



Куцова В. З. /д. т. н./  
НМетАУ



Богун Л. І. /к. т. н./  
НУ «Львівська політехніка»



Лавриш С. М.  
Фізико-механічний інститут  
ім. Г. В. Карпенка НАН України

## Структура та зносостійкість поверхневих шарів сталі 45 при напиленні з різним тиском повітря

В роботі досліджено вплив тиску під час напилення покриттів порошковими дротами системи «Fe–Cr–Mn–Ti–Al» на формування структури поверхневих шарів. Встановлено, що збільшення питомого тиску повітря під час напилення забезпечує утворення дисперсної пористої структури покриттів, що дозволяє зменшити інтенсивність їх зношування за однакових режимів напилення. Іл. 6. Табл. 2. Бібліогр.: 14 найм.

**Ключові слова:** напилення, пара тертя, граничне мащення, зносостійкість, ламелі, пори

*The influence of pressure during spray coating by flux-cored wire of Fe–Cr–Mn–Ti–Al system on the formation of surface coating structure is investigated. It is stated that increase of air specific pressure while coating provides formation of dispersive pore structure of coatings, allows to reduce the intensity of their wear during similar modes of spraying.*

**Keywords:** spraying, friction couple, wear-resistance, lamellae, pores

Сучасне виробництво ставить високі вимоги до підвищення ресурсу та надійності роботи машин та механізмів. Покращення цих характеристик є можливим за умови використання відповідних конструкційних матеріалів, які б поєднували високу міцність та зносостійкість. Тому одна з важливих задач, яка стоїть перед матеріалознавцями – підвищення триботехнічних характеристик існуючих матеріалів та покриттів або створення нових з наперед заданими властивостями [1]. Перспективним є використання зносостійких покриттів, одержаних методами дифузійного нанесення, що спроможні ефективно виконувати свої функції, бути екологічно чистими та економічно обґрунтованими.

Для поверхневого зміцнення малонавантажених деталей, які працюють за умов граничного мащення та одночасного впливу корозійного середовища широко використовують хромування [2, 3]. Цей спосіб зміцнення забезпечує достатню зносостійкість та корозійну стійкість деталей вузлів тертя. Проте таке зміцнення потребує додаткових витрат на утилізацію відходів виробництва, супроводжується виділенням токсичних речовин та створює екологічну небезпе-

ку [4, 5]. При роботі деталей в режимі граничного мащення, коли мастильний матеріал подається в зону тертя періодично, на контактуючих поверхнях необхідно створювати певні мікрорезервуари для мастильного матеріалу. В працях авторів [6] показано, що для зміцнення виробів, які працюють за даних умов тертя, доцільно використовувати метод напилення порошковими дротами різних систем. Пориста структура сформованого поверхневого шару має можливість утримувати частинки мастила, що полегшує процеси тертя та зменшує зношування.

Попередніми дослідженнями встановлено [7-9], що високі триботехнічні характеристики мають покриття, напилені порошковими дротами системи Fe–Cr–Mn–Ti–Al. Зі зростанням тиску повітря під час нанесення від 0,3 до 0,6 МПа мікроструктура покриття суттєво подрібнюється, змінюються розміри ламелей та пор [10].

### Мета роботи

Встановити вплив питомого тиску розпилювального повітря під час напилення покриттів на формування структури поверхневих шарів, розмір пор та їх вплив на зміну інтенсивності зношування.

**Матеріали та методика досліджень**

Покриття одержували шляхом розпилення суцільного дроту електродуговим металізаторм з модифікованою системою розпилення, де електрична дуга горить в каналі головки, що дозволяє одержувати дрібнодисперсні покриття. Зразки зі сталі 45 напиляли за режимами: сила струму – 100 А, напруга – 32 В, віддаль від сопла до напилюваної поверхні 100–110 мм, тиск стисненого повітря 0,5 та 0,6 МПа.

Дослідження на зношування проводились на машині тертя СМТ-1 за схемою тертя «диск-колодка». В якості тіла тертя використовували диски з напиленими порошковими покриттями, а контртілом служили колодки, виготовлені з чавуну СЧ 30. Змащування проводилося зануренням одного з тіл пари тертя в контейнер з мастилом ТАД-17и. Дослідження проводилось за різних питомих навантажень – 1, 3 та 5 МПа зі швидкістю 0,47 м/с та часом випробувань – 6 год. Номінальна площа контакту становила 250 мм<sup>2</sup>. Зносостійкість зразків визначали ваговим методом.

Мікроструктуру пар тертя після випробувань досліджували на металографічному мікроскопі МЕТАМ Р – 1 та методом аналізу поверхонь зношування відповідно до стандарту ISO/DIS 7146 [11]. Об'ємну частку пор в покритті та на поверхнях зношування визначали лінійним та точковим методами [12, 13]. Розрахунок плям фактичного контакту проводили на основі аналізу профілограм, що зняті після тертя на профілографі «Dektak 11A» та опорних кривих робочого профілю, побудованих на основі програми Microgeometry за методикою Крагельського [14].

Рентгенівський фазовий аналіз здійснювали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3М

методом крокового сканування в інтервалі кутів  $2\theta$  – 10–90°. Крок сканування становив 0,05°, час експозиції в точці – 3–5 с. Швидкість сканування – 1–40 об/хв<sup>-1</sup>. Обробку експериментальних даних проводили з використанням програми PowderCell 2,4 для повнопрофільного аналізу рентгенівських спектрів.

**Результати досліджень**

*Визначення інтенсивності зношування досліджуваних пар тертя.* За зміною втрати маси  $\Delta m$  визначали вагове зношування покриттів за різних питомих навантажень. Точність вимірювань становила  $\pm 5\%$ . Відношення різниці маси зразка до шляху тертя, часу випробувань або роботи тертя дали змогу визначити інтенсивність зношування робочої поверхні.

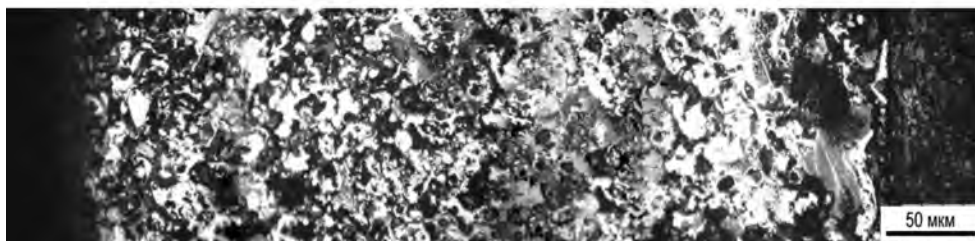
Порівнюючи результати досліджень покриттів, які напилялися за питомих тисків газу 0,5–0,6 МПа після 6 год. випробувань за різних питомих навантажень встановлено, що характер зношування практично однаковий. При цьому покриття, що напилені за питомого тиску повітря 0,6 МПа, поглинули приблизно в 2 рази більше мастила, що зменшило інтенсивність їх зношування в 1,5–3 рази [10]. Очевидно, що на зміну зносостійкості покриттів буде також впливати сформована структура.

*Мікроструктура дослідження напилених покриттів.* Автори [7] встановили, що нанесені покриття характеризуються ламелярною структурою на основі твердих розчинів хрому та алюмінію у мартенситі. Між ламелями утворюються проміжки оксидних та карбідних фаз. Після випробування на зношування структура напиленого шару практично не змінюється (рис. 1).

При збільшенні питомого тиску повітря до 0,6 МПа вдається сформувати дисперснішу



а)



б)

**Рис. 1.** Мікроструктура покриттів напилених порошковим дротом системи Fe–Cr–Ti–Mn–Al під тиском повітря 0,5 МПа (а) та 0,6 МПа (б) після тертя за питомого навантаження 5 МПа

структуру напиленого шару, що містить велику кількість пор. Пори виконують роль резервуарів для мастильної речовини. Під час тертя мастило видавлюється з об'єму матеріалу та надходить у зону контакту пари тертя. Це сприяє відновленню мастильної плівки, забезпечуючи умови граничного мащення.

Об'ємна частка пор в покриттях, напилених за питомого тиску газу 0,5 МПа становить 13,21 %, а за питомого тиску 0,6 МПа – 12,36 % відповідно. Це свідчить, що питомий тиск газу під час напилення не впливає на об'ємну частку пор у покритті, що переважно зменшується зі збільшенням питомого навантаження при випробуваннях на зношування (табл. 1). Можна припустити, що зменшення кількості пор на поверхнях зношування може сприяти зменшенню інтенсивності зношування. З другого боку, тиск газу під час напилення впливає на розміри утворених пор, що своєю чергою також впливає на інтенсивність зношування.

Таблиця 1

**Об'ємна частка пор на поверхні зношування покриттів напилених порошковими дротами системи Fe-Cr-Ti-Mn-Al**

Поверхня зношування після тертя за зусиль	Визначена лінійним методом, %	Визначена точковим методом, %	Середнє заповнення шару порами, %
Покриття напилене за питомого тиску 0,5 МПа			
1 МПа	6,85	6,98	6,91
3 МПа	5,10	5,46	5,28
5 МПа	3,58	4,01	3,79
Покриття напилене за питомого тиску 0,6 МПа			
1 МПа	11,82	11,29	11,55
3 МПа	4,06	4,43	4,25
5 МПа	3,33	3,64	3,49

Встановлено, що у об'ємі напилених покриттів переважають пори діаметром 25–30 мкм, але зустрічаються пори розміром 12 мкм та 10 мкм (рис. 2). Після тертя у всьому діапазоні навантажень їх розміри не змінюються (рис. 3, 4). Це свідчить, що пори саме такого розміру прийматимуть активну участь у процесах тертя та впливатимуть на інтенсивність зношування.

Дослідження показали, що існує взаємозв'язок між розмірами, кількістю пор в покритті і на поверхнях зношування та діаметром і кількістю плям фактичного контакту, що формуються під час тертя. Саме такий взаємозв'язок визначатиме здатність напилених покриттів до зменшення зношування за умов граничного мащення.

Розрахунок діаметру плям фактичного контакту поверхонь пар тертя. За методикою Крагель-

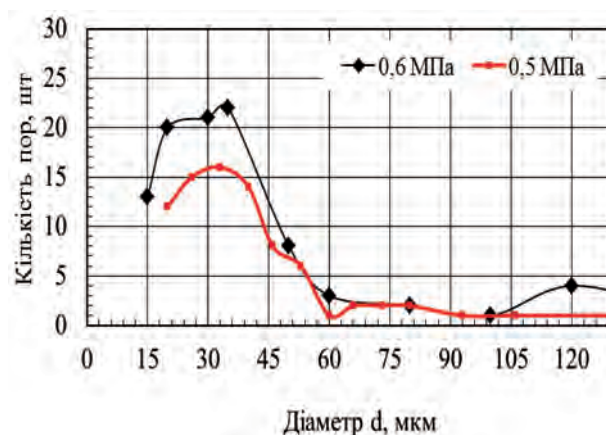


Рис. 2. Залежність кількості та розмірів пор в покриттях напилених порошковими дротами системи Fe-Cr-Mn-Ti-Al за різних тисків повітря

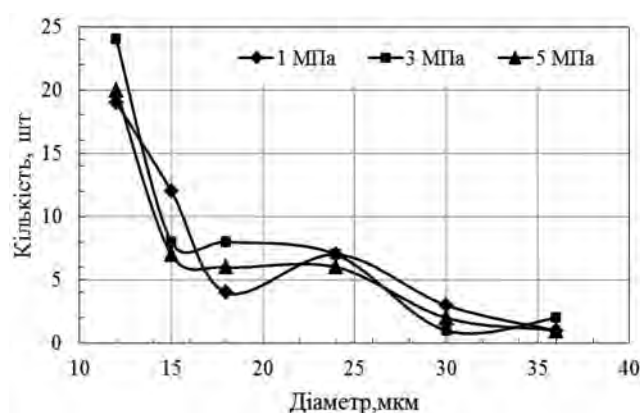


Рис. 3. Залежність кількості та розміру пор на поверхні зношування від питомого навантаження

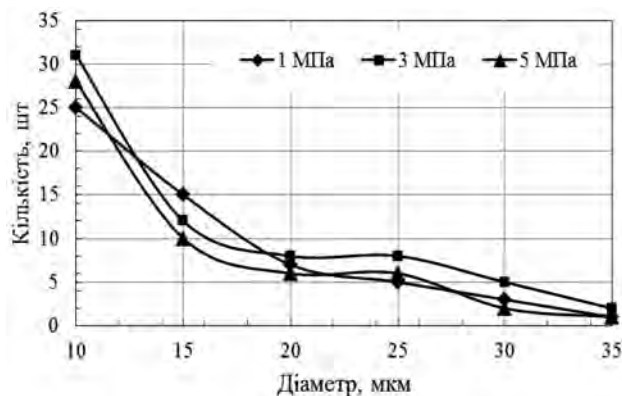


Рис. 4. Кількість пор на поверхнях зношування покриття, напилених за тиску повітря 0,6 МПа, після випробування на тертя за різних питомих навантажень

ського в основу розрахунків закладають параметри мікрогеометрії твердішого з тіл пари тертя, а величину твердості відповідно – більш м'якого. Тому розрахунки діаметру плям фактичного контакту, які в першу чергу пов'язані з мікрогеометрією поверхні, проводили для пружного контакту. З іншого боку, якщо при першому навантаженні ми спостерігаємо пластичну дефор-

Параметри пор на поверхні зношування

Навантаження, МПа	$d_{\text{пор}}$ , мкм	$L$ , мкм	$N$ , шт	$d_{\text{пор}}$ , мкм	$L$ , мкм	$N$ , шт
	0,5 МПа			0,6 МПа		
1	5,0392	451	89	5,3026	480	91
3	5,0417	453	90	5,5169	500	91
5	5,0050	449	90	5,5160	490	89

мацію, то при повторному навантаженні зусиллям, яке не перевищує початкове, пластичний контакт вироджується в пружний. Такий вид деформації найбільш характерний для поверхні тертя після притирання і встановлення рівноважної шорсткості поверхні. Це дає підставу для проведення розрахунків триботехнічних характеристик, використовуючи залежності для пружного контакту.

Для розрахунків середнього діаметра плям фактичного контактування використали залежність (1), попередньо визначивши параметри  $v$  та  $r$  за формулами (3, 4). Усі характеристики визначають за даними профілограм, знятих з поверхні зношування.

$$d_{\text{пп}} = 2 \cdot \sqrt{\left( \frac{r \cdot R_{\text{max}}}{v} \cdot \varepsilon \right)}, \quad (1)$$

де  $R_{\text{max}}$  – відстань між лінією виступу і лінією впадини профілю в межах базисної площини;  $v$  – параметр, що залежить від виду обробки;  $\varepsilon$  – деформація виступу;  $R_{\text{max}}$ ,  $\varepsilon$  – визначається з опорної кривої.

Параметр опорної кривої, що залежить від виду обробки, розраховують

$$v = 2 \cdot t_m \cdot \frac{R_p}{R_a}, \quad (2)$$

де  $R_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю;  $R_p$  – середнє арифметичне значення відстані від лінії виступу до середньої лінії;  $t_m$  – середня відносна опорна довжина профілю.

Для напильного покриття середній радіус становить

$$r = \frac{1}{k} \cdot \sum_1^k r_{ni} = \frac{1}{k} \cdot \sum_1^k \frac{d_i^2}{8 \cdot h_i}, \quad (3)$$

де  $d$  – ширина січення виступу;  $h$  – вершини виступів.

Розрахунки показали, що розміри плям фактичного контактування на покриттях та контртілах після випробувань за різних питомих навантаженнях практично однакові і становлять 5 мкм (табл. 2). Такі режими випробувань забезпечують однакову кількість плям фактичного кон-

тактування, що становлять приблизно 89–91 шт на 1 мм довжини. Отже розміри пор, які формуються на поверхні зношування (10 мкм) є найбільш близькими до діаметру плям фактичного контактування (5 мкм), що формуються під час тертя.

Встановлення фазового складу плям фактичного контакту в досліджуваних парах тертя дозволить оптимізувати хімічний склад нанесених покриттів.

Аналіз механізму зношування трибо спряжень за різних питомих навантажень. Рентгеноструктурним фазовим аналізом на поверхні тертя виявлено тверді розчини  $\text{Fe}_\alpha$  (фериту або мартенситу) та аустеніту  $\text{Fe}_\gamma$  (рис. 5). В той же час оксидних фаз не виявлено. Це свідчить про утворення на поверхні тертя плівок, що традиційно виділяються під час другої стадії оксидного зношування, коли утворюються тверді розчини та евтектики хімічних сполук кисню з металом.

Поверхні тертя, в яких насичення металу киснем не досягає необхідної концентрації для

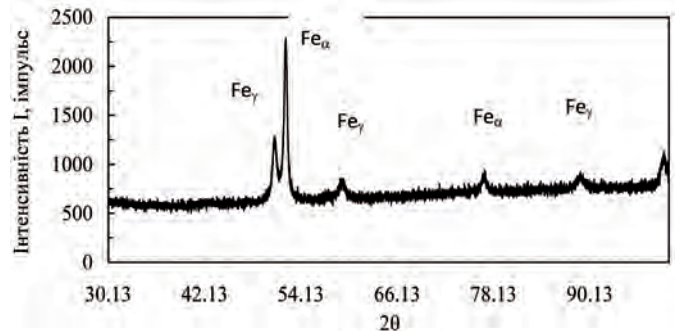


Рис. 5. Дифрактограма напильних покриттів порошковими дротами системи Fe-Cr-Ni-Ti-Al за умов тертя

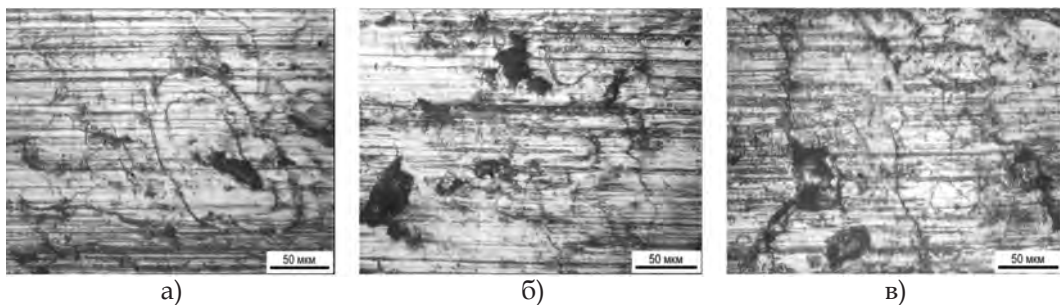


Рис. 6. Мікроструктура поверхні зношування напильних покриттів після тертя за питомих навантажень, МПа: а – 1; б – 3; в – 5

утворення оксидів, зношуються при постійному утворенні структури твердого розчину та винесення плівок із зони тертя, що підтверджується мікроструктурним аналізом.

Аналіз поверхні тертя (рис. 6) є смугасто-плівковою, що характерно для оксидного механізму зношування. Проте спостерігаються ділянки руйнування поверхонь зношування, як відповіді абразивному механізму зношування.

Граничний шар переважно складається з легованих твердих розчинів хрому, алюмінію та кисню у Fe<sub>2</sub> та Fe<sub>3</sub> з вкрапленнями твердих фаз. Саме такі включення сприяють реалізувати абразивний механізм зношування.

Отже можна припустити, що за всіх навантажень під час тертя відбувається абразивно-оксидний механізм зношування. Для ідентифікації фаз, які формують фактичні плями контакту на поверхнях тертя необхідно провести більш детальних аналіз будови поверхонь зношування.

### Висновки

Зі збільшенням питомого тиску повітря під час наплення покриттів за однакових режимів випробувань інтенсивність зношування пар тертя зменшується  $\approx$  в 2 рази, при цьому збільшується кількість поглинутого мастила.

Середній розмір пор, які беруть активну участь в полегшенні процесів тертя, в об'ємі покриття становить близько 25 мкм, а на поверхнях зношування приблизно 10 мкм. Розміри та кількість плям фактичного контактування, котрі сформувалися після випробувань за різних питомих навантажень, практично однакові, їх розмір приблизно 5 мкм. Очевидно, що на тих поверхнях зношування, розміри пор яких ближчі до розмірів плям фактичного контактування, полегшуються процеси тертя і зменшується зношування вузлів тертя.

За всіх навантажень відбувається абразивно-окисний механізм зношування.

### Бібліографічний список

1. Чернега С. М., Поляков І. А., Медова І. Ю. Підвищення зносостійкості поверхневих шарів металів та сплавів боридними покриттями за участю міді // *Машинобудування*. – 2011. – № 61. – С. 104-108.
2. *Справочник. Гальванические покрытия в машиностроении* / Под ред. М. А. Шлугера. – М.: Машиностроение. – 1985. – Т. 1. – С. 119-121.
3. Иванова Н. Д., Иванов С. В., Болдырев Е. И. *Справочник гальванотехника. Фторсодержащие элетролиты и растворы*. – Киев: Наукова думка, 1993. – С. 39-47, 148-151.

4. Богун Л. І., Пашечко М. І., Ленік К. С., Яворська М. М. Дослідження кінетики зношування хромовмісних покриттів за умов граничного мащення // *Сборник научных трудов XVI международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века»*, Т. 3, Севастополь, 2009.

5. Измайлова Д. Р., Войтович В. Б., Куролан Н. С. Ионообменный метод очистки промышленных стоков гальванических цехов // *Водоснабжение и сантехника*. – 1980. – № 4. – С. 7-9.

6. Internet. [www.kmccorporation.com/products/chromefx](http://www.kmccorporation.com/products/chromefx).

7. Похмурський В. І., Студент М. М., Довгунік В. М., Похмурська Г. В., Сидорак І. Й. Електродугові відновні та захисні покриття. – Львів: Національна академія наук України, ФМІ, 2005. – 192 с.

8. Богун Л. І., Студент М. М. Дослідження кінетики зношування напилених хромовмісних покриттів за умов граничного мащення / *Науковий журнал «Технологічні комплекси»*. – Луцьк: Вид-во Луцького національного технічного університету. – 2011. – № 2 (4). – С. 112-116.

9. Богун Л. І., Кушпір В. І. Дослідження кінетики зношування пар тертя: напилени покриття порошковими дротами системи Fe-Cr-Ni-Ti-Al – чавун СЧ 30 // 11-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові. – 2013. – С. 178-179.

10. Богун Л. І., Лаврись С. М. Вплив розмірів пор на формування зносотривкої структури напилених покриттів, що працюють в умовах граничного мащення // *Нові матеріали і технології в машинобудуванні: матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції*. – Київ: Вид-во НТУУ «КПІ», 2014. – 156 с.

11. Богун Л. І., Яворська М. М. Структури поверхонь зношування, які формуються в умовах тертя // *Методичні вказівки до лабораторної роботи з дисципліни «Трибологія та зносотривкі матеріали»*. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2008. – 12 с.

12. Салтыков С. А. *Стереометрическая металлография*. – М.: Металлургия, 1976. – 271 с.

13. Богун Л. І., Кузін М. О. Вплив параметрів структури напилених покриттів на контактну довговічність вузлів тертя в умовах граничного мащення // *Машинознавство*. – 2013. – № 9-10 (195-196). – С. 72-78.

14. Крагельський І. В., Алисіна В. В. *Трение, изнашивание и смазка. Справочник, книга 1*. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.

**Поступила 12.08.2015**