

А.А. Карпеченко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-7543-4159

М.М. Бобров, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-9098-6912

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Миколаїв)

ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ З КОМПЛЕКСОМ ПІДВИЩЕНИХ ФІЗИКО- МЕХАНІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Досліджено можливість підвищення комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей плазмових покриттів з порошків марок ПГ-19М-01 і ПРХ18Н9 за рахунок електроімпульсного впливу на гетерофазний високотемпературний струмінь при напиленні і подальшій поверхневій пластичній деформації нанесених покриттів дробоструменевою обробкою. Показано, що дробоструменова обробка забезпечує формування зміцненого шару товщиною до 180...200 мкм, при цьому максимальний рівень мікротвердості спостерігається на глибині близько 60 мкм. Мікротвердість покриття з порошку ПГ-19М-01 в точці максимального зміцнення підвищується на 35%; сталевих покриттів з порошку ПР-Х18Н9 – на 48% в порівнянні зі станом після напилення. Проведено експериментальні дослідження впливу зазначеної обробки на міцність зчеплення і зносостійкість отриманих покриттів. Показано, що після проведення дробоструменевої обробки міцність зчеплення покриттів знижується на 10...15%, а зносостійкість підвищується на 32...38%.

Ключові слова: плазмові покриття, поверхнева пластична деформація, твердість, зносостійкість, міцність зчеплення.

Вступ.

Основна причина вичерпання ресурсу енергетичних агрегатів більшості ТЕЦ пов'язана з ерозією і контактним зносом різних поверхонь турбіни через високі навантаження, великі швидкості обертання і вплив швидкісних парогазових потоків із значним вмістом крапельної фази вологи на її останніх ступенях. В останні два десятиліття при проведенні планових ремонтних робіт відзначається стійка тенденція до збільшення інтенсивності зносу деталей парових турбін, особливо вхідних кромek робочих лопаток, що багато в чому обумовлено періодичною зміною режимів експлуатації ТЕЦ через необхідність використання більш економічних з них. Підвищення зносостійкості нових і відновлення зношених поверхонь деталей енергетичних машин в цілому забезпечує економію високоякісного металу, енергетичних і трудових ресурсів, а також приводить до раціонального використання природних ресурсів і забезпечує охорону навколишнього середовища. Одним із способів вирішення цієї проблеми є газотермічне напилення, що включає найбільш універсальний плазмовий метод, який широко використовується в даний час для відновлення і зміцнення деталей машин і механізмів. Однак, отримані традиційним методом плазмового напилення, такі покриття не завжди забезпечують достатній рівень фізико-механічних і експлуатаційних властивостей, зокрема необхідні значення твердості, міцності зчеплення з основою та зносостійкості.

У сучасних тенденціях розвитку технології плазмового напилення можна виділити ряд перспективних напрямків. Найбільш кардинальним є підвищення комплексу функціональних властивостей покриттів за рахунок їх наноструктурування. Отримують такі покриття напиленням агломерованих порошків з нанорозмірними частинками [1]. При цьому підготовлені порошки мікронних розмірів подають у високотемпературний плазмовий струмінь традиційним способом за рахунок використання транспортувального газу. Також для подачі ультрадисперсних порошків використовують суспензії [2], а сам процес їх нанесення отримав назву Suspension Plasma Spraying (SPS). Останнім часом запропоновано плазмову технологію нанесення покриттів з використанням прекурсорів, що містять дрібнодисперсні порошки керамік – Solution Precursor Plasma Spraying (SPPS). Процес складається з послідовного швидкого випаровування розчинника при вприскуванні прекурсора в плазмовий факел на зріз сопла плазмотрону, піролізу в плазмовому високотемпературному струмені і кристалізацією на підкладці [3]. Зазначені способи характеризуються складністю додаткового обладнання, необхідністю трудомісткої підготовки матеріалів, що напилюються. Досить перспективними вважаються способи формування нанокристалічного стану в поверхневому шарі за рахунок поверхневої пластичної деформації ультразвуковою ударною або електромеханічною обробкою [4, 5]. Окремий напрямок складають способи які спрямовані на створення

композиційних плазмових покриттів за рахунок застосування металевих матеріалів і наповнювачів (скло, полімер, кераміка, карбід) [6] або напилення плакованих порошків [7]. Багатообіцяючими вважаються способи, в яких використовується імпульсний вплив на процес напилення. Попередні дослідження [8] показали, що саме електроімпульсний вплив на гетерофазний високотемпературний потік при напиленні дозволяє значно підвищити міцність зчеплення з основою, щільність і твердість покриттів за рахунок зменшення середнього розміру частинок, що напилюються і збільшення їх швидкості. При цьому, додаткове обладнання є досить недорогим у виробництві і простим у застосуванні.

