

ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВИХ ТА ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОКОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ СТАЛЕЙ У АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ*

В.І. Похмурський¹, М.С. Хома¹, І.О. Рябцев², Є.Ф. Перепльотчиков², В.А. Винар¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: khomams@gmail.com

²ІЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Досліджено корозійні та трибокорозійні характеристики плазмово-порошкових та електродугових покриттів на трубних сталях у хлоридвмісних середовищах з сірководнем та амонієм. Встановлено, що корозійна стійкість покриттів, нанесених методом плазмово-порошкового наплавлення і електродугового напилення, зростає зі збільшенням рН розчину. Показано, що найстійкішими до корозійно-механічного руйнування у даних середовищах виявилися покриття, які були наплавлені плазмовим методом порошком сплаву 08X17H35C3P. Встановлено, що електродугові покриття, напилені з порошкового дроту 75X19P3C2, знижують густину струму корозії вуглецевих сталей у сірководневому розчині на 40 %. У цьому ж середовищі на поверхні покриттів формуються сульфідні сполуки, які при терті виконують роль твердої змазки, що сприяє зниженню зносу матеріалу на 40...42 %. Електродугові покриття з порошкового дроту 75X19P3C2 запропоновано використовувати для відновлення пошкоджених поверхонь деталей та їх захисту від корозійно-абразивного зношування у сірководневих середовищах. Бібліогр. 14, табл. 5, рис. 4.

Ключові слова: плазмово-порошкове наплавлення, електродугові покриття, корозія, трибокорозія, хлориди, сірководень, амоній

Корозійно-механічне зношування виникає при терті деталей в агресивних середовищах і часто є причиною зниження довговічності багатьох деталей обладнання та споруд у нафтовій, газовій, нафтохімічній, комунальній промисловостях, наприклад, запірних елементів арматури, торцевих ущільнень, підшипників ковзання тощо [1–3].

До основних методів відновлення та підвищення працездатності поверхонь деталей, які експлуатуються в умовах корозійно-механічного зношування, належить плазмово-порошкове наплавлення [4, 5] та електродугове напилення захисних покриттів з порошкових дротів [3, 6–8].

Плазмово-порошкове наплавлення використовують для покращення фізико-механічних характеристик робочих поверхонь та реставрації зношених деталей. Зокрема даним способом наплавляють поверхні деталей запірної арматури: шиберів, сідел, штоків та інших деталей нафтогазовидобувного обладнання [4–10]. Використання порошків на основі Ni, Fe, Cr, B, Si тощо дозволяє регулювати хімічний склад наплавлених шарів і розширює спектр їх функціональних властивостей [6–8].

Електродугова металізація (ЕДМ) з використанням порошкових дротів – один з поширених методів нанесення зносостійких покриттів, вартість

яких у 2...3 рази нижче за плазмово-порошкове наплавлення [6]. Під час плавлення порошкових дротів в електричній дузі формується розплав, який при диспергуванні на краплини формує електродугове покриття з високою структурною гетерогенністю. Поєднання твердих і м'яких складових забезпечує їх високу зносостійкість. Для покращення корозійної та трибокорозійної стійкості покриттів до шихти порошкових дротів додають сполуки хрому, для зниження пористості напиленого шару вводять FeMn та FeSi, які утворюють легкоплавку евтектику. Комплексні дослідження корозійних та трибокорозійних властивостей покриттів з різним хімічним складом, отриманих плазмово-порошковим наплавленням та електродуговим напиленням з порошкових матеріалів, мають важливе значення для відновлення працездатності та підвищення ресурсу обладнання, що експлуатується у корозійно-активних середовищах за наявності сірководню, хлоридів та аміаку.

Мета даної роботи – дослідити можливість застосування плазмово-порошкових та електродугових покриттів для відновлення працездатності та підвищення ресурсу вузлів тертя в обладнанні нафтогазовидобувної, переробної та комунальної галузей, що експлуатуються в корозійних середовищах.

Похмурський В.І. – <http://orcid.org/0000-0003-1042-829X>, Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Хома М.С. – <https://orcid.org/0000-0002-0951-3975>, Винар В.А. – <http://orcid.org/0000-0002-5314-7052>

© В.І. Похмурський, М.С. Хома, І.О. Рябцев, Є.Ф. Перепльотчиков, В.А. Винар, 2020

* Робота виконана в рамках комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу та безпечної експлуатації конструкцій, споруд і машин» з участю В.М. Гвоздецького, Х.Б. Василіва, Н.Б. Рацької, В.Р. Івашківа, Є.М. Рудковського у 2016–2020 рр.

