

УДК 621.793.7

**СТРУКТУРА ТА ЗНОСОТРИВКІСТЬ ПОКРИВІВ VC–FeCr
ТА VC–FeCrCo, ОТРИМАНИХ НАДЗВУКОВИМ
ГАЗОПОЛУМЕНЕВИМ НАПИЛЕННЯМ***М. М. СТУДЕНТ¹, Г. В. ПОХМУРСЬКА², Х. Р. ЗАДОРЖНА¹*¹ *Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;*² *Національний університет "Львівська політехніка"*

Досліджено зносотривкість покровів, напилених надзвуковим газополуменевим (HVOF) та плазмовим методами у динамічному вакуумі, з порошків, отриманих механічним легуванням VC–FeCr та VC–FeCrCo. Покриви напиляли з використанням установок Diamond Jet Hybrid gun (пропан–кисень) та JP5000 gun (гас–кисень). Встановлено, що зносотривкість таких покровів більша у 75–100 разів, ніж основи Д16, в 3–5 разів, ніж сталі ШХ15 (HRC 60), у 1,3 рази, ніж наплавленого шару із порошкового дроту НП 80X20P3Т, у 2,5 рази, ніж електродугового покрову із порошкового дроту ПД Х6Ю6РЗ за тертя жорстко закріпленим абразивом.

Ключові слова: *напилення, покриви, зносотривкість, надзвуковий газополуменевий метод, метод плазмового напилення покровів у динамічному вакуумі.*

Газотермічні методи напилення покровів все ширше застосовують у промисловості для захисту від абразивного зношування конструктивних елементів. Серед цих методів надзвуковий газополуменевий (HVOF – High Velocity Oxygen Fuel Flame Spraying process) забезпечує надзвичайно високу міцність зчеплення покровів із металевою основою, достатньо продуктивний та помірно вартісний (рис. 1) [1]. Установки надзвукового напилення сконструйовані за класичною схемою роботи рідкопаливних реактивних двигунів, в яких швидкість газового струменя, що виходить із сопла пальника становить понад 2000 м/с. При цьому досягається висока щільність напилених покровів – 99%.

Щоб забезпечити високу абразивну зносотривкість покровів, використовують порошкові суміші на основі карбїду вольфраму. Проте, зважаючи на його високу вартість та питому вагу, шукають йому заміну. Запропоновано використовувати порошкові суміші на основі карбїду ванадію, який має високу мікротвердість та малу питому вагу, тому очікуємо на їх суттєве здешевлення.

Методика дослідження абразивного зношування. Покриви наносили з використанням установок для високошвидкісного напилення покровів Diamond Jet Hybrid gun (пропан–кисень) та JP5000 gun (гас–кисень). Для порівняння використали метод плазмового напилення покровів у динамічному вакуумі (ПНПДВ), як такий, що забезпечує найвищу якість покровів (рис. 2) [1].

Наведена схема пальника системи HVOF, де як паливо використали суміш гас–кисень (рис. 1b) та пропан–кисень (рис. 1a). Тиск у камері згоряння становив до 1,0 МПа, швидкість частинок – до 650 м/с для порошку VC–FeCr. Витрата порошку – 10 kg/h. Попередня обробка – дробоструминна + очистка в ультразвуковій ванні (етиловий спирт). Покрив завтовшки 100 μm напиляли на зразки-диски, вирізані із прутка алюмінієвого сплаву Д16 діаметром 50 mm, товщиною 10 mm. Склад покрову, метод і відстань напилення та фракція порошків наведені

в табл. 1. Порошки для наплення виготовляли методом механічного легування із використанням планетарного млина. Вихідні компоненти – порошки карбіду ванадію, ферохрому та сплаву кобальту із нікелем.

