПІ ім. Ігоря Сікорського, 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37

Автореферат розіслано «26» травня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради Д26.002.15



Р.М. Рижов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з найбільш прогресивних і ефективних напрямів створення деталей з заданими властивостями на їх робочих поверхнях, є нанесення газотермічних, зокрема, плазмових захисних покриттів. Проте, використання більшості відомих матеріалів і технологій, вичерпали можливість поліпшення механічних властивостей даних покриттів. Саме тому, останнім часом, активно розвиваються дослідження в галузі створення газотермічних покриттів, до складу яких входять нерівноважні, дисперсні та нанорозмірні компоненти, які значно підвищують захисні властивості поверхонь. Особливе місце серед них займають покриття з кераміки та самофлюсівні плазмові покриття системи Ni-Cr-B-Si, модифіковані нанодисперсними сполуками оксидів (алюмінію, титану та кремнію).

Використання у якості модифікаторів нанодисперсних порошків, дозволяє отримувати покриття з поліпшеними експлуатаційними властивостями, роблячи можливим виробництво деталей з доступних матеріалів, без значного використання високовартісних компонентів. При цьому, навіть незначне підвищення експлуатаційних характеристик таких деталей дає вагомий економічний ефект, що відкриває широкий діапазон застосування модифікованих плазмових покриттів в області створення нових технологій інженерії поверхонь. Суттєвий внесок у даному напрямку досліджень газотермічних покриттів, зробили такі вітчизняні вчені, як Борисов Ю.С., Петров С.В., Смирнов І.В., Ільющенко А.Ф., Копилов В.І., Харламов Ю.О. та цілий ряд закордонних дослідників.

Таким чином, дослідження в області створення плазмових покриттів з використанням нанодисперсних порошків оксидів із встановленням закономірностей впливу модифікуючих компонентів на формування та властивості отриманих покриттів є актуальною науково-технічною задачею, що потребує детального наукового вивчення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі інженерії поверхні КПІ ім. Ігоря Сікорського відповідно до планів фундаментальних та прикладних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України: «Підвищення експлуатаційних властивостей поверхонь деталей і конструкцій нанесенням модифікованих наноутвореннями покриттів» (№ДР 0114U003428, 2014–2015 рр.); «Розроблення технології відновлення та підвищення зносостійкості деталей гусеничної техніки на основі використання порошкових матеріалів» (№ДР 0115U001973, 2015–2016 рр.).

Мета роботи і задачі дослідження. Підвищення експлуатаційних властивостей плазмових покриттів на основі самофлюсівних сплавів та кераміки шляхом застосування нанодисперсних порошків Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 та оптимізації режимів напилення для подовження терміну експлуатації елементів конструкцій, що працюють в умовах інтенсивного зношування та корозійного впливу.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні наукові завдання:

- встановити оптимальні параметри й умови механохімічної обробки для модифікації вихідних порошків нанодисперсними Al_2O_3 , TiO_2 та SiO_2 для газотермічних покриттів з підвищеними експлуатаційними властивостями;
- встановити раціональні технологічні режими плазмового напилення модифікованих порошків на основі дослідження стабільності горіння дуги, визначення вольт-амперних характеристик (ВАХ), коефіцієнту використання

матеріалу (КВМ) та отримання рівняння регресії, що встановлює взаємозв'язок між режимними параметрами плазмотрону та міцністю зчеплення покриттів;

- дослідити вплив нанодисперсного порошку Al_2O_3 на формування та експлуатаційні властивості плазмових покриттів на основі самофлюсівного сплаву системи Ni-Cr-B-Si;
- встановити закономірності формування та дослідити фізико-механічні властивості плазмових покриттів на основі кераміки оксиду алюмінію з введенням до їх складу нанодисперсних порошоків TiO_2 та SiO_2 ;
- розробити технологічні рекомендації стосовно складу та режимних параметрів плазмового напилення модифікованих порошоків для їх практичного застосування.

Об'єкт дослідження – процес плазмового напилення покриттів із застосуванням нанодисперсних порошоків.

Предмет дослідження – закономірності впливу нанодисперсних порошоків оксидів на експлуатаційні (зносо-, корозійна стійкість та стійкість покриття до термоциклювання) та механічні (міцність зчеплення, мікротвердість, пористість) властивості плазмових покриттів.

Методи досліджень. Для виконання поставлених задач і отримання основних результатів дисертаційної роботи використовували теоретичні та експериментальні дослідження. Напилення покриттів проводили на установці УПНС-304. Випробування на зносостійкість проводились в умовах сухого тертя металу по металу за схемою зразок-контртіло на машині СМЦ-2 з вимірюванням втрат маси зразків під час досліджень. Міцність зчеплення покриттів з основою визначали за методикою у відповідності зі стандартом ASTM C 633. Оцінку корозійної стійкості отриманих покриттів здійснювали за допомогою методу поляризаційного опору на приладі Р5126. Термостійкість визначали шляхом нагріву зразків з покриттями на протязі 3 хв в муфельній печі при температурі $850 \pm 20^\circ C$, та різкого охолодження у воді. Для досліджень мікротвердості використовували мікротвердомір ПМТ-3. Визначення пористості покриттів проводили оптичним методом за стандартом ASTM B-276 з обробкою зображень у програмі Atlas. Дифрактометричний аналіз проводили на рентгенівському дифрактометрі Rigaku Ultima IV. Мікроструктуру та хімічний склад плазмових покриттів визначали за допомогою скануючого електронного мікроскопа з енергодисперсійним мікроаналізатором РЕМ 106.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблені технологічні основи плазмового напилення функціональних покриттів із застосуванням нанодисперсних порошоків Al_2O_3 , TiO_2 та SiO_2 , які полягають у модифікації вихідних самофлюсівних та керамічних порошоків нанодисперсними частинками шляхом механохімічної обробки у планетарному кульовому млині за частотою обертів 120–125 об/хв в середовищі вакууму $2,5-5 \cdot 10^{-1}$ Па впродовж 6–8 хв, яка дозволяє отримувати гомогенний модифікований порошок без помітного подрібнення з рівномірно розподіленими по об'єму нанодисперсними частинками та плазмовому напиленні модифікованих порошоків плазмотроном потужністю до 6 кВт в режимі генерації ламінарного плазмового струменя з додатковим оснащенням соленоїдом з індукцією 12–16 мГТ.

2. На основі дослідження стабільності горіння дуги, визначення ВАХ, КВМ та аналізу, що встановлює взаємозв'язок між робочими параметрами плазмотрону та

міцністю зчеплення покриттів, встановлені оптимальні режими напилювання модифікованих порошків, які дозволяють переносити нанодисперсні частинки в покриття для створення поверхонь з підвищеними експлуатаційними властивостями: струм дуги 85–95 А, напруга на дузі 30–40 В, струм соленоїда 4–5 А, положення соленоїда відносно сопла 6–8 мм, витрати плазмоутворювального газу 0,18–0,2 м³/год, витрати порошку 2 кг/год, дистанція напилення 100–150 мм.

3. Встановлені закономірності формування та фізико-механічні характеристики плазмових покриттів на основі кераміки оксиду алюмінію з введенням до їх складу 1–1,5 об.% нанодисперсних порошків TiO₂ та SiO₂, які завдяки наявності на поверхні розвинених, вільних зв'язків, що активуються при високих температурах в умовах плазмового напилення та хімічної взаємодії між компонентами, сприяють підвищенню однорідності покриття, кращому проплавленню керамічного ядра, зменшенню сітки мікротріщин та пористості до 3–6%, що забезпечує підвищення мікротвердості на 38–44%, міцності зчеплення напилених покриттів на 16–25%, корозійної стійкості у середовищі 10% HCl у 2,8 та у 6 разів, під час застосування нанодисперсних порошків TiO₂ та SiO₂, відповідно.

4. Експериментально встановлено, що незначні об'ємні частки нанодисперсних оксидів (до 1,5 об.%), завдяки високій дисперсності (5 – 41 нм) збільшують внесену поверхневу енергію з реалізацією механізмів модифікування 1-го та 2-го роду, та дисперсійного зміцнення, забезпечуючи комплексне підвищення експлуатаційних властивостей та їх збереження навіть після оплавлення самофлюсівних плазмових покриттів. Так, на основі отриманих даних зносостійкості та мікротвердості, встановлений раціональний вміст нанодисперсного Al₂O₃ у вихідному самофлюсівному порошку системи Ni-Cr-B-Si на рівні 0,2–1,0 об.%, при цьому зносостійкість покриттів зростає у 2,8–5,7 рази; мікротвердість підвищується на 18–34%; термостійкість досягає 50 циклів без помітних відшарувань та зміни хімічного складу.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблено композиційний металокерамічний порошок для газотермічних покриттів на основі самофлюсівного сплаву системи Ni-Cr-B-Si марки ПС-12НВК-01 (Патент України на корисну модель №99762), який складається з частинок металевої матриці до складу якої, шляхом механохімічної обробки в кульовому планетарному млині, вводили добавку нанодисперсного (30–50 нм) тугоплавкого Al₂O₃ чи TiO₂ у кількості 0,5–1,5 об.%.

Розроблено пристрій для плазмово-дугового напилення покриттів з магнітним керуванням у вигляді соленоїда, що зафіксований відносно соплової частини плазмотрона і використовується для напилення модифікованих керамічних порошків (Патент України на корисну модель №104371).

Розроблено технологічні рекомендації для плазмового напилення модифікованих порошків, які забезпечують підвищення зносостійкості, корозійної та термостійкості, адгезійної міцності поверхневих шарів, що працюють в умовах інтенсивного зношування та корозійного впливу.

Розроблені технологічні рекомендації плазмового напилення модифікованих самофлюсівних порошків системи Ni-Cr-B-Si для відновлення лопатей змішувача фірми Lodige та робочих поверхонь коліс дробарок, які були рекомендовані до впровадження на «Київському заводу суднобудування та судноремонту».

Особистий вклад здобувача полягав у встановленні оптимальних параметрів й умов механохімічної обробки вихідних порошків для модифікації нанодисперсними оксидами, вдосконаленні конструкції плазмотрону для напилення модифікованих порошків, встановленні раціональних технологічних режимів плазмового напилення, дослідженні формування та фізико-механічних властивостей (зносостійкість, корозійна стійкість, міцність зчеплення, термоциклічна стійкість, пористість та мікротвердість) плазмових покриттів, аналізі отриманих результатів та їх обговоренні для формулювання висновків дисертації. Під час підготовки публікацій внесок автора був істотним.

