

## ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ НА АДГЕЗІЙНУ МІЦНІСТЬ КЕРАМІЧНИХ ПОКРИТТІВ

<sup>1</sup>Долгов М.А., *д.т.н., доцент*, <sup>2</sup>Смирнов І.В., *д.т.н., професор*

<sup>1</sup>Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Плазмово-напилені покриття широко використовуються в різних галузях техніки. Однак під час експлуатації вони можуть відшаровуватися і розтріскуватися. Для підвищення механічних характеристик покриттів на основі оксиду алюмінію в порошки для напилення додають оксид титану у вигляді нанопорошків [1, 2].

Досліджено вплив технологічних режимів плазмового напилення порошку  $Al_2O_3$ , який був модифікований нанопорошком  $TiO_2$ . Для напилення використовували порошок оксиду алюмінію з розміром частинок 40–63 мкм [3]. Як модифікатор використовували нанопорошок оксиду титану з розміром частинок 40–50 нм, який вводили в кількості від 1,5 об.%. Напилення покриттів товщиною 250–300 мкм проводили на зразки зі сталі марки Ст 3. Для приготування гомогенної порошкової суміші з мікро- і наночастинок використовували планетарний кульовий млин XQM-2. Важливою умовою отримання якісного покриття під час напилення мікро- і нанопорошків є використання аргонового ламінарного плазмового струменя. Тому використовували плазмотрон з частково винесеної дугою і додатковим обдувом плазмового струменя концентричним потоком захисного газу. Для стабілізації процесу горіння плазми і підвищення температури за рахунок обтиску магнітними хвилями плазмового потоку, в конструкцію плазмотрона була додана магнітна система.

Струм дуги встановлювали в межах 80–100 А, напругу – 35–50 В. Продуктивність обладнання складала до 4 кг/год з загальною витратою плазмоутворюючого, транспортуючого і захисного газу (аргону) – 5 л/хв. Внаслідок таких конструктивних особливостей і відповідних технологічних режимів, характер перебігу плазмового струменя був близький до ламінарного, що забезпечило сприятливі умови для збереження і перенесення наночастинок.

Внаслідок того, що експлуатаційні навантаження викликають відшарування покриттів, то за функцію відгуку була прийнята адгезійна міцність, яку досліджували при випробуваннях на відрив. Для склеювання циліндричних зразків використовували клей на епоксидній основі [4]. Поверхню зразків зі сталі Ст 3 перед напиленням для поліпшення адгезійної міцності піддавали струменевій обробці корундовим порошком. Діаметр зразків становив 24,5 мм. Випробування проводили на розривній машині FM-1000.

З огляду на складність процесу плазмового напилення, для досліджень застосовували методи експертного відсіювання факторів, планування експерименту і статистичної обробки даних [5]. Після застосування методів експертної оцінки було отримано середнє апіорне ранжування факторів

плазмового напilenня. Як незалежні змінні (технологічні фактори), які є найбільш значущими, тобто мають найбільший вплив на характеристики міцності покриттів, обрані:  $x_1$  – струм лінзи  $I_n$ , А;  $x_2$  – струм дуги  $I_d$ , А;  $x_3$  – положення соленоїда щодо сопла  $L$ , мм.

Рівні варіювання факторів приведені в табл. 1. У табл. 2 представлені натуральні значення технологічних факторів і їх кодування.

Таблиця 1. Фактори та інтервали варіювання

Фактори	Рівні варіювання
$x_1$	80...100
$x_2$	0...7
$x_3$	6...10

Таблиця 2. Кодування факторів

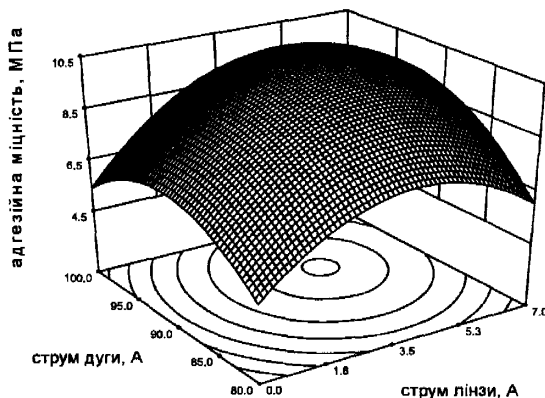
Рівні факторів	$I_d$ , А	$I_n$ , А	$L$ , мм
Нульовий $x_0$	90	3,5	8
Нижній $x_{-1}$	80	0	6
Верхній $x_{+1}$	100	7	10
Інтервал варіювання факторів $\delta_i$	10	3,5	2

Побудували матрицю центрального композиційного ротатабельного планування другого порядку для трьох факторів, яка складається з плану повного факторного експерименту типу  $2^3$ , шести дослідів в «зіркових точках» і шести дослідів в центрі плану. Відповідно до матриці планування досліджували 20 технологічних режимів нанесення покриттів. В результаті експериментальних досліджень були отримані характеристики міцності для досліджуваних покриттів внаслідок змінювання технологічних факторів відповідно до плану експерименту.

Після обробки результатів експерименту отримано математичну модель, що описує залежність адгезійної міцності від технологічних факторів. Виключення статистично незначущих коефіцієнтів дозволило отримати наступну математичну модель в кодованих значеннях:

$$y = 10,24 + 1,06x_1 + 0,74x_2 + 0,52x_1x_2 - 0,38x_1x_3 - 2,2x_1^2 - 1,8x_2^2$$

Адекватність отриманої моделі перевіряли за допомогою розрахункового критерію Фішера. Аналіз впливу технологічних режимів на адгезійну міцність дозволив визначити ті чинники, які мають на неї найбільший вплив. Найбільш значимими факторами є струми лінзи і дуги. Визначили вплив кожного з факторів на адгезійну міцність. Отриманій моделі в факторному просторі відповідає поверхня відгуку (рис. 1).



*Рис. 1. Поверхня відгуку в залежності від струмів дуги та лінзи при положенні соленоїда щодо сопла  $L = 8$  мм*

Аналіз результатів дозволив зробити висновок, що за технологічних режимів (струм лінзи – 4,5 А, струм дуги – 93 А, положення соленоїда відносно сопла – 6,8 мм) адгезійна міцність покриттів максимальна (10,5 МПа).

#### **Література:**

1. Vicent M., Bannier E., Moreno R. et al. Atmospheric plasma spraying coatings from alumina–titania feedstock comprising bimodal particle size distributions // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2013. – V. 33, Issues 15 – 16. – P. 3313 – 3324.
2. Żyrawski W., Gyrál A., Bokuvka O. et al. Microstructure and tribological properties of nanostructured and conventional plasma sprayed alumina–titania coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – V. 268. – P. 190 – 197.
3. Смирнов І.В., Долгов М.А., Черний А.В. та інш. Модифікування плазово-напиленних покриттів застосуванням плакованих та нанодисперсних порошоків // *Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ»*. – Луцьк, 2015. – Вип. № 51. – С. 199 – 204.
4. Букетов А.В., Долгов Н.А., Сапронов А.А., Нигалатий В.Д. Прочность сцепления при отрыве и сдвиге оксидных нанокompозитных покрытий, наполненных ультрадисперсным алмазом // *Проблемы прочности*. – 2018. – № 3. – С. 71 – 78.
5. Долгов Н.А., Смирнов И.В., Андрейцев А.Ю. Влияние режимов плазменного напыления нанокompозитного порошка  $Al_2O_3 - nanoTiO_2$  на прочность сцепления покрытий // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов*. Сб. научн. тр. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / редкол.: А.В.Белый (гл. ред.) – Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2018. – С. 83 – 92.