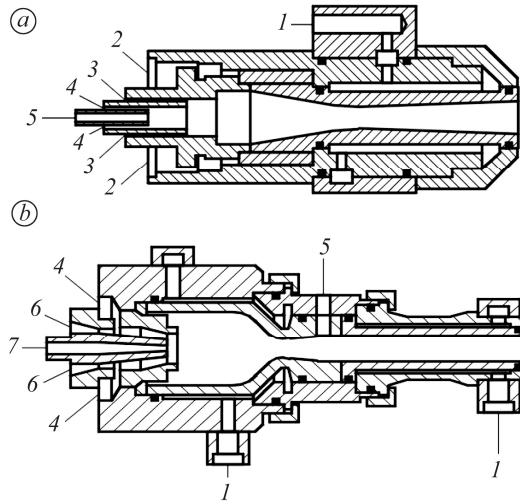


Рис. 1. Схема високошвидкісного порошкового пальника HVOF, пальна суміш: пропан–кисень (Diamond Jet Hybrid gun) (a) та гас–кисень (JP5000 gun) (b): 1 – охолоджувальна рідина; 2 – стиснене повітря; 3 – пальний газ; 4 – кисень; 5 – порошок і транспортувальний газ; 6 – рідке паливо; 7 – запалювач.

Fig. 1. High-speed powder burner scheme HVOF, a combustible mixture: propane–oxygen (Diamond Jet Hybrid gun) (a) and kerosene–oxygen (JP5000 gun) (b): 1 – cool liquid; 2 – compressed air; 3 – combustible gas; 4 – oxygen; 5 – powder and transportable gas; 6 – oil-fuel; 7 – ignitor.

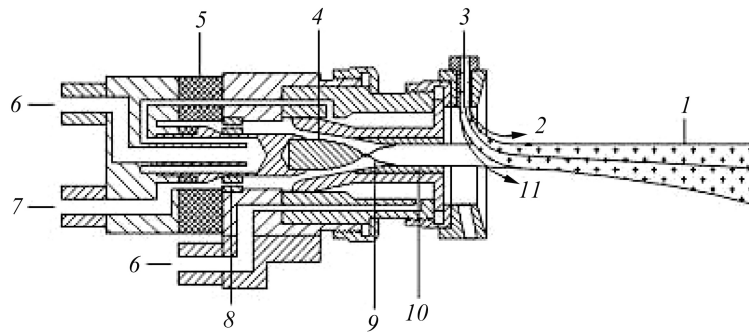


Рис. 2. Схема установки плазмового наплення покривів у динамічному вакуумі. Хрестиком показані напилювані частинки: 1 – відкритий плазмовий потік; 2 – тонкий порошок; 3 – порошок; 4 – вольфрамовий катод; 5 – ізолятор; 6 – охолоджувальна рідина; 7 – плазмовий газ (аргон, азот); 8 – дозувальне кільце; 9 – дуга; 10 – мідний анод; 11 – грубий порошок.

Fig. 2. The scheme of the installation for plasma spraying of coatings in dynamic vacuum (PDV): 1 – open plasma stream; 2 – thin powder; 3 – powder; 4 – tungsten cathode; 5 – insulator; 6 – cooling liquid; 7 – plasma gas (argon, nitrogen); 8 – batching ring; 9 – arc; 10 – copper anode; 11 – rough powder. The crosses show the sprayed particles.

Абразивне зношування за тертя нежорстко закріпленими абразивними частинками виконували згідно з ГОСТ 23.208-79 [2]. Схематично установка показана на рис. 3а. Кварцовий пісок просували (його вологість не перевищувала 0,16%), а гумовий диск заправляли шліфувальною шкіркою типу 2 (ГОСТ 6456-75) зернистістю № 8П (ГОСТ 3647-71), закріпленою на зразку-держаку у вигляді плоскої сталевій пластини. У зону контакту гумового диска і зразка за допомогою дозувального пристрою постійно подавали абразив. Режим тертя: навантаження $P = 2,4 \text{ N}$, швидкість обертання диска – 25 m/min , абразив – фракціонований (розмір частинок $200 \dots 1000 \text{ }\mu\text{m}$) та просушений кварцовий пісок. Час випробування

30 min. Розміри зразків 30×30(або 50)×*h*, mm, діаметр і ширина гумового диска 48...50 mm та 15±0,1 mm, відповідно.

