

УДК: 621.891.62-408.2:669.15

Г.Є. Остриця, П.В. Назаренко, І.Є. Поліщук

### Триботехнічні властивості газотермічних покриттів з різним типом зміцнення

*Розглянуто триботехнічні властивості газотермічних покриттів із різним типом зміцнення при терті по бронзі БрАЖМц 10-3-1,5. Виявлено, що високий рівень цих властивостей відповідає утворенню на стичних поверхнях гетерогенних вторинних структур змішаного типу, що супроводжується переносом елементів трибопари. Доведено, що кращі властивості мають покриття на нікелевій основі з інтерметалідним зміцненням, потім – покриття на залізо-нікелевій основі, що містять карбіди типу MeC.*

Досліджено триботехнічні властивості покриттів, які нанесені плазмовим та детонаційним методами по оптимальним режимам, із порошків на нікелевій основі з інтерметалідним зміцненням, залізо-нікелевій та залізній основах, що зміцнені карбідами MeC, Me<sub>3</sub>C, Me<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, Me<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (див. таблицю).

Характеристика газотермічних покриттів

Шифр сплава	Система легування	Тип зміцнюючої фази	Твердість, HRC	Поверхнева пористість, %	Шорсткість поверхні, R <sub>a</sub> , мкм
	Метод напилення				
ВКНА	Ni-Al	Ni <sub>3</sub> Al	38-40	8.0-10.0	0.30-0.32
	плазма				
ВКНА	Ni-Al	Ni <sub>3</sub> Al	42-45	1.0-2.0	0.20-0.25
	детонація				
Трибокор А	Fe-Ni-Cr-Al-Si-C	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	40-42	10.0-12.0	0.25-0.30
	плазма				
Трибокор А	Fe-Ni-Cr-Al-Si-C	Me <sub>7</sub> C <sub>3</sub> , Me <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	43-45	2.0-3.0	0.20-0.25
	детонація				
Трибокор Z	Fe-Ni-Zr-Si-C плазма	MeC, Me <sub>3</sub> C, MeSi	47-50	12.0-15.0	0.45-0.50
Трибокор Z	Fe-Ni-Zr-Si-C	MeC, Me <sub>3</sub> C, MeSi	52-55	3.0-5.0	0.30-0.35
	детонація				
Полікор	Fe-Cr-Al-Si-C	Me <sub>3</sub> C	42-44	2.0-3.0	0.2-0.25
	детонація				

Триботехнічні випробування проводили на машині тертя ковзання при навантаженнях 5,0 – 20,0 МПа, швидкостях ковзання 0,5 – 1,5 м/с в середовищі АМГ-10 у парі з алюмінієвою бронзою БрАЖМц 10-3-1,5. Номінальна площа контакту складала 0,6 см<sup>2</sup>, шорсткість поверхні – R<sub>a</sub>=0,2...0,5 мкм.

Результати експерименту показали, що газотермічні покриття у всьому інтервалі швидкостей та навантаження зношуються набагато менше бронзи, що свідчить про їхню високу зносостійкість (рис. 1).