Актуальним є дослідження можливості комбінації декількох способів, що дозволяє значно підвищити фізико-механічні та експлуатаційні властивості функціональних плазмових покриттів і забезпечити їх необхідний рівень.

Основна частина.

Ціль та завдання дослідження. Дослідження можливості підвищення комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей функціональних плазмових покриттів, що використовуються в енергомашинобудуванні, за рахунок застосування електроімпульсного впливу на гетерофазний високотемпературний струмінь у процесі їх формування та подальшої поверхневої пластичної деформації.

Методика досліджень. Підготовку поверхні зразків, безпосередньо перед напиленням, здійснювали за допомогою установки струменево-абразивної обробки марки 026-7 "Ремдеталь". Як абразив використовували електрокорунд марки 7Б, шліфзерно номер 125.

Струменево-абразивну обробку поверхні, призначену під напилення, проводили на наступному технологічному режимі:

– Тиск стисненого повітря, МПа	0,4 – 0,6
– Відстань від зрізу сопла до оброблювальної поверхні, мм	100 – 150
– Діаметр сопла, мм	12
– Кут падіння струменя на оброблювальну поверхню, град	60 – 90
– Лінійна швидкість переміщення пістолета, мм/хв	50 – 400

Обробка проводилася в декілька проходів.

Контроль якості обробленої поверхні проводився візуально. Оброблена поверхня сталевих пластин і зразків, призначених для дослідження мікроструктури та визначення міцності зчеплення покриттів з основою відповідно, після струменево-абразивної обробки мала сірувато-матовий відтінок. Величина шорсткості обробленої поверхні склала $R_z = 38 - 75$ мкм.

Плазмові покриття отримували за допомогою установки «Київ-7», яка укомплектована плазмотроном ПУН-1 на наступному технологічному режимі: напруга на дузі 180 В, сила струму 150 А, дистанція напилювання 180 мм, витрати плазмотвірного газу 6,5 м³/год; тиск транспортувального газу 0,01 МПа. В якості плазмотвірного і транспортувального газу використовували стиснене повітря, а напилюваного матеріалу – порошок бронзи марки ПГ-19М-01 (ТУ 322-19-001-95) та порошок нержавіючої сталі марки ПР-Х18Н9 (ГОСТ 14086-69). Порошок перед напиленням прожарювали в сушильній шафі ШСВ 3,5.3.5.6/3,5 при температурі 150 °С протягом 3 годин. Ситову класифікацію застосованого порошку проводили на лабораторній установці моделі 029, використовуючи сітку номерів 004 і 008 за ГОСТ-ом 6613-86. В результаті просіювання виділено порошок фракцією 40...80 мкм. Для електроімпульсного впливу на гетерофазний високотемпературний плазмовий струмінь застосовували джерело високовольтних електричних імпульсів, яке підключали до розпилювача за прямою схемою. Напруга електричних імпульсів становила 5 кВ при частоті 5 кГц. Зазначені оптимальні режими плазмового напилення із застосуванням електроімпульсного впливу обґрунтовані в роботі [8].

Напилення плазмових покриттів здійснювали на пластини з вуглецевої якісної сталі марки 45 розміром 50x20x5 мм. Зазначена сталь призначена для виготовлення втулок, шестерень, колінчастих і розподільних валів, шпинделів, бандажів, циліндрів, штоків і т.п. Товщину покриттів визначали вимірами зразків до і після напилення штангенциркулем. Перед нанесенням покриттів поверхню, що підлягає напиленню, знежирювали технічним етанолом і піддавали струменево-абразивній обробці на вище зазначених технологічних режимах. Товщина нанесених покриттів не перевищувала 0,5...1,0 мм.

Дослідження мікроструктури отриманих плазмових покриттів здійснювали за допомогою оптичного металографічного мікроскопу ММУ-3. Знімки мікроструктур отримували цифровою камерою Delta Optical HDCE-20С, укомплектованою програмним забезпеченням Score Image 9.0. Отримані знімки аналізували в програмному металографічному комплексі МEGRAN. Вимірювання твердості за Віккерсом (HV₅) проводили з використанням твердоміра типу ТП, мікротвердості (H_{ц50}) – мікротвердомір ПМТ-3 при навантаженні на індентор 50 г (ДСТУ ISO 6507-4: 2008).

