

ЗНОСОТРИВКІСТЬ ПОКРИВІВ СИСТЕМИ Fe–Cr–Mn–Ti–Al, НАПИЛЕНИХ ПОРОШКОВИМИ ДРОТАМИ

Л. І. БОГУН¹, Т. М. КОВБАСЮК¹, В. І. КУШПІР¹, І. А. ГУМЕНЮК²

¹ Національний університет "Львівська політехніка";

² Національний авіаційний університет, Київ

Досліджено роботоzдатність покриттів системи Fe–Cr–Mn–Ti–Al, напилених із порошкових дротів, залежно від їх поглинальної здатності. Встановлено механізм зношування досліджуваних трибоспрямижень та допустимий діапазон питомих навантажень для надійного використання цих покриттів в умовах граничного мащення.

Ключові слова: зносотривкість, напилення, питоми навантаження, поглинальна здатність, покриття, граничне мащення.

Вступ. Щоб поліпшити роботоzдатність деталей машин та механізмів, які працюють за умов граничного мащення, використовують зміцнення поверхонь тертя напиленням або іншими методами поверхневої обробки [1–14]. Відомо, що найкращі триботехнічні характеристики за питомих навантажень 1...5 МПа мають трибоспрямиження з напиленими покриттями з порошкових дротів системи Fe–Cr–Mn–Ti–Al [1, 13–15]. Встановлено, що за питомого тиску повітря ~ 0,6 МПа під час напилення покриттів формується структура, яка забезпечує найменшу інтенсивність їх зношування [16, 17]. Зокрема, порувата структура поверхневого шару покриттів поглинає мастило, що полегшує тертя та відповідно зменшує зношування. Проте не достатньо досліджено діапазон питомих навантажень, за яких покриття можуть поглинути максимально можливу кількість мастила для поліпшення умов мащення таких трибоспрямижень.

Мета досліджень – встановити граничне питоми навантаження, за якого поглинальна здатність напилених покриттів збільшуватиме зносотривкість вузлів тертя та дослідити механізм зношування трибоспрямижень у діапазоні питомих навантажень 1...10 МПа.

Матеріали та методика досліджень. Покриття наносили за технологією електродугової металізації з використанням порошкових дротів системи Fe–Cr–Mn–Ti–Al [1, 2]. Напилювали за питомого тиску повітря 0,6 МПа, за якого формується порувата структура, що забезпечує ефективне поглинання мастила [16]. Хімічний склад порошкового дроту та напиленого шару подано у табл. 1. Досліджували на машині СМТ-1 за стандартною схемою тертя "диск–колодка". Для моделювання умов експлуатації використали диски зі сталі марки 45 з напиленими покриттями та колодки з чавуну СЧ 30. Мащення здійснювали, занурюючи тіло пари тертя в контейнер з мастилом ТАД-17и. Досліджували трибоспрямиження за питомих навантажень 1...10 МПа, зі швидкістю 0,5 м/с упродовж 6 h. Номінальна площа контакту становила 274 мм². Зносотривкість зразків визначали ваговим методом за ГОСТ 23.224-86. Металографічний аналіз поверхонь трибоспрямижень виконували на мікроскопі МЕТАМ Р-1 після травлення 4% спиртовим розчином нітратної кислоти.

Таблиця 1. Хімічний склад порошкового дроту та напиленого покриття

Система Fe–Cr–Ti–Mn–Al	Cr	Ti	Mn	Al	C	O ₂	Fe
	(mass%)						
Порошковий дріт	4	1,0	3,0	3,0	1,0	0,5	решта
Напилений покрив	4	0,6...0,8	3,0	2,5	0,6...0,9	3...4	решта

Результати та їх обговорення. Зважування трибоспрямижень після випробувань на тертя за питомого навантаження 7 МПа показало, що покриття максимально поглинали 0,029 g мастила за першу годину тертя і упродовж подальших 5 h відбувалося зношування покриттів (рис. 1a). Натомість покриття, які випробовували за питомого навантаження 10 МПа, максимально поглинали 0,01 g мастила за 15 min тертя, після чого активно зношувалися. При цьому після 6 h контактної взаємодії вони втрачали свою масу на 0,03 g (рис. 1b). Загалом після повного циклу випробувань зі збільшенням питомого навантаження від 7 до 10 МПа втрата маси трибоспрямижень збільшується в 3,5 разів (рис. 1).