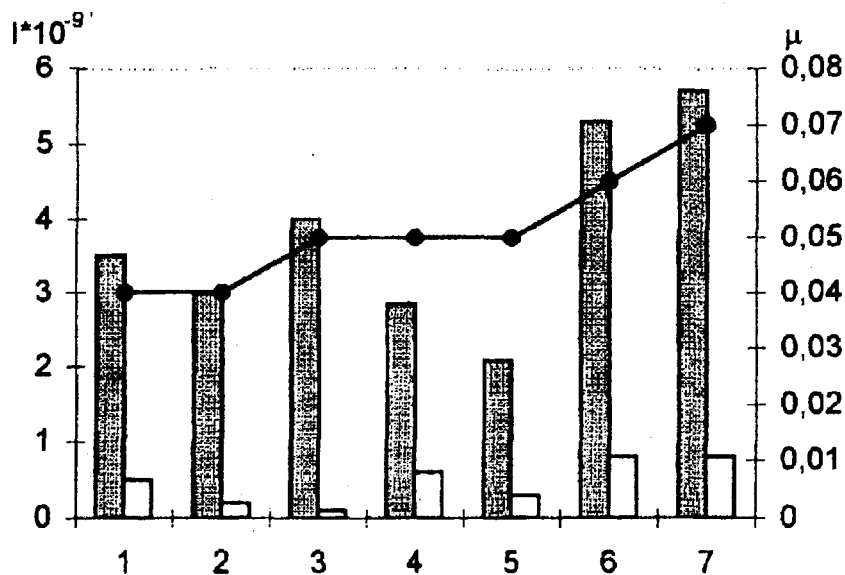


Рис. 1. Інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя трибопари (середовище АМГ-10,  $P = 5$  МПа,  $V = 0,5$  м/с):  
 1 - ВКНА; 2 - трибокор Z (детонація); 3 - трибокор Z (плазма); 4 - трибокор А (детонація); 5 - трибокор А (плазма); 6 - полікор (детонація); 7 - сталь 45

■ - Зношування контртіла □ - Зношування покриття  
 ● - Коефіцієнт тертя.

Переважаючим фактором, який впливає на працездатність пари, є навантаження, підвищенням якого інтенсивність зношування більш м'якого бронзового контртіла помітні зростає (рис. 2).

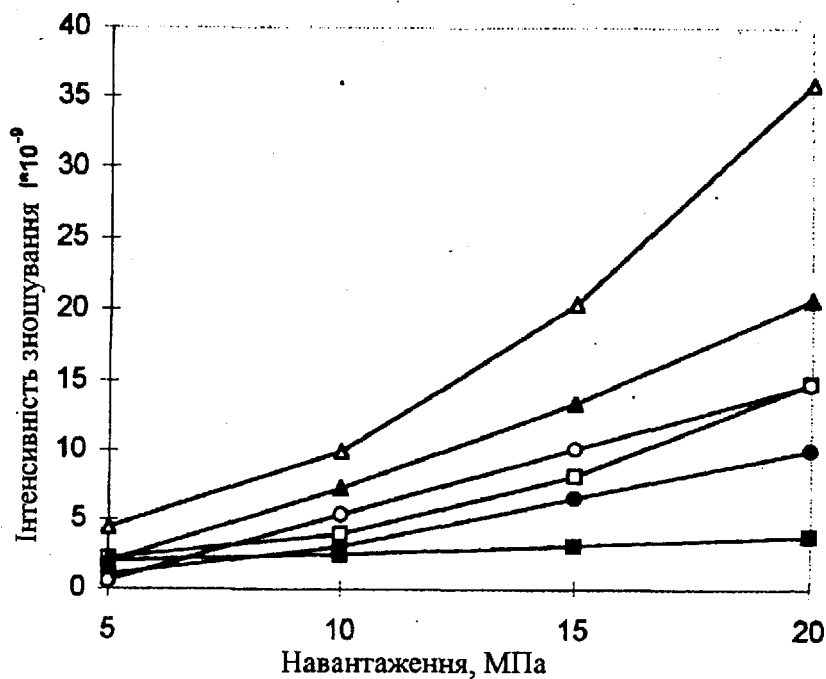


Рис. 2. Інтенсивність зношування бронзи БраЖМц 10-3-1,5 під час тертя по газотермічним покриттям в залежності від навантаження (середовище АМГ-10,  $V = 1,0$  м/с).