Апробація результатів досліджень. Основні наукові положення дисертації доповідалися на: VIII Міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології» (м. Київ, 2015 р.); V – VII міжнародних науково-практичних конференціях «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2015 – 2017 рр.); II – IV всеукраїнських науково-технічних конференціях студентів, аспірантів та наукових співробітників «Інженерія поверхні. Комплексний підхід» (м. Київ, 2015 – 2017 рр.); I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу» (м. Херсон, 2015 р.); V всеукраїнській науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» (м. Львів, 2016 р.); V международной Самсоновской конференции «Материаловедение тугоплавких соединений и композитов» (г. Киев, 2016 г.); Восьмій конференції молодих вчених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування» (м. Київ, 2016 р.); V Международной научной конференции «Наноструктурные материалы – 2016: Беларусь – Россия – Украина: НАНО-2016» (г. Минск, 2016 г.); Міжнародній науковій конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу» (м. Херсон, 2017 р.); 7th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2017) (Odesa region, Zatoka, 2017 р.).

Публікації. Результати дисертації представлені у 30 опублікованих роботах: 6 статтях у наукових фахових виданнях, 1 з яких у іноземному виданні, 2 патентах України, 22 тез доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 4-х розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний об'єм роботи – 165 сторінок машинописного тексту, зокрема 73 рисунки, 32 таблиць, список використаних джерел із 208 найменувань і 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, наведені мета роботи і задачі досліджень, описано об'єкт, предмет і методи досліджень, сформульована наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі за результатами аналізу опублікованих у наукових виданнях робіт вітчизняних та закордонних вчених, обрано напрямок, сформульовано мету і завдання наукової роботи, досліджено сучасний стан проблеми розробки нових газотермічних покриттів на основі наноструктурованих порошків з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Проведений літературний огляд показав широкий спектр застосування у якості модифікаторів нанодисперсних порошків оксидів. Проте деякі системи покриттів та їх властивості при плазмовому напиленні недостатньо вивчені або взагалі відсутні результати дослідів за даним напрямком. Це стосується корозійних властивостей керамічних покриттів з оксиду алюмінію модифікованого нанодисперсними TiO_2 чи SiO_2 та основних закономірностей впливу нанодисперсного порошку Al_2O_3 на фізико-механічні показники самофлюсівних покриттів системи Ni-Cr-B-Si під час плазмового напилення.

У другому розділі побудована загальна структура роботи, наведені матеріали, обладнання та способи отримання модифікованих порошків, досліджено їх морфологію, хімічний склад, проведено дифрактометричний аналіз, описано обладнання, що використовували під час експериментів. Наведені методики випробувань корозійної стійкості та міцності зчеплення керамічних покриттів, зносостійкості та стійкості до термічних навантажень самофлюсівних плазмових покриттів, обладнання для металографічного аналізу.

З метою виявлення комплексних закономірностей впливу наноконпонентів на формування та експлуатаційні властивості, напилення покриттів проводили, використовуючи абсолютно різні за призначенням основні матеріали, а саме, керамічний порошок оксиду алюмінію, що дозволяє отримувати корозійностійкі покриття та самофлюсівний порошок системи Ni-Cr-B-Si (ПГ-10Н-01) для створення або відновлення зносостійких поверхонь. Як модифікатори застосовували нанодисперсні порошки Al_2O_3 (фракцією 21–41 нм, отриманого за кріохімічною технологією), TiO_2 виробництва американської фірми Nanostructured & Amorphous Materials (фракцією 5–40 нм) та як аналог до нього, більш доступний SiO_2 виробництва Калуського дослідно-експериментального заводу інституту хімії поверхні Національної академії наук України (фракцією 5–40 нм).

Для приготування гомогенного порошку системи Ni-Cr-B-Si модифікованого нанодисперсним Al_2O_3 та керамічного порошку оксиду алюмінію модифікованого нанодисперсними TiO_2 , SiO_2 після зважування навіски їх піддавали механохімічній обробці у планетарному відцентровому млині марки XQM-2, в ємностях з додатковим вакуумуванням. Для підвищення подрібнюючої ефективності в ємність завантажували кулі різного розміру, кількість яких повинна становити 50 % від об'єму суміші: кулі \varnothing 12 мм – 40 шт., кулі \varnothing 10 мм – 50 шт., кулі \varnothing 8 мм – 60 шт. Експериментально встановлено, що за частотою обертання ємностей 120–125 об/хв в середовищі вакууму $2,5\text{--}5\cdot 10^{-1}$ Па впродовж 6–8 хв, відбувається формування модифікованого порошку з необхідним гранулометричним складом.

Вплив ударної взаємодії в середовищі вакууму на частинки порошків неоднозначний, але в кожному конкретному випадку супроводжується ефектами, що виявляють позитивний вплив на формування напиленого покриття. У процесі ударної взаємодії відбувається відновлення оксидів і утворення ювенільних поверхонь частинок. Поверхневі шари таких частинок переходять у більш високий енергетичний стан за рахунок мікропластичної деформації, змінюється їх дислокаційна структура й напружений стан. Внаслідок цього активуються процеси взаємодії компонентів суміші один з одним, у локальних мікронах на поверхні частинок можливе протікання дифузійних процесів та утворення нових хімічних сполук.

Результати досліджень морфології (рис. 1) та хімічного аналізу (табл. 1) модифікованих порошків показали, що добавки нанодисперсних Al_2O_3 , TiO_2 та SiO_2 в умовах вакууму та механохімічної обробки переходять в активований стан і приєднуються, завдяки своїй високій поверхневої енергії до частинок інших елементів, утворюючи фізичні зв'язки між компонентами, що дозволяє під час подальшого плазмового напилення переносити їх в покриття.

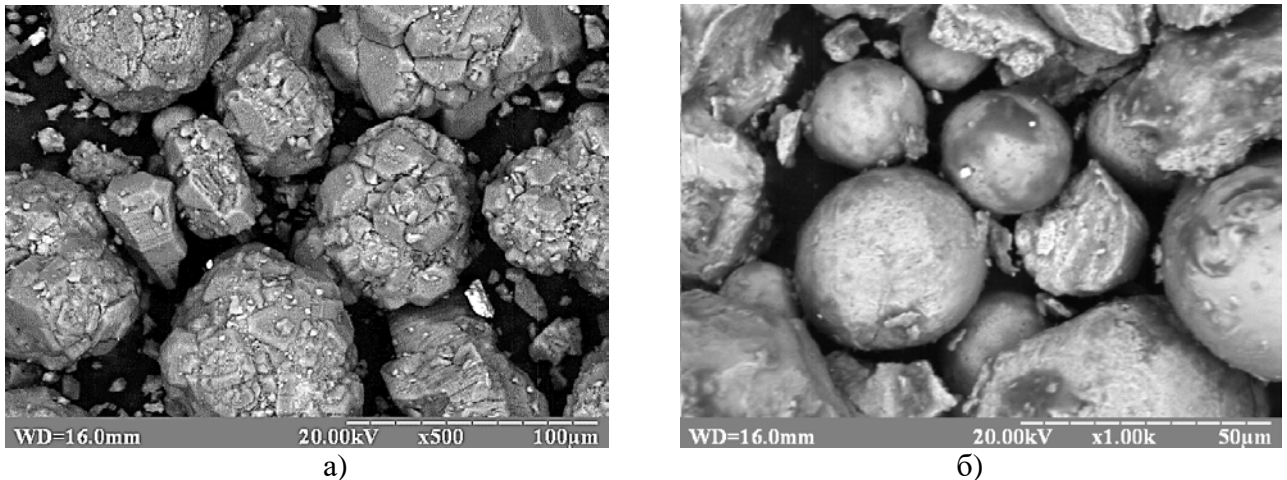


Рис. 1. Морфологія модифікованих порошків $\text{Al}_2\text{O}_3+1,5\% \text{TiO}_2$ (а) та $\text{Ni-Cr-B-Si}+5\% \text{Al}_2\text{O}_3$ (б)

Таблиця 1

Загальний хімічний аналіз модифікованих порошків

Порошок	$\text{Al}_2\text{O}_3+1,5\% \text{TiO}_2$		$\text{Ni-Cr-B-Si (ПГ-10Н-01)}+5\% \text{Al}_2\text{O}_3$				
Елементи	Al	Ti	Ni	Cr	Fe	Al	Si
Кількість, об.%	98,18	1,82	64,55	19,25	18,64	5,88	1,69

Додатковим доказом присутності введених нанодисперсних елементів у складі модифікованого порошку є дифрактограми вихідних порошків (рис. 2). На них спостерігається наявність піків введених нанодисперсних елементів, а саме з'єднань титану, кремнію та алюмінію.

