

## ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ КАРБІДУ КРЕМНІЮ

<sup>1</sup>Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України,

<sup>2</sup>Національний технічний університет «КПІ»

*В роботі досліджено інтенсивність зношування та коефіцієнти тертя детонаційно-газових покриттів з карбїду кремнію, легованого оксидами хрому та алюмінію, в широкому діапазоні параметрів тертя та температур. Показано, що за таких умов переважає механо-хімічне зношування завдяки утворенню оптимальних оксидних плівок, тому до досліджених покриттів можна підбирати пари тертя з різних матеріалів з мінімальним сумарним зносом. Отримані покриття з карбїду кремнію можна розглядати як альтернативні для заміни покриттів з карбїду вольфраму.*

**Актуальність і постановка задач дослідження.** Тверді сплави типу ВК отримали широке розповсюдження в якості різального, штампового та волочильного інструменту, оснащення робочих поверхонь гірничодобуваючого та рудообробного обладнання, матеріалу для зносостійких підшипників та нанесення покриттів [1-4]. Їх використання зумовлено унікальним набором властивостей: високою твердістю як при кімнатних, так і при високих температурах, високими красностійкістю (до 1000 °С), різальною здатністю, зносостійкістю, міцністю, модулем Юнга. До недоліків твердих сплавів типу ВК можна віднести високу крихкість, низьку втомну міцність, невелику тріщиностійкість, обмежені запаси вольфрамової сировини, що обмежують коло задач, які можна вирішувати за допомогою цих сплавів. Тому постійно ведуться дослідження можливостей їх заміни на альтернативні, конкурентоспроможні матеріали. Одним з таких перспективних матеріалів є монокарбїд кремнію SiC, який за деякими властивостями не поступається, а іноді перевершує відповідні властивості твердих сплавів типу ВК. Так,

монокарбід кремнію має високу температуру плавлення, ненульову пластичність, високу корозійну стійкість, жаростійкість, жароміцність, його поклади досить великі і мають комерційну привабливість. Суттєвим недоліком SiC є низька зносостійкість, особливо в умовах тертя ковзання без ковзання.

У останні роки приділяється увага керамічним композиційним матеріалам системи  $Al_2O_3 - SiC$  з добавками карбідної компоненти 5–20 мас.% [5; 6], мікротвердість яких складає 18,5–18,9 ГПа, а межа міцності при згинанні сягає 450–590 МПа.

В нашій роботі було поставлено завдання: дослідити можливість підвищення зносостійкості покриття SiC шляхом додаткового введення при детонаційно-газовому напиленні одночасно порошоків оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) та оксиду хрому ( $Cr_2O_3$ ). Оксид хрому є добавкою, що призводить до інтенсифікації масопереносу та дифузійних процесів на міжфазній межі при утворенні рідкої фази. Мікроструктура керамічного матеріалу зі складом Si – 2%  $Al_2O_3$  - 8%  $Cr_2O_3$  є дрібнодисперсною за рахунок того, що співвідношення оксидів хрому і алюмінію відповідає евтектичному складу. Керамічний матеріал на основі карбіду кремнію з добавками оксидів алюмінію і хрому має більш високі механічні властивості ( $\sigma_{зг} = 1025 \pm 25$  МПа) у порівнянні з композиційним матеріалом Si – 50%  $Al_2O_3$ .

Змінюючи відсоткове співвідношення між складовими такого композиційного порошку можна впливати на рівень структурної активації покриття при терті, формування вторинних структур, в результаті чого мінімізувати параметри тертя та зношування.

**Методика дослідження.** Дослідження триботехнічних характеристик детонаційних покриттів, напилених легованим карбідом кремнію, а також, для порівняння – твердим сплавом ВК15, проводилося на установці, описаній в [7]. Покриття випробовувалися при швидкостях ковзання в діапазоні від 0,1 м/с до 1,0 м/с. Навантаження при цьому залишалося постійним і становило 5 МПа. Випробуванню піддавалися як однойменно напилені пари тертя, так і пари, де у якості контртіла використалися зразки із загартованих сталей 45, 30ХГСА, ХВГ і бронзи БрОЦС 6-6-3.

**Обговорення результатів дослідження.** За результатами випробувань побудовані залежності інтенсивності зношування від

швидкості ковзання при терті однойменних детонаційних покриттів (рис.1). При збільшенні швидкості ковзання зношування детонаційних покриттів незначно збільшується. Однак, мінімальну інтенсивність зношування за таких умов тертя мають покриття, напилени легованим карбідом кремнію.