Таблиця 1. Хімічний склад порошків для плазмово-порошкового наплавлення, мас. %

Марка порошку	C	Cr	Si	Mn	Ni	Fe	B
ПР-06X17Н80СЗРЗ	0,6...0,9	15...17	2,7...3,7	–	Основа	≤5,0	2,3...3,0
ПР-01X17Н8С6Г	0,05...0,12	15...18	4,8...6,4	1...2	7...9	Основа	–
ПР-08X17Н35СЗРЗ	0,8	18	3,5	≤1,0	35	35	2,5

Методика дослідження. Плазмово-порошкове наплавлення, технологія якого розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, виконували на універсальній установці ОБ2184 на базі апарату А1756 [4, 5]. Хімічний склад порошків для наплавлення наведено у табл. 1. Режим наплавлення: струм 250...300 А, подача порошку 3 кг/год, швидкість наплавлення 6 м/год, амплітуда коливань плазмотрона 10 мм, їх частота 45 хв⁻¹. Витрати транспортувального, плазмоутворювального та захисного газів (аргон) 3 л/год, 2 та 12 л/хв відповідно. Наплавлені за цих умов валики мали ширину 25...35 мм та висоту 6,0...6,6 мм за двоваликового наплавлення.

Електродугову металізацію виконували по технології, розробленої у ФМІ ім. Г.В. Карпенка [3, 6–9]. Покриття отримували шляхом розпилення електродних порошкових дротів ПД-60X15P2ГС та ПД-75X19P3С2 за допомогою електродугового металізатора ЕМ-17 з модифікованою системою розпилювання, за якої електрична дуга горить в каналі розпилювальної головки, що дає змогу одержувати дрібнодисперсні покриття. Режим наплавлення: сила струму 150 А, робоча напруга 32 В, віддаль від сопла до поверхні напилювання 150 мм, тиск стисненого повітря 0,65 МПа. Оболонка порошкових дротів зі сталі 08кп (0,05...0,11 % С; ≤ 0,02 % S; 0,025...0,5 % Mn; 0,04 % P), хімічний склад шихти наведено у табл. 2.

Корозійно-механічне зношування матеріалів вивчали на установці тертя зі зворотно-поступальним рухом індентора за схемою кулька–площина [2]. Контртіло – корундова кулька діаметром 9 мм. Прикладене нормальне навантаження 10 Н, довжина доріжки тертя 16 мм, швидкість переміщення індентора 0,003 м/с. Зразки для досліджень полірували до шорсткості $R_z = 2,5$ мкм. Характер зміни досліджуваних параметрів за трибокорозійних випробувань реєстрували аналого-цифровим пристроєм за допомогою персонального комп'ютера з кроком вимірювань 0,25 с. Ступінь зношування зразків після тертя визначали за шириною трека, утвореного в результаті взаємодії кульки з поверхнею покриття, твердість якого суттєво нижча від корунду.

Для визначення пружно-пластичних властивостей структурних складових отриманих покриттів,

Таблиця 2. Хімічний склад шихти порошкових дротів, мас. %

Марка порошкового дроту	Склад шихти
ПД-60X15P2ГС	FeCr 72 %; B ₄ C 13 %; FeSi 10 %; FeMn 5 %
ПД-75X19P3С2	Cr 72 %; FeSi 13 %; B ₄ C 10 %

зокрема мікротвердості за Месром, застосовували метод динамічного індентування. Для цього використовували прилад «Микрон-гамма» [11].

Електрохімічні дослідження за статичних умов та під час тертя проводили за допомогою потенціостата ІРС-ProM. Електродні потенціали зразків у корозійних середовищах вимірювали відносно насиченого хлоридсрібного електроду порівняння. Допоміжний електрод – платиновий. Середовища для корозійних та трибокорозійних випробувань наступні: вільноаерований 3%-ний розчин NaCl, pH 7; 3%-ний розчин NaCl + 0,025 % NH₄OH, pH 9...10; 3%-ний розчин NaCl + H₂S (насичений), pH 4.

Мікроструктуру поверхонь вивчали металографічним методом на сканівному електронному мікроскопі EVO 40XVP із системою мікрорентгеноспектрального аналізу з використанням енергодисперсійного спектрометра INCA ENERGY 350.

Результати досліджень та їх обговорення.

Плазмово-порошкове наплавлення. Досліджено різні за складом та структурою наплавлені шари (рис. 1) з порошків ПР-01X17Н8С6Г (основа Fe), ПР-06X17Н80СЗРЗ (основа Ni), ПР-08X17Н35СЗРЗ (основа Ni–Fe). Встановлено, що вони мають гетерогенну структуру, яка визначає їх мікромеханічні, корозійно-електрохімічні та трибокорозійні властивості. У наплавленого шару на основі заліза дві структурні складові з мікротвердістю 6,0...6,5 та 7,5...8,0 ГПа. У шарі на основі нікелю після наплавлення утворюються три складові з мікротвердістю 6,0...7,0, 7,0...8,5 та 15 ГПа. Найбільша мікротвердість (~15 ГПа) зумовлена присутністю боридів типу FeCrB. Покриття з залізо-нікелевою основою містить дві складові з мікротвердістю 7,0...7,5 та 10,1...12,2 ГПа. Для покриттів на основі нікелю та нікель–заліза, порівняно з покриттям на основі заліза, характерна вища мікротвердість структурних складових, яка пов'язана із присутністю бору та вищою концентрацією вуглецю у порошках (0,6...0,9 % проти 0,12 % відповідно).