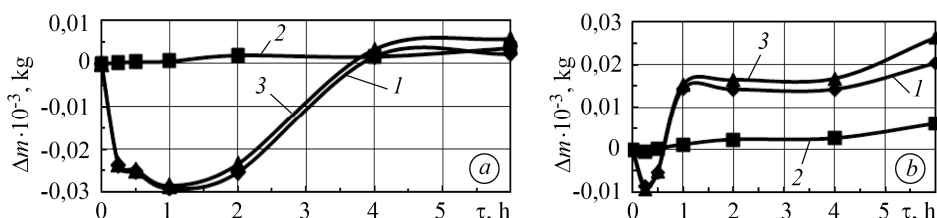


Рис. 1. Кінетика зміни маси трибоспрямижень “напилений покрив Fe–Cr–Mn–Ti–Al – чавун СЧ 30” за граничного мащення під час випробувань за питомих навантажень 7 (a) та 10 МПа (b): 1 – напилений покрив; 2 – чавун СЧ 30; 3 – пара тертя.

Fig. 1. Kinetics of mass change of tribo-coupling system “spray coating Fe–Cr–Mn–Ti–Al – cast iron СЧ 30” under conditions of boundary lubrication during tests at specific loads of 7 (a) and 10 МПа (b): 1 – sprayed coating; 2 – cast iron СЧ 30; 3 – friction pair.

Для встановлення питомих навантажень, за яких поглинальна здатність покриттів максимальна, порівняємо результати попередніх досліджень таких трибоспрямижень за навантажень 1; 3 та 5 МПа [1, 16]. Ці покриття поступово поглинали мастило, збільшуючи масу упродовж всього часу випробувань (рис. 2). Встановлено, що найбільшу поглинальну здатність мають покриття за питомого навантаження 3; 5 та 7 МПа. Проте ті, які випробовували за 7 МПа, вже після 1 h тертя активно зношувалися. Отже, зі збільшенням питомого навантаження до 7 МПа поглинальна здатність покриттів не зменшується, проте збільшується їх втрата маси упродовж повного циклу випробувань (рис. 3).

Таким чином, встановлено діапазон питомих навантажень (1...6,5 МПа), за яких поглинання мастила напиленими покриттями покращує умови мащення трибоспрямижень. За більших питомих навантажень вони хоч і поглинають мастило, але упродовж циклу випробувань зношуються.

Отже, поглинальна здатність покриттів впливає як на власну зносотривкість, так і на трибоспрямижень загалом. Зносотривкість трибоспрямижень оцінювали за інтенсивністю зношування з урахуванням номінальної площі контакту, шляху тертя, але без густини матеріалу (ГОСТ 23.224–86). Обчислювали інтенсивність зношування пар тертя за втратою маси трибоспрямижень упродовж повного циклу випробувань.

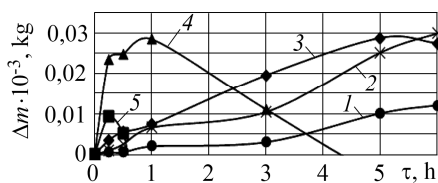


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Зміна маси покриттів системи Fe–Cr–Mn–Ti–Al під час випробувань на тертя за граничного мащення та різних питомих навантажень: 1 – 1 МПа; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 7; 5 – 10 МПа.

Fig. 2. Change in the coating mass of the Fe–Cr–Mn–Ti–Al system during friction tests under boundary lubrication and at various specific loads: 1 – 1 MPa; 2 – 3; 3 – 5; 4 – 7; 5 – 10 MPa.