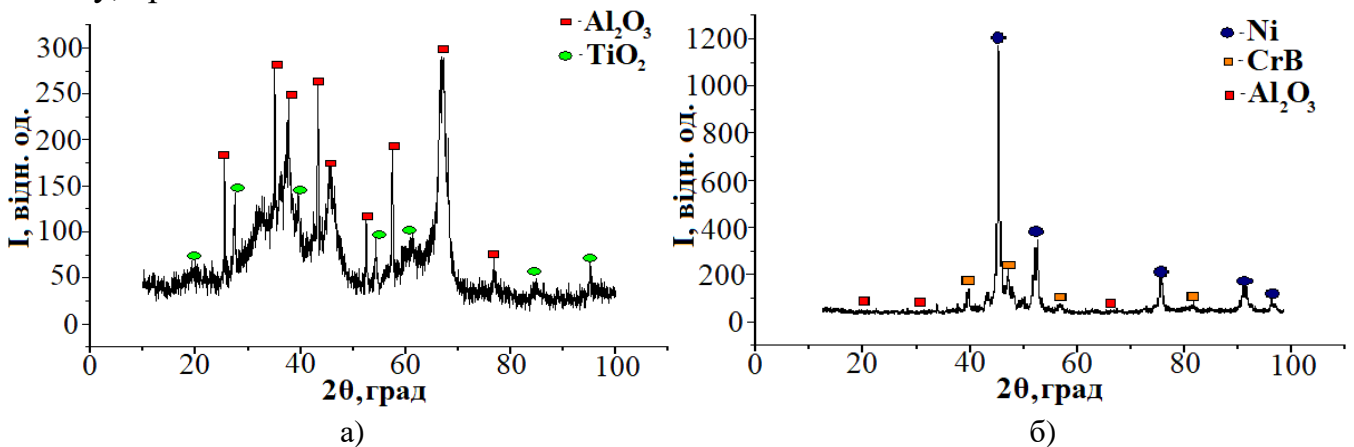


Рис. 2. Дифрактометричний аналіз порошку оксиду алюмінію модифікованого нанодисперсним TiO_2 (а) та порошку системи Ni-Cr-B-Si модифікованого нанодисперсним Al_2O_3 (б)

Напилення модифікованих порошків здійснювали спеціальним плазмотроном в режимі генерації ламінарного плазмового струменя, додатково оснащеним соленоїдом. Характерною ознакою плазмотрону є частково винесена дуга з додатковим обдуванням плазмового струменя концентричним потоком захисного

газу. Завдяки таким конструктивним особливостям, які виключають значні градієнти швидкостей і температур в поперечному перерізі двофазного плазмового потоку та інтенсивне перемішування плазмового струменя з навколишньою атмосферою, характер течії плазмового струменя був близький до ламінарного, що забезпечує сприятливі умови для збереження та перенесення в покриття нанодисперсних частинок (патент України №104371).

Дослідження міцності зчеплення керамічних покриттів з основою проводили за методикою у відповідності зі стандартом ASTM C 633, а оцінку корозійної стійкості здійснювали за допомогою методу поляризаційного опору на приладі P5126. Випробовування на зносостійкість плазмових покриттів на основі самофлюсівного порошку системи Ni-Cr-B-Si (ПГ-10Н-01) модифікованого нанодисперсним Al_2O_3 в умовах сухого тертя металу по метал, проводили за схемою зразок-контртіло (загартована сталь У8) на машині СМЦ-2. Для досліджень мікротвердості використовували мікротвердомір ПМТ-3. Визначення пористості покриттів проводили оптичним методом за стандартом ASTM B-276. Дифрактометричний аналіз проводили за допомогою рентгенівського дифрактометра Rigaku Ultima IV. Мікроструктуру та хімічний склад плазмових покриттів визначали за допомогою скануючого електронного мікроскопа з енергодисперсійним мікроаналізатором РЕМ 106.

У третьому розділі були встановлені раціональні режимні параметри плазмового напилення, шляхом дослідження стабільності горіння дуги, визначення вольт-амперних характеристик (ВАХ), коефіцієнту використання матеріалу (КВМ) та отримання рівняння регресії. Наведені результати досліджень впливу нанодисперсних порошків Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 на формування плазмових покриттів, проведений аналіз мікроструктури, хімічного складу та дифрактометричний аналіз отриманих покриттів.

Дослідження стабільності горіння дуги при зміні струму соленоїда в діапазоні 0–7 А проводили за допомогою цифрового осцилографа. Вимірювання напруги на дузі здійснювали протягом 5 с після виходу на стабільний режим горіння. В результаті обробки отриманих осцилограм, шляхом підрахування сумарної кількості максимальних сплесків ΣN за певний період часу – 100 мс та дисперсії окремих ділянок осцилограм, встановлений оптимальний струм соленоїда 3,5–4,5 А (12–16 мЛТ). Стабілізація горіння виносної дуги відбувається завдяки встановленню динамічної рівноваги у ході її горіння, через прив'язку анодної плями до торця виносного аноду, що надає можливість збільшення витрат плазмоутворювального газу та довжини плазмового струменя без переходу в турбулентний режим, і як наслідок, підвищенню швидкості частинок порошку та якості отриманого покриття. Таким чином, максимально можливі витрати плазмоутворювального газу без переходу плазмового струменя в турбулентний режим складали 0,18–0,20 м³/год, при цьому довжина плазмового струменя досягала свого максимуму 100–150 мм.

ВАХ дуги плазмотрона з додатковим соленоїдом має лінійний зростаючий характер з крутизною 0,2 В/А, що дозволяє проводити плазмове напилення від серійних зварюваних джерел живлення на зростаючій ділянці зовнішньої характеристики без збільшення напруги холостого ходу.

Встановлення раціональних технологічних режимів плазмового напилення модифікованих порошків проводили на основі рівняння регресії, що встановлює взаємозв'язок між робочими параметрами плазмотрону та міцністю зчеплення

покривтів. В якості незалежних змінних технологічних чинників, які є найбільш впливовими, вибрані: X_1 – струм дуги I_d , А; X_2 – струм соленоїда I_l , А; X_3 – положення соленоїда відносно сопла плазмотрона L , мм.

В результаті експерименту були отримані значення міцності зчеплення досліджуваних плазмових покривтів з основою при зміні технологічних чинників, відповідно до плану експерименту. За результатами регресійного статистичного аналізу експериментальних даних отримана залежність міцності зчеплення від технологічних чинників:

$$y = 10,24 + 1,06X_1 + 0,74X_2 + 0,52X_1X_2 - 0,38X_1X_3 - 2,2X_1^2 - 1,8X_2^2 \quad (1)$$

Встановлений вплив кожного з факторів на міцність зчеплення. Аналіз впливу технологічних режимів на міцність зчеплення дозволив визначити, що найбільш значимими факторами є струми соленоїда і дуги, а менше всього впливає зміна положення соленоїда відносно сопла плазмотрона. Отриманій моделі в факторному просторі відповідає гіперповерхня відгуку, представлена у вигляді ізоліній на рис. 3 (а).

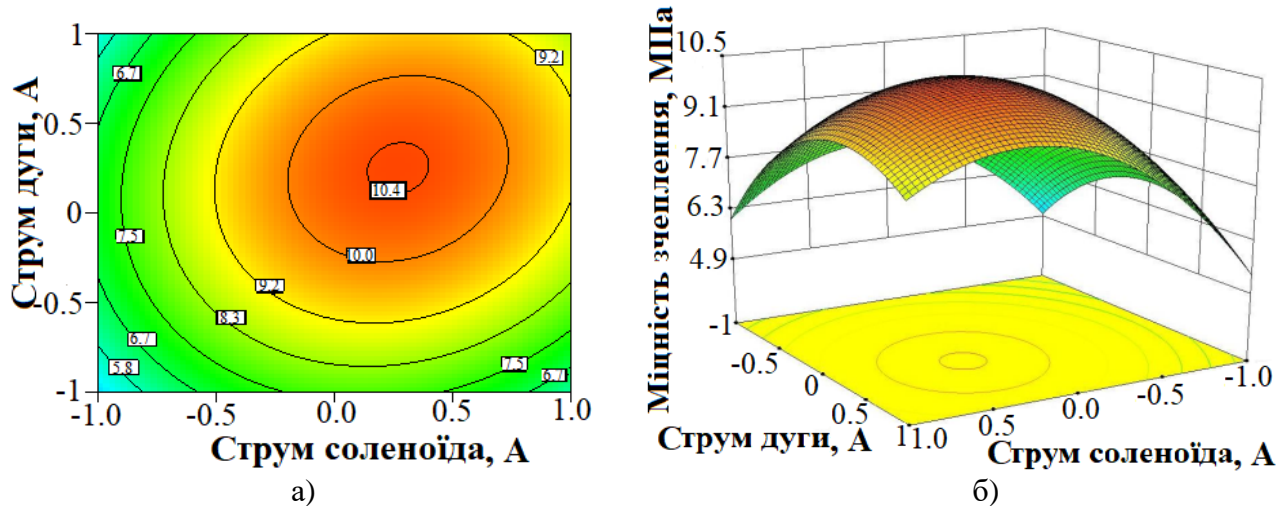


Рис. 3. Ізолінії рівнів (а) і поверхня відгуку (б) міцності зчеплення в залежності від струмів соленоїда і дуги (при відстані = 0)

Аналіз отриманої моделі дозволяє зробити висновок, що величина міцності зчеплення покриття з основою буде мати максимальне значення (10,5 МПа) при струмі соленоїда $x_1 = 4,5$ А, струмі дуги $x_2 = 93$ А і положення соленоїда відносно сопла плазмотрону $x_3 = 6,8$ мм. Таким чином, встановлена функціональна залежність міцності зчеплення плазмових покривтів від ряду найбільш значимих технологічних чинників.

Оскільки в формуванні покриття беруть участь всі частинки в плазмовому струмені, то найкращі властивості будуть мати покриття, які відповідають режимам, де кількість розплавлених частинок в струмені та їх концентрація максимальні. Аналіз отриманих даних КВМ показує, що під час напилення керамічного модифікованого порошку оксиду алюмінію максимальне його значення (75–80%) досягається при дистанції напилення 100 мм, коли кількість розплавлених частинок максимальна. Зменшення КВМ під час напилення оксиду алюмінію (72%) пояснюється більшою важкістю плавлення керамічного ядра, в порівнянні з модифікованим, де TiO_2 та SiO_2 сприяють більш повному його проплавленню.

Режими напилення модифікованих керамічних порошків

Струм дуги, А	Напруга на дузі, В	Струм соленоїда, А	Положення соленоїда відносно сопла, мм	Витрати плазмоутворювального газу, м ³ /год	Відстань напилення, мм
85–95	30–40	4–5	6–8	0,18–0,20	100–150

Для встановлення впливу нанодисперсних порошків оксидів на формування плазмових покриттів проведено аналіз мікроструктури, хімічного складу та дифрактометричний аналіз отриманих покриттів. Результати металографічних досліджень плазмових покриттів (рис. 4, 5) ілюструють зміни в мікроструктурі, внаслідок додавання нанодисперсних порошків оксидів.