Вивчено електрохімічну поведінку наплавлених шарів у корозійно-активних хлоридвмісних середовищах з додаванням сірководню та амонію (табл. 3). Встановлено, що нанесення плазмово-порошкових шарів дає змогу знизити густину струмів корозії сталі 17Г1СУ, яка вибрана для порівняння, приблизно на 2 порядки. Зі збільшенням водневого показника середовища від pH4 до pH9 спостерігається зниження густини струмів корозії сплавів 01X17Н8С6Г та 06X17Н80СЗРЗ

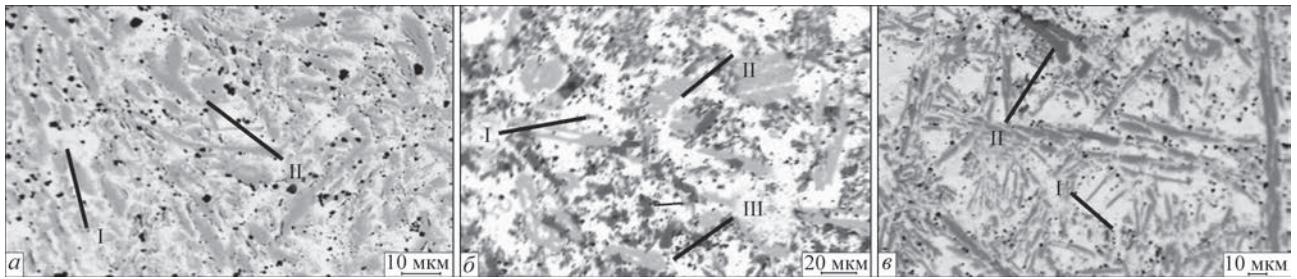


Рис. 1. Мікроструктура шарів, нанесених методом плазмово-порошкового наплавлення: а – 01X17Н8С6Г (основа Fe); б – 06X17Н80С3Р3 (основа Ni); в – 08X17Н35С3Р3 (основа Ni-Fe)

на 7...15 %, а 08X17Н35С3Р3 – утричі. Швидкість корозії визначається анодними процесами у розчині 3% NaCl + NH₄OH і катодними процесами у 3 % NaCl та 3 % NaCl + H₂S. За корозійною стійкістю в досліджуваних середовищах шар, наплавлений порошком на Ni-Fe основі, поступається двом іншим, його густина струму корозії становить (0,47...1,60)·10⁻³ проти (0,56...0,80)·10⁻³ mA/cm². Однак за умов трибокорозії у шарі з керамічною корундовою кулькою покриття на основі Ni-Fe має найнижчі значення коефіцієнта тертя та втрати матеріалу у всіх досліджуваних середовищах (табл. 4), що свідчить про його вищий опір руйнуванню. У сірководневому середовищі ширина доріжки зносу цього покриття і коефіцієнти тертя у 3...4 рази менші, ніж вихідної сталі, а в нейтральному і лужному розчинах – на 30...50 %, що свідчить про значний вплив продуктів корозії на тертя і зношування. Зокрема, сульфідні плівки, сформовані на поверхні тертя у розчині 3 % NaCl + H₂S, виконують функцію змащувального матеріалу при терті, що сприяє зниженню коефіцієнта тертя і ширини доріжки зносу.

Спостерігається чітка залежність між триботехнічними характеристиками та швидкістю корозії наплавлених шарів. Зі зростанням рН середовища знижується густина струмів корозії для шарів з різною основою, а коефіцієнт тертя та втрати матеріалу зростають (табл. 3). Механізми контактної взаємодії шарів визначаються структурною гетерогенністю та трибологічними характеристиками окремих структурних складових. Так, за контактної взаємодії поверхневих шарів 06X17Н80С3Р3 з керамічною кулькою відбувається вихід крихких складових з високою мікротвердістю (15 ГПа) у зону тертя. Це відображається у невисоких значеннях коефіцієнта тертя, проте інтенсивнішому зношуванню за механізмом мікрорізання, втрати матеріалу приблизно на 45 %

Таблиця 3. Густина струмів корозії, коефіцієнт тертя та ширина доріжок тертя шарів, нанесених методом плазмово-порошкового наплавлення, у різних середовищах