Таблиця 1. Характеристики методу наплення покривів

Склад покриву	Відстань до підкладки, mm	Фракція порошку, μm	Установки
VC-FeCr	300	20...45	DJH
VC-FeCr	250	20...45	DJH
VC-FeCrCo	300	20...45	DJH
VC-FeCrCo	250	20...45	DJH
VC-FeCr	300	20...30	JP5000
VC-FeCr	300	20...45	JP5000
VC-FeCrCo	300	20...30	JP5000
VC-FeCrCo	300	20...45	JP5000

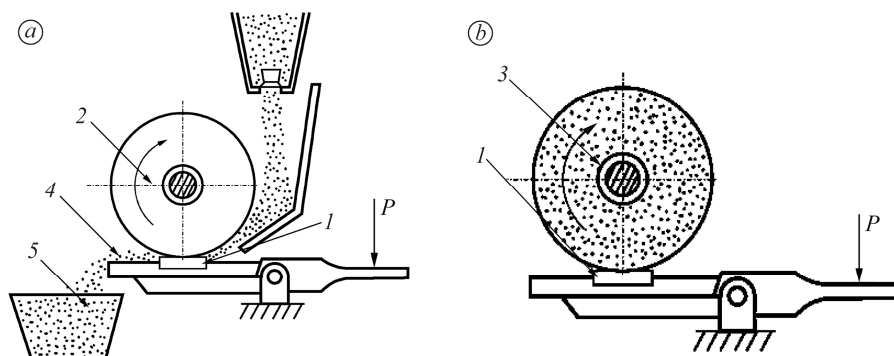
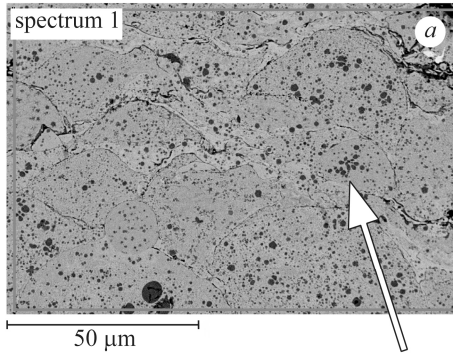


Рис. 3. Принципові схеми установок для дослідження абразивного зношування зразків нежорстко (а) та жорстко (б) закріпленим абразивом: 1 – зразок; 2 – гумовий диск; 3 – абразивний диск; 4 – пісок; 5 – ємність для збирання абразиву.

Fig. 3. Schematics diagrams of the installation for samples abrasive wear test by not rigidly (a) and rigidly (b) fixed abrasive: 1 – sample; 2 – rubber disc; 3 – abrasive disk; 4 – sand; 5 – a capacity for collection of abrasive.

Для порівняльних досліджень використовували абразивний диск із електрокорунду середньом'якої твердості СМ-2 на керамічній зв'язці 7K15 діаметром 150 mm та завширшки 8 mm (рис. 3b). Зернистість електрокорунду (25А, 25Н) – 250...315 μm, лінійна швидкість тертя – 100 m/min, навантаження у зоні лінійного контакту – 1,5 kg. Знос оцінювали за втратою маси зразків з точністю до $2 \cdot 10^{-4}$ g на електронній аналітичній вазі марки KERN ABJ 220 4M. Тривалість випробування 30 min.

Результати експерименту. Структури покривів, отриманих методами Diamond Jet Hybrid gun та JP5000 gun, практично не відрізняються між собою (рис. 4a, b). Покриви мають ламелярну будову, де ламелі – кристалізовані слабодеформовані краплини порошкової суміші. Це свідчить, що краплини, які розділені між собою ледь помітними прошарками оксидів, у момент удару об напилювану поверхню були у розплавленому стані лише з поверхні. Між краплинами здебільшого відбулось сплавлення без оксидних прошарків. У матричній фазі покривів на основі ферохрому розсіяні виділення карбідів ванадію круглої форми (чорні включення) розміром від 1 до 5 μm.