■ - ВКНА, детонація □ - Трибокор А, детонація  
 △ - Полікор, детонація ● - Трибокор Z, детонація  
 ○ - Трибокор Z, плазма ▲ - Трибокор А, плазма

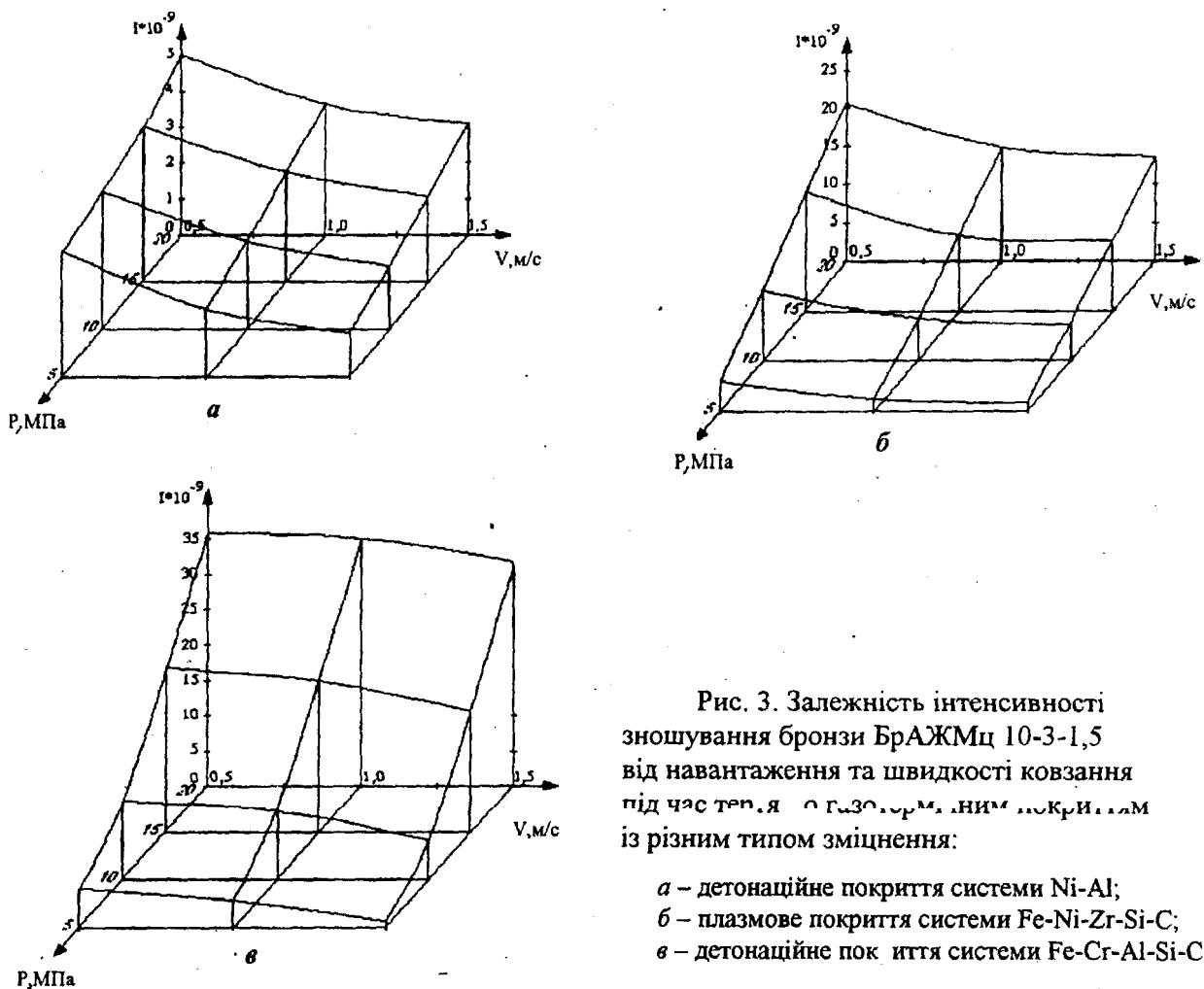
На початкових етапах тертя незалежно від складу покриття та методу напилення здійснюється перенос бронзи на покриття, який визначається розміром його пористості та відношенням когезійної та адгезійної складової міцності тіл, які знаходяться у контакті. При наступному русі фрагменти перенесеної бронзи знімаються в напрямку ковзання і змішуються з матрицею покриття, що приводить, кінець кінцем, до формування шару, який має склад, що відрізняється від складу покриття. Такий процес є аналогічним механічному легуванню [1]. До того ж, окремі частинки зносу, що відокремились від бронзи та покриття, виносяться із зони тертя, а та їх частина, яка по розміру не перевищує розміру поверхневих пор, заповнює пори та змінює морфологію поверхні. При цьому відбуваються зміна елементного складу поверхні покриття і зменшення пористості в 1,5 - 2,0 рази. Найбільш помітне перенесення бронзи спостерігається на покриттях, які мають фази впровадження MeC, що відповідає найбільш високій пористості (див. таблицю) та початковій шорсткості поверхні. Руйнування найбільш високих мікроставів, що розповсюджені по межах пор, відбувається під час перших фрикційних взаємодій. Напруження, які діють на контакти в даному випадку, перебільшують порівняно невелику границю текучості матеріалів поверхневого шару покриття. Об'єми, що деформуються, при цьому мінімальні за рахунок інтенсифікації процесів деформування та поглинання одиницею деформованого об'єму великих значень енергії тертя. При цьому відбувається руйнування ряду виступів без помітного їх зміцнення до встановлення рівноважної шорсткості. Поряд з цим відбувається часткове викришування окремих структурних складових покриття, зокрема оксидів, що збільшує поверхневу пористість. На даному етапі тертя в умовах рівноваги процес заповнення пор переважає над процесом їх утворення, що визначає працездатність покриття. Розмір пор, їх кількість і характер розподілення в значній мірі впливає на зміну якісного складу поверхні покриття. При цьому на стичних поверхнях спостерігаються сліди проорювання, які утворилися в результаті шаржування більш м'якої бронзи частинками зносу.