Середовище	01X17Н8С6Г (основа Fe)			06X17Н80С3Р3 (основа Ni)			08X17Н35С3Р3 (основа Ni-Fe)		
	<i>i</i> _{кор} , mA/cm ²	<i>B</i> , мкм	μ	<i>i</i> _{кор} , mA/cm ²	<i>B</i> , мкм	μ	<i>i</i> _{кор} , mA/cm ²	<i>B</i> , мкм	μ
3 % NaCl + H ₂ S (pH 4)	0,00075	180	0,10	0,0006	210	0,13	0,0016	140	0,09
3 % NaCl (pH 7)	0,00065	190	0,21	0,0008	230	0,16	0,0019	160	0,10
3 % NaCl + 0,025 % NH ₄ OH (pH 9)	0,00065	260	0,41	0,00056	300	0,35	0,00047	190	0,31

більші ніж у покритті на залізо-нікелевій основі. У матриці шарів 01X17Н8С6Г та 08X17Н35С3Р3 крихка складова відсутня, а тверді фази рівномірно розподіляються в пластичній матриці, що відповідає правилу Шарпі-Бочвара [12], і контактна взаємодія проходить за відсутності елементу абразивного зношування, що і пояснює високий опір трибокорозії.

За зміною електродних потенціалів при корозійно-механічному зношуванні можна якісно оцінити руйнування та утворення вторинних структур у зоні фрикційної взаємодії [13]. Показано (рис. 2), що найбільша різниця між потенціалами корозії у вихідному стані (*E*_{кор}), трибокорозії під час тертя (*E*_{триб}) та потенціалами поверхні після тертя (*E*_{п.т.}) для усіх наплавлених шарів характерна для середовища 3 % NaCl + NH₄OH. Це свідчить про утворення щільних вторинних структур на поверхні зони контактування, які з початком фрикційної взаємодії руйнуються. Під час усталеного тертя вторинні структури інтенсивно руйнуються та відновлюються, що відображається у осциляціях трибопотенціалу, які свідчать про високу швидкість репасивації поверхні і руйнування матеріалу за механізмом окиснювального зношування. Зі зниженням показника рН середовища знижується швидкість репасиваційних процесів, які у сірководневому середовищі є мінімальними. Різниця між цими потенціалами є несуттєвою і практично відсутні локальні коливання трибопотенціалу, що свідчить про несучільність початкових поверхневих плівок з продуктів корозії. Коефіцієнт тертя за таких умов є найнижчим у порівнянні із іншими середовищами. Фрикційна взаємодія шарів із контртілом відбувається з утворення вторинних структур, які знижують адгезію між поверхнями.

Встановлено, що різниця між потенціалами корозії, трибокорозії і пасивації корелює із твердістю

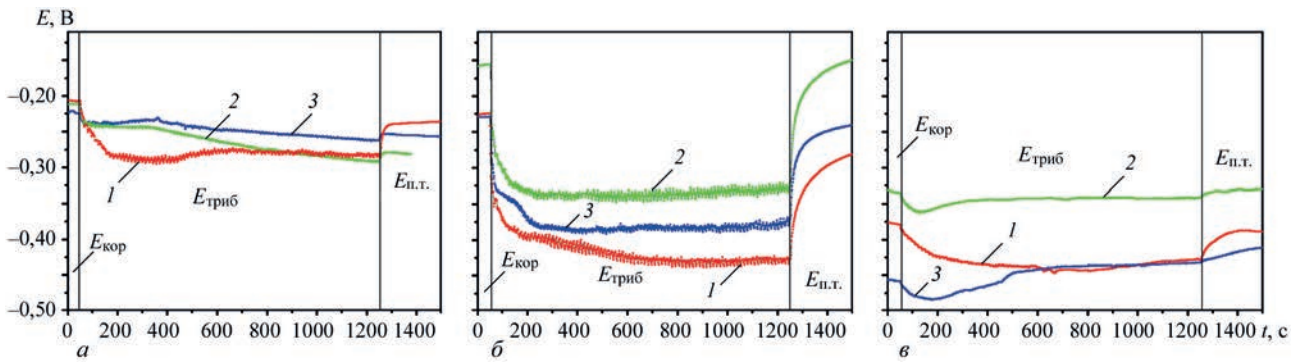


Рис. 2. Зміна електродних потенціалів поверхні сплавів під час тертя у 3 % NaCl (а), 3 % NaCl + NH₄OH (б), 3 % NaCl + H₂S (в): покриття на основі Fe (1), Ni (2) та Ni-Fe (3)

покриттів. Зокрема це чітко простежується при порівнянні матеріалу 01X17H8C6Г (основа Fe) та 08X17H35C3P3 (основа Ni-Fe) у досліджуваних середовищах. Найбільша різниця між потенціалами, а також локальні осциляції трибопотенціалу характерні для наплавленого шару з складних карбідів, що пов'язано із більшою пошкоджуваністю поверхні за рахунок меншої твердості у поверхневих шарах покриття.

Плазмове наплавлення з порошку ПР-08X17H-35C3P запропоновано для нанесення захисних шарів на поверхню деталей запірної арматури (рис. 3) з метою покращення їх корозійної і трибокорозійної стійкості в агресивних середовищах і використано на ПАТ «Конотопський арматурний завод».