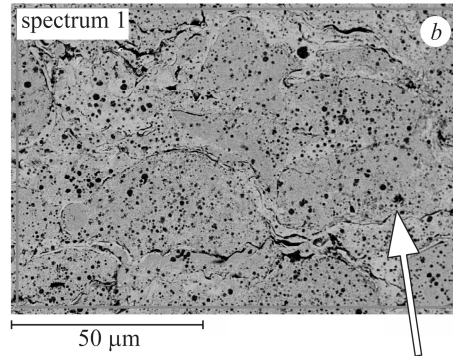


Спектральний
аналіз покриву

Еле-мент	mass %	at.%
C K	4,44	17,48
Si K	0,35	0,59
V K	17,58	16,33
Cr K	13,09	11,92
Fe K	62,84	53,24
W M	1,70	0,44
Всього	100,00	

Спектральний
аналіз карбідів

Еле-мент	mass %	at.%
C K	12,49	38,21
V K	76,34	55,08
Cr K	6,19	4,38
Fe K	2,91	1,92
W M	2,07	0,41
Всього	100,00	

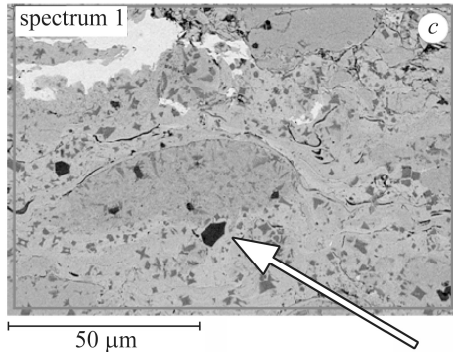


Спектральний
аналіз покриву

Еле-мент	mass %	at.%
C K	5,60	21,07
Si K	0,82	1,32
V K	17,68	15,70
Cr K	12,90	11,23
Fe K	61,83	50,08
W M	1,17	0,61
Всього	100,00	

Спектральний
аналіз карбідів

Еле-мент	mass %	at.%
C K	17,06	47,18
V K	72,23	47,10
Cr K	5,16	3,30
Fe K	3,43	2,04
W M	2,12	0,38
Всього	100,00	

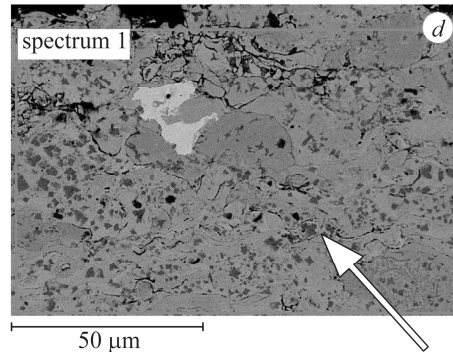


Спектральний
аналіз покриву

Еле-мент	mass %	at.%
C K	3,04	12,22
Si K	1,78	3,06
V K	18,44	17,46
Cr K	25,04	23,23
Fe K	38,11	32,91
Co K	8,46	6,93
Ni K	5,12	4,21
Всього	100,00	

Спектральний
аналіз карбідів

Еле-мент	mass %	at.%
C K	3,22	12,68
V K	40,29	37,42
Cr K	34,70	31,57
Fe K	18,92	16,03
Co K	2,88	2,31
Всього	100,00	



Спектральний
аналіз покриву

Еле-мент	mass %	at.%
C K	2,70	10,10
O K	3,81	10,70
Si K	1,74	2,79
V K	18,82	16,62
Cr K	24,84	21,49
Fe K	37,29	30,04
Co K	8,27	6,32
Ni K	2,53	1,94
Всього	100,00	

Спектральний
аналіз карбідів

Еле-мент	mass %	at.%
C K	2,59	10,43
V K	39,25	37,19
Cr K	35,40	32,86
Fe K	19,37	16,75
Co K	3,39	2,78
Всього	100,00	

Спектральний аналіз покриття

Елемент	mass%	at. %
C K	4,47	16,17
O K	3,54	9,62
Si K	0,79	1,23
V K	18,17	15,49
Cr K	12,17	10,16
Fe K	60,85	47,32
Всього	100,00	