В якості методу поверхневої пластичної деформації (ППД) в роботі використовували дробоструминну обробку, вибір якої пояснюється її простотою реалізації, технологічністю та ефективністю даного способу. Для цього використовували також установку марки 026-7 «Ремдеталь». Як

робоче тіло використовували литу дріб з чавуну (ДЧЛ) номер 08 (ГОСТ 11964-81). Міцність зчеплення покриттів з основою визначали методом «втягування конусного штифта» на розривній машині УММ-5 на зразках-свідках. Їх також виготовляли з вуглецевої конструкційної якісної сталі 45. Для отримання результатів міцності зчеплення покриттів з основою напилення на одному і тому ж режимі виконували в один прохід на 5 зразків одночасно.

Зносостійкість визначали на машині тертя СМЦ-2 за схемою ролик-колодка при обмеженій подачі мастила зі швидкістю 30 крапель за хвилину. Як мастило використовували моторну оливу марки М10Г2К (ГОСТ 8581-75). Окружна швидкість обертання ролика становила 0,8 м/с, тиск 4 МПа. Заміри втрат маси проводили після приробки (90% сполученої поверхні) на вагах ТВЕ-0.21 через кожні 10 км шляху. Всього було знято 10 вимірів. Колодку і ролик також виготовляли зі сталі 45. Плазмове покриття після знежирення і струменево-абразивної обробки наносили на ролик. Колодку піддавали термічному поліпшенню: гартування здійснювали з температури 840 °С і витримці протягом 50 хв, охолодження в воді. Після гартування твердість колодки складала HRC 54...55. Потім проводили відпуск при температурі 550 °С з витримкою протягом 1 год і охолодженням на повітрі. Твердість після відпуску складала HRC 30...32.

Результати досліджень. Для отримання плазмових покриттів з підвищеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями їх формування здійснювали із застосуванням електроімпульсного впливу на гетерофазний високотемпературний струмінь. Для подальшого підвищення їх властивостей, отримані зразки з плазмовими покриттями піддавали дробоструйній обробці.

Тривалість дробоструйної обробки розраховували за формулою [10]:

$$t = \frac{7.6ld\sqrt{H}}{k_i v m_{dp} \sin^2 \alpha} \quad (1)$$

де l – відстань від сопла до оброблювальної поверхні, мм; d – діаметр дробу, мм; H – твердість оброблювального матеріалу; k_i – коефіцієнт, який враховує кількість необхідних ударів для забезпечення зміцнення ($k_i = 0,8$); v – швидкість часток дробу, м/с; m_{dp} – витрати дробу, кг/хв; α – кут між потоком дробу та оброблювальною поверхнею, град.

Тривалість дробоструменевої обробки зразків з плазмовими покриттями становила 1 хв. Необхідність визначення часу пов'язана з тим, що більш тривалий наклеп знижує твердість поверхні за рахунок появи великої кількості дефектів, які сприяють передчасному руйнуванню покриття. Глибину наклепаного шару встановлювали шляхом визначення значень мікротвердості плазмового покриття на поперечних шліфах (рис.1). Результати визначення значень мікротвердості наведені на рис. 2.