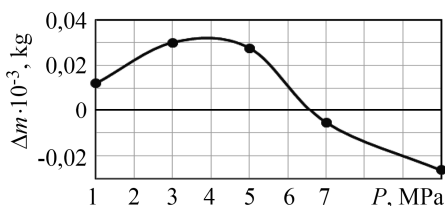


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Вплив питомого навантаження на зміну маси напилених покриттів системи Fe–Cr–Mn–Ti–Al упродовж 6 h тертя за граничного мащення.

Fig. 3. Effect of specific load on the change in the mass of the deposited Fe–Cr–Mn–Ti–Al coatings for 6 h of friction under conditions of boundary lubrication.

Встановлено, що зі збільшенням питомого навантаження від 1 до 10 МПа (рис. 4b) інтенсивність зношування трибоспряжень після 6 h тертя спочатку зменшується до $2 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$ (за навантаження 5 МПа), а потім збільшується до $2,7 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$ (10 МПа). Слід зауважити, що найменшу інтенсивність зношування мали трибоспряження (рис. 4), покритви яких поглинали до 0,029 g мастила (рис. 3).

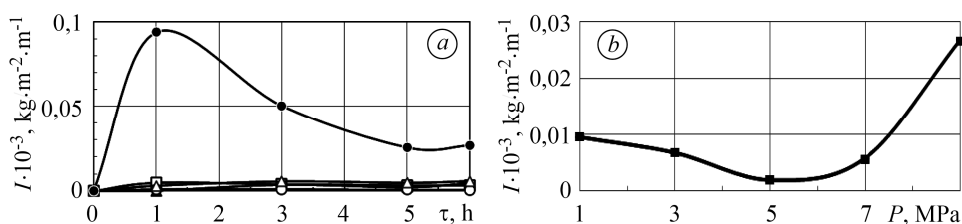


Рис. 4. Зміна інтенсивності зношування трибоспряжень залежно від часу тертя (a) та питомого навантаження (b): ♣ – 1 МПа; ▲ – 3; ♠ – 5; Δ – 7; ● – 10 МПа.

Fig. 4. Change of the intensity of tribo-coupling wear depending on the friction time (a) and specific load (b): ♣ – 1 MPa; ▲ – 3; ♠ – 5; Δ – 7; ● – 10 MPa.

Найбільша інтенсивність зношування трибоспряжень – після контактної взаємодії за питомого навантаження 10 МПа (рис. 4a). Зокрема, після 1 h тертя виявили її різке підвищення до $9,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{m}^{-1}$, що вказує на недостатнє поглинання мастила та активне зношування покриттів (рис. 4b). Тому деталі прецизійних вузлів тертя, зміцнених покритвами, які працюють за питомого навантаження 10 МПа, перед встановленням доцільно додатково притерти упродовж 1...3 h. Натомість для трибоспряжень, які випробовували в діапазоні питомих навантажень 1...7 МПа, не потрібно такої обробки.

Таким чином, виявлено, що трибоспряження (диски з напиленими покритвами системи Fe–Cr–Mn–Ti–Al – колодки з чавуну СЧ 30) мають максимальну роботоздатність у діапазоні питомих навантажень 1...7 МПа.

Щоб встановити механізм зношування трибоспряжень, оцінили будову поверхонь зношування за ISO/DIS7146-2 та DIN 50 320. Покритви мають смугасто-плівкову структуру (рис. 5a, c). Плівки на поверхнях покриттів свідчать про окис-

нювальний механізм зношування. Смуги нашарованих плівок у вигляді пелюстків мають різну ширину і орієнтовані вздовж напрямку ковзання. Напрямок орієнтування пелюстків збігається з напрямком пластичної деформації матеріалу. Вони розташовані гострими краями за напрямком ковзання. Що менша відстань між пелюстками, то менше зношування пар тертя. Крім того, на напилених поверхнях зношування виявили хаотичні пори різного розміру. Після випробувань за питомого навантаження 10 МПа спостерігаємо об'єднання пор у великі каверни, які порушують суцільність покривів. Це є однією з причин збільшення зношування трибоспряжень. Водночас поверхні контртіл мають чіткий борознистий рельєф, що є ознакою абразивного механізму зношування (рис. 5*b, d*) [18].