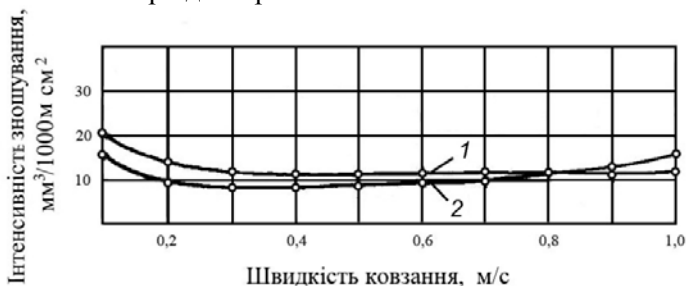


Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування детонаційних покриттів від швидкості ковзання: 1 – твердий сплав ВК15; 2 – легований карбід кремнію

Значно менший знос у великому діапазоні значень швидкостей ковзання зі стабільним значенням інтенсивності зношування для дослідженого покриття у порівнянні з вольфрамовим сплавом є наслідком відмінності фазового складу поверхневих плівок, що утворюються в процесі трибоокиснення, головним чином, твердих розчинів  $Al_2O_3-Cr_2O_3$ ,  $Al_2O_3-Si_2$  – за результатами електронграфічного дослідження. Збільшення швидкості ковзання практично не позначається на зміні характеристик тертя й зношування. У випробовуваному діапазоні швидкостей ковзання досягається стійка динамічна рівновага між процесами активації та пасивації, чим і зумовлюється повне придушення процесів захоплення.

За даними рентгеноструктурного аналізу склад плівок, що утворилися на поверхні тертя зразків напилених легованим карбідом кремнію при випробуваннях у повітряному середовищі, являє собою складний важко активований при терті комплекс фаз у вигляді подвійних з'єднань типу шпінелей  $CrSi_2O_4$ ,  $(Al,Cr)_2O_3$  і муліта  $Al_2Si_5$ , а також оксидів  $Cr_2O_3$  та  $Al_2O_3$ .

Важливою характеристикою антифрикційних матеріалів є коефіцієнт тертя, величина якого визначає ступінь втрати енергії у вузлах тертя. На рис. 2 наведено залежність коефіцієнту тертя від швидкості

ковзання випробовуваних детонаційних покриттів. Такий характер зміни коефіцієнта тертя узгоджується зі встановленою закономірністю тертя та зношування отриманих покриттів. Зниження коефіцієнту тертя, його стабільність за підвищення швидкості ковзання свідчить про високу працездатність цих покриттів.

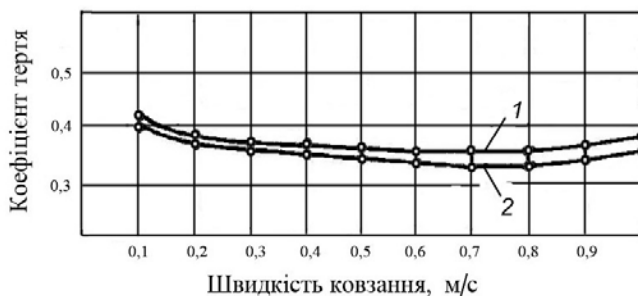


Рис. 2. Залежність коефіцієнту тертя від швидкості ковзання для детонаційних покриттів твердим сплавом ВК15 (1) та легованого карбіду кремнію (2)

Таким чином, у повітряному середовищі в досліджуваному діапазоні швидкостей ковзання для випробовуваних детонаційних покриттів спостерігається домінуючий механо-хімічний вид зношування, який характеризується, насамперед, відсутністю будь-яких видів руйнування, локалізацією пластичної деформації і процесу диспергації в тонких поверхневих шарах [8].

На рис. 3, а, б наведено мікроструктури поперечного шліфа напиленого покриття на основі легованого карбіду кремнію, що представляє собою дрібнодисперсну суміш твердих фаз, рівномірно розподілених по всьому об'єму покриття.

На шліфах добре видно включення практично недеформованих зміцнювальних частинок, рівномірно розподілених по товщині покриття. Така структура добре задовольняє вимоги до зносостійких матеріалів, сформульованих у фундаментальних роботах Костецького Б. І. і Крагельського І.В. [8–10]. При металографічному аналізі оксидів або будь-яких інших забруднень на деформованих частках покриття не виявлено. Не вдалося також виявити дефекти ні у вигляді порожнин, ні у вигляді тріщин, навіть за збільшення  $\times 1200$ .

Для підбору оптимальних пар тертя, з метою мінімізації інтенсивності їхнього сумарного зношування, були проведені випробування, результати яких представлено в табл. 1.