Електродугове напилення. Для відновлення зношених або пошкоджених поверхонь та покращення експлуатаційних характеристик деталей широко використовується газотермічне напилення [3, 6–9]. Метод дає змогу істотно продовжити життєвий цикл деталей за рахунок створення на їх поверхні шару покриттів із заданими властивостями. При напиленні не відбувається термічного



Рис. 3. Деталі запірної арматури, наплавлені плазмовим методом порошком ПР-08X17H35C3P

короблення деталі та не змінюються фізико-хімічні властивості основного матеріалу. Можливість ремонту деталей замість їх заміни сприяє скороченню витрат та підвищенню ефективності виробництва.

В роботі [3] досліджували покриття, отримані електродуговим напиленням з порошкових дрітків ПД-60X15P2ГС і ПД-75X19P3С2. Вони мають гетерогенну структуру, що складається з мартенситної матриці, зміцненої дрібнодисперсними вclusions боридів FeCrB та FeCr₂B. Твердість покриттів становить HV 545...565, когезивна міцність 140...150 МПа [3]. Наявність у шихті ферохромбору та хрому забезпечує високий вміст хрому у покритті.

Досліджували також електрохімічні характеристики напилених покриттів у середовищах, що містять амоній, сірководень та хлориди. На отриманих поляризаційних кривих ділянки пасивації відсутні, що свідчить про електрохімічно активне розчинення матеріалів. Після електродугового напилення значення електродних потенціалів у всіх корозивних середовищах зміщуються в область додатних значень на 60...70 мВ. Густина струмів корозії напилених покриттів у сірководневому та хлоридному розчині знижується на 40 % порівняно з вихідним матеріалом (табл. 4, 5). У розчині амонію струми корозії матеріалу основи і покриттів мають найменші значення. Швидкість корозії електродугових покриттів контролюють катодні процеси. Встановлено, що швидкість корозії покриттів з ПД-75X19P3С2 нижча, ніж з ПД-60X15P5ГС, що пов'язано з вищою концентрацією хрому (табл. 4, 5).

Ширина доріжки тертя та значення коефіцієнтів тертя обох електродугових покриттів найнижчі у 3 % NaCl + H₂S, а найбільші у 3%-ному розчині NaCl. Трибологічні характе-

Таблиця 4. Коефіцієнти тертя та ширина доріжки зносу електродугових покриттів у різних середовищах

Середовище	60X15P2ГС				75X19P3С2			
	E, мВ	i, мА/см ²	μ	B, мкм	E, мВ	i, мА/см ²	μ	B, мкм
3 % NaCl + H ₂ S (pH 4)	-586	0,053	0,30	350	-626	0,052	0,25	240
3 % NaCl (pH 7)	-525	0,034	0,38	510	-525	0,024	0,30	480
3 % NaCl + 0,025 % NH ₄ OH (pH 9)	-468	0,024	0,50	490	-468	0,022	0,55	400

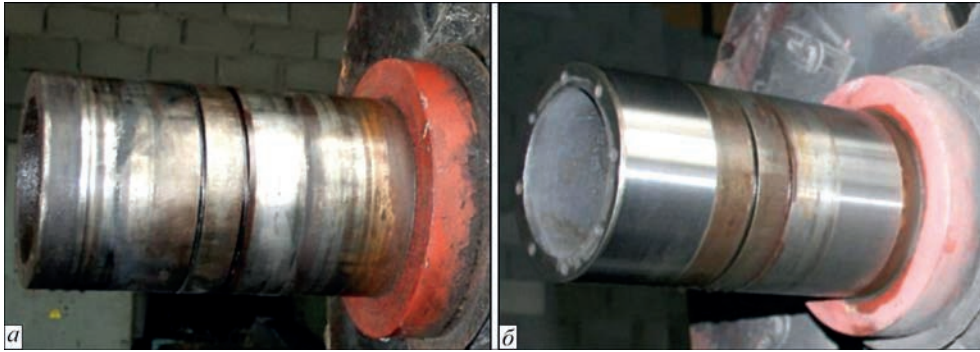


Рис. 4. Загальний вигляд пошкодженого валу центрифуги очисних споруд у вихідному стані (а) і після електродугового напилення та шліфування (б)

Таблиця 5. Електродні потенціали, густина струмів корозії, коефіцієнт тертя та ширина доріжок тертя сталі 17Г1СУ (основа) у різних середовищах

Середовище	<i>E</i> , мВ	<i>i</i> , мА/см ²	<i>B</i> , мкм	μ
3 % NaCl + H ₂ S (pH 4)	-660	0,08	580	0,28
3 % NaCl (pH 7)	-580	0,04	310	0,25
3 % NaCl + 0,025 % NH ₄ OH (pH 9)	-530	0,025	360	0,41

ристики покриттів з ПД-75Х19Р3С2 кращі, ніж з ПД-60Х15Р2ГС, зокрема, у 3 % NaCl + H₂S його знос менший на третину (табл. 4). Параметри тертя і зношування покриттів визначаються їх хімічним складом, гетерогенністю структури, співвідношенням характеристик міцності її компонентів, рельєфом тощо. Найефективнішими електродугові покриття виявилися у розчині 3 % NaCl + H₂S, де ширина доріжки зносу після напилення знизилася на 40...42 % (табл. 4, 5).