Під час контактної взаємодії мікроступи напиленого покриву, які є твердішими за контртіло, вирізають у ньому канавки та утворюють продукти зношування. В результаті на поверхнях тертя формується мікрорельєф з рівноважною шорсткістю. Часточки продуктів зношування можуть руйнувати поверхні тертя як мікрорізнанням, так і перекочуванням. При цьому під час перекочування утворюватиметься згладжене дно западин профілю, а під час різання – дрібний борознистий мікрорельєф.

Аналіз профілограм, знятих з поверхонь зношування, виявив, що руйнування поверхонь трибоспряжень за питомого навантаження 7 МПа відбувалося за механізмом різання. Після тертя за питомого навантаження 10 МПа присутні фрагменти структури, характерні для обох механізмів зношування. Слід зауважити, що на поверхні тертя виявлені ознаки притаманні втомному зношуванню у вигляді слідів перекочування часточок.

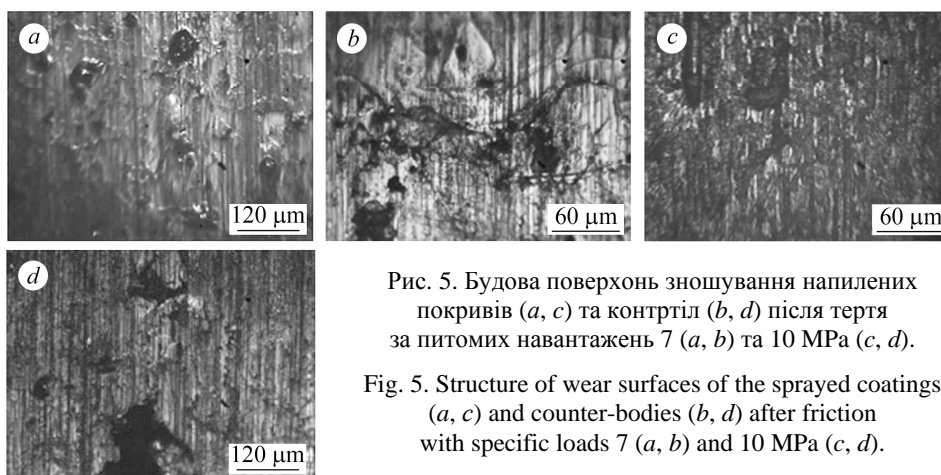


Рис. 5. Будова поверхонь зношування напилених покривів (*a, c*) та контртіл (*b, d*) після тертя за питомих навантажень 7 (*a, b*) та 10 МПа (*c, d*).

Fig. 5. Structure of wear surfaces of the sprayed coatings (*a, c*) and counter-bodies (*b, d*) after friction with specific loads 7 (*a, b*) and 10 MPa (*c, d*).

Для дослідження механізму зношування здійснили мікрорентгеноспектральний аналіз поверхонь тертя, які випробовували за питомого навантаження 5 МПа. Встановлено, що на поверхнях зношування присутній кисень, що свідчить про окиснення (табл. 2, рис. 6*b–d*). Слід зауважити, що більша частина оксидних фаз сформувалася під час напилення [1, 2, 15, 16–19] (рис. 6*a*). Оксидні фази характеризуються різними розмірами від 5...10 до 30...40 μm (рис. 6*c*, табл. 2). Інша частина оксидних фаз утворилася в результаті окиснення поверхонь під час тертя (рис. 6*b–d*, табл. 2). Це підтверджується підвищеним вмістом кисню на доріжках зношування порівняно з його вмістом у матричному сплаві покриву (рис. 6*b, d*, табл. 2). Враховуючи різну спорідненість до кисню титану, хрому, алюмінію та заліза, які входять до складу покривів, можна передбачити, що на поверхнях зношування насамперед утворюватимуться оксидні фази на їх основі (рис. 6*c, d*, табл. 2). На межах ламелей напилених покривів між плівками оксидів

виявили часточки мастила (рис. 6с, табл. 2). На поверхнях зношування також можуть бути присутні часточки графіту, котрі могли потрапити з поверхні контртіла в результаті масоперенесення чавуну (СЧ 30) адгезійним схоплюванням, або в результаті самоорганізації поверхні [20, 21].

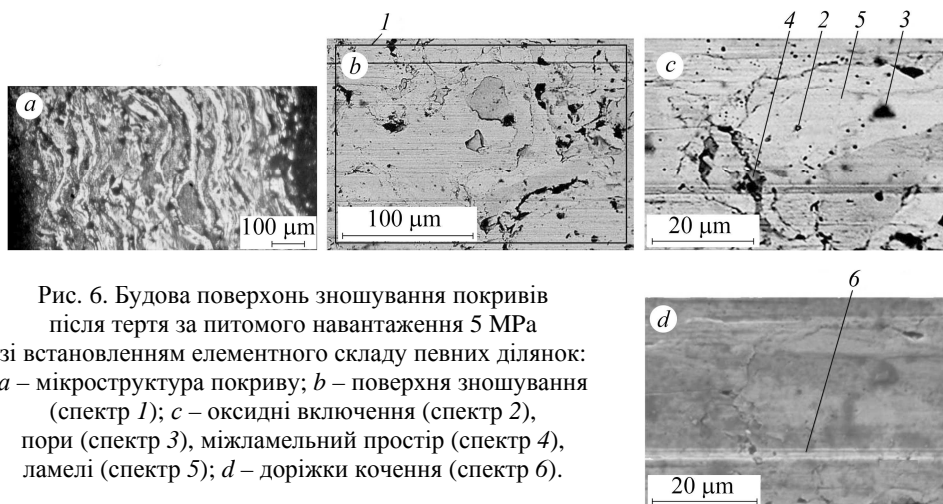


Рис. 6. Будова поверхонь зношування покриттів після тертя за питомого навантаження 5 МПа зі встановленням елементного складу певних ділянок: *a* – мікроструктура покриття; *b* – поверхня зношування (спектр 1); *c* – оксидні включення (спектр 2), пори (спектр 3), міжламельний простір (спектр 4), ламелі (спектр 5); *d* – доріжки кочення (спектр 6).

Fig. 6. Structure and chemical composition of the wear surfaces of sprayed coatings after friction at a specific load of 5 MPa: *a* – coating microstructure; *b* – wear surface (spectrum 1); *c* – oxide inclusions (spectrum 2), pores (spectrum 3), inter-lamellae space (spectrum 4), lamellae (spectrum 5); *d* – rolling track (spectrum 6).

Таблиця 2. Розподіл елементів по поверхні зношування у спектрах (рис. 6)

Елемент	Спектр 1		Спектр 2		Спектр 3	
	mass%	at. %	mass%	at. %	mass%	at. %
O	1,87	5,95	23,34	44,74	3,96	8,99
Al	3,07	5,80	21,60	24,54	35,75	48,13
Si	0,42	0,76	–	–	–	–
Ti	1,60	1,70	2,05	1,31	30,99	23,50
Cr	11,50	11,28	7,56	4,46	6,70	4,68
Mn	1,36	1,27	–	–	–	–
Fe	80,18	73,23	45,45	24,95	22,60	14,70
	Спектр 4		Спектр 5		Спектр 6	
O	8,52	12,11	–	–	4,72	13,87
Al	2,24	1,89	2,11	4,20	5,39	9,40
Ti	0,78	0,37	1,42	1,59	2,07	2,03
Cr	8,45	3,70	13,70	14,15	11,09	10,03
Mn	–	–	2,13	2,08	1,27	1,09
Fe	46,20	18,82	80,19	77,11	75,46	63,57

В результаті досліджень встановлено, що такі контактні тиски і тонка плівка мастила не достатньо охороняє поверхневі шари мікровиступів від пластичної деформації, що призводить до розвитку окиснювального зношування трибоспряжень.

Таким чином, на підставі аналізу будови поверхонь можна стверджувати, що в діапазоні питомих навантажень 1...10 МПа зношування покриттів відбувається за окисно-абразивним механізмом. Поверхневий шар, який утворюється під час тертя, складається з пластичної основи (оксидних фаз заліза) та вкраплень твердих включень оксидних фаз Ti, Al, Cr. Пори та мікрозападини утримують мастило в поверхневих шарах, що додатково полегшує тертя. Отже, така будова шару здатна ефективно зменшити інтенсивність зношування трибоспряжень.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що найбільшу поглинальну здатність мають покриття системи Fe–Cr–Mn–Ti–Al, напилені з порошкових дротів за питомих навантажень 1...6,5 МПа. Показано, що трибоспряження (диски з напиленими покриттями системи Fe–Cr–Mn–Ti–Al – колодки з чавуну СЧ 30) мають максимальну робото-здатність за питомих навантажень 1...7 МПа. Виявлено, що зношування трибоспряжень у діапазоні досліджуваних питомих навантажень описується окисно-абразивним механізмом.

РЕЗЮМЕ. Исследована работоспособность покрытий системы Fe–Cr–Mn–Ti–Al, напыленных из порошковых проволок, в зависимости от их поглощающей способности. Установлен механизм износа исследуемых трибоспряжений и допустимый диапазон удельных нагрузок для надежного использования этих покрытий в условиях предельной смазки.

SUMMARY. The effect of serviceability of Fe–Cr–Mn–Ti–Al coatings sprayed from powdered wires, depending on their adsorption capacity is investigated. The mechanism of wear of the investigated tribo-coupling and the permissible range of specific loads for the reliable use of these coatings under conditions of boundary lubrication is established.

1. *Електродугові відновні та захисні покриття* / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік, Г. В. Похмурська, І. Й. Сидорак. – Львів: ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2005. – 192 с.
2. *Вплив високотемпературної корозії на газоабразивну тривкість електродугових покриттів* / М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. В. Гвоздецький, М. Я. Головчук, М. С. Романів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 4. – С. 19–27.
(*Effect of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings* / М. М. Student, Н. V. Pokhmurs'ka, V. V. Hvozdet's'kyi, M. Y. Holovchuk, M. S. Romaniv // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 4. – P. 481–489.)
3. *Вплив тертя на фазові перетворення у поверхневих шарах газотермічного покриття FeCrB+Al* / М. М. Студент, В. М. Довгунік, І. Й. Сидорак, Г. В. Похмурська, О. І. Яськів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2000. – **36**, № 4. – С. 109–112.
(*Effect of friction on phase transitions in the surface layers of fecrb + al gas-thermal coatings* / М. М. Student, V. M. Dovhunya, I. I. Sydorak, H. V. Pokhmurs'ka, O. I. Yas'kiv // *Materials Science*. – 2000. – **36**, № 4. – P. 607–611.)
4. *Оптимізація вмісту хрому в порошкових дротах систем Fe–Cr–C, Fe–Cr–B за корозійною тривкістю електродугових покриттів* / Т. Р. Ступницький, М. М. Студент, Г. В. Похмурська, В. М. Гвоздецький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – **52**, № 2. – С. 23–29.
(*Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings* / Т. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V. M. Hvozdet's'kyi // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172.)
5. *Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures* / V. Pokhmurskii, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Stypnuts'kyi, O. Student, B. Wielage, H. Pokhmurska // *J. of Thermal Spray Technology*. – 2013. – **22**, № 5. – P. 808–819.