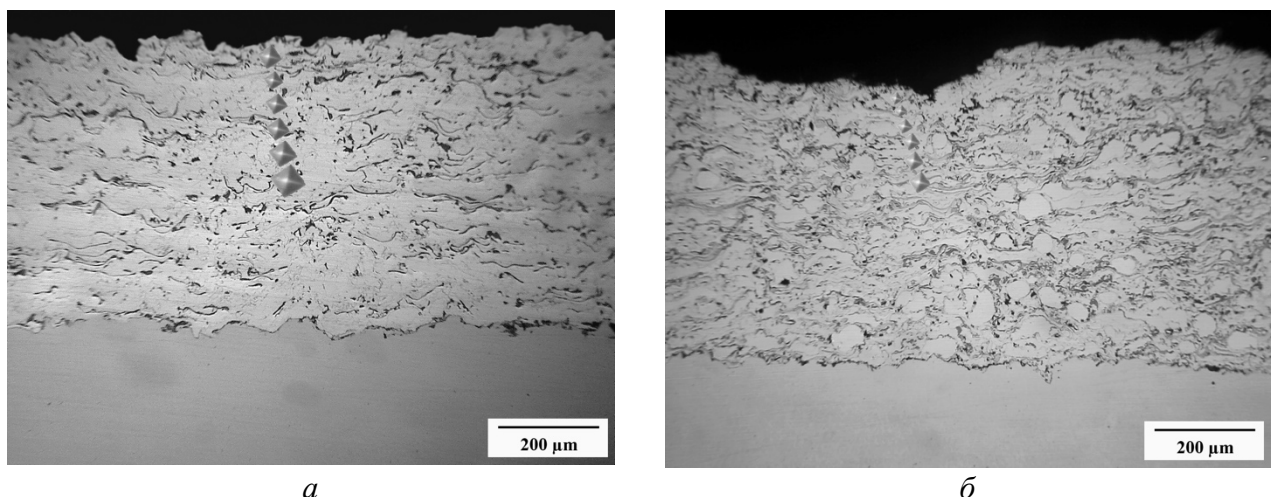


Рисунок 1 – Розмір відбитків індентору в залежності від глибини наклепаного шару плазмового покриття: отриманого з порошків марок ПГ-19М-01 (а) та ПР-Х18Н9 (б)

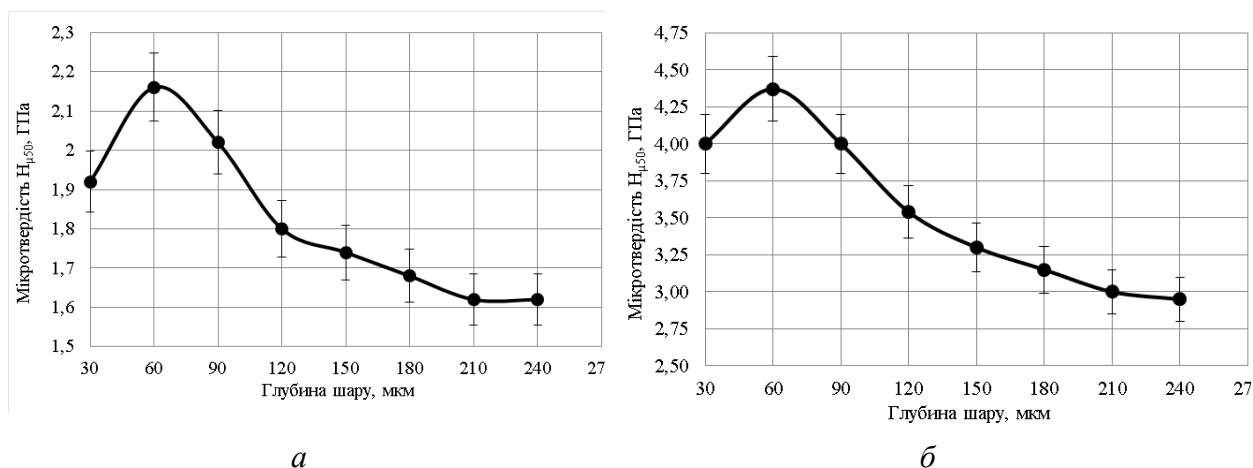


Рисунок 2 – Залежність значень мікротвердості від глибини наклепаного шару плазмових покриттів, отриманих з порошків марок: ПГ-19М-01 (а) та ПР-Х18Н9 (б)

Згідно з наведеними даними, у всіх випадках максимальні значення мікротвердості визначено не поблизу поверхневого шару плазмового покриття (рис.1), а на глибині приблизно 60 μm від місця дробоструменевої обробки. Пояснюється це тим, що в місці удару дробу виникає локальний нагрів поверхневого шару, який і приводить до зниження наклепу тонких приповерхневих шарів, а зона максимального зміцнення зміщується до підповерхневого шару. Мікротвердість покриття отриманого з порошку ПГ-19М-01 в точці максимального зміцнення підвищується з 1,6 ГПа до 2,16 ГПа (+ 35%); нержавіючих сталевих покриттів з порошку марки ПР-Х18Н9 з 2,95 ГПа до 4,37 ГПа (+ 48%). Більший ефект підвищення твердості покриттів з нержавіючої сталі пояснюється їх здатністю до деформаційного зміцнення за рахунок формування α' -фази мартенситного типу [10]. Глибина наклепаного шару складає 180...200 μm , після чого мікротвердість приймає значення, які відповідають необробленому матеріалу покриття.

В літературі [11], присвяченій питанням дослідження когезійної і адгезійної міцності газотермічних покриттів, основна увага приділена останньої. Це, очевидно, пов'язано з тим, що при експлуатації газотермічних покриттів має місце їх відшарування від матеріалу основи і тому сформувалося переконання, що адгезійна міцність є лімітуючим параметром. У даній роботі для визначення міцності зчеплення з металевою основою використовували штифтовий метод, оскільки він дозволяє оперативно проводити випробування безпосередньо після нанесення покриття на зразки. Результати визначення міцності зчеплення плазмових покриттів зі сталеву основою представлені на рис. 3.

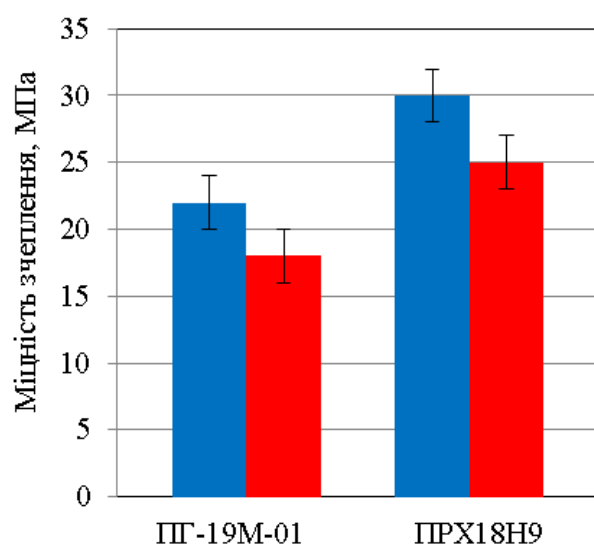


Рисунок 3 – Результати визначення міцності зчеплення плазмових покриттів зі сталеву основою:
 ■ – після напилання; ■ – після напилання и ППД

Згідно з отриманими даними, після проведення дробоструменевої обробки міцність зчеплення покриттів зі сталеву основою знижується на 10...15% у порівнянні зі станом після напилення, ймовірно, за рахунок виникнення додаткових внутрішніх напружень в поверхневих шарах плазмового покриття.

На рис. 4 наведені результати випробувань на зносостійкість досліджуваних плазмових покриттів.

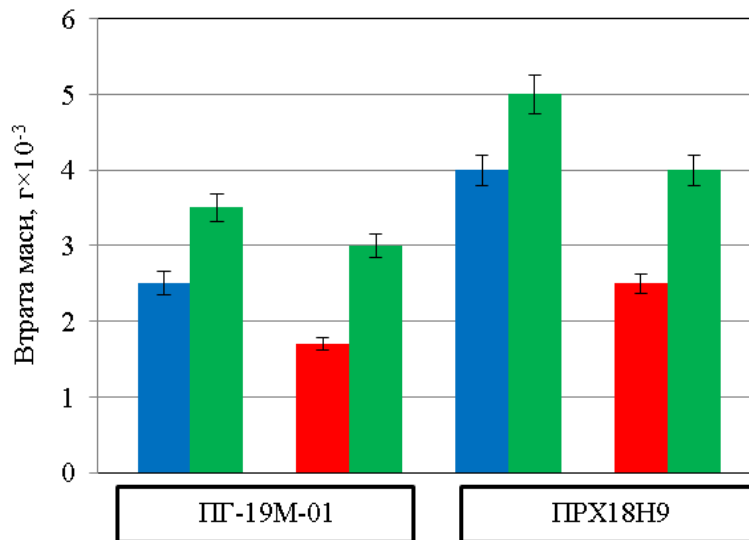


Рисунок 4 – Результати визначення зносостійкості плазмових покриттів:

■ - після напилення; ■ – після напилення і ППД; ■ – зносостійкість контртіла (колодки)

Згідно з наведеними даними, дробоструминна обробка забезпечує підвищення зносостійкості на 32% для покриттів, отриманих з порошку марки ПГ-19М-01; на 38% для покриттів, сформованих з порошку нержавіючої сталі марки ПР-Х18Н9. Ефект збільшення зносостійкості покриттів корелюється з ефектом підвищення їх твердості. Знос контртіла обернено пропорційний зносу покриття: чим більша твердість і зносостійкість покриття, тим більше зношується контртіло, але остання характеристика зростає менш інтенсивно, ніж твердість покриття.