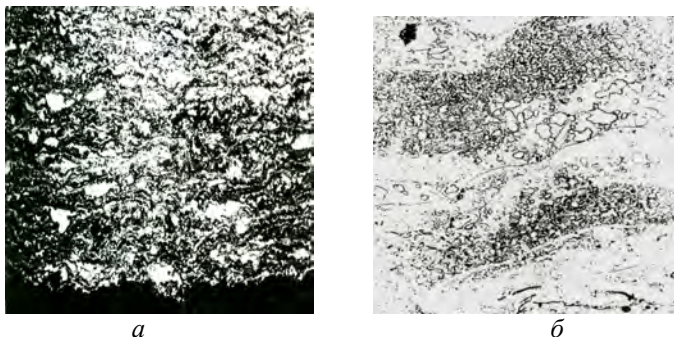


Рис. 3. Мікроструктура перетину детонаційно-газового покриття, напиленого композиційним порошком  $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ .  $\times 500$

Таблиця 1

**Вплив матеріалу контр-тіла на інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя**

Матеріал покриття	Матеріал контртіла	Швидкість ковзання, V, м/с	Інтенсивність зносу, $\text{мм}^3/1000.\text{см}^2$	Коефіцієнт тертя	Нормальний тиск, P, МПа
на основі SiC	Сталь 45	0,5	9	0,3	5,0
	30ХГСНА	0,5	5	0,22	5,0
	БрОЦС 6-6-3	0,5	10	0,3	5,0
ВК	Сталь 45	0,5	11	0,35	5,0
	30ХГСНА	0,5	15	0,38	5,0
	БрОЦС 6-6-3	0,5	6	0,25	5,0
на основі Ni-Cr	Сталь 45	0,5	20	0,35	5,0
	30ХГСНА	0,5	18	0,32	5,0
	БрОЦС 6-6-3	0,5	8	0,28	5,0
Сталь 45	30ХГСНА	0,5	56	0,45	5,0
30ХГСНА	ХВГ	0,5	60	0,48	5,0

З таблиці видно, що при терті однойменних детонаційних покриттів їхній опір зношуванню нижче, ніж в аналогічних умовах для різнойменних пар тертя, де в якості контртіла використовувалися зразки загартованих сталей 30ХГСА, ХВГ, сталі 45 і бронзи БрОЦС-6-6-3. Очевидно, різнойменні матеріали забезпечують пев-

ний перепад твердості, кращі умови припрацювання та, ймовірно, зменшення когезійної взаємодії, а отже і зниження величини пластичної деформації поверхневих шарів і сили тертя, і, як результат, розширення області мінімального зношування.

Залежність зношування від властивостей матеріалів і зовнішніх умов тертя, показує, що зношування росте пропорційно навантаженню і визначається не тільки числом контактів взаємодіючих поверхонь, але й характером процесів, що протікають на контактах, причому характер цих процесів істотно залежить від величини тиску [1; 8; 10]. Таким чином, навантаження є одним з важливих факторів, що зумовлюють розвиток процесів зовнішнього тертя.

Виходячи з вище наведеного, детонаційні покриття, напилені досліджуваними легованими порошками системи  $\text{Si-Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ , і порошками твердого сплаву ВК15, випробовували за швидкості ковзання 0,5 м/с. При цьому досліджувалися як однойменні пари тертя, так і різнойменні, в яких у якості контртіла використовувалися зразки із загартованої сталі 45.

Аналізуючи отримані експериментальні дані (рис.4) можна відзначити, що характерним є незначне збільшення зношування з ростом навантаження й більш висока несуча здатність різнойменних пар тертя.

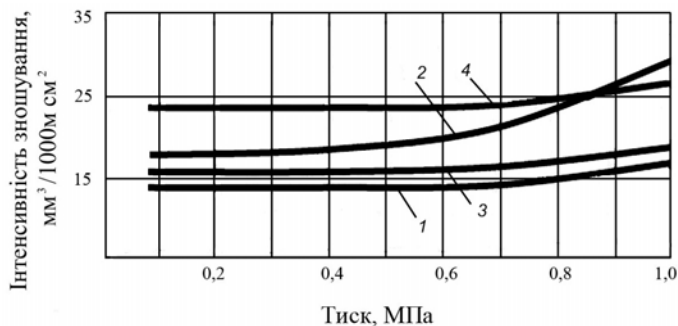


Рис. 4. Залежність інтенсивності зношування детонаційних покриттів від тиску: 1 – твердий сплав ВК15 по ВК15; 2 – твердий сплав ВК15 по загартованій сталі Ст.45; 3 – легований SiC по SiC; 4 – легований SiC по загартованій сталі 45

Збільшення тиску, як відомо [9; 11], спричиняє збільшення фактичної площі контакту і посилення молекулярної взаємодії поверхонь. Інтенсивність зношування при цьому зростає, але, загалом, вона не пропорційна росту тиску. Це справедливо, доки тиск не переходить через деяке критичне значення ( $P_{кр.}$ ), після якого інтенсивність зношування значно збільшується. Для різнойменних пар тертя ця закономірність більш явно виражена (криві 2, 4), ніж для однойменних.