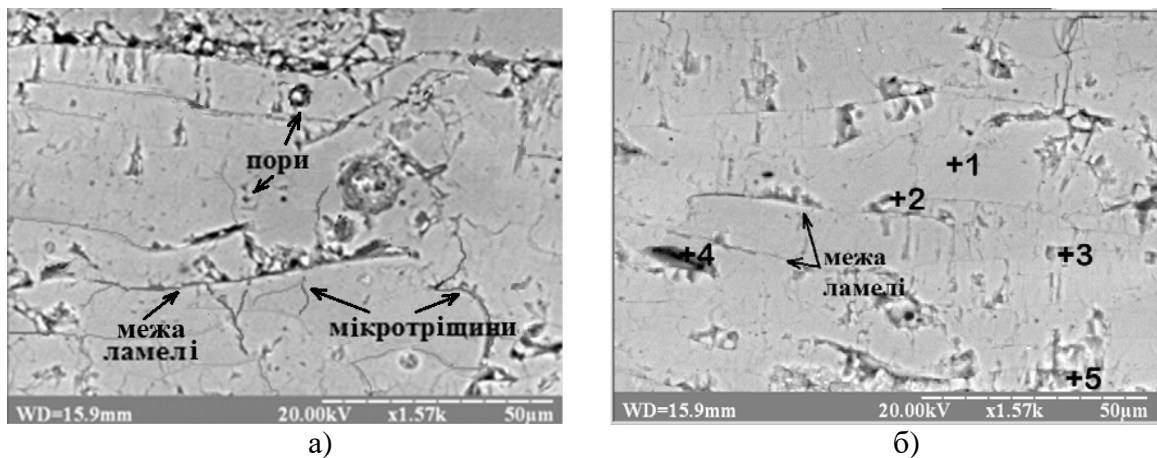


Рис. 4. Мікроструктура плазмового покриття з оксиду алюмінію (а) та при додаванні 1,5 об.% нанодисперсного порошку TiO_2 з хімічним аналізом (б)

При додаванні нанодисперсних порошків в кількості 1,5 об.% мікроструктура керамічних покриттів має компакту, гладку та щільну будову. Спостерігається зменшення сітки мікротріщин та пористості до 5–6%, підвищення однорідності покриття та міцності зчеплення (на 16–25%), що відбувається завдяки екзотермічній взаємодії нанодисперсних модифікаторів з додатковим виділенням тепла, яке сприяє кращому проплавленню керамічного ядра оксиду алюмінію. Наскрізні пори, наявність яких істотно впливає на корозійні властивості покриттів не виявлені. Збільшення ж вмісту нанодисперсних порошків до 5 об.% відображає збільшення пористості мікроструктури до 8–10 %, з розтріскуванням покриттів та їх відшаруванням в зоні адгезійного контакту, що пояснюється високими залишковими напруженнями в покриттях.

Проведений мікроструктурний аналіз самофлюсівних покриттів отриманих при додаванні 0,2–1,5 об.% Al_2O_3 (рис. 5, б, в) показав, щільну та високо однорідну будову з мінімальною кількістю дефектів в зоні адгезійного контакту. Додаткове оплавлення призводить до гомогенізації та впорядкованості структури покриття з підвищенням адгезійної міцності, характерної для утворення перехідних дифузійних зон. При збільшенні вмісту нанодисперсного порошку Al_2O_3 до 5 об.% пори в самофлюсівних покриттях об'єднуються по границях зерен, що може сприяти утворенню мікротріщин. Після оплавлення, внаслідок процесів коалесценції та коагуляції, в покриттях з ПГ-10Н-01 пори та темні (не металеві) включення приймають округлу форму.

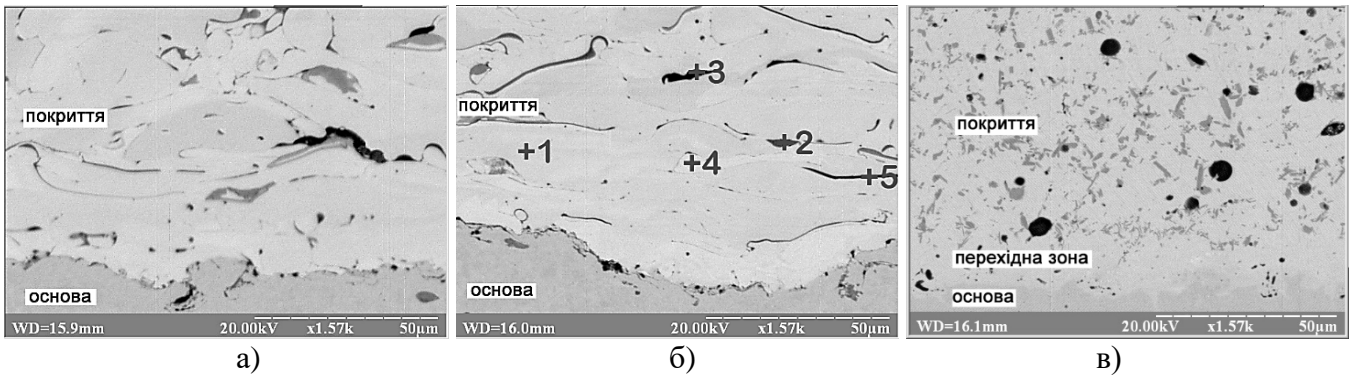


Рис. 5. Мікроструктура плазмового покриття з порошку системи Ni-Cr-B-Si (а), при додаванні 1,5 об.% нанодисперсного порошку Al_2O_3 з хімічним аналізом (б) та додатково оплавлене (в)

Хімічний аналіз покриттів (табл. 2) показав, що добавки нанодисперсних оксидів Al_2O_3 , TiO_2 та SiO_2 при плазмовому напиленні переносяться в покриття і досить рівномірно розподіляються по структурі покриттів. Хоча алюміній, в основному зосереджений у темних (не металевих) включеннях покриття та присутній у зернах збагачених нікелем та хромом.

Таблиця 2

Хімічний склад плазмового покриття

Точки Елементи, об. %	Ni-Cr-B-Si (ПГ-10Н-01)+1,5% Al_2O_3					Al_2O_3 +1% TiO_2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Ni	83,73	48,35	64,48	87,74	71,98	-	-	-	-	-
Cr	12,45	33,32	20,21	7,36	20,6	-	-	-	-	-
Fe	2,82	16,43	12,16	4,58	4,38	-	-	-	-	-
Si	0,99	0,75	1,64	0,26	1,06	-	-	-	-	-
Al	-	1,15	1,52	0,06	1,98	98,94	99,09	97,61	98,51	98,34
Ti	-	-	-	-	-	1,06	0,75	1,47	1,49	1,39

На рис. 6 наведені результати вимірювання мікротвердості плазмових покриттів на основі керамічного порошку оксиду алюмінію та самофлюсівного порошку системи Ni-Cr-B-Si.

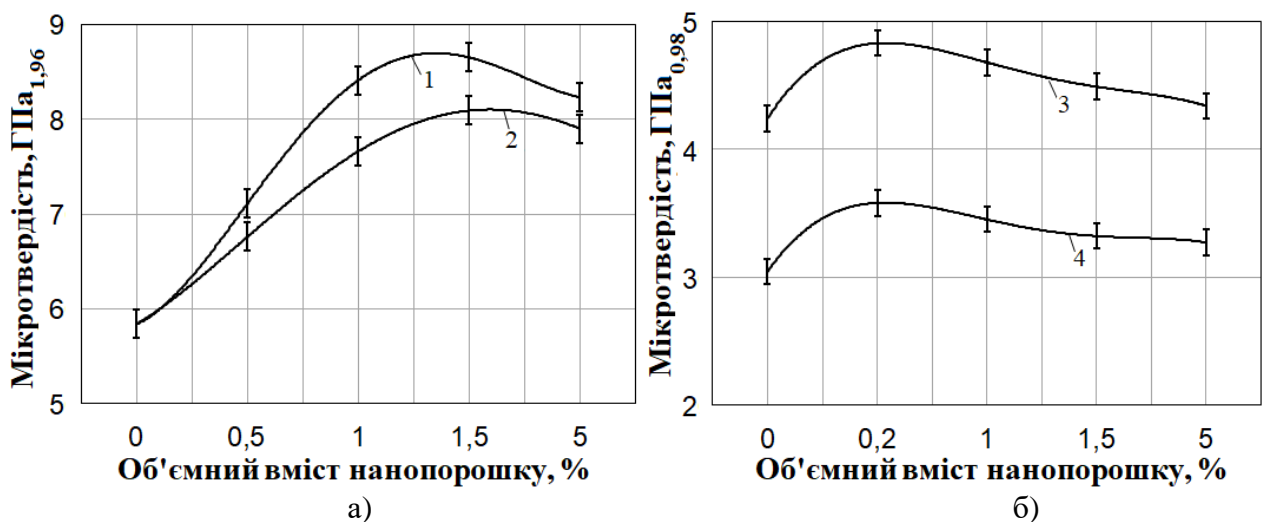


Рис. 6. Мікротвердість плазмових покриттів з керамічного порошку оксиду алюмінію (а): 1 – Al_2O_3 + SiO_2 ; 2 – Al_2O_3 + TiO_2 та самофлюсівного порошку системи Ni-Cr-B-Si+ Al_2O_3 (б): 3 – без оплавлення; 4 – після оплавлення покриття при $1050\text{ }^\circ\text{C}$

Результати вимірювання мікротвердості плазмових покриттів (рис. 6) показали, що збільшення мікротвердості до 8–8,6 ГПа_{1,96} відбувається зі збільшенням кількості модифікаторів до 0,2-1,5 об.%, які відіграють роль ПАР та впливають на створення щільної гетерофазної структури, подальше збільшення вмісту нанодисперсних порошків призводить до зменшення мікротвердості на 10–15%. Додаткове оплавлення самофлюсівних покриттів призводило до падіння мікротвердості з 4,8 до 3,5 ГПа_{0,98} (рис. 6, б), що пояснюється покращенням структури, зниженням залишкових напружень та відповідними фазовими перетвореннями.

Додатковим доказом присутності нанодисперсних частинок в покриттях є дифрактограми плазмових покриттів (рис. 7). В покриттях на дифрактограмах (рис. 7, а) спостерігається присутність піків введених до складу керамічного порошку оксиду алюмінію нанодисперсних елементів з'єднань титану та кремнію, відповідно. Наявність на дифрактограмах (рис. 7, б) з'єднань алюмінію лише у фоновому вигляді, пояснюється використанням у якості модифікатора аморфного Al₂O₃, кристалічні ґратки якого майже не помітні для рентгенівського проміню дифрактометра.

