

УДК 621.793.72

DOI: 10.25140/2411-5363-2020-1(19)-32-41

Володимир Лебедев, Олександр Дубовий, Сергій Лой

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ (СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ) ТА ВЛАСТИВОСТІ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ПРИ ПЛАЗМОВОМУ НАПИЛЕННІ

Актуальність теми дослідження. Плазмове напилення для створення захисних покриттів у різних галузях машинобудування, ремонту та відновлення є достатньо поширеним, зокрема при покращенні показників стійкості в авіаційних та судових двигунах, турбінах завдяки відносній простоті, низькій вартості компонентів, отриманні високих результатів.

Постановка проблеми. Однак поряд з явними перевагами плазмових покриттів вони мають достатньо суттєві недоліки, зокрема ті, що напилюються як захист від впливу тепла й мають схильність до відшарування, зокрема при неефективних складових матеріалів для їх нанесення на вузли та деталі й недостатньо вивчені щодо властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відзначено, що напилення, яке проводиться за допомогою плазмового потоку, є дієвим технологічним засобом отримання надійних покриттів, у тому числі й теплозахисних, при цьому показано, що поруч з уже проведеними дослідженнями є проблеми, які потребують подальших пошукових робіт.

Мета роботи. Метою цієї роботи є визначення характеристик плазмових покриттів, розробка математичного опису одного з них для використання як одного з параметрів та порівняльний аналіз запропонованих та отриманих результатів, зокрема з тими, що вже існують на теперішній час.

Виклад основного матеріалу. Методами фізичних експериментів за вже існуючими методиками, спеціально розробленого математичного опису, отримання та детального опису й аналізу мікрошліфів покриттів при різних способах їх отримання встановлюються переваги покриттів, які нанесені способом плазмового напилення, при цьому підкреслено, що якісні покриття можуть бути отримані як в контрольованій, так не в контрольованій атмосфері.

Висновки відповідно до статті. Встановлено, що здебільшого на стійкість напиленого шару щодо теплових впливів впливає склад матеріалу для напилення, при цьому необхідно виконувати тришарове напилення різними за складом матеріалів для кожного шару при певних відстанях сопла плазмотрона від поверхні. Також необхідно враховувати потужність плазмотрона при виконанні процесу.

Ключові слова: плазмове напилення; склад матеріалу; стійкість; теплопровідність; опис; мікротвердість; параметри; аналіз; мікрошліфи.

Рис.: 8. Табл.: 1. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Покриття, які наносяться на поверхню вузлів та деталей за допомогою плазмових потоків з метою покращення їх здатності до протидії руйнівному впливу середовища та процесів, в яких напилені деталі використовуються, належать до досить уживаних у техніці та технології різного походження та умов експлуатації. Відносно мала товщина напиленого шару та високі адгезійні властивості разом із високими показниками стійкості дає можливість їх використання у відповідальних конструкціях, таких як, наприклад, авіаційні та судові двигуни, газотурбінні установки тощо [1–3].

Однією з основних функцій, які використовують при створенні напилених покриттів, є теплозахист вузлів та деталей, які працюють при дії підвищених теплових навантажень. У цьому зв'язку до матеріалів напилення, способів їх нанесення висуваються високі вимоги, зокрема, щодо стійкості.

Поняття стійкості, як показано в роботах [4; 5], є комплексним і включає в себе достатньо широкий спектр характеристик та методик їх визначення. Це, зокрема, стосується мікроструктур плазмового напилення різними складами для найбільш ефективного щодо стійкості до теплового впливу покриття.

Дуже складним є завдання вивчення умов формування покриттів, їх структури та властивостей, у тому числі фізичних, щодо виконання ними їхніх службових вимог.

Постановка проблеми. Враховуючи те, що ефективність теплозахисних плазмових покриттів певною мірою залежить від теплопровідності захисного шару одним з перших кроків є вивчення мікротвердості теплозахисних покриттів із використанням відповідного лабораторного устаткування та створення математичного опису їх теплопровідності. Ці параметри є одними з основних для визначення порівняльних характеристик покриттів різного походження, які суттєво впливають на якість покриттів.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Треба відзначити, що обґрунтовані та раціонально вибрані склад матеріалів, що транспортуються плазмовим потоком, режими роботи самого плазмотрона, розташування сопла відносно поверхні деталі, яка напилюється, є складовими для вибору технології напилення, яке забезпечить найбільш ефективно працюючий шар теплозахисного покриття в певних умовах роботи.

У зв'язку з вищенаведеним постає низка завдань – проблем, які треба, по-перше, виявити, а по-друге, виконати певні дослідження, які спрямовані на виявлення певних характеристик напиленого шару, які суттєво впливають на результати процесу плазмового напилення і які до цього часу були невідомі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Водночас у роботах [6–8] розглянуто деякі дослідження, які скеровані на виявлення напрямів підвищення якості напиленого шару. Це стосується вивчення напруженого стану напилених покриттів із розробкою відповідних рекомендацій та методик тощо.

Водночас досягнутого на сьогодні рівня знань щодо технологічного процесу плазмового напилення недостатньо для подальшого підвищення якості напилених виробів.

Сучасний стан методик вивчення, обладнання для проведення широкого дослідження стану напиленого шару [9–11] дає змогу виявити його нові властивості й на цій основі розробити нові техніко-технологічні рішення і запропонувати їх промисловості.

Наведені у вказаних роботах результати зокрема стосуються аналізу двох варіантів розроблених напилених плазмою ущільнень ПГ-10К-01+20%С(Ni) і ПГ-10К-01+20%BN(Ni), які за корозійно-ерозійною і термічною стійкістю перевершують серійні ущільнення і можуть працювати в продуктах згоряння палива ДС, при температурах до 1000...1050 °С.

Сучасний стан методик вивчення, обладнання для проведення широкого дослідження стану напиленого шару [12–13] дозволяє виявити його нові властивості й на цій основі розробити нові техніко-технологічні рішення і запропонувати їх промисловості.

Мета роботи. Виявити найбільш ефективні структури напиленого плазмою теплозахисного покриття на основі порівнювальних досліджень мікроструктур, фізичних випробувань та з використанням математичного опису теплопровідності, як показника якості та стійкості шарів плазмового напилення.

Виклад основного матеріалу. Дослідження та опис (математичний та отриманих мікрошліфів) властивостей та вибір ефективно працюючих шарів напилених плазмою покриттів проводили за декількома напрямками.

1. Визначення теплопровідності покриттів

Один із найбільш раціональних методів визначення властивостей теплозахисного покриття – це його теплопровідність, за рівнем якої можна судити про ефективність напиленого шару.

Фізичні дослідження теплопровідності були проведені на вимірнику теплопровідності типу ИТ-λ-400.

Експерименти з визначення теплопровідності покриттів при високих температурах проводили на модуляційному високотемпературному калориметрі КМВ – 2800 на спеціальних зразках, що мають форму диска.

З метою забезпечення одновимірності теплового потоку витримували співвідношення діаметр – товщина $D/\delta \geq 5$. У даних експериментах $D = 20$ мм; $\delta = 3$ мм.

Технічна характеристика КМВ-2800

1. Розміри досліджуваного зразка:

діаметр, мм 8 - 25

товщина, мм 0,6-3,0

2. Діапазон вимірювання питомої теплоємності C_p , Дж/(кг·К) 151-2240

3. Діапазон вимірювання теплопровідності, Вт/(м·К) 120-630

4. Діапазон температур нагріву зразків, К 300-2800

5. Граничний тиск у камері при температурі 2000 К, Па $6,7 \cdot 10^{-3}$

Принцип дії калориметра заснований на регулярному тепловому режимі третього роду, тобто в процесі, в якому просторово-часові зміни температури системи не залежать від початкових умов. У цьому калориметрі регулярний режим третього роду здійснюється шляхом періодичного нагрівання однієї поверхні необмеженої (у математичному сенсі) пластини кінцевої товщини. У разі нагрівання шляхом дії теплового потоку, що змінюється за гармонійним законом, рівняння теплопровідності має вигляд

$$\Delta^2 F - ix^2 F = 0, \quad (1)$$

причому

$$F = \frac{\theta}{\theta_0} = \omega \cdot M \cdot C_p; \quad (2)$$

$$X = \sqrt{\frac{\omega}{a}} \cdot L, \quad (3)$$

де θ – амплітуда коливань теплового потоку, який поглинається зразком, Дж;

M – маса зразка, кг;

C_p – питома теплоємність матеріалу зразка, кДж/(кг·град);

a – температуропровідність матеріалу зразка, м²/с;

L – товщина зразка, м;

ω – кругова частота модуляції теплового потоку, с⁻¹.

Функція F підкоряється таким граничним умовам:

- на стороні, протилежній тій, що нагрівається ($X = 0$)

$$\frac{dF}{d\left(\frac{X}{L}\right)} = 0; \quad (4)$$

- на стороні, що нагрівається ($X = L$)

$$\frac{dF}{d\left(\frac{X}{L}\right)} = X^2. \quad (5)$$

Вирішування рівняння теплопровідності (1) при граничних умовах (4) та (5) дає вираз для амплітуди коливань температури на стороні, протилежній тій, що нагрівається:

$$\theta = \theta_0 \frac{X}{\sqrt{A_s^2(X) + B_s^2(X)}} \quad (6)$$

та вираз для зсуву фаз між вказаними коливаннями та коливаннями теплового потоку:

$$\varphi = \frac{\pi}{4} + \operatorname{arctg} \frac{B_s(X)}{A_s(X)}, \quad (7)$$

де

$$A_s(X) = sh \frac{X}{\sqrt{2}} \cdot \cos \frac{X}{\sqrt{2}}; \quad (8)$$

$$B_s(X) = sh \frac{X}{\sqrt{2}} \cdot \sin \frac{X}{\sqrt{2}}. \quad (9)$$

Вирішування рівняння (7) відносно X дає вираз:

$$X^2 = -0,064 \cdot \varphi^4 + 1,04 \cdot \varphi^3 - 4,1 \cdot \varphi^2 + 12,2 \cdot \varphi - 12,68. \quad (10)$$

Таким чином, вимірювання в калориметрі зсуву фаз φ дозволяє при відомих величинах ω та L , використовуючи вираз (10) та (3), вичислити температуропровідність матеріалу зразка за формулою:

$$a = \frac{\omega \cdot L^2}{X^2}, \quad (11)$$

а вимірювання амплітуди коливань температури θ та амплітуди коливань теплового потоку дозволяє, використовуючи вирази (3) та (6) та з урахуванням зв'язку між теплофізичними властивостями

$$\lambda = \rho \cdot a \cdot C_p \quad (12)$$

дає можливість обчислити теплоємність та теплопровідність матеріалу зразка за формулами:

$$C_p = \frac{Q}{\theta} \cdot \frac{1}{M \cdot \omega} \cdot \frac{X}{\sqrt{A_s^2(X) + B_s^2(X)}} \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{Q}{\theta} \cdot \frac{L}{S} \cdot \frac{1}{\sqrt{A_s^2(X) + B_s^2(X)}}, \quad (14)$$

де S – площа поверхні зразка, що нагрівається, мм^2 .

Наведене визначення теплопровідності (6) та (7) справедливе за умови малого теплообміну та малих коливань температури, тобто

$$\frac{\theta}{T} \ll 1. \quad (15)$$

Вказаний метод забезпечує комплексне визначення теплофізичних властивостей матеріалу зразка, який досліджується і має можливість внутрішнього контролю результатів вимірювань завдяки наявності надмірної інформації.

Джерелом надмірної інформації є природна багатократна повторюваність спостережень.

Результати вимірювань при заданій температурі одержують у результаті повторних спостережень, кількість яких дорівнює фіксованій кількості періодів коливань температури зразка.

Іншим джерелом надмірної інформації є використання періодичного теплового потоку складної форми, що дає можливість отримання для кожного гармонійної складової з частотою ω_k групи параметрів Q_k , θ_k , $\Delta\varphi_k$. У цьому випадку кількість вимірювань теплофізичних властивостей матеріалу дорівнює кількості реєстрованих гармонік.

Перевагою методу плоских температурних хвиль є можливість обмежитися вимірюванням коливань температури всього лише в одній точці досліджуваного зразка.

Нагрів зразка здійснювали в циліндровій печі опору до заданої температури.

Потім, при ізотермічній витримці на зовнішню поверхню зразка подається модульований потік когерентного випромінювання безперервного лазера з частотою модуляції від 0, 5 до 15 Герц.

Енергія падаючого на зразок теплового променистого потоку визначається вимірником потужності. Під його дією в зразку збуджується температурна хвиля (коливання температури в цій точці зразка в часі).

Температура реєструється на тильній стороні (щодо випромінювача) поверхні зразка.

По зсуву фаз коливання температури на «гарячій» і «холодній» поверхні зразка може бути розрахована температуропровідність досліджуваного матеріалу (рівняння 11).

По загасанню амплітуди коливань, використовуючи вирази (12) і (13), розраховується теплопровідність і теплоємність.

На теплопровідність досліджувались зразки з плазмовим двошаровим покриттям (підшар: Co-Cr-Al-Y-Si, робочий шар: Co-Cr-Al-Y-Si +15% ZrO₂); зразки з плазмовим тришаровим покриттям (підшар: Co-Cr-Al-Y-Si, проміжний шар: Co-Cr-Al-Y-Si

+15%ZrO₂, робочий шар: ZrO₂) та для порівняння зразки з покриттям, отриманим електронно-променевим осадженням (робочий шар Co-Cr-Al-Y).

Результати проведених досліджень із використанням математичного апарату та фізичних експериментів наведені на рис. 1.

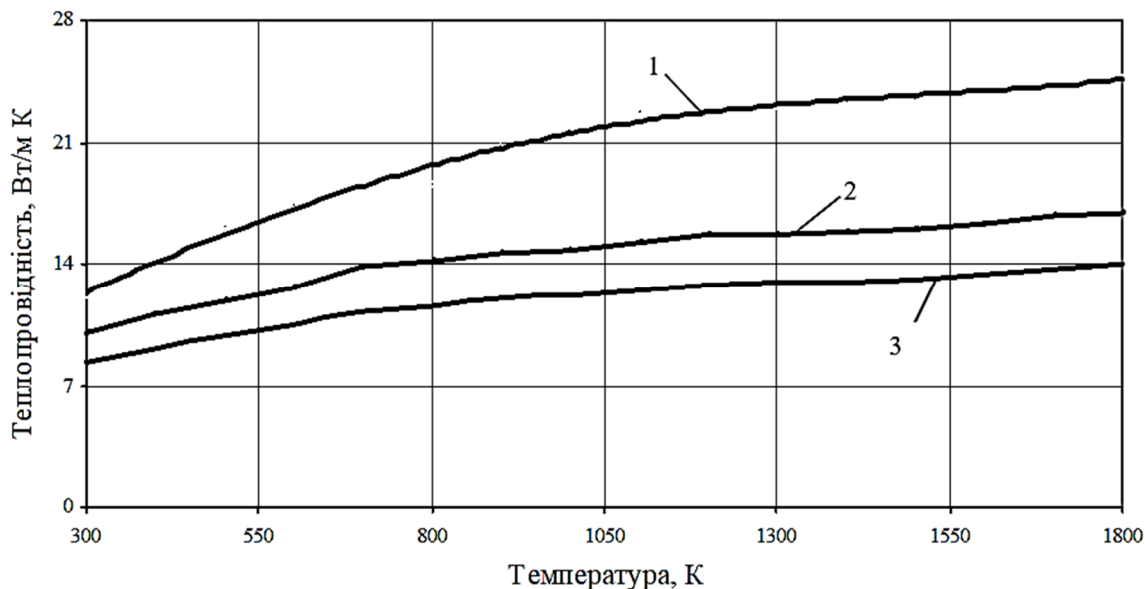


Рис. 1. Результати досліджень на теплопровідність:
1 – плазмове двошарове покриття; 2 – електронно-променеве покриття;
3 – плазмове тришарове покриття

2. Дослідження мікротвердості теплозахисних покриттів

Визначення мікротвердості покриттів виконувалося на приборі ПМТ-3, методом вдавлювання алмазної пірамідки з навантаженням 50 г.

Вимірювалася мікротвердість характерних фаз двошарового плазмового покриття, тришарового плазмового покриття з перехідним шаром та для порівняння покриття, отриманого електронно-променевим осадженням. Результати вимірювань наведені в таблиці.

Таблиця

Результати досліджень мікротвердості покриттів

Вид покриття	Фаза	Твердість (H ₅₀), МПа
Плазмове двошарове покриття: підшар: Co-Cr-Al-Y-Si робочий шар: Co-Cr-Al-Y-Si +15% ZrO ₂	сіра	4630
	темно сіра	4630
	світла	6310
	сіра	4630
Плазмове тришарове покриття: підшар: Co-Cr-Al-Y-Si проміжний шар: Co-Cr-Al-Y-Si +15% ZrO ₂ робочий шар: ZrO ₂	сіра	5210
	світла	5350
	сіра	6040
	світла	14200
Електронно-променеве покриття: робочий шар Co-Cr-Al-Y	світла	6084

Із наведених у таблиці даних можна зробити висновок, що найбільш високою мікротвердістю володіє плазмове тришарове покриття з проміжним шаром Co-Cr-Al-Y-Si +15%ZrO₂. Отже, зносостійкість такого покриття буде найбільш високою.

За результатами досліджень видно, що найменшою теплопровідністю володіє плазмове покриття з підшаром Co-Cr-Al-Y-Si, проміжним шаром Co-Cr-Al-Y-Si +15%ZrO₂, робочим шаром ZrO₂. Таким чином, найбільшого зниження температури лопатки можна досягти застосовуючи тришарові плазмові покриття.

3. Дослідження мікроструктур плазмових покриттів

Для визначення властивостей плазмових покриттів практичний інтерес представляють їх фазовий та структурний аналіз.

Фазовий склад початкових порошків, а також покриттів визначався методом рентгено-структурного аналізу в Ni-фільтрованому $Cu_{K\alpha}$ – випромінюванні на дифрактометрі ДРОН-3, який працює в режимі запису дифрактограми. У результаті встановлено, що в $ZrO_2 \cdot 5\% CaO$ знаходиться до 80-90 % кубічної фази, а в $ZrO_2 \cdot 7\% Y_2O_3$ не менше ніж 90 %, інше – моноклінна. Таким чином, додавання Y_2O_3 забезпечує більш повну стабілізацію діоксиду цирконія. Дослідження мікроструктури та розподілу елементів у поперечному перерізі покриття після термообробки здійснювали на рентгеноспектральному електрозондовому мікроаналізаторі – Superproba 733 фірми Jol (Японія) на мікрошліфах, які оброблено травителем Васильєва після електрополірування, при збільшенні в 1000 разів.

На рис. 2 та 3 представлені мікроструктури покриттів, які містять кераміку. Основа структури являє собою твердий розчин Ni - Co, оскільки відмічається підвищений вміст Ni і Co, в якому утворилися складні евтектичні структури.

У покриттях видно темні ділянки вздовж межі «підложка-покриття», вони особливо проявляються після випробувань на прожиг.

Випробування на прожиг (високотемпературну ерозійну стійкість) проводилися на устаткуванні й за методикою підприємства ДП НВКТ «Заря-Машпроект». Випробуванню піддавалися зразки типу пластин, розміром $3 \times 40 \times 115$ мм. Поверхня покриття шліфувана.

Випробування проводилися на стенді, що імітує експлуатацію покриття в суднових газотурбінних двигунах. Обдув пластин проводився з боку покриття потоком продуктів згорання важкого високосірчастого (до 2 % сірки) палива. Температура потоку 800-900 °C, швидкість – 250-300 м/с, час проведення досліджень – 200 годин.

Наявність темних ділянок може бути пояснена низькою якістю підготовки поверхні. У прикордонних ділянках підложки також спостерігається підвищений вміст Fe, C і Si на глибині до 10 мкм, що пояснюється дифузією останніх у підложку.

Наявність сплесків Zr в структурі на рис. 2 і відсутність останніх на рис. 3 свідчить про нерівномірний його розподіл. Відсутність сплесків Ca дозволяє судити про якісну стабілізацію порошку.

Отже, у результаті фазового і структурного аналізів встановлено наявність у рихлості графіту і кремнію, дифузійний перерозподіл Fe, C і Si в підложку на глибину до 10 мкм.

Також досліджені структури керамічних покриттів, покриттів на основі кобальту та тришарових покриттів із проміжним шаром, який являє собою суміш керамічного та металевих порошків.

На рис. 4 наведена мікроструктура плазмового тришарового покриття: підшар Ni-Cr-Al-Y-Ta, напилений у вакуумі; проміжний шар Ni-Cr-Al-Y-Ta + 10% $ZrO_2(7\% Y_2O_3)$, напилений у вакуумі; робочий шар $ZrO_2(7\% Y_2O_3)$, напилений на повітрі. Покриття напилене на пластину із матеріалу ЧС-104.

На рисунку 5 наведена мікроструктура плазмового покриття, отриманого напиленням у вакуумі порошкової суміші ПГ-10К-01 + 15% $ZrO_2(7\% Y_2O_3)$ на пластину із матеріалу ЧС-104. Товщина покриття до 0,1 мм.

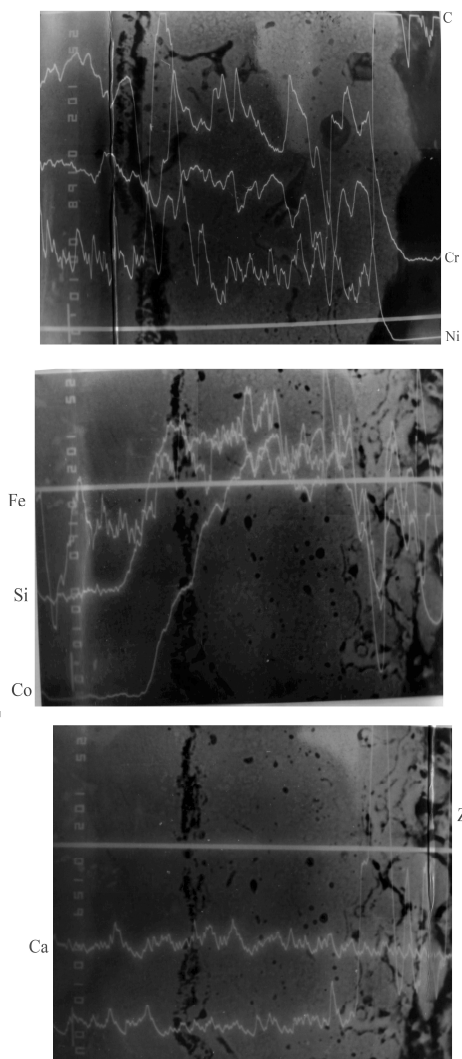


Рис. 2. Мікроструктура покриття складу: підшар ПГ-10К-01, робочий шар – ПГ-10К-01 + 30% ZrO₂ (CaO)

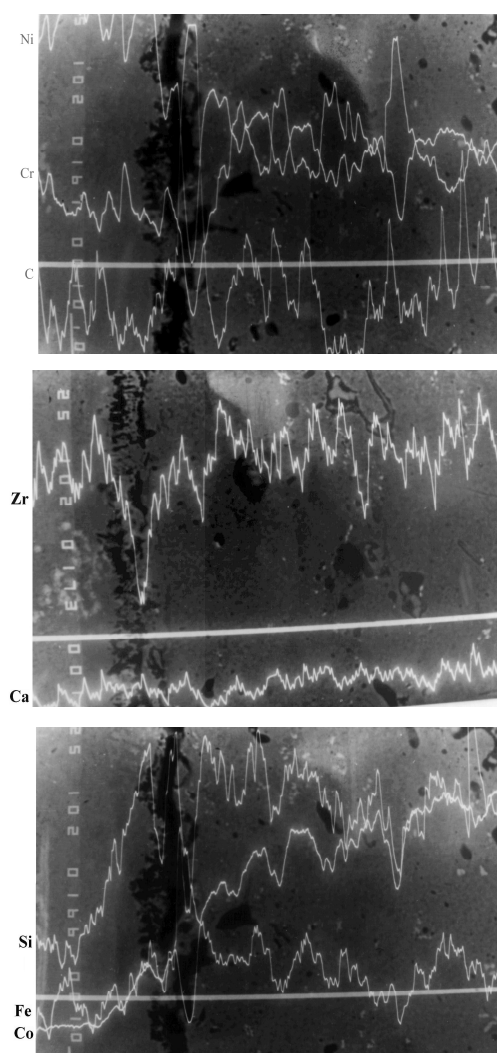


Рис. 3. Мікроструктура покриття складу: підшар ПГ-10К-01, робочий шар – ПГ-10К-01 + 30% ZrO₂ (CaO) після випробувань на прожиг

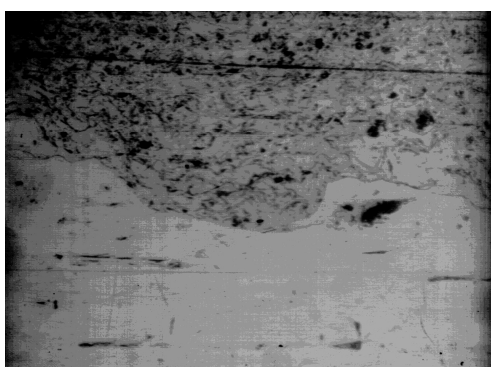


Рис. 4. Мікроструктура тришарового плазмового покриття

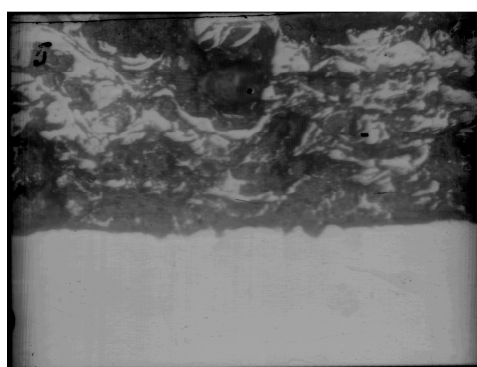


Рис. 5. Мікроструктура плазмового покриття ПГ-10К-01 + 15%ZrO₂(7%Y₂O₃)

На рис. 6 представлена мікроструктура плазмового покриття товщиною до 0,1 мм, отриманого напиленням порошку ПГ-10К-01 у вакуумі на пластину з матеріалу ЧС-104.



Рис. 6. Мікроструктура покриття ПГ-10К-01

Висновки відповідно до статті. На основі результатів проведених досліджень та розрахунків можна зробити такі висновки:

- з технологічного і економічного погляду процес плазмового напилення в контрольованій атмосфері є найбільш оптимальним і економічно вигідним процесом для нанесення теплозахисних покриттів на соплові лопатки газотурбінних установок;
- для гарного проплавлення часток порошку Co-Cr-Al-Y-Si розраховане значення потужності плазмотрону становить 23 кВт, а для часток порошку ZrO₂ -30 кВт;
- згідно з результатами розрахунку газодинамічних параметрів плазмового струменя оптимальна дистанція напилення лежить у межах 650...750 мм, а тиск розрідженого середовища – 5,5-6 кПа;
- дослідження на стійкість до теплових плазмових покриттів показали, що найбільшою стійкістю володіють тришарові покриття: підшар Co-Cr-Al-Y-Si, проміжний шар – Co-Cr-Al-Y-Si+15% ZrO₂, робочий шар – ZrO₂;
- найбільшу мікротвердість мають тришарові плазмові покриття;
- згідно з результатами дослідження теплопровідності покриттів можна зазначити, що найбільшого зниження температури лопатки можна досягти, застосовуючи тришарові плазмові покриття.

Список використаних джерел

1. Viňáš J., Greš M., Vaško T. Cladding of wear-resistant layers in metallurgy and engineering *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 862. P. 1-48. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.41>.
2. Pfender L. F. Trends in Thermal Plasma Technology. *Thermal Plasma Torches and Technologies*. Cambridge International Science Publishing, 2003. Vol. 1. Plasma Torches. Basic Studies and Design. P. 20–41.
3. Лой С. А., Дубовой А. Н. Плазменное напыление защитных покрытий на детали горячего тракта судовых турбин. *Збірник наукових праць УДМУТУ*. 1999. № 6 (366). С. 105–109.
4. Лой С. А., Дубовой А. Н. Повышение эффективности плазменного напыления защитных покрытий. *Збірник наукових праць УДМУТУ*. 1999. № 2 (362). С. 68–75.
5. ДСТУ ISO 9000:2015 Системы управления качеством. Основные положения и словарь терминов (ISO 9000:2015, IDT).
6. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на термостойкость / Лебедев В. А. и др. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2014. № 11. С. 8–12.

7. Лебедев В. А., Лой С. А., Ермолаев Г. В., Матвиенко М. В. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на отрыв. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2014. № 12. С. 8–12.
8. Нечаев Л. М. Изучение напряженного состояния в поверхностных слоях для оценки качества защитного покрытия. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. Вып. 8. Ч. 1. С. 294-297.
9. Guessasma S., Montavon G., Coddet C. Modeling of the APS Plasma Spray Process Using Artificial Neural Networks: Basis, Requirements and an Example *Computational Materials Science*. 2004. Vol. 29 (3). P. 315-333.
10. Зеленина Е. А., Лоскутов С. В., Ершов А. В. Метод расчета физико-механических характеристик плазменного покрытия на подложке при испытаниях образцов на изгиб. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. № 2. С. 107–110.
11. Kuzmin V. I. et al Comparison of Thermophysical and Optical Methods of Temperature Distribution Measurements in Flow of Plasmatron with Interelectrode Inserts. *Изв. вузов. Физика*. 2007. Т. 50, № 9. С. 85–88.
12. Лебедев В. А., Лой С. А. Моделирование стойкости плазменного напыления лопаток газотурбинных двигателей и установок. *Modern question of production and repair in industry and in transport: materials of the 19th International Scientific f-nd Technical Seminar (February 18-23, 2019, Kosice, Slovak Republic)* (pp. 97-99).
13. Новые возможности технологии плазменного напыления износостойких покрытий / Григорьев С. Н. и др. *Трение и износ*. 2013. Т. 34, № 3. С. 221–226.

References

1. Vinas, J., Gres, M., Vasko, T. (2016). Cladding of wear-resistant layer sinmetallurgy and engineering. *Materials Science Forum*, 862, 1-48. Retrieved from <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.41>.
2. Pfender, L. F. (2003). Trends in Thermal Plasma Technology. *Thermal Plasma Torches and Technologies*. Cambridge International Science Publishing. Vol. 1. Plasma Torches. Basic Studies and Design, 20-41.
3. Loi, S. A., Dubovoi, A. N. (1999). Plazmennoe napylenie zashitnykh pokrytij na detali gory acheho trakta sudovykh turbin [Plasma spraying of protective coatings on parts of the hot tract of ship turbines]. *Zbirnik naukovih prac UDMTU – Collection of scientific works of UDMTU*, 6 (366), 105–109 [in Russian].
4. Loi, S. A., Dubovoi, A. N. (1999). Povyshenie effektivnosti plazmennogo napyleniia zashitnykh pokrytij [Improving the efficiency of plasma spraying of protective coatings]. *Zbirnik naukovih prats UDMTU – Collection of scientific works of UDMTU*, 2 (362), 68–75 [in Russian].
5. DSTU ISO 9000:2015. Sistem yupravleniia kachestvom. Osnovnye polozheniia i slovar terminov (ISO 9000:2015, IDT) [DSTU ISO 9000:2015. Quality Management Systems. Fundamentals and Glossary (ISO 9000:2015, IDT)].
6. Lebedev, V. A., Ermolaev, G. V., Loi, S. A. et al. (2014). Napryazhennoe sostoianie napylennoho pokrytiia pri ispytaniakh na termostoikost [The stress state of the sprayed coating during heat resistance tests]. *Uprochniiaushie tehnologii i pokrytiia – Hardening technologies and coatings*, 11, 8-12 [in Russian].
7. Lebedev, V. A., Loi, S. A., Ermolaev, G. V., Matvienko M. V. (2014). Napriazhennoe sostoianie napylennoho pokrytiia pri ispytaniakh na otryv [The stress state of the sprayed coating during separation tests]. *Uprochniiaushie tehnologii i pokrytiia – Hardening technologies and coatings*, 12, 8-12 [in Russian].
8. Nechaev, L. M. (2017). Izuchenie napryazhennoho sostoianiia v poverhnostnykh sloiah dlia otsenki kachestva zashitnogo pokrytiia [The study of the stress state in the surface layers to assess the quality of the protective coating]. *IzvestiyaTulGU. Tehnicheskie nauki – Izvestiia TulGU. Technical science*, 8 (1), 294-297 [in Russian].
9. Guessasma, S., Montavon, G., Coddet, C. (2004). Modeling of the APS Plasma Spray Process Using Artificial Neural Networks: Basis, Requirements and an Example. *Computational Materials Science*, 29 (3), 315-333.
10. Zelenina, E. A., Loskutov, S. V., Ershov, A. V. (2016). Metod rascheta fiziko-mehaniicheskikh karakteristik plazmennogo pokrytiya na podlozhke pri ispytaniyah obrazcov na izgib [Method for calculating the physicomechanical characteristics of a plasma coating on a substrate during bending tests of samples]. *Novi materiali i tehnologii v metalurhii ta mashinobuduvanni – New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2, 107–110 [in Russian].