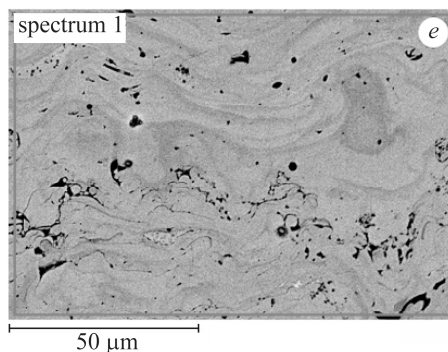


Рис. 4. Структура покриттів, отриманих методом HVOF: *a* – VC–FeCr Diamond Jet Hybrid; *b* – VC–FeCr JP5000 gun; *c* – VC–FeCrCo Diamond Jet Hybrid gun; *d* – VC–FeCrCo JP5000 gun; *e* – ПНПДВ.

Fig. 4. The structure of coatings obtained by HVOF: *a* – VC–FeCr Diamond Jet Hybrid; *b* – VC–FeCr JP5000gun; *c* – VC–FeCrCo Diamond Jet Hybrid gun; *d* – VC–FeCrCo JP5000 gun; *e* – PDV.

Додавання порошку CoNi у склад порошкової суміші призводить до появи у покритті крупніших карбідів ванадію, які мають переважно неправильну форму (рис. 4*c, d*). Крім цього, у структурі покриття зустрічаються ламелі сплаву CoNi (світлого кольору).

Покриття, отримані методом плазмового напилення у динамічному вакуумі, також мають ламелярну будову. Однак на відміну від HVOF покриттів більшість краплин практично сплавлені між собою, а ламелі сильно zdeформовані, що свідчить про те, що краплини в момент удару об напилювану поверхню були повністю у розплавленому стані. Карбіди ванадію надзвичайно малі < 500 nm (рис. 4*e*).

Зносотривкість за умов випробування жорстко закріпленим абразивом. Покриття напилені методами HVOF, а також ПНПДВ мають високу зносотривкість порівняно з еталомом зі сталі 20 та сталі ШХ15 (60 HRC). Несуттєво вищу зносотривкість мають покриття, отримані методом Diamond Jet Hybrid gun порівняно із JP5000 gun та ПНПДВ. Додавання CoNi у порошкову суміш її знижує (рис. 5*a*).

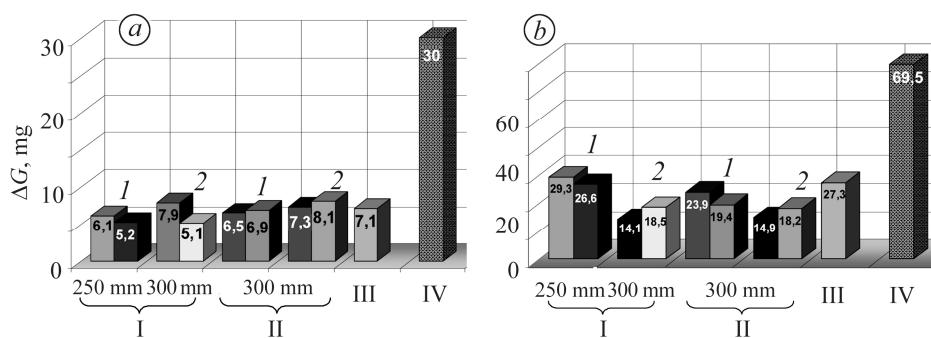


Рис. 5. Втрата маси зразків під час тертя абразивним диском (Base Д16 $\Delta G = 600$ mg) (*a*) та нежорстко закріпленими абразивними частинками (Base Д16 $\Delta G = 180$ mg) (*b*). I – DJH; II – JP5000; III – PDV; IV – сталь ШХ15 HRC 60. 1 – VC–FeCr; 2 – VC–FeCrCo.