Висновки. Досліджено можливість підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей плазмових покриттів отриманих з порошків марок ПГ-19М-01 і ПРХ18Н9 за рахунок електроімпульсного впливу на гетерофазний високотемпературний струмінь при напиленні і подальшої їх ППД дробоструменевої обробки. Показано, що дробоструменева обробка забезпечує формування зміцненого шару завтовшки до 180...200 мкм, при цьому максимальний рівень мікротвердості спостерігається на глибині близько 60 мкм. Встановлено, що мікротвердість плазмового покриття отриманого з порошку марки ПГ-19М-01 в точці максимального зміцнення підвищується з 1,6 ГПа до 2,16 ГПа; сталевих покриттів з порошку нержавіючої сталі марки ПР-Х18Н9 з 2,95 ГПа до 4,37 ГПа. При цьому спостерігається зниження міцності зчеплення зі сталеву основою на 10...15%, що пояснюється виникненням додаткових внутрішніх напружень в поверхневих шарах плазмових покриттів, але при цьому спостерігається підвищення їх зносостійкості на 32...38% після ППД в порівнянні з покриттями, нанесеними з використанням електроімпульсного впливу на високотемпературний гетерофазний струмінь. Запропоновані плазмові покриття рекомендовано застосовувати в енергетичному машинобудуванні в якості зносостійких антикорозійних матеріалів у зв'язку зі збільшенням щільності та зміцненням їх поверхневого шару.

Список використаної літератури

1. Gao Y. A novel plasma-sprayed nanostructured coating with agglomerated-unsintered feedstock / Y. Gao, Y. Zhao, D. Yang, J. Gao // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2016. – Vol. 25, pp. 291-300. doi: 10.1007/s11666-015-0340-1.
2. Qiu C. Manufacturing process of nanostructured alumina coatings by suspension plasma spraying / C. Qiu, Y. Chen // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2009. – Vol. 18, pp. 272-283. doi: 10.1007/s11666-009-9295-4.
3. Lohia A. Deposition of nanocomposite coatings employing a hybrid APS + SPPS technique / A. Lohia, G. Sivakumar, M. Ramakrishna // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2014. – Vol. 23, pp. 1054-1064. doi: 10.1007/s11666-014-0071-8.

4. Васильєв М.О. Синтез деформаційних наноккомпозитів на поверхні алюмінієвого сплаву Д16 за допомогою ультразвукового ударного оброблення / М.О. Васильєв, Б. М. Мордюк, С. І. Сидоренко // Металофізика та новітні технології. – 2016. - №4 - С.545-563. doi: 10.15407/mfint.38.04.0545.

5. Ivannikov A.Y. The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma-sprayed Fe-30Cr coating / Journal of Thermal Spray Technology. – 2019. – Vol. 28, pp. 883-892. doi: 10.1007/s11666-019-00868-y.

6. Mal'tseva S. V. Structure and properties of modified plasma-sprayed composite coatings on a titanium base / S. V. Mal'tseva, I. P. Mel'nikova, A. V. Lyasnikova, A. M. Zaharevich // Mechanics of Composite Materials. – 2016. – Vol. 52, pp. 531-534. doi:10.1007/s11029-016-9603-2.

7. Borisov Y.S. High-velocity air plasma spraying of (Ti, Cr)C–32 wt.% Ni clad powder / Y.S. Borisov, A.L. Borisova, M.V. Kolomytsev // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2017. – Vol. 56, pp. 305-315. doi: 10.1007/s11106-017-9898-0.

8. Dubovyi O.M. Perspectives of improving physical and mechanical properties of thermal coatings by electropulse exposure / O.M. Dubovyi, O.V. Chechel, M.M. Bobrov, Yu. Ye. Nedelko // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2017. – Vol. 1, pp. 82-87.

9. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

10. Бородулин Г.М. Нержавеющая сталь / Г.М. Бородулин, Е.И. Мошкевич. – М.: Металлургия, 1973. – 319 с.

11. Mellali M. Influence of substrate roughness and temperature on the adhesion/cohesion of alumina coatings / M. Mellali, P. Fauchais, A. Grimaud // Surface and Coatings Technology. – 1996. – Vol. 1, pp. 275-286. doi: 10.1016/0257-8972(95)02540-5.

A. Karpechenko, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, **ORCID** 0000-0002-7543-4159

M. Bobrov, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID** 0000-0002-9098-6912

Admiral Makarov National university of Shipbuilding

FORMATION OF FUNCTIONAL PLASMA SPRAYED COATINGS WITH COMPLEX OF IMPROVED PHYSICAL, MECHANICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES

The possibility of increasing the complex of physical, mechanical and operational properties of plasma sprayed coatings from powders of the PG-19M-01 and PRH18N9 grades due to the electric pulse effect on the heterophase high-temperature flow during spraying and next surface plastic deformation of the deposited coatings by shot blasting has been investigated. It is shown that shot blasting provides the formation of a hardening layer with a thickness of up to 180...200 μm, while the maximum level of microhardness is observed at a depth of about 60 μm. The microhardness of the coating from PG-19M-01 powder at the point of maximum hardening increases by 35%; steel coatings from PR-HI18N9 powder – by 48% compared to the state after spraying. Experimental studies of the effect of this treatment on the bond strength and wear resistance of the obtained coatings have been carried out. It is shown that after shot-blasting the bond strength of the coatings decreases by 10...15%, and the wear resistance increases by 32...38%.

Keywords: plasma sprayed coatings, surface plastic deformation, hardness, wear resistance, bond strength.

REFERENCES

1. Y. Gao, Y. Zhao, D. Yang, J. Gao, “A novel plasma-sprayed nanostructured coating with agglomerated-unsintered feedstock”, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 25, pp. 291-300, 2016. doi: 10.1007/s11666-015-0340-1.

2. C. Qiu, Y. Chen, “Manufacturing process of nanostructured alumina coatings by suspension plasma spraying”, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 18, pp. 272-283, 2009. doi: 10.1007/s11666-009-9295-4.

3.A. Lohia, G. Sivakumar, M. Ramakrishna, “Deposition of nanocomposite coatings employing a hybrid APS + SPPS technique”, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 23, pp. 1054-1064, 2014. doi: 10.1007/s11666-014-0071-8.

4. M.O. Vasyliiev, B. M. Mordiyuk, S. I. Sydorenko, “Syntez deformatsiinykh nanokompozitiv na poverkhni aliuminiiovoho splavu D16 za dopomohoiu ultrazvukovoho udarnoho obrobлення”, Metalofizyka ta novitni tekhnolohii, vol. 4, pp. 545-563. 2016. doi: 10.15407/mfint.38.04.0545.

5. A.Y. Ivannikov, V.I. Kalita, D.I. Komlev, “The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma-sprayed Fe-30Cr coating”, Journal of Thermal Spray Technology, vol. 28, pp. 883-892, 2019. doi: 10.1007/s11666-019-00868-y.

6. S. V. Mal'tseva, I. P. Mel'nikova, A. V. Lyasnikova, A. M. Zaharevich, "Structure and properties of modified plasma-sprayed composite coatings on a titanium base", *Mechanics of Composite Materials*, vol. 52, pp. 531-534, 2016. doi:10.1007/s11029-016-9603-2.

7. Y.S. Borisov, A.L. Borisova, M.V. Kolomytsev, "High-velocity air plasma spraying of (Ti, Cr)C-32 wt.% Ni clad powder", *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 56, pp. 305-315, 2017. doi: 10.1007/s11106-017-9898-0.

8. O.M. Dubovyi, O.V. Chechel, M.M. Bobrov, Yu. Ye. Nedelko, "Perspectives of improving physical and mechanical properties of thermal coatings by electropulse exposure", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 1, pp. 82-87, 2017.

9. L. G. Odintsov, *Uprochnenie i Otdelka Detaley Poverkhnostnym Plasticheskim Deformirovaniem: Spravochnik* [Hardening and Conditioning of Parts by Surface Plastic Deformation: Handbook], Mashinostroenie, Moscow, Russia, 1987, p. 328.

10. G. M. Borodulin, E. I. Moshkevich, *Nerzhaveyushchaya Stal* [Stainless Steel], Metallurgiya, Moscow, Russia, 1973, p. 319.

11. M. Mellali, P. Fauchais, A. Grimaud, "Influence of substrate roughness and temperature on the adhesion/cohesion of alumina coatings", *Surface and Coatings Technology*, vol. 81, pp. 275-286, 1996. doi: 10.1016/0257-8972(95)02540-5.

Надійшла 01.04.2021

Received 01.04.2021