Найвищі значення коефіцієнтів тертя виявлено при терті покриттів у середовищі, що містить амоній. Ймовірно, у розчині на поверхні формуються вторинні структури, які руйнуються при терті і відіграють роль абразиву. Це сприяє підвищенню коефіцієнта тертя і зношуванню матеріалу. Депасивуючі іони хлору в середовищі ініціюють корозію покриттів, а сукупна дія корозійного і механічного чинників при терті призводить до зниження зносостійкості. У сірководневому середовищі знос і коефіцієнти тертя електродугових покриттів найнижчі, що пов'язано з формуванням на поверхні сульфідвмісних плівок, які при терті виконують роль твердої змазки, зменшуючи адгезійну складову контактної взаємодії, що сприяє зниженню коефіцієнтів тертя і зносу [2, 13, 14]. Крім того при терті сульфідні можуть заповнювати пори у покритті, покращуючи його гомогенність, що сприяє підвищенню корозійної стійкості матеріалу.

Електродугові покриття з порошкового дроту ПД-75Х19Р3С2 запропоновано використовувати для відновлення пошкоджених поверхонь деталей і їх захисту від корозійно-абразивного зношування у сірководневих середовищах. Покриття були нанесені на поверхню валів у центрифугах

очисних споруд ЛМКП «Львівводоканал» (рис. 4) і пройшли дослідно-промислово перевірку.

Висновки

1. Досліджено корозійні та трибокорозійні характеристики плазмових наплавок з порошоків на основі заліза (ПР-01Х17Н8С6Г), нікелю (ПР-06Х17Н80С3Р3) і системи Fe-Ni (ПР-08Х17Н35С3Р3) та покриттів, отриманих електродуговим напиленням з порошкових дротів ПД-60Х15Р2ГС і ПД-75Х19Р3С2 у середовищах, що містять хлориди, сірководень і аміак.

2. У наплавок, отриманих з порошоків 01Х17Н8С6Г та 08Х17Н35С3Р3, виявлено дві структурні складові з мікротвердостями 6,0...6,5 і 7,5...8,0 ГПа та 7,0...7,5 і 10,1...12,2 ГПа відповідно. Наплавлений шар з порошку ПР-06Х17Н80С3Р3 на основі нікелю має три складові з мікротвердістю 6,0...7,0, 7,0...8,5 та 15 ГПа. Підвищена мікротвердість структурних складових пов'язана із присутністю бору та вищою концентрацією вуглецю у порошок. Найбільша мікротвердість (~15 ГПа) зумовлена присутністю боридів типу FeCrB.

3. Покриття, отримані електродуговим напиленням з порошкових дротів ПД-60Х15Р2ГС і ПД-75Х19Р3С2, мають структуру, що складається з мартенситної матриці, зміцненої дрібнодисперсними включеннями боридів FeCrB та FeCr₂B. Твердість покриттів *HV* 545...565 когезивна міцність 140...150 МПа.

4. В результаті випробувань показано, що найвищу стійкість до корозійно-механічного зношування в корозійно-активних середовищах мають наплавки з порошку на основі Fe-Ni та електродугові покриття з дроту ПД-75Х19Р3С2.

5. Встановлено, що нанесення шарів плазмовим методом з порошку ПР-08Х17Н35С3Р дає змогу приблизно на 2 порядки знизити швидкість корозії у середовищах, що містять хлориди, амоній та сірководень. При терті у сірководневому середовищі ширина доріжки зносу і коефіцієнти тертя у 3...4 рази менші, ніж вихідної сталі, а в нейтральному і лужному розчинах – на 30...50 %.

6. Плазмово-порошкове наплавлення порошком ПР-08Х17Н35С3Р запропоновано для нанесення захисних покриттів на поверхню шиберів запірної арматури з метою покращення їх корозійно-механічних властивостей і використано на ПАТ «Конотопський арматурний завод».

7. Встановлено, що швидкість корозії електродугових покриттів, напилених з порошкового дроту ПД-75Х19Р3С2, у розчині амонію співмірна зі швидкістю корозії вуглецевої сталі. У хлоридному і хлоридно-сірководневому розчинах нанесення покриттів знижує швидкість корозії сталі майже на 40 %. За присутності сірководню у середовищі на поверхні покриттів формуються сульфідні сполуки, які при терті виконують роль твердої змазки, зменшуючи адгезійну складову контактної взаємодії, що сприяє зниженню зносу матеріалу на 40...42 %.