Fig. 5. Loss of sample mass during friction with abrasive disk wheel (Base Д16 $\Delta G = 600$ mg) (*a*) and nonrigidly fixed abrasive particles (Base Д16 $\Delta G = 180$ mg) (*b*). I – DJH; II – JP5000; III – PDV; IV – ШХ15 steel HRC 60. 1 – VC–FeCr; 2 – VC–FeCrCo.

Зносотривкість за умов випробування нежорстко закріпленням абразивом. У цьому випадку зносотривкість покриттів у 3–5 разів вища, ніж в еталона зі сталі ШХ15 (рис. 5b).

Додавання CoNi у порошкову суміш суттєво підвищує зносотривкість покриттів для Diamond Jet Hybrid gun та JP5000 gun систем напилення, очевидно внаслідок збільшення розмірів карбідних включень. Звідси робимо висновок, що зі збільшенням розміру карбідів ванадію від 0,5 до 10 μm зносотривкість зростає на 50...100%.

Виконали порівняльні дослідження зносотривкості досліджуваних покриттів систем Diamond Jet Hybrid gun, JP5000 gun та ПНПДВ на алюмінієвому сплаві Д16, оксидного корундового шару, отриманого плазмоелектролітним оксидуванням Д16 (ПЕО) [3, 4], сталі ШХ 15, наплавленого шару із порошкового дроту НП 80Х20Р3Т [5, 6], електродугового покриття із ПД Х6Ю6Р3 [7, 8] (табл. 2).

Таблиця 2. Порівняльна характеристика зносотривких покриттів, отриманих різними методами

Метод напилення	Закріплений абразив	Незакріплений абразив
	Втрата маси, mg	
VC–FeCr JP5000	6	21
VC–FeCr DJH	5	27
VC–FeCrCo JP5000	8	16
VC–FeCrCo DJH	7	16
ПНПДВ	7	27
Основа Д16	600	180
Сталь ШХ15-HRC60	30	69,5
Наплавлений шар із ПД НП 80Х20Р3Т	8	8
Електродуговий покриття із ПД Х6Ю6Р3	15	50
Д16 + ПЕО	2	7

За випробувань закріпленням абразивом найбільшу зносотривкість має оксидо-керамічний шар, синтезований на поверхні Д16. HVOF покриття також мають високу зносотривкість на рівні з наплавленим шаром 80Х20Р3Т. Встановлено, що зносотривкість напилених покриттів вказаними методами більша в 75–100 разів, ніж основи Д16, в 3–5 разів, ніж сталі ШХ15, в 1,3 рази, ніж наплавленого шару із ПДНП 80Х20Р3Т, в 2,5 рази, ніж електродугового покриття із ПД Х6Ю6Р3.

Однак за випробувань незакріпленням абразивом такої залежності не спостерігали. Досліджувані покриття мають суттєво гіршу зносотривкість порівняно з наплавленим шаром 80Х20Р3Т на сталі і з оксидованим шаром на алюмінієвому сплаві Д16. Це зумовлено тим, що між ламелями покриття розташовані крихкі оксидні плівки та пори і абразив-пісок, який потрапляє між ними і гумовим диском, швидко їх руйнує. В подальшому ці ламелі викришуються.

ВИСНОВКИ

Покриття на основі VC–FeCr, отриманий методом HVOF, має високу абразивну зносотривкість за використання як газоподібного, так і рідкого палива. Додавання CoNi в напилюваний порошок збільшує зносотривкість покриття за випробування незакріпленням абразивом. Встановлено, що зносотривкість напилених

покривів вказаними методами вища в 75–100 разів, ніж основи Д16, в 3–5 разів, ніж сталі ШХ15, в 1,3 рази, ніж наплавленого шару із ПД НП 80Х20Р3Т, в 2,5 рази, ніж електродугового покриву із ПД Х6Ю6Р3 за тертя жорстко закріпленим абразивом.

Із досліджуваних покривів найбільшу зносотривкість мають плазмоелектролітні оксидні шари на алюмінієвому сплаві Д16.