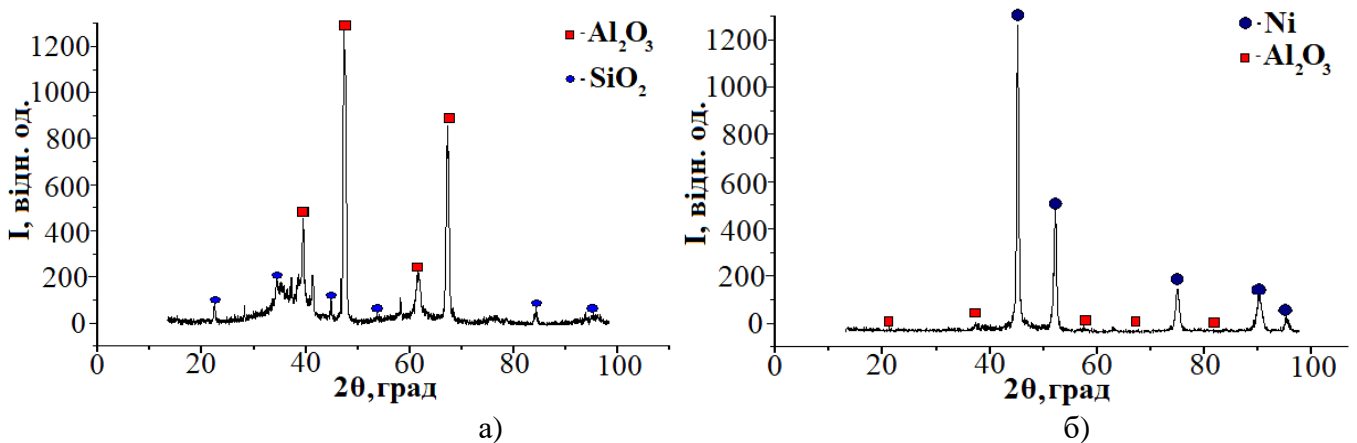


Рис. 7. Дифрактометричний аналіз плазмового покриття з порошку оксиду алюмінію при додаванні нанодисперсного SiO₂ (а) та самофлюсівного покриття системи Ni-Cr-B-Si з добавкою нанодисперсного порошку Al₂O₃ (б)

Таким чином, можна побічно констатувати про наявність та певним чином розподілення у покритті нанодисперсних частинок оксидів, які відіграють позитивний вплив на формування плазмових покриттів. Також було виявлено, що завдяки високим температурам плазмового струменя в покриттях після процесу розпилення відбуваються зміни фазового складу порівняно з вихідним напилюваним порошком.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень на зносостійкість і термічну стабільність покриттів на основі самофлюсівного порошку системи Ni-Cr-B-Si, модифікованого нанодисперсним порошком Al₂O₃, та міцність зчеплення і корозійну стійкість покриттів на основі кераміки з оксиду алюмінію, модифікованих нанодисперсними порошками TiO₂ та SiO₂. Надані технологічні рекомендації стосовно складу та режимних параметрів для їх практичного застосування.

Результати випробовувань на зносостійкість плазмового покриття на основі самофлюсівного порошку системи Ni-Cr-B-Si (ПГ-10Н-01), модифікованого нанодисперсним Al₂O₃, наведено на рис. 8.

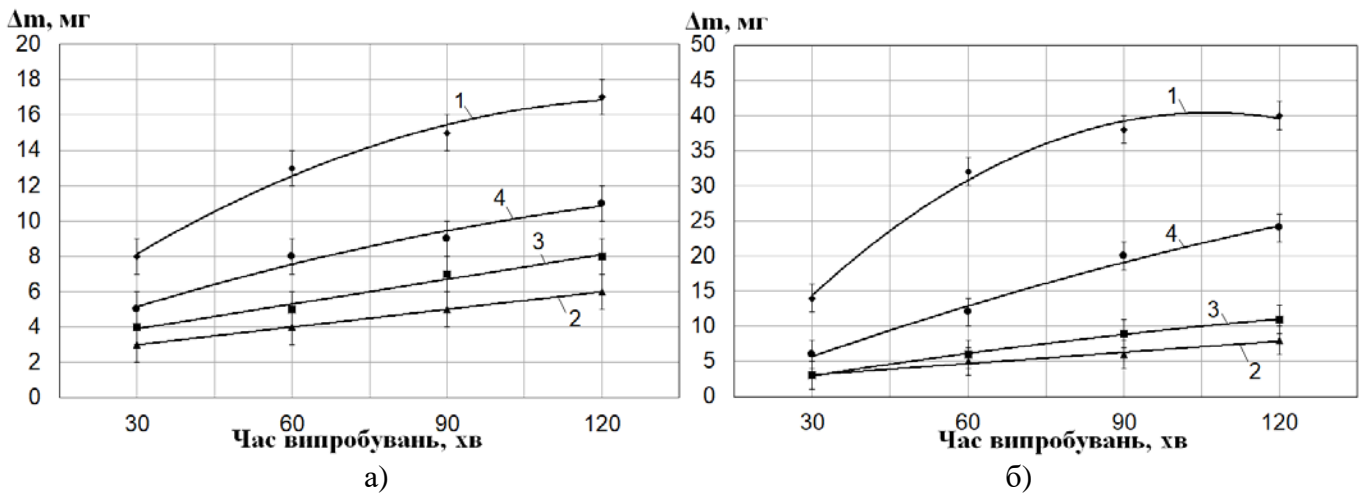


Рис. 8. Кінетика зношування плазмових самофлюсівних покриттів з порошку системи Ni-Cr-B-Si до (а) та після оплавлення (б): 1- Ni-Cr-B-Si; 2- Ni-Cr-B-Si +0,2% Al₂O₃; 3- Ni-Cr-B-Si +1,5% Al₂O₃; 4- Ni-Cr-B-Si +5% Al₂O₃

Наведені графіки на рис. 8, свідчать про збільшення зносостійкості покриттів системи Ni-Cr-B-Si при додаванні 0,2 об.% нанодисперсного порошку Al₂O₃ у 2,8 рази після тертя впродовж 2 годин, в порівнянні з результатами покриттів без модифікаторів. Після оплавлення зносостійкість цих самофлюсівних покриттів Ni-Cr-B-Si+Al₂O₃ збільшилась у 5,7 рази. При цьому додавання нанодисперсного порошку Al₂O₃ дозволяє зберігати високі показники зносостійкості (6–8 мг за 120 хв) самофлюсівних покриттів навіть після їх оплавлення, хоча показники мікротвердості істотно падають з 4,8 до 3,5 ГПа_{0,98}. В інших випадках чітко спостерігається кореляція між мікротвердістю та зносостійкістю напилених покриттів. Загалом результати зносостійкості покриттів при додаванні нанодисперсних домішок досягають рівня широко відомого порошку ПС-12НВК-01.

Для оцінки стійкості покриттів, що працюють в умовах підвищених температур, проводили випробовування зразків шляхом термоциклювання. В результаті проведених випробувань, покриття на основі самофлюсівного порошку Ni-Cr-B-Si модифікованого нанодисперсним Al₂O₃ витримали 50 термоциклів без відшарувань. При цьому, покриття без нанодисперсної добавки вже після перших 15 циклів мало істотні потемніння, а після 50 циклів окислену і пошкоджену поверхню. Хімічний аналіз покриттів показав, що нанодисперсний Al₂O₃ при плазмовому напиленні переноситься в покриття та не вигорає під час проведення випробувань на жаростійкість.

Експлуатаційні властивості покриттів на основі кераміки оцінювались за показниками міцності зчеплення та корозійної стійкості (рис. 9). Результати проведених випробувань на міцність зчеплення покриттів з основою свідчать про зростання цих показників з 16 до 20 МПа – при випробуваннях на відрив та зі 108 до 123 МПа – на зсув, при збільшенні концентрації нанодисперсного порошку TiO₂ від 0 до 1,5 об.%.

З метою визначення впливу нанодисперсних добавок на корозійну стійкість були проведені випробування зразків з плазмовими покриттями, зануреними в сірчану кислоту. Швидкість корозії покриттів тим менша, чим вищий показник поляризаційного опору (R_p).

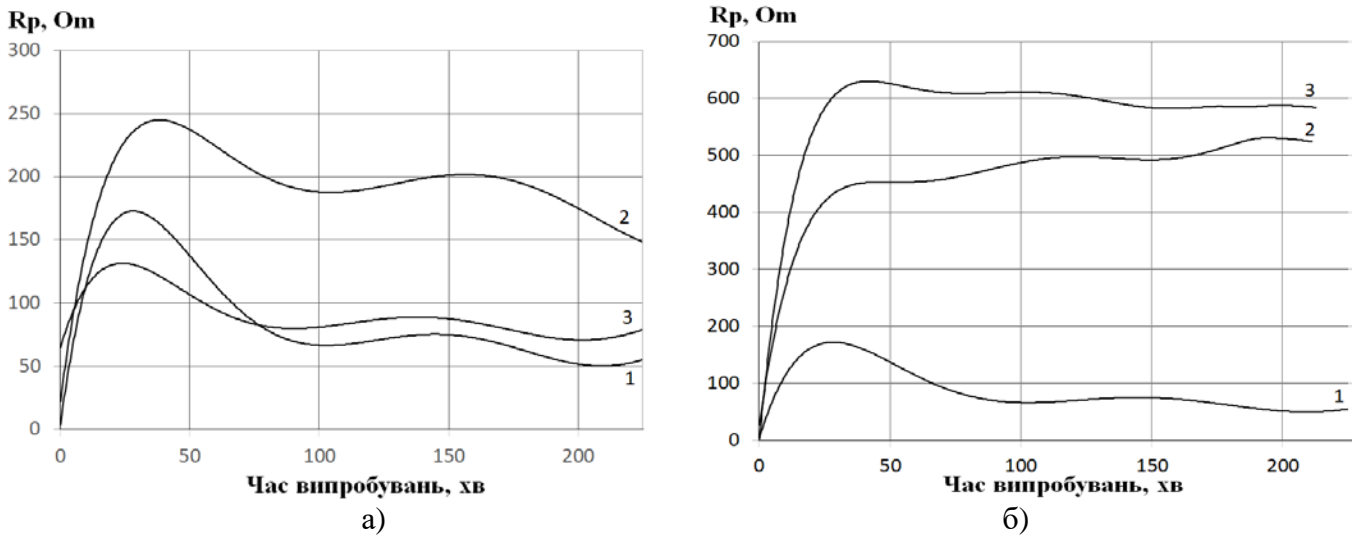


Рис. 9. Залежність поляризаційного опору від часу випробування керамічних покриттів з порошків $Al_2O_3+TiO_2$ (а) та $Al_2O_3+SiO_2$ (б) в 10% розчині HCl: 1 – Al_2O_3 ; 2 – $Al_2O_3+0,5\% TiO_2/SiO_2$; 3 – $Al_2O_3+1,5\% TiO_2/SiO_2$

Керамічні покриття з додаванням TiO_2 показали вищі значення, в порівнянні з покриттями з оксиду алюмінію. Так, R_p покриття з порошку $Al_2O_3+0,5$ об. % TiO_2 склав 20-30 Ом, $Al_2O_3+1,5$ об. % TiO_2 – 50-60 Ом, а покриття з оксиду алюмінію без нанодисперсного порошку – 15-18 Ом. Головним чином ці покращення корозійної стійкості відбулися завдяки зменшенню кількості зв'язаних пор в покриттях. При цьому кислота, що проникала через них, руйнувала метал основи з утворенням локальних осередків корозії під покриттям.