8. Електродугові покриття з порошкового дроту ПД-75Х19Р3С2 запропоновано використовувати для відновлення пошкоджених поверхонь деталей та їх захисту від корозійно-абразивного зношування у сірководневих середовищах. Покриття були нанесені на поверхню валів у центрифугах очисних споруд ЛМКП «Львівводоканал» і успішно пройшли дослідно-промислово перевірку.

Список літератури

1. Landolt, D., Mischler, S. (2011) *Tribocorrosion of passive metals and coatings*. Woodhead Publishing Limited.
2. Хома М.С., Рацька Н.Б., Івашків В.Р. та ін. (2019) Корозійні і трибокорозійні властивості плазмових покриттів на основі заліза, нікелю і хрому в середовищах, що містять сірководень, хлориди та аміак. *Наукові нотатки*, **66**, 356–361.
3. Student, M., Veselivska, H., Gvozdecki, V. et al. (2008) Corrosion-mechanical resistance of arc-sprayed coatings made from cored powders. *Ukrainian J. of Mechanical Engineering and Materials Science*, **4**, **1**, 12–20.
4. Гладкий П.В., Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А. (2007) *Плазменно-порошковая наплавка*. Киев, Экотехнология.
5. Переплетчиков С., Василів Х., Винар В. та ін. (2018) Плазмово-порошкове наплавлення високолегованих сплавів на основі заліза, хрому і нікелю на низьколеговані конструкційні сталі з метою підвищення їх зносотривкості. *ФХММ*, **3**, 81–88.
6. Похмурська Г.В., Студент М.М., Похмурський В.І. (2017) *Газотермічні покриття*: навчальний посібник. Львів, Простір-М.
7. Pokhmurskyi, V., Student, M., Gvozdeckii, V. et al. (2013) Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures. *J. of Thermal Spray Technology*, **22**, **5**, 808–819.
8. Wielage, B., Pokhmurska, H., Student, M. et al. (2013) Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. *Surface and Coating Technology*, **220**, 27–35.
9. Bolelli, G., Milanti, A., Lusvardi, L. et al. (2016) Wear and impact behaviour of High Velocity Air-Fuel sprayed Fe–Cr–Ni–B–C alloy coatings. *Tribology International*, **95**, 372–390.
10. Bobzin, K., Zhao, L., Öte, M., Königstein, T. (2017) Novel Fe-based wear and corrosion resistant coatings by three-cathode plasma technology. *Ibid.*, **318**, 288–292.

11. Игнатович С.Р., Закиев И.М. (2011) Универсальный микро/нано-индентор «Микрон-гамма». *Заводская лаборатория*, **77**, **1**, 61–67.
12. Закалов О.В., Закалов И.О. (2011) *Основи тертя і зношування в машинах*: навчальний посібник. Тернопіль, Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя.
13. Khoma, M.S., Ivashkiv, V.R., Chuchman, M.R. et al. (2018) Corrosion cracking of ferrite-pearlitic steels of different structure in the hydrogen sulfide environment under static load. *Procedia Structural Integrity*, **13**, 2184–2189.
14. Хома М.С., Івашків В.Р., Галайчак С.А. (2019) Вплив структури сталей на корозію, наводнювання та корозійне розтріскування у сірководневих середовищах. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **2**, 121–125.

References

1. Landolt, D., Mischler, S. (2011) *Tribocorrosion of passive metals and coatings*. Woodhead Publishing Ltd.
2. Khoma, M.S. et al. (2019) Corrosion and tribocorrosion properties of plasma sprayed coatings based on iron, nickel and chrome in environment containing hydrogen sulfide, chlorides and ammonia. *Naukovi Notatky*, **66**, 356-361 [in Ukrainian].
3. Student, M., Veselivska, H., Gvozdecki, V. et al. (2008) Corrosion-mechanical resistance of arc-sprayed coatings made from cored powders. *Ukrainian J. of Mechanical Engineering and Materials Sci.*, **4**, **1**, 12–20.
4. Gladky, P.V., Pereplyotchikov, E.F., Ryabtsev, I.A. (2007) *Plasma-powder surfacing*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
5. Pereplyotchikov, E.F., Vasylyiv, Kh., Vynar, V. et al. Plasma-powder surfacing of high-alloyed alloys based on iron, chrome and nickel on low-alloyed structural steels to improve their wear resistance. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **3**, 81–88 [in Ukrainian].
6. Pokhmurska, G.V., Student, M.M., Pokhmurskyi, V.I. (2017) *Thermal sprayed coatings: Manual*. Lviv, Prostir-M [in Ukrainian].
7. Pokhmurskyi, V., Student, M., Gvozdeckii, V. et al. (2013) Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures. *J. Thermal Spray Technol.*, **22**, **5**, 808–819.
8. Wielage, B., Pokhmurska, H., Student, M. et al. (2013) Ironbased coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. *Surface and Coating Technol.*, **220**, 27–35.
9. Bolelli, G., Milanti, A., Lusvardi, L. et al. (2016) Wear and impact behaviour of high velocity air-fuel sprayed Fe–Cr–Ni–B–C alloy coatings. *Tribology Int.*, **95**, 372–390.
10. Bobzin, K., Zhao, L., Öte, M., Königstein, T. (2017) Novel Fe-based wear and corrosion resistant coatings by three-cathode. *Plasma Technology, Ibid.*, **318**, 288–292.
11. Ignatovich, S.R., Zakiev, I.M. (2011) Universal micro/nano-indenter «Micron-gamma». *Zavodskaya Laboratoriya*, **77**, **1**, 61-67 [in Russian].
12. Zakalov, O.V., Zakalov, I.O. (2011) *Fundamentals of friction and wear in machines: Manual*. Ternopil, Tntu [in Ukrainian].
13. Khoma, M.S., Ivashkiv, V.R., Chuchman, M.R. et al. (2018) Corrosion cracking of ferrite-pearlitic steels of different structure in the hydrogen sulfide environment under static load. *Procedia Structural Integrity*, **13**, 2184–2189.
14. Khoma, M.S., Ivashkiv, V.R., Galaichak, S.A. (2019) Influence of structure of steels on corrosion, hydrogenation and corrosion cracking in hydrogen sulfide environment. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **2**, 121-125 [in Ukrainian].