Інтенсивність зношування покриття з легованого карбїду кремнію (крива 2) при збільшенні питомого навантаження до 0,6 МПа практично не зростає. Значення критичних навантажень для контртіл із загартованих сталей значно нижче, ніж для однойменних пар тертя. При терті зразків із загартованих сталей процеси пошкодження за зростання навантаження, що супроводжуються інтенсивним схоплюванням, виражені більше та інтенсифікуються при його збільшенні. Подальше збільшення навантаження спричиняє незначне підвищення величини інтенсивності зношування.

За результатами металографічного аналізу поверхонь тертя було зроблено висновок, що ведучим за даних умов випробувань є механо-хімічне зношування.

На рис. 5 наведено залежності коефіцієнтів тертя від нормального тиску.

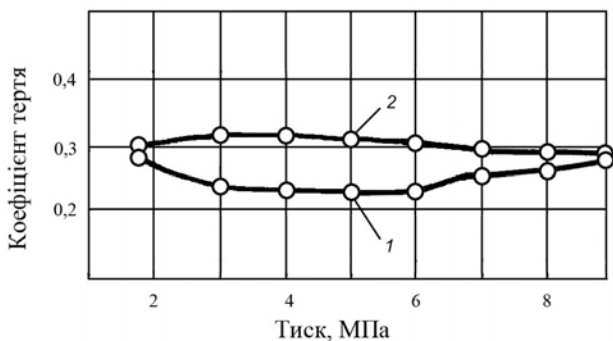


Рис. 5. Залежність коефіцієнту тертя від тиску: 1 – покриття із твердого сплаву ВК15; 2 – покриття на основі карбїду кремнію

При збільшенні навантаження підвищується ступінь неоднорідності деформації, зростає кількість продуктів зношування, у

процес втягуються глибинні та приповерхневі шари. Сили тертя, зумовлені деформацією та руйнуванням, зростають повільніше, ніж нормальне навантаження [12], у результаті коефіцієнти тертя зменшуються. За певних значень тисків, як відзначалося, досить інтенсивно відбувається процес пошкодження, що викликає зростання сили і коефіцієнту тертя. Значення коефіцієнту тертя визначається сумарним протіканням цих процесів.

За даними мікроструктурного аналізу поверхонь тертя зменшення коефіцієнту тертя, що залежить від складу та властивостей оксидних плівок при зростанні навантаження, відповідає області механо-хімічного зношування, що пояснюється більш інтенсивним розвитком окисних процесів у міру збільшення навантаження, а отже, і температури.

Таким чином, утворення вторинних структур протікає у всьому досліджуваному діапазоні режимів тертя за наявності динамічної рівноваги процесів активації та пасивації. У міру зношування поверхневої плівки в процесі тертя активуються нові шари, і завдяки наступному пасивуванню екрануючий шар вторинної структури відновлюється. Вторинні структури, як показав проведений аналіз, метастабільні і мають ультрадисперсну текстуровану будову.

Однією з важливих ознак, що характеризують сталий процес нормальної роботи вузла тертя, є сталість температури в зоні тертя. Зміна температури, як відомо, впливає на інтенсивність процесів дифузії, швидкість хімічних реакцій, визначає протікання в поверхневих шарах матеріалу пластичної деформації, від якої в підсумку залежить ступінь процесу структурно-термічної активації. Таким чином, температура поверхонь тертя є важливим чинником, зміна якого призводить не тільки до зміни інтенсивності, але й виду зношування [13; 14]. Розподіл теплових потоків, обумовлене градієнтом температур, визначається не тільки теплофізичними характеристиками матеріалів пари тертя, але й залежить від площі, на якій вони генеруються. Отже, на умови теплопередачі значний вплив має коефіцієнт взаємного перекриття поверхонь тертя [15].

Форма зразків і застосовувана схема тертя (торцева) забезпечували коефіцієнт взаємного перекриття, який дорівнює одиниці, що сприяло створенню найбільш важких умов тертя. Випробування проводилися при постійному питомому навантаженні, рівному 1



МПа та швидкості ковзання 0,3 м/с. Для дослідження впливу температури на швидкість процесів механо-хімічного зношування й захоплювання, що відбуваються при терті, було передбачено зовнішнє нагрівання зразків під час випробувань до температури 800°C. Температуру поблизу поверхні тертя вимірювали за допомогою термопари, заведеної в глухий отвір зразка. Дані випробувань, що визначають функціональну залежність інтенсивності зношування від температури поблизу поверхні тертя досліджуваних детонаційних покриттів, представлені на рис. 6. Випробування проводилися при швидкості ковзання 0,3 м/с і навантаженні 1,5 МПа. Найменші значення інтенсивності зношування за даних умов випробувань мають детