

**Фурман В.К.,
Чорний А.В.,
Смирнов І.В.**

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна
E-mail: luga-sava@mail.ru

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОМІШОК НАНОПОРОШКУ ОКСИДУ АЛЮМІНІЮ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

УДК 621.793

Одним з ефективних способів керування структурою та підвищення експлуатаційних властивостей напиленних покриттів, вважається введення в матрицю наноконцентів. Досліджена зносостійкість, мікротвердість та стійкість до термоцикування плазмових покриттів на основі самофлюсівного порошку ПГ-CP2 з додавання до його складу нанодисперсного порошку оксиду алюмінію.

Встановлено, що в результаті додавання нанодисперсного оксиду алюмінію до складу самофлюсівного порошку марки ПГ-CP2 відбувається підвищення зносостійкості та мікротвердості плазмово-напиленних покриттів.

Ключові слова: знос, плазмово - напилені покриття, нанодисперсні порошки, мікроструктура, термоцикування.

Вступ

В даний час ефективним способом підвищення надійності і довговічності деталей і вузлів сучасної техніки, яка працює в умовах високих навантажень, сухого і граничного тертя, газової ерозії та абразивного зношування є нанесення захисних плазмових покриттів. Особливе місце серед них займають покриття, що забезпечують високий рівень зносостійкості. Внаслідок важких режимів навантаження деталі механізмів часто виходять з ладу через знос робочих поверхонь. Тому виникає нагальна потреба у підвищенні стійкості їх поверхневих шарів.

Дослідженнями багатьма вітчизняними та закордонними вченими за останні роки встановлено, що одним із основних факторів, які впливають на будову та властивості поверхневих шарів є введення до їх складу домішок у вигляді різних нанодисперсних порошоків карбідів, боридів, оксидів і нітридів перехідних металів [1, 2, 3]. Частинки нанопорошків, як модифікатори першого роду, забезпечують прискорене і більш рівномірне затвердіння металу в покритті, здійснюють певний вплив на розмір зерен та неметалевих включень. Так, у роботі [4] наведені результати випробувань на зношення наплавленого металу типу 40X13, 25XГ2С, 300X28М, модифікованого наноксидами алюмінію, титану та кремнію через зварювальну ванну за різними схемами введення. Показано, що введення у зварювальну ванну наноксидів призводить до помітного підвищення зносостійкості наплавленого металу у 5 - 7 разів, тоді як при застосуванні традиційних підходів на базі зміни системи легування тільки у 1,5 - 3 рази.

Можливість модифікації шару бронзи в процесі плазмово - порошкового наплавлення матеріалу ПГ-19М-01 нанорозмірними частинками Al_2O_3 показано в роботі [5]. Результатом введення нанорозмірних компонентів є зміна структури бронзи і значне підвищення твердості наплавленого шару.

Пошуку ефективних модифікаторів для отримання композиційних покриттів з антифрикційними властивостями присвячена робота [6], в якій після аналізу ефективності застосування ультрадисперсних оксидів зі структурою корунду та рутилу, вуглецю та нітриду бору, а також металів зі структурами типу вольфраму та магнію, робиться висновок про доцільність застосування, як модифікатора, оксиду алюмінію. В роботі [7] за допомогою високоенергетичного планетарного кулькового млина отримували наноконцентраційний порошок Al - Al_2O_3 з розміром частинок оксиду алюмінію 20 - 40 нм, що забезпечувало підвищення твердості в 1,5 - 2 рази та зносостійкості напиленних покриттів в середньому на 85 % - 91 %.

Тому введення в матрицю нанорозмірних порошоків дозволяє вирішити поставлену інженерну задачу шляхом створення покриттів зі спеціальними властивостями на поверхні деталі або виробу. Стає можливим виробництво деталей з більш дешевого матеріалу, або з меншою товщиною стінки, без використання дорогих і рідкісних матеріалів, при цьому навіть відносно невелике підвищення зносостійкості таких деталей дає значний економічний ефект.

Постановка проблеми

Мета роботи полягала в дослідженні зносостійкості плазмових покриттів на основі самофлюсівного порошку ПГ-CP2 з додавання до його складу нанодисперсного порошку оксиду алюмінію.

Результати досліджень

Для встановлення оптимальних значень вмісту наноконцентів у плазмових покриттях проводили випробування на зносостійкість та визначали їх мікротвердість. Процес зношування досліджували в

умовах сухого тертя на машині тертя СМЦ-2 за схемою ролик (контртіло - загартована сталь У8) – пластичний зразок з покриттям, при навантаженні 3 кг. Мікротвердість отриманих покриттів визначали вдавлюванням алмазної піраміди Віккерса з навантаженням 0,98 Н на мікротвердомірі ПМТ-3.

У якості наноконцентів застосовували оксид Al_2O_3 фракцією 50 - 60 нм, який вводився у концентраціях від 0,5 об.% до 5 об.%. Для приготування гомогенної порошкової суміші з мікро- та наночастинок застосовували механохімічну обробку в планетарному кульовому млині ХМ-2, з додатковим вакуумуванням робочих ємностей. Наночастинки оксиду алюмінію в умовах вакууму та механохімічної обробки переходять в активований стан і приєднуються до частинок інших елементів, утворюючи фізичні зв'язки між компонентами, що дозволяє під час подальшого плазмового напилення переносити їх в покриття.

Напилення порошоків здійснювали плазмотроном з частково винесеною дугою і додатковим обдуванням плазмового струменя концентричним потоком захисного газу. Струм дуги встановлювався в межах 80 - 90 А, напруга 35 - 50 В, продуктивність до 4 кг/год із загальною витратою плазмоутворюючого, транспортуючого і захисного газу (аргону) 5 л/хв. Завдяки таким конструктивним особливостям і технологічним режимам, характер течії плазмового струменя був близький до ламінарного, що забезпечує сприятливі умови для збереження та перенесення в покриття наночастинок.

Застосування нанодисперсного порошку оксиду алюмінію в поєднанні з частинками крупної

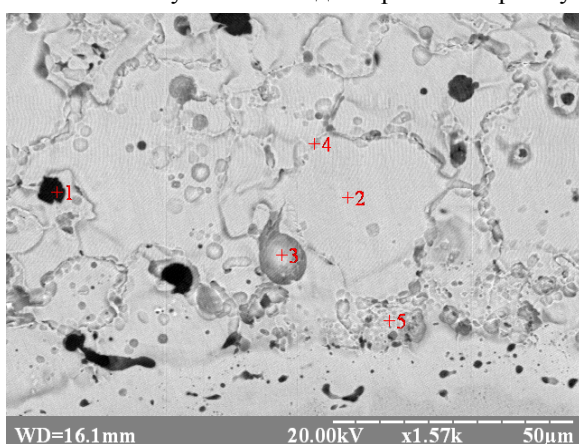


Рис. 1 – Мікроструктура плазмового покриття з порошку ПГ-СР2 + 0,2% Al_2O_3

фракції призводить до формування неоднорідної структури покриття. В частинці порошку, яка потрапляє на поверхню основи під час плазмового напилення зі швидкістю не більше 200 м/с відбуваються звичайні фізико-хімічні процеси, проте через наявність наночастинок умови формування покриттів змінюються. Деформація напилюваних частинок здійснюється при зниженій в'язкості та щільності, що може призводити до зменшення площі фізичного контакту та погіршення механічних властивостей зі збільшенням кількості нанопорошку в покритті. Під час кристалізації та охолодження в покритті також можуть відбуватись хімічні реакції і поліморфні перетворення під впливом наночастинок, що призводить до формування складної структури композиційного покриття, фазовий склад і властивості якого залежать від розвитку реакції, як в плазмовому потоці, так і на поверхні основи.

Для створення однорідної структури та підвищення адгезійної міцності зразки з напиленими покриттями піддавали опалвленню в муфельній печі при температурі $(1050 \pm 20)^\circ C$ впродовж 5 хв.

Хімічний склад плазмово-напиленних покриттів в окремих ділянках, досліджений за допомогою мікроаналізатора РЕМ 10бі, наведено в табл. 1, 2 та на рис. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад плазмового покриття на основі самофлюсівного порошку ПГ-СР2+0,2% Al_2O_3

Спектри	1	2	3	4	5
Елементи, %					
Ni	73,73	86,75	87	84,16	80,63
Fe	4,57	3,77	3,69	4,84	7,17
Cr	19,61	8,38	9,12	10,17	11,25
Si	1,16	0,98	0,15	0,79	0,76
Al	0,93	0,13	0,05	0,04	0,19

Проведений мікроструктурний аналіз покриттів (рис. 2) показав, що додаткове опалвлення призводить до впорядкованості структури покриття та підвищенню адгезійної міцності, характерної для утворення перехідних дифузійних зон, які найбільш наочно спостерігаються при травленні в хлористому ангідриті. Збільшення об'ємної долі наночастинок Al_2O_3 до 5% призводить до розтріскування покриття в результаті збільшення залишкових напружень.

Результати мікроаналізу свідчать про нерівномірний розподіл елементів в структурі покриття, зокрема, алюміній, в основному зосереджений у несплавлених ділянках покриття (спектр 1 рис. 1). На основі цих даних можна побічно констатувати про наявність та розподілення в покритті нанодисперсних частинок оксиду алюмінію.

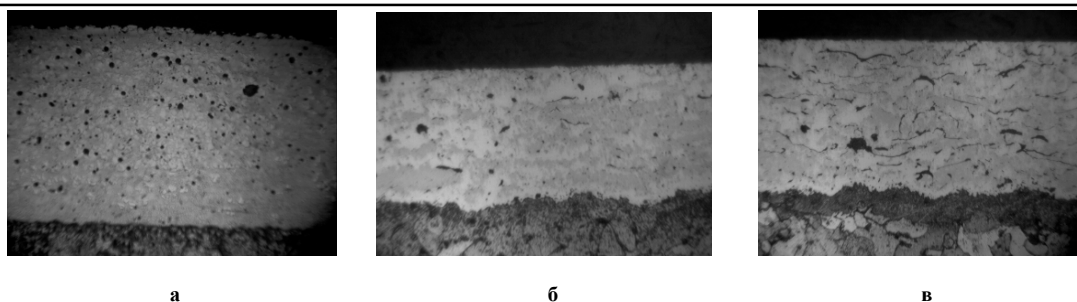


Рис. 2 – Мікроструктура плазмового покриття системи ПГ-СР2 + Al_2O_3 після оплавлення та травлення електролітичним способом:
 а – ПГ-СР2;
 б – ПГ-СР2 + 1 % Al_2O_3 ;
 в – ПГ-СР2 + 5 % Al_2O_3

Покриття на основі порошку ПГ-СР2 піддавались випробуванню на стійкість до термоцикування. Зразки з покриттям нагрівались в муфельній печі до температури $850 \pm 20^\circ\text{C}$, після чого різко охолджувалися у воді. Хімічний склад поверхні покриттів після рентгенофлуорисцентного аналізу показані в табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад плазмових покриттів на основі самофлюсівного порошку ПГ-СР2

Елементи, %	Ni	Cr	Si	Fe	Al	Ca	Cu	P	S
Покриття ПГ-СР2 (50 термоциклів)	$72,237 \pm 0,349$	$12,489 \pm 0,149$	$7,242 \pm 0,355$	$5,954 \pm 0,089$	-	$0,995 \pm 0,173$	$0,608 \pm 0,070$	$0,475 \pm 0,089$	-
ПГ-СР2+0,5% Al_2O_3 (50 термоциклів)	$65,621 \pm 0,564$	$15,531 \pm 0,152$	$7,927 \pm 0,407$	$5,779 \pm 0,065$	$1,819 \pm 0,700$	$1,672 \pm 0,087$	$0,479 \pm 0,029$	$0,775 \pm 0,076$	$0,398 \pm 0,117$
ПГ-СР2+1% Al_2O_3 (50 термоциклів)	$69,888 \pm 0,525$	$14,510 \pm 0,165$	$6,763 \pm 0,339$	$5,973 \pm 0,087$	$0,381 \pm 0,591$	$1,424 \pm 0,151$	$0,429 \pm 0,053$	$0,197 \pm 0,094$	$0,435 \pm 0,098$
ПГ-СР2+1,5% Al_2O_3	$73,240 \pm 0,489$	$15,259 \pm 0,154$	$2,804 \pm 0,248$	$6,046 \pm 0,082$	$1,110 \pm 0,561$	$0,239 \pm 0,106$	$0,259 \pm 0,053$	-	$1,044 \pm 0,115$

В результаті проведених випробувань можна зробити висновок, що всі покриття витримали 50 термоциклів без відшарування. При цьому, покриття без домішок нанопорошку, вже після перших 15 циклів мали потемніння, а після 50 циклів сильно окиснену і пошкоджену поверхню. Мікроаналіз покриття показав, що нанодобавки оксиду алюмінію при напыленні переносяться в покриття та не вигорають під час температурних випробувань (табл. 2).

Проведені випробування на зношування в умовах сухого тертя (рис. 3) показали, що діапазон оптимальних значень вмісту нанопорошку знаходиться в межах 0,2 - 1,0 об.% при застосуванні порошку на основі самофлюсівного сплаву системи Ni-Cr-B-Si (ПГ-СР2).

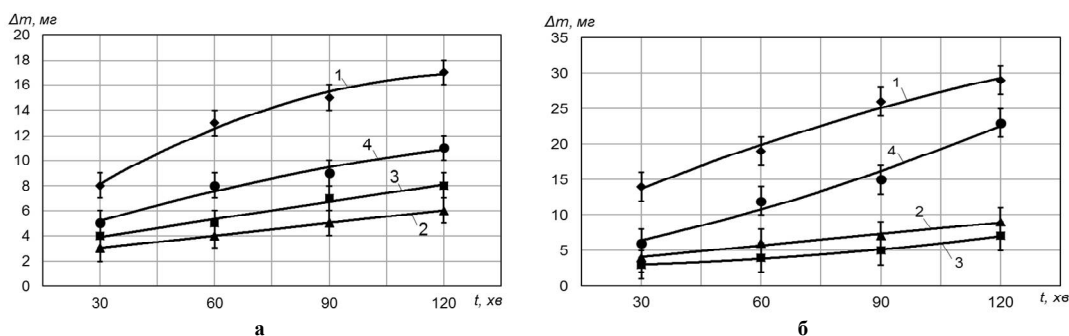
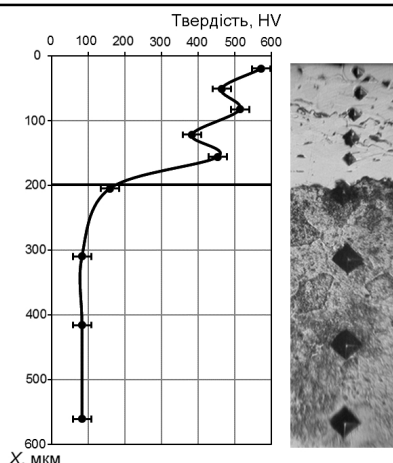


Рис. 4 – Кінетика зношування неоплавлених (а) та оплавлених (б) плазмових покриттів:
 1 – покриття з ПГ-СР2;
 2 – покриття з ПГ-СР2+0,2% Al_2O_3 ;
 3 – покриття з ПГ-СР2+1% Al_2O_3 ; 4 - покриття з ПГ-СР2+5% Al_2O_3

Визначення мікротвердості по всій товщині напыленого покриття, у зоні сплавлення покриття з основою та основі (рис. 5) показали, що мікротвердість напыленого шару незначно зменшується ближче до основи.

Рис. 5 – Мікротвердість плазмового покриття ПГ-СР2+1,5% Al₂O₃ та основи в залежності від відстані від поверхні

Результати вимірювання мікротвердості та відносної зносостійкості плазмових покриттів на основі порошку ПГ-СР2 з нанодобавками Al₂O₃ представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Мікротвердість та відносна зносостійкість покриттів

Покриття	Мікротвердість, ГПа	Відносна зносостійкість, %
ПГ-СР2	3,4	1
ПГ-СР2+0,2%Al ₂ O ₃	4,8	6
ПГ-СР2+1%Al ₂ O ₃	5,2	2,5
ПГ-СР2+1,5%Al ₂ O ₃	4,4	-
ПГ-СР2+5%Al ₂ O ₃	4,8	-

Залежність мікротвердості напилених шарів від збільшення концентрації нанорозмірних частинок - не виявлено (табл. 3). Максимальне значення мікротвердості встановлено при додаванні 1 об.% нанопорошку Al₂O₃, і становить 5,2 ГПа. Найкраща відносна зносостійкість 5-6% при 0,2% Al₂O₃ нанопорошку.

Висновки

Встановлено, що оптимальне значення введення нанодисперсного оксиду алюмінію до складу самофлюсівного порошку марки ПГ-СР2 становить 0,2 % - 1 % об'ємні долі. При цьому зростає мікротвердість на 25 - 40 % та відбувається підвищення зносостійкості плазмово-напилених покриттів у 2,5 - 3 рази.

Література

1. Борисов Ю.С. Получение порошков для газотермических покрытий методами механического легирования и механохимического синтеза / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Л.И. Адеева и др. // Сварочное производство. – 2010. – № 12. – С. 18 – 22.
2. Кулик А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков [Текст] / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин. - Л.: Машиностроение, 1985. – 197 с.
3. Смирнов І.В. Модифікування плазмово - напилених покриттів застосуванням плакованих та нанодисперсних порошків / І.В. Смирнов, М.А. Долгов, А.В. Черний, В.К. Фурман, І.А. Селіверстов // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк. – 2015. – Випуск № 51. – С. 199-204.
4. Кузнецов В.Д. Износостойкая наплавка с вводом в сварочную ванну нанопорошков / В.Д. Кузнецов, Д.В. Степанов // Автоматическая сварка. – 2015. – №5. – С.52-56.
5. Князьков К.В. Повышение свойств плазменно-порошковых покрытий модифицированием наноразмерными частицами / К.В. Князьков, М.В. Радченко, А.Н. Смирнов и др. // Ползуновский вестник. – 2012. – № 1. – С. 127 - 130.
6. Дерлугян П.Д. Поиск эффективных модификаторов для получения композиционных Ni-P покрытий с антифрикционными свойствами / П.Д. Дерлугян, В.В. Иванов, И.В. Иванов и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – №5. – С. 21 - 24.
7. Mazaheri Y. Development of Al356–Al₂O₃ nanocomposite coatings by high velocity oxy-fuel technique / Y. Mazaheri, F. Karimzadeh, M.H. Enayati // J. Mater. Sci. Technol. – 2013. – V.29, No9. – P. 813-820.

Поступила в редакцію 18.03.2016

Furman V.K, Chornyi A.V., Smirnov I.V. **Research of influence admixtures nanopowder oxide of aluminium is on wearproofness of plasma coatings.**

One of effective methods of management and increase of operating properties of sprayed coatings a structure, introduction is considered to the matrix of additions of nanocomponents. Investigational microhardness, wear and resistance to the thermocycling of plasma coatings on the basis of self-fluxing powder of ПІГ-CP2 from addition to his composition of nanodispersible powder of oxide of aluminium.

It was established that the addition of alumina nanodispersed of the self-fluxing powder brand ПІГ-CP2 is an increase in wear resistance and microhardness plasma-sprayed coatings.

Keywords: nanoparticle powders, plasma-sprayed coating, microstructure, the wear, thermal cycling.

References

1. Borisov Yu.S., Borisova A.L., Adeeva L.I. Poluchenie poroshkov dlya gazotermicheskikh pokritii metodami mehanicheskogo legirovaniya i mehanohi-micheskogo sinteza, Svarochnoe proizvodstvo, 2010, № 12, pp. 18 – 22.
2. Kulik A.Ya., Borisov Yu.S., Mnuhin A.S. Gazotermicheskoe napilenie kompozitsionnih poroshkov [Tekst], L.: Mashinostroenie, 1985. - 197 p.
3. Smirnov I.V., Dolgov M.A., Chernii A.V., Furman V.K., Seliverstov I.A. Modifikuvannya plazmovo-napilenih pokrittiv zastosuvannyam plakovanih ta nanodispersnih poroshkiv, Mizhvuzivs'kii zbirnik «Naukovi notatki», Luts'k, 2015, Vyp. № 51, pp. 199-204.
4. Kuznetsov V.D., Stepanov D.V. Iznosostoikaya naplavka s vvodom v svarochnuyu vannu nanoporoshkov, Avtomaticheskaya svarka, 2015, №5, pp.52-56.
5. Knyaz'kov K.V, Radchenko M.V., Smirnov A.N. Povishenie svoistv plazmenno-poroshkovih pokritii modifitsirovaniem nanorazmernimi chastitsami, Polzunovskii vestnik, 2012, № 1, pp. 127–130.
6. Derlugyan P.D., Ivanov V.V., Ivanov I.V. Poisk effektivnih modifikatorov dlya polucheniya kompozitsionnih Ni-P pokritii s antifriktsionnimi, Sovremennie naukoemkie tehnologii, 2013, №5, pp. 21 – 24.
7. Mazaheri Y., Karimzadeh F., Enayati M.H. Development of Al₃Si–Al₂O₃ nanocomposite coatings by high velocity oxy-fuel technique, J. Mater. Sci. Technol, 2013, V.29, No9, pp. 813-820.