Рівень триботехнічних характеристик при терті по бронзі визначається взаємним елементопереносом стичних поверхонь. У тих випадках, коли елементоперенос спостерігається в одному напрямку, а саме, на поверхню покриття, трибопара має достатньо високий рівень антифрикційних властивостей і характеризується утворенням на стичних поверхнях гетерогенних вторинних структур, збагачених киснем, тип яких визначається складом покриття. Тертя в даному випадку являє собою динамічну рівновагу актів уйнування та формування вторинних структур і відповідає режиму, який встановився, про що свідчать низький та стабільний коефіцієнт тертя, невисока інтенсивність зношування бронзи та мінімальний знос покриття. На поверхні бронзи утворюються змішані дисипативні смугасто-плівкові структури, які збагачені міддю і мають вигляд смужок різної товщини, рієнтовані вздовж напрямку ковзання [2,3].

Найбільш високі та стабільні характеристики розглянуті покриття мають у діапазоні авантаження 5,0 - 10,0 МПа, швидкостях ковзання 0,5 - 1,0 м/с, при цьому їх рівень аходиться у відповідному інтервалі значень (рис. 3, а-в).

Для покриттів на нікелевій основі спостережувані закономірності найбільш виражені, три цьому інтенсивність зношування в порівнянні з покриттями на залізній основі нижча, а діапазон змін вужчий, що обумовлено властивостями вторинних структур. Покриття на ікелевій основі, зміцнені алюмінідами нікелю, мають найбільш високий рівень антифрикційних характеристик, менше зношують бронзу, що, ймовірно, пояснюється утворенням на поверхні покриття дисипативних структур змішаного I-II типів та структур I типу на поверхні бронзи, які містять кисень, та відповідає високій антифрикційності [4,5]. Достатньо високий вміст алюмінію (21,0 %), ймовірно, призводить до утворення на поверхні покриття тонких, твердих і достатньо міцних оксидів на основі цього елемента ( $Al_2O_3$ , а

також шпінелі  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$ ), аналогічних оксидам, які утворюються при окисленні нікель-алюмінієвих сплавів [6]. Таке поєднання вторинних структур є оптимальним і забезпечує мінімальне зношування пари. Пояснюється це тим, що плівки структур II типу мають високу адгезію до рідких та твердих мастил, а плівки I типу погано змочуються мастилами і зсув локалізується на межі розділу між мастильним шаром та поверхнею, яка покрита плівками структур I типу, що відрізняються високою пластичністю [4]. На поверхні бронзи при цьому спостерігається утворення тонких плівок, збагачених міддю (по результатам якісного мікрорентгеноспектрального аналізу), які мають червоний відтінок, що відрізняється від жовтого кольору алюмінієвої бронзи. Поверхня бронзи стає більш гладкою та на ній спостерігаються окремі сліди проорювання, глибина яких менша товщини утворених плівок. Тертя в даному випадку являє собою динамічну рівновагу актів руйнування і формування вторинних структур та відповідає режиму тертя, що встановився, про що свідчать низький коефіцієнт тертя та невисока інтенсивність зношування.



Покриття на основі заліза, які містять фази впровадження  $\text{Me}_3\text{C}$ , на стадії тертя, що встановилася, мають також достатньо високі антифрикційні характеристики. Найбільш високі гетерогенність і твердість структурних складових знижують адгезійну взаємодію. З цієї причини на поверхні бронзи елементперенос покриття не відбувається, що підтверджують результати мікрорентгеноспектрального аналізу.

Покриття, зміцнені карбідами  $\text{Me}_3\text{C}$ ,  $\text{Me}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ , незалежно від типу матриці більше зношують бронзу в порівнянні з покриттями, розглянутими раніше (рис 3, в). Загальною

ознакою при терті цих покриттів є формування оксидних структур переважно II типу на обох поверхнях стичної пари, а також взаємний елементперенос при навантаженнях вище 10,0 МПа та відповідає більш низьким антифрикційним характеристикам трибопари. Вторинні структури, які утворюються на поверхні бронзи при навантаженнях до 10 МПа, що відрізняються однорідністю будови, мають плівчато-полосчастий вигляд, який переходить у борозчатий при збільшенні навантаження. Збагачення міддю в даному випадку не відбувається. Зношування бронзи та покриття в значній мірі визначається частковим руйнуванням поверхневих структур та утворенням частинок у вигляді сфероїдів та пластинок розмірами від 3,0 до 10,0 мкм, збагачених киснем, природа яких до кінця не виявлена, однак свідчить про хід нормального окислювального зносу та утворення вторинних структур змішаного типу [4,5,7]. Характер зміни коефіцієнта тертя з підвищенням швидкості ковзання, його стабільність також свідчать про достатньо високу структурну пристосованість газотермічних покриттів (рис. 4).

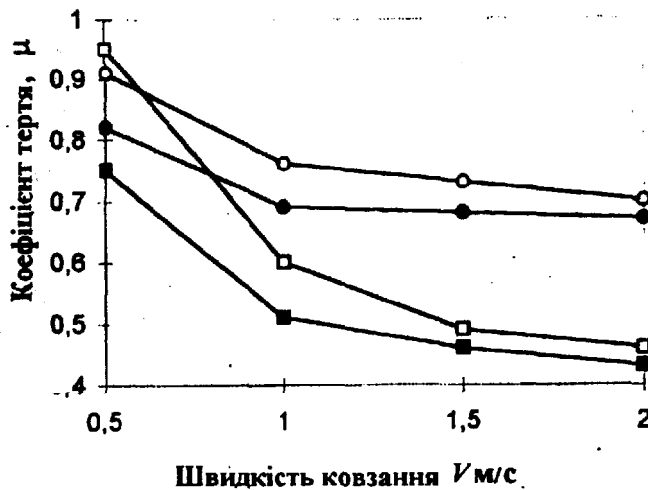


Рис. 4. Коефіцієнт тертя газотермічних покриттів у залежності від швидкості ковзання (середовище АМГ-10, P= 10,0 МПа)

■ - ВКНА; □ - Трибокор Z; ○ - Поликор; ● - Трибокор А

З ростом навантаження поряд з руйнуванням поверхневих структур проходить викришування оксидів, що знаходяться в структурі покриття, кількість яких досягає 10,0 - 25,0 %, що підвищує інтенсивність зношування трибопари.

Таким чином, при терті газотермічних покриттів по бронзі БраЖМц 10-3-1,5 спостерігається утворення на стичних поверхнях гетерогенних вторинних структур змішаного типу. Кращі властивості мають покриття на нікелевій основі з інтерметалідним зміцненням, далі ідуть покриття на залізо-нікелевій основі, які містять карбіди MeC. Тертя таких покриттів супроводжується елементпереносом в одному напрямку – бронзи на покриття.

#### Список літератури

1. Ригни Д. Процессы изнашивания при трении скольжения // Трение и износ, 1987.-Т. 8. № 6 - С. 973 - 976.
2. Костецкий Б.И., Бершадский Л.И. Динамическое равновесие при трении и износе металлов // ДАН СССР, 1970.- Т. 191. №6.- С. 2337 - 1339.

3. *Методы* анализа структур поверхностей, формирующихся в процессе трения/ Н.Н. Кузьмин, Е.А. Шувалова, Г.Р. Транковская Г.Р. и др.// Трение и износ, 1996.–Т. 17.– № 4.– С. 480 – 486.

4. *Костецкая Н.Б.* Механизмы деформирования и разрушения поверхностей трения при трибоокислительных процессах // Сверхтвердые материалы, 1986.– №1. – С. 48 – 54.

5. *Горский В.В.* Формирование легированных кислородом сплавов Me-Me<sup>1</sup>-O в зоне контакта металлов при трении// Трение и износ, 1989.– Т. 10 – № 3.– С. 452 – 460.

6. *Современные жаростойкие материалы.* Справочник /Под ред С.Б. Масленкова. М.: Металлургия, 1986. – 359 с.

7. *Кириенко О.Ф.* Структурно-масштабная модель безызносного трения металлических конструкционных материалов в условиях структурной самоорганизации // Трение и износ, 1993. – Т.143. – №1. – С. 85 – 97.

Стаття надійшла до редакції 5 листопада 1997 року.

**Павло Васильович Назаренко** (1928-1998) закінчив Київський інститут цивільного повітряного флоту в 1954 році. Доктор технічних наук професор, ректор Київського міжнародного університету цивільної авіації, заслужений діяч науки і техніки України. Напрям наукових досліджень – створення нових антифрикційних матеріалів для деталей машин і засобів нанесення покриття на деталі авіаційної техніки для підвищення їхньої стійкості до спрацювання.



**Pavel V. Nazarenko** (1928-1998) graduated from Kyiv Institute of Civil Aviation (1954). DSc (Eng) professor. Scientific research sphere – creation of new antifriction materials for machine details and means of covering the aviatechnical details for their strengthening. He is the author of 212 publications in the field of friction and wear in machines and mechanisms.

**Ганна Євгенівна Остриця** (1970) закінчила Київський політехнічний інститут в 1993 році. Кандидат технічних наук, інженер кафедри фізики Київського міжнародного університету цивільної авіації. Має 8 наукових публікацій. Працює в галузі триботехнічного матеріалознавства.



**Hanna E. Ostranitsa** (b.1970) graduated from Kyiv Polytechnical Institute (1993). PhD (Eng), the engineer of physics Department of Kyiv International University of Civil Aviation. Works in the field of tribotechnics of materials.

**Ірина Євгенівна Поліщук** (1944) закінчила Київський політехнічний інститут в 1968 році. Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, член-кореспондент Української Академії триботехніки. Має 95 наукових праць, 20 винаходів. Працює в галузі триботехнічного матеріалознавства.



**Irina E. Polischuk** (b. 1944) graduated from Kyiv Polytechnical Institute (1968). PhD (Eng), senior researcher, corresponding member of Ukrainian Academy of Tribotechnics. Author of 95 publications in the field of tribotechnics.