РЕЗЮМЕ. Исследована износостойкость покрытий, напыленных сверхзвуковым газопламенным (HVOF) и плазменным методами в динамическом вакууме, из порошков полученных механическим легированием VC–FeCr и VC–FeCrCo. Покрытия напыляли с использованием установок Diamond Jet Hybrid gun (пропан–кислород) и JP5000 gun (керосин–кислород). Установлено, что износостойкость этих покрытий выше в 75–100 раз, чем основи Д16, в 3–5 раз, чем стали ШХ15, в 1,3 раза, чем наплавленного слоя из ПД НП 80Х20Р3Т, в 2,5 раза, чем электродугового покрытия из ПД Х6Ю6Р3 при трении жестко закрепленным абразивом.

SUMMARY. The wear resistance of coatings sprayed with supersonic gas-flame (HVOF) and plasma spray method of coatings from powders obtained by mechanical alloying of VC–FeCr and VC–FeCrCo in dynamic vacuum has been investigated. The coatings were sprayed using Diamond Jet Hybrid (propane–oxygen) gun and JP5000 gun (kerosene–oxygen fuel). It was established that the wear resistance of coatings sprayed by these methods is 75–100 times higher than D16 base, 3–5 times higher than ШХ15 steel, 1.3 times higher than the layer sprayed from 80Х20Р3Т powder wire, 2.5 times higher than electric arc coating from Х6Ю6Р3 powder wire under friction by rigidly fixed abrasive.

1. *Похмурська Г. В., Студент М. М., Похмурський В. І.* Газотермічні покриття: Навч. пос. – Львів: Простір-М, 2017. – 180 с.
2. *Хрущов М. М., Бабичев М. А.* Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
3. *Plasma electrolytic oxidation of arc-sprayed aluminium coatings / V. Pokhmurski, H. Nykyforchyn, M. Student, M. Klapkiv, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund, A. Wank // Proc. Int. Thermal Spray Conf.: Global Coating Solutions, Beijing, China, 2007. – Ohio, USA: ASM Int., Mat. Park, 2007. – P. 1029–1034.*
4. *Shatskyi I. P., Ropyak L. Ya., and Makoviichuk M. V.* Strength optimization of a two-layer coating for the particular local loading conditions // *Strength of Materials.* – 2016. – **48**, № 5. – P. 28–35.
5. *Пашечко М. І.* Зносотривкість евтектичних покривів системи Fe–Mn–C–B, легованих Si, Ni і Cr // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2010. – **46**, № 5. – С. 109–115.
(*Pashechko M.* Wear resistance of eutectic coatings of the Fe–Mn–C–B system alloyed with Si, Ni and Cr // *Materials Science.* – 2011. – **46**, № 5. – P. 695–701.)
6. *Вплив вібрації під час наплавлення захисного шару на його мікроструктуру та ударно-абразивне зношування / Г. В. Похмурська, М. М. Студент, О. С. Ланець, А. А. Войтович // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2015. – **51**, № 3. – С. 107–112.
(*Influence of vibration in the course of surfacing of a protective layer on its microstructure and impact-abrasive wear / H. V. Pokhmurs'ka, M. M. Student, O. S. Lanets', A.A. Voitovych // Materials Science.* – 2015. – **51**, № 3. – P. 412–417.)
7. *Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures / V. Pokhmurskyi, M. Student, H. Pokhmurska, V. Gvozdeckii, T. Stupnytskyu, O. Student, B. Wielage // J. Therm. Spray Techn.* – 2013. – **22**, № 5. – P. 808–819.
8. *Трибологічні властивості комбінованих метало-оксидокерамічних шарів на легких сплавах / М. М. Студент, В. М. Довгунік, М. Д. Клапків, В. М. Посувайло, В. В. Шмирко, А. Р. Киця // Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2012. – **48**, № 2. – С. 55–65.
(*Tribological properties of combined metal-oxide-ceramic layers on light alloys / M. M. Student, V. M. Dovhunyk, M. D. Klapkiv, V. M. Posuvailo, V. V. Shmyrko, A. R. Kytsya // Materials Science.* – 2012. – **48**, № 2. – P. 180–190.)

Одержано 15.11.2017