APPLICATION OF PLASMA-POWDER AND ELECTRIC ARC COATINGS TO INCREASE TRIBOCORROSION RESISTANCE OF STEELS IN AGGRESSIVE ENVIRONMENT

V.I. Pokhmursky¹, M.S. Khoma¹, I.O. Ryabtsev², Ye.F. Pereplyotchikov¹, V.A. Vynar¹

¹G.V. Karpenko Physical-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine, E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The corrosion and tribocorrosion characteristics of plasma-powder and electric arc coatings on tubular steels in chloride-containing media with hydrogen sulfide and ammonium were studied. It was established that the corrosion resistance of coatings applied by plasma-powder surfacing and electric arc spraying increases with increasing pH of the solution. It was shown that in these media the most resistant to corrosion and mechanical fracture were the coatings that were deposited by the plasma method of powder of 08Kh17N35S3R alloy. It was established that electric arc coatings sprayed using the flux-cored wire 75Kh19R3S2 reduce the corrosion current density of carbon steels in hydrogen sulfide solution by 40%. In the same medium on the surface of the coatings sulfide compounds are formed, which during friction act as a solid lubricant, which reduces the wear of the material by 40...42%. The electric arc coatings produced by the flux-cored wire 75Kh19R3S2 were proposed to be used to restore damaged surfaces of parts and protect them from corrosion and abrasive wear in the hydrogen sulfide media. 14 Ref., 5 Tabl., 4 Fig.

Key words: plasma-powder surfacing, electric arc coatings, corrosion, tribocorrosion, chlorides, hydrogen sulfide, ammonium

Надійшла до редакції 07.05.2020

ВОЛЬФРАМОВІ ЕЛЕКТРОДИ БЕЗ ТОРІЮ

Червоні вольфрамові електроди містять від 1,7 до 2,2 % торію. Торій покращує якість вольфрамових електродів, але також має радіотоксичну сполуку, що становить небезпеку для зварників, особливо під час шліфування.

Технологія MultiStrike® компанії Huntingdon Fusion (Великобританія) з вольфрамовим синім наконечником HFT® (містить суміш нерадіоактивних рідкоземельних елементів) виключає ризик для здоров'я, викликаний використанням радіотоксичних торійованих вольфрамових електродів, зберігаючи при цьому високу ефективність вольфрамового електроду.

Зварники сьогодні продовжують використовувати торійовані вольфрамові електроди як більш дешеву альтернативу іншим безпечнішим вольфрамовим електродам, часто не знаючи про ризики. Оскільки MultiStrikes® не має радіотоксичних та канцерогенних добавок, тому під час шліфування наконечників немає небезпечної пилу, який вдихають.

Обширні випробування показують, що вольфрамові електроди MultiStrike® забезпечують до 10 разів довший термін експлуатації та покращені характеристики дуги порівняно з іншими вольфрамовими електродами при випробуваннях в тих же умовах.

MultiStrikes® може бути використаний для зварювання алюмінію на змінному струмі (фото зверху), а також сталей на постійному струмі (фото знизу), що дозволяє зварювальнику мати лише один тип вольфрамового електроду для зварювання всіх матеріалів та зменшити номенклатуру при закупівлі.

MultiStrike® забезпечує економію за рахунок більш тривалого терміну експлуатації, витримує більше ударів на електрод перед повторним шліфуванням, потребує меншої кількості повторних робіт та менших витрат на потужність джерела живлення. Зараз немає необхідності зберігати декілька типів електродів – MultiStrike® робить все.



За матеріалами сайту www.huntingdonfusion.com.