6. *Microstructural characteristics and tribological behavior of HVOF-sprayed novel Fe-based alloy coatings* / A. Milanti, H. Koivuluoto, P. Vuoristo, G. Bolelli, F. Bozza, L. Lusvarghi // *Coatings*. – 2014. – **4**, № 1. – P. 98–120.
7. *Wilden J., Frank H., and Bergmann J.-P.* Process and microstructure simulation in thermal spraying // *Surf. Coat. Technol.* – 2006. – № 201. – P. 1962–1968.
8. *Mellor B. G.* Surface Coatings for Protection Against Wear. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2006. – 448 p.
9. *Вплив лазерного мікролегуювання ніобієм на зносотривкість нержавних сталей* / В. В. Широков, Х. Б. Василів, З. А. Дурягіна, Г. В. Лазько, Н. Б. Рацька // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2009. – **45**, № 4. – P. 12–19.
(*Effect of laser microalloying with niobium on the wear resistance of stainless steels* / V. V. Shyrokov, K. B. Vasylyv, Z. A. Duryahina, H. V. Laz'ko, N. B. Rats'ka // *Materials Science*. – 2009. – **45**, № 4. – P. 473–480.)
10. *Дурягіна З. А., Ковбасюк Т. М., Беспалов С. А.* Аналіза конкурентоспроможних метод підвищення експлуатаційних властивостей функціональних шарів плоских нагрівальних елементів // *Успехи фізики металлов*. – 2016. – **17**, № 1. – P. 29–51.
11. *Phase dependence of Fe-based bulk metallic glasses on properties of thermal spray coatings* / S. Kumar, J. Kim, H. Kim, C. Lee // *J. Alloys Compd.* – 2009. – № 475. – L9–L12.
12. *Кузнецов Ю. А., Гончаренко В. В., Кулаков К. В.* Перспективные способы высокоскоростного газотермического напыления покрытий. – Орел: ОрелГАУ, 2011. – 124 с.
13. *Богун Л. І., Студент М. М.* Дослідження кінетики зношування напилених хромовмісних покриттів за умов граничного мащення // *Технологічні комплекси*. – 2011. – **4**, № 2. – С. 112–116.
14. *Богун Л. І.* Дослідження структурно-фазового стану поверхонь тертя у парах хромовмісній покриття-чавун СЧ 30 // *Вісн. Львівськ. політехн. ін-ту*. – 2012. – № 729. – С. 93–99.
15. *Богун Л. І., Кузін М. О.* Вплив параметрів структури напилених покриттів на контактну довговічність вузлів тертя в умовах граничного мащення // *Машинознавство*. – 2013. – **195–196**, № 9–10. – С. 72–78.
16. *Куцова В. З., Богун Л. І., Лавриць С. М.* Структура та зносотривкість поверхневих шарів сталі 45 при напыленні з різним тиском повітря // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – **296**, № 5. – С. 47–51.
17. *Planche M. P., Liao H., and Coddet C.* Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – **182**, № 2–3. – P. 215–226.
18. *ДСТУ 2823-94.* Зносотривкість виробів. Тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1995. – 31 с.
19. *Fauchais P. and Vardelle M.* Sensors in Spray Processes // *J. of Thermal Spray Technology*. – 2010. – **19**, № 4. – P. 668–694.
20. *The surface self-organization in process friction and corrosion of composite materials* / Z. Duriagina, K. Lenik, M. Paszczko, K. Dzedzic, M. Barszcz // *Archives of Mater. Sci. and Engng.* – 2008. – № 30. – P. 9–12.
21. *Мікромеханічні та електрофізичні властивості наноструктурованих діелектричних покриттів Al₂O₃ на плоских нагрівних елементах* / З. А. Дурягіна, Т. М. Ковбасюк, С. А. Беспалов, В. Я. Підкова // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2016. – **52**, № 1. – С. 51–55.
(*Micromechanical and electrophysical properties of Al₂O₃ nanostructured dielectric coatings on plane heating elements* / Z. A. Duryahina, T. M. Kovbasyuk, S. A. Bespalov, V. Ya. Pidkova // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 1. – P. 50–55.)

Одержано 05.04.2018