В покриттях з порошку оксиду алюмінію, модифікованого 0,5 об. % TiO_2 , у середовищі 10% HCl (рис. 9, а) R_p з початком процесу окислення був на рівні 130 Ом і лише через 80 хв перевищило значення для покриття з оксиду алюмінію. Після процесу стабілізації R_p цих покриттів склало 90 Ом. Це головним чином, пояснюється здатністю титану до пасивації в кислотах. Помітне підвищення R_p (на 50%) спостерігається при заміні TiO_2 на SiO_2 у якості модифікатора (рис. 9, б), що пояснюється більшою стійкістю кремнію в соляній кислоті та найменшою з усіх випробуваних покриттів пористістю (3–5%). Як видно з рис. 9, поляризаційний опір для всіх видів покриттів в соляній кислоті стабілізувався через 20–40 хв. Це значення може бути критерієм корозійної стійкості при порівняльних випробуваннях.

Проте підвищення поляризаційного опору більшою мірою залежало не від матеріалу покриття, а від товщини напиленого шару, що на пряму пояснюється зниженням кількості зв'язаних пор і узгоджується з літературними даними про захисну здатність інших видів покриттів. Однак нанесення плазмового покриття більшої товщини, сприяє підвищенню залишкових напружень, які суттєво впливають на адгезійну міцність – зменшуючи її. На основі цих даних, була визначена раціональна товщина

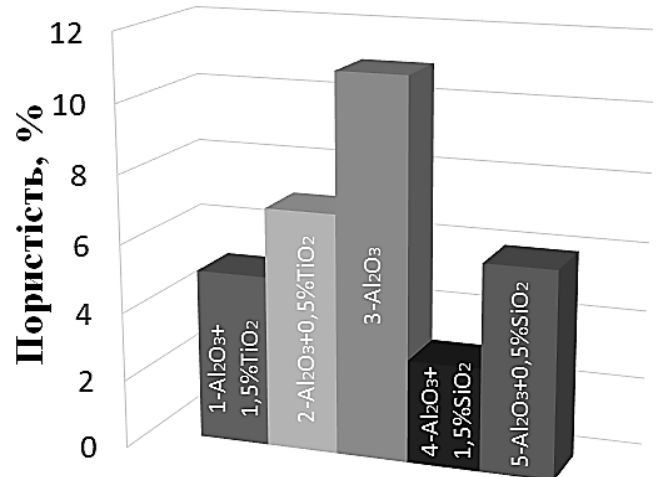


Рис. 10. Пористість отриманих керамічних покриттів з порошку: 1- $Al_2O_3+1,5\% TiO_2$; 2- $Al_2O_3+0,5\% TiO_2$; 3- Al_2O_3 ; 4- $Al_2O_3+1,5\% SiO_2$; 5- $Al_2O_3+0,5\% TiO_2$

плазмового покриття, в діапазоні 200–250 мкм. Проведені випробування за визначенням поляризаційного опору зразків з отриманими покриттями в розчинах сірчаної і соляної кислот, свідчать про раціональне значення додавання нанодисперсних модифікаторів в діапазоні 1,5 об. %.

Таким чином, проведені дослідження є доказом перспективності застосування нанодисперсних порошків в технології плазмового напилення покриттів. Особливий стан нанодисперсних порошків проявляється за рахунок високої дисперсності (5–41 нм), наявності на поверхні частинок розвинених, вільних зв'язків, які активуються при високих температурах в умовах плазмового напилення. Як наслідок, збільшується поверхнева енергія, можлива реалізація механізмів модифікування 1-го та 2-го роду, хімічної взаємодії між компонентами та дисперсійного зміцнення покриття. Наявність таких фізичних явищ, які можуть протікати під час формування покриттів забезпечує комплексне підвищення фізико-механічних характеристик (міцність зчеплення, мікротвердість, пористість) та експлуатаційних властивостей (зносо-, корозійна стійкість та стійкість покриття до термоциклювання), незважаючи на те, що вміст нанодисперсних порошків складає всього декілька відсотків від загального об'єму.

Були надані практичні рекомендації стосовно складу та режимних параметрів напилення покриттів для зміцнення лопатей змішувачів та робочих поверхонь коліс дробарок гірничо-збагачувальних комбінатів. Плазмове напилення самофлюсівних порошків системи Ni-Cr-B-Si модифікованих нанодисперсним Al_2O_3 у кількості 0,2 об. %, з подальшим оплавленням, дозволить отримувати зносостійкі покриття з підвищеними показниками жаростійкості, що значно подовжить термін експлуатації даних деталей. Технологія плазмового напилення керамічного порошку оксиду алюмінію модифікованого нанодисперсним TiO_2 у кількості 1,5 об. %, дозволяє отримувати корозійностійкі покриття з підвищеними показниками міцності зчеплення, що працюють в умовах важкої експлуатації та контактують з агресивними середовищами і можуть наноситись на деталі, які використовуються в хімічній промисловості.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлені оптимальні параметри й умови механохімічної обробки для модифікації вихідних порошків нанодисперсними Al_2O_3 , TiO_2 та SiO_2 для газотермічних покриттів з підвищеними експлуатаційними властивостями. Без помітного подрібнення частинок основного порошку модифікування самофлюсівного порошку системи Ni-Cr-B-Si та керамічного порошку оксиду алюмінію проводили за частотою обертів 120–125 об/хв в середовищі вакууму $2,5-5 \cdot 10^{-1}$ Па впродовж 6–8 хв.

2. Встановлені раціональні технологічні режими плазмового напилення модифікованих порошків на основі дослідження стабільності горіння дуги, визначення ВАХ, КВМ та отримання рівняння регресії, що встановлює взаємозв'язок між робочими параметрами плазмотрону та міцністю зчеплення покриттів: струм дуги 85–95 А, напруга на дузі 30–40 В, струм соленоїда 4–5 А, положення соленоїда відносно сопла 6–8 мм, витрати плазмоутворювального газу 0,18–0,2 м³/год, витрати порошку 2 кг/год, дистанція напилення 100–150 мм.

3. Встановлені закономірності формування та досліджені фізико-механічні показники плазмових покриттів на основі кераміки з порошку оксиду алюмінію при введенні до їх складу 1–1,5 об. % нанодисперсних порошків TiO_2 та SiO_2 , які

полягають у підвищенні однорідності покриття, зменшенні сітки мікротріщин та пористості до 3–6%, що забезпечує підвищення мікротвердості на 38–44%, міцності зчеплення плазмових покриттів на 16–25%, корозійної стійкості у середовищі 10% HCl у 2,8 та у 6 разів при застосуванні нанодисперсних порошоків TiO_2 та SiO_2 відповідно.

4. Досліджений вплив нанодисперсного порошку Al_2O_3 на формування, зносостійкість, мікротвердості, стійкості до термоциклювання плазмових покриттів на основі самофлюсівного сплаву системи Ni-Cr-B-Si. На основі експериментальних даних зносостійкості та мікротвердості плазмових покриттів, встановлений раціональний вміст нанодисперсного Al_2O_3 у вихідному самофлюсівному порошку системи Ni-Cr-B-Si на рівні 0,2–1,0 об.%, при цьому зносостійкість покриттів зростає у 2,8–5,7 рази; мікротвердість підвищується на 18–34%; термостійкість досягає 50 циклів без помітних відшарувань та зміни хімічного складу.

5. Встановлено, що додавання нанодисперсного порошку Al_2O_3 дозволяє зберігати високі показники зносостійкості самофлюсівних покриттів системи Ni-Cr-B-Si після їх оплавлення. Так, в самофлюсівних покриттях без додаванням нанодисперсних модифікаторів зносостійкість після оплавлення падає у 2,1 рази, при використанні модифікованих порошоків системи Ni-Cr-B-Si - вона залишається на тому ж рівні.

6. Встановлено, що наявність нанодисперсних порошоків сприяє формуванню ділянок з підвищеною адгезійною міцністю, внаслідок чого відбувається покращення мікроструктури та експлуатаційних властивостей. Данні по визначенню кількості титану, алюмінію та кремнію в покритті, свідчать про повне перенесення цих компонентів в склад отриманого покриття.

7. Розроблені технологічні рекомендації стосовно складу та режимних параметрів плазмового напилення модифікованих порошоків для їх практичного застосування.

Наукові праці, в яких опубліковані результати дисертації

1. Дослідження впливу домішок нанопорошку оксиду алюмінію на зносостійкість плазмових покриттів/ В.К. Фурман, А.В. Чорний, І.В. Смирнов// Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». Хмельницький. – 2016. – №1. – С. 100-104.

Здобувачем проведено випробування на зносостійкість самофлюсівних покриттів системи Ni-Cr-B-Si (ПГ-10Н-01) модифікованих нанодисперсним порошком Al_2O_3 .

2. Вплив домішок нанодисперсних сполук оксидів на зносо- та корозійну стійкість плазмово-напиленних покриттів/ І.В. Смирнов, А.В. Чорний, В.К. Фурман, Н.А. Долгов// Науково-технічний журнал «Проблеми тертя та зношування», Київ. – 2017. – №1 (74) – С. 14-22. Журнал включений до міжнародних науково-метричних баз EBSCO, Google Scholar, WorldCat та РІНЦ.

Здобувачем проведені випробування на зносостійкість самофлюсівних покриттів системи Ni-Cr-B-Si та на корозійну стійкість керамічних покриттів.

3. Влияние нанодисперсных модификаторов на структуру и свойства плазменно-напыленных покрытий И.В. Смирнов, А.В. Чёрный, В.К. Фурман, Н.А. Долгов\ Міжнародний науково-технічний журнал «Наукові вісті» НТУУ "КПІ", Матеріалознавство та машинобудування. – 2017. – №5 – С. 65-71. Журнал

включений до міжнародних науково-метричних баз EBSCO, Google Scholar, WorldCat, РИНЦ, Index Copernicus, J-Gate.

Здобувачем проведені експериментальні дослідження корозійної стійкості, мікротвердості, залишкових напружень і адгезійної міцності плазмово напилених покриттів на основі керамічного порошку оксиду алюмінію з добавкою нанодисперсного TiO_2 .

4. Численно-аналитический подход к решению задачи определения температуры плакированных частиц в плазменном потоке А.Ю. Андрейцев, Н.Н. Крюков, В.К. Фурман, И.В. Смирнов/ Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон: ХНТУ, 2017. – Вип. 3(62). Т. 1. – С. 105-108. Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв: РИНЦ, Google Scholar.

Здобувачем запропонований склад порошкової суміші для аналітичного встановлення температури окремих частинок.

5. Statistical adhesion-cohesion strength criterion for coating/ Dolgov N.A., Ivanchenko A.V., Besov A.V., Furman V.K., Smirnov I.V. // Machines, technologies, materials. – Sofia. – 2015. – р. 31-34. Іноземне видання.

Здобувачем проаналізовано вплив зміни товщини покриттів на міцність зчеплення покриттів.

6. Модифікування плазмово-напилених покриттів застосуванням плакованих та нанодисперсних порошків/ І.В. Смирнов, М.А. Долгов, А.В. Чорний, В.К. Фурман, І.А. Селіверстов // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк. – 2015. – Випуск № 51. – С. 199-204. Журнал включено до міжнародної індексація: РИНЦ.

Здобувачем проведено випробування на зносостійкість модифікованих плазмових покриттів.

7. Патент України на корисну модель 99762 МПК (2006.01) С23С 4/10, В22F1/02. Композиційний металокерамічний порошок для газотермічних покриттів/ Смирнов І.В., Кузнецов В.Д., Чорний А.В., Фурман В.К., Руденький С.О.; заявл. 15.12.2014, опубл. 25.06.2015, Бюл. №12.

Здобувачем були встановлені параметри механохімічної обробки металокерамічної порошкової суміші для газотермічного напилення.

8. Патент України на корисну модель 104371 МПК (2016.01) С23С 4/00, В05В 7/16, Н05Н 1/26. Пристрій для плазмово-дугового напилення покриттів з магнітним керуванням/ Смирнов І.В., Долгов Н.А., Чорний А.В., Фурман В.К., Зіберов М.Л.; заявл. 16.07.2015, опубл. 25.01.2016, Бюл. №2.

Здобувачем проведені дослідження стабільності горіння дуги та виміряно рівень індукції магнітного поля соленоїда.

9. Nanostructured PVD Film-Coated Alumina Powders for Thermal Spraying Technologies/ Furman V., Smirnov I., Chorny A., Dolgov N., Andreytsev A.// Proceedings of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2017), Part 1. – Zatoka, Ukraine. - September 10–15, 2017. – р. 41-44. Матеріали конференції індексуються базами даних **Scopus**, Web of Science Core Collection

Здобувачем проведені дослідження морфології, структури та хімічного складу наноструктурованих покриттів.

10. Increased operational properties of welds and plasma coatings using nanopowders / A. Cherniy, I. Smirnov, M. Ziberov, V. Furman, J. L. García-Jacomino // IX Conferencia Científica Internacional Medio Ambiente Siglo XXII, 24 - 27 november 2015. – Cuba.

Здобувачем проведено випробування на зносостійкість самофлюсівних покриттів системи Ni-Cr-B-Si (BoroTec 10009) модифікованих нанодисперсним порошком Al_2O_3 .

11. Повышение эксплуатационных свойств плазменно-напыленных покрытий, модифицированных нанопорошками/ В.К. Фурман, А.В. Чёрный, И.В. Смирнов, Н.А. Долгов// Материалы V Международной научной конференции «Наноструктурные материалы – 2016: Беларусь – Россия – Украина: НАНО-2016». – Минск. – 2016. – 22-25 ноября. – С. 106-109.

Здобувачем проведено дослідження адгезійної міцності та залишкових напружень плазмових покриттів на основі керамічного порошку оксиду алюмінію з добавкою нанодисперсного TiO_2 .

12. Improvement of working properties of plasma-sprayed coatings using nanopowders/ Furman V.K., Smirnov I.V., Chorniy A.V., Seliverstov I.A., Dolgov N.A. // Труды V международной Самсоновской конференции «Материаловедение тугоплавких соединений и композитов». – м. Київ.– 2016.– 24-25 мая. – С. 50.

13. The effect of addition of nanodispersed compounds oxides on mechanical properties of plasma spraying coatings/ Furman V.K., Chorniy A.V., Smirnov I.V. Збірка матеріалів доповідей міжнародної науково-технічної конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 7». – Київ. – 2017. – 30 листопада - 2 грудня. – р. 104-107.

14. Вплив домішок наночастинок оксиду алюмінію на зносостійкість плазмових покриттів / В.К. Фурман, А.В. Чорний, І.В. Смирнов // Матеріали VIII Міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології»: – Київ.– 2015.–20-22 травня.– С. 304.

15. Підвищення властивостей плазмово-напиленних самофлюсівних покриттів застосуванням нанодисперсних компонентів/ І.В. Смирнов, А.В. Чорний, В.К. Фурман, І.А. Селіверстов, Г.Н. Троцан// Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». – м. Чернігів. – 2015 р. – 19 - 22 травня. – С 198-199.

16. Вплив на зносостійкість плазмових покриттів додавання наночастинок оксиду алюмінію/ В.К. Фурман, І.В. Смирнов, А.В. Чорний// Матеріали II всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників «Інженерія поверхні. Комплексний підхід». – м. Київ.– 2015.– 28-29 травня.– С.14.

В роботах 12-16 здобувачем проведено випробування на зносостійкість в умовах сухого тертя, виміряна мікротвердість самофлюсівних покриттів системи Ni-Cr-Si-B модифікованих нанодисперсним порошком Al_2O_3 та проведені дослідні випробування адгезійної міцності та залишкових напружень плазмових покритті.

17. Дослідження віброперемішувача для плакування порошків у вакуумі/ В.Ю. Ковальчук, В.К. Фурман, І.В. Смирнов // Матеріали II всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників «Інженерія поверхні. Комплексний підхід». – м. Київ.– 2015.– 28-29 травня.– С.19.

18. Анализ адекватности математических моделей движения частиц порошка в плазменной струе в зависимости от фракционного диапазона/ А.В. Чорний, В.К. Фурман, І.В. Смирнов, А.Ю. Андрейцев // Матеріали І Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу». – м. Херсон.– 2015.– 15-18 вересня.– С.124-127.

В роботах 17,18 здобувачем запропоновані порошкові суміші для плакування та подальшого аналітичного встановлення температури окремих частинок.

19. Вплив нанопорошків на механічні властивості плазово-напиленних покриттів/ І.В. Смирнов, М.А. Долгов, В.К. Фурман, Н.В. Бабич, А.Ю. Андрейцев// Збірник наукових праць V всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні». – м. Львів. – 2016р. – 8-12 лютого. – С. 126-128.

Здобувачем проведено дослідження міцності зчеплення керамічних плазових покриттів з основою модифікованих нанодисперсним TiO_2 .

20. Дослідження зносостійкості плазових покриттів системи Ni-Cr-B-Si модифікованих керамічними нанопорошками/ В.К. Фурман, А.В. Чорний// Збірник наукових праць «Технічна творчість». – Хмельницький. – 2016. – №1. – С. 195-198.

21. Зміцнення плазових покриттів системи Ni-Cr-B-Si з застосуванням нанопорошків/ В.К. Фурман, О.С. Шагієв, А.В. Чорний, І.В. Смирнов, А.Ю. Андрейцев// Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем». – м. Чернігів. – 2016. – 26-29 квітня.– С. 257-259.

В роботах 20, 21 здобувачем проведені дослідні випробування зносостійкості та мікротвердості покриттів системи Ni-Cr-B-Si (ПГ-10Н-01) модифікованих нанодисперсним порошком Al_2O_3 .

22. Повышение эксплуатационных свойств плазменных покрытий с использованием нанопорошков/ В.К. Фурман, А.В. Чёрный, И.В. Смирнов, И.А. Селивёрстов, Н.А. Долгов // Труды V международной Самсоновской конференции «Материаловедение тугоплавких соединений и композитов». – м. Київ.– 2016.– 24-25 мая. – С. 30.

23. Підвищення експлуатаційних властивостей плазових покриттів з застосуванням нанопорошків / О.С. Шагієв, В.К. Фурман, А.В. Чорний, І.В. Смирнов/ X всеукраїнська науково-технічна конференція “Досконалість зварювання – комплексний підхід”. – Київ, НТУУ "КПІ", – 2016. – С. 3.

В роботах 22, 23 здобувачем запропонована методика механохімічної обробки мікро- та нанодисперсних порошків для плазового напилення і методика проведення випробувань на зносостійкість.

24. Модифікування плазових покриттів системи Ni-Cr-B-Si з застосуванням нанопорошків/ В.К. Фурман, А.В. Чорний, І.В. Смирнов// Матеріали III всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників «Інженерія поверхні. Комплексний підхід». – м. Київ.– 2016.– 30 травня. – С. 15-16.

Здобувачем проведені дослідження корозійної стійкості та стійкості до термоциклювання плазових покриттів модифікованих нанодисперсними порошками.

25. Модифікування керамічних плазово-напиленних покриттів із застосуванням нанопорошків/ В.К. Фурман, А.В. Чорний// Тези доповідей Восьмої

конференції молодих вчених та спеціалістів «Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування». – м. Київ.– 2016.– 25–27 жовтня. – С. 75-77.

Здобувачем проведено дослідження корозійної стійкості, адгезійної міцності та залишкових напружень плазмових покриттів на основі керамічного порошку оксиду алюмінію з добавкою нанодисперсного TiO_2 .

26. Дослідження впливу домішок нанопорошку оксиду титану на властивості керамічних плазмових покриттів/ В.К. Фурман, І.В. Смирнов, А.В. Чорний// Збірка матеріалів доповідей міжнародної наукової конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6». – Київ. – 2016. – 1-2 грудня. – С. 164-165.

Здобувачем запропоновано методика визначення корозійної стійкості та проведено дослідження морфології, структури та хімічного складу керамічних покриттів

27. Вплив домішок нанодисперсного TiO_2 на властивості плазмових керамічних покриттів з оксиду алюмінію/ Фурман В.К., Макаревич В.В., Чорний А.В., Смирнов І.В.// Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», том 2 – м. Чернігів. – 2017. – 24-27 квітня.– С. 257-259.

28. Модифікування плазмово-напилених покриттів нанопорошком оксиду титану/ Фурман В.К., Чорний А.В., Макаревич В.В.// Інженерія поверхні. Комплексний підхід: Матеріали четвертої всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників: К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ТОВ “Фастпринт”, – 2017. – 25 травня. – С. 13-14.

В роботах 27, 28 здобувачем запропоновано методики визначення корозійної стійкості та адгезійної міцності керамічних покриттів з домішками нанодисперсного TiO_2 .

29. Застосування нанодисперсних порошоків в інженерії високотемпературних покриттів/ Смирнов І.В., А.В. Чорний, В.К. Фурман, А.Ю. Андрейцев, М.А. Долгов, Н.В. Бабич, І.А. Селіверстов// Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу», випуск 3 – м. Херсон, ХНТУ.– 2017.– 12-17 вересня.– С.11-15.

Здобувачем проведено дослідні випробування корозійної стійкості, адгезійної міцності та залишкових напружень плазмових покриттів на основі керамічного порошку оксиду алюмінію з добавкою нанодисперсних TiO_2 та SiO_2 .

30. Определение температуры частиц с металлической оболочкой в потоке низкотемпературной плазмы (численно-аналитический подход)/ А.Ю. Андрейцев, Н.Н. Крюков, В.К. Фурман, И.В. Смирнов// XVIII Міжнародна конференція з математичного моделювання (МКММ-2017) [Збірка тез (18-22 вересня 2017 р., м. Херсон)]. – Херсон: ХНТУ, 2017. – С. 49-50.

Здобувачем запропонований склад порошкової суміші для аналітичного встановлення температури окремих частинок.

АНОТАЦІЯ

Фурман В.К. «Підвищення експлуатаційних властивостей плазмових покриттів із застосуванням нанодисперсних порошків». – Рукопис.

Дисертаційна робота 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 імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена пошуку шляхів підвищення експлуатаційних властивостей плазмових покриттів на основі самофлюсівного сплаву та кераміки для відновлення або створення корозійностійких та зносостійких покриттів, що працюють в умовах інтенсивного зношування та корозійного впливу.

На основі експериментальних даних зносостійкості та мікротвердості плазмових покриттів встановлений оптимальний вміст нанодисперсного Al_2O_3 у вихідному самофлюсівному порошку системи Ni-Cr-B-Si на рівні 0,2–1 об.%. При цьому зносостійкість покриттів зростає у 2,8–5,7 рази, мікротвердість підвищується на 18–34%, термостійкість досягає 50 циклів без помітних відшарувань та зміни хімічного складу. Встановлені закономірності формування та досліджені фізико-механічні показники плазмових покриттів на основі кераміки з порошку оксиду алюмінію при введенні до його складу 1–1,5 об.% нанодисперсних порошків TiO_2 та SiO_2 , які полягають у підвищенні однорідності покриття, кращому проплавленні керамічного ядра, зменшенні сітки мікротріщин та пористості до 3–6%, що забезпечує підвищення мікротвердості на 38–44%, міцності зчеплення напилених покриттів – на 16–25%, корозійної стійкості у середовищі 10% HCl – у 2,8 та у 6 разів при застосуванні нанодисперсних порошків TiO_2 та SiO_2 відповідно.

Розроблені технологічні рекомендації для плазмового напилення модифікованих порошків, які забезпечують підвищення зносостійкості, корозійної та термостійкості, адгезійної міцності поверхневих шарів, що працюють в умовах інтенсивного зношування та корозійного впливу.

Ключові слова: плазмове напилення, нанодисперсні порошки, зносостійкість, корозійна стійкість, міцність зчеплення, експлуатаційні властивості, мікроструктура.

АННОТАЦИЯ

Фурман В.К. «Повышение эксплуатационных свойств плазменных покрытий с использованием нанодисперсных порошков». – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – сварка, родственные процессы и технологии – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» Министерства образования и науки Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена поиску путей повышения эксплуатационных свойств плазменных покрытий на основе самофлюсующегося сплава и керамики для восстановления или создания коррозионностойких и износостойких покрытий, работающих в условиях интенсивного износа и коррозионного воздействия.

Установлены оптимальные параметры и условия механохимической обработки для модификации исходных порошков нанодисперсными Al_2O_3 , TiO_2 и

SiO₂ для газотермических покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами.

Разработан композиционный металлокерамический порошок для газотермических покрытий на основе самофлюсующегося сплава системы Ni-Cr-B-Si марки ПС-12НВК-01, который состоит из частиц металлической матрицы в состав которой путем механохимической обработки в шаровой планетарной мельнице, вводят добавку нанодисперсного (30–50 нм) тугоплавкого Al₂O₃ или TiO₂ в количестве 0,5–1,5 об.%.

Разработано устройство для плазменно-дугового напыления покрытий с магнитным управлением в виде соленоида, который зафиксирован относительно сопловой части плазматрона и используется для напыления модифицированных керамических порошков.

Установлены рациональные технологические режимы плазменного напыления модифицированных порошков на основе исследования стабильности горения дуги, определение вольт-амперных характеристик, коэффициента использования материала и уравнения регрессии, которое устанавливает взаимосвязь между рабочими параметрами плазматрона и прочностью сцепления покрытий.

Экспериментально установлено, что незначительные объемные доли нанодисперсных оксидов (до 1,5 об.%), благодаря высокой дисперсности (5–41 нм) увеличивают внесенную поверхностную энергию с реализацией механизмов модификации 1-го и 2-го рода, и дисперсионного упрочнения, обеспечивая комплексное повышение эксплуатационные свойства плазменного покрытия.

На основе экспериментальных данных износостойкости и микротвёрдости плазменных покрытий, установлено оптимальное содержание нанодисперсного Al₂O₃ в исходном самофлюсующемся порошке системы Ni-Cr-B-Si на уровне 0,2–1 об.%. При этом износостойкость покрытий возрастает в 2,8–5,7 раза; микротвёрдость повышается на 18–34%; термостойкость достигает 50 циклов без заметных отслоений и изменения химического состава.

Установлены закономерности формирования и исследованы физико-механические показатели плазменных покрытий на основе керамики с порошка оксида алюминия при введении в его состав 1–1,5 об.% нанодисперсных порошков TiO₂ и SiO₂, которые благодаря наличию на поверхности развитых, свободных связей, активируются при высоких температурах в условиях плазменного напыления и химического взаимодействия между компонентами, способствуют повышению однородности покрытия, лучшем проплавлению керамического ядра, уменьшению сетки микротрещин и пористости до 3–6%, что обеспечивает повышение микротвёрдости на 38–44%, прочности сцепления напылённых покрытий на 16–25%, коррозионной стойкости в среде 10% HCl в 2,8 и в 6 раз при применении нанодисперсных порошков TiO₂ и SiO₂, соответственно.

Разработаны технологические рекомендации для плазменного напыления модифицированных порошков, обеспечивающих повышение износостойкости, коррозионной и термостойкости, адгезионной прочности поверхностных слоев, работающих в условиях интенсивного износа и коррозионного воздействия.

Ключевые слова: плазменное напыление, нанодисперсные порошки, износостойкость, коррозионная стойкость, прочность сцепления, эксплуатационные свойства, микроструктура.

ABSTRACT

Furman V.K. "Increase of operational properties of plasma-sprayed coatings using nanodispersed powders." – Manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.03.06 – welding and related processes and technologies – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

The thesis is devoted to the search for ways to increase the operational properties of plasma-sprayed coatings based on self-fluxing alloys and ceramics for the restoration or creation of corrosion-resistant and wear-resistant coatings operating under conditions of intense wear and corrosion.

Based on the experimental data of wear resistance and microhardness of plasma-sprayed coatings, the optimum content of nano Al_2O_3 in the original self-fluxing powders of the Ni-Cr-B-Si system is set at 0.2–1% by volume, while the wear resistance of coatings increases in 2.8–5.7 times; microhardness is increased by 18–34%; heat resistance reaches 50 cycles without noticeable delamination and changes in chemical composition. Formation regularities have been established and physicomechanical indices of plasma-sprayed coatings based on ceramics from aluminum oxide have been introduced with the addition of 1–1.5% by volume of nano TiO_2 and SiO_2 powders. Which consist in increasing the coating homogeneity, better penetration of the ceramic core, reducing the grid of microcracks and porosity to 3–6%, which provides an increase in microhardness by 38–44%, adhesion strength of spray coatings by 16–25%, corrosion resistance in a 10% HCl environment in 2.8 and 6 times with nanodispersed powders TiO_2 and SiO_2 , respectively.

Technological recommendations for plasma spraying of modified powders providing an increase in wear resistance, corrosion resistance, heat and adhesion strength of surface layers operating under conditions of intensive wear and corrosion are developed.

Key words: plasma spraying, nano powders, wear resistance, corrosion resistance, adhesion strength, operational properties, microstructure.