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

11. Kuzmin V. I. et al. (2007). Comparison of Thermophysical and Optical Methods of Temperature Distribution Measurements in Flow of Plasmatron with Interelectrode Inserts. *Izv. vuzov. Fizika – University News. Physics*, 50 (9), 85–88.

12. Lebedev, V. A., Loi, S. A. (2019). Modelirovanie stojkosti plazmennogo napyleniya lopatok gazo-turbinnnyh dvigatelej i ustanovok [Modeling the resistance of plasma spraying of blades of gas turbine engines and plants]. *Modern question of production and repair in industry and in transport: materials of the 19th International Scientific f-nd Technical Seminar (February 18-23, Kosice, Slovak Republic)* (pp. 97-99).

13. Grigorev, S. N., Kovalev, O. B., Kuzmin, V. I. et al. (2013). Novye vozmozhnosti tehnologii plazmennogo napyleniia iznosostoikikh pokrytii [New features of plasma spraying technology for wear-resistant coatings]. *Trenie i iznos – Friction and wear*, 34 (3), 221–226 [in Russian].

UDC 621.793.72

Volodymyr Lebediev, Oleksandr Dubovyi, Serhii Loi

FORMATION (STRUCTURING) FEATURES AND PROPERTIES OF HEAT PROTECTIVE COATINGS FOR PLASMA SPRAYING

Urgency of the research. Plasma spraying to create a coating protector in various fields of engineering, repair and refurbishment is widespread, particularly in improving the performance of aircraft and marine engines, turbines due to its relative simplicity, low cost of components, and high results.

Target setting. However, along with the obvious advantages of plasma coatings, they have significant disadvantages, in particular those that are sprayed as a protection against the effects of heat and have a tendency to peel off, in particular in case of ineffective constituent materials for their application to components and components and are not sufficiently studied for properties.

Actual scientific researches and issues analysis. It is noted that sputtering, which is carried out with the help of plasma flow is an effective technological means of obtaining reliable coatings, including thermal protection, and it is shown that, in addition to the already conducted studies, there are problems that need further exploration.

The research objective. The purpose of this work is to determine a number of characteristics of plasma coatings, to develop a mathematical description of one of them to use the quality of one of the parameters, and to comparatively analyze the proposed and obtained results, including those that already exist at present.

The statement of basic materials. Methods of physical experiments using existing methods, specially designed mathematical description, obtaining and detailed description and analysis of micro-grinding coatings in different ways of obtaining them set the advantages of coatings applied by the method of plasma spraying, while emphasizing that quality coatings can be obtained as in controlled, not in a controlled atmosphere.

Conclusions. It has been established that the stability of the deposited layer with respect to thermal influences is mainly influenced by the composition of the sputtering material, while it is necessary to perform a three-layer spraying of different material composition for each layer at certain distances of the plasma torch nozzle from the surface. It is also necessary to consider the power of the plasmatron when performing the process.

Keywords: plasma sputtering; material composition; stability; thermal conductivity; description; microhardness; parameters; analysis; micro-grinders.

Лебедєв Володимир Олександрович – доктор технічних наук, професор кафедри зварювання, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсонська філія (просп. Ушакова, 44, м. Херсон, 73022, Україна).

Lebediev Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Welding, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Kherson branch (44 Ushakova Av., 73022 Kherson, Ukraine).

E-mail: valpaton@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0391-6113>

Дубовий Олександр Миколайович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (просп. Героїв Сталінграду, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна).

Dubovyi Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department Material science and technology of metals, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov (9 Heroes of Stalingrad, 54025 Mykolaiv, Ukraine).

E-mail: oleksandr.dubovyj@nuos.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2843-1879>

Лой Сергій Анатолійович – доцент, старший викладач кафедри зварювання, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсонська філія (просп. Ушакова, 44, м. Херсон, 73022, Україна).

Loi Serhii – Associate Professor, senior lecturer of the department of welding, National University of Shipbuilding named by admiral Makarov, Kherson branch (44 Ushakova Av., 73022 Kherson, Ukraine).

E-mail: welding.kherson@nuos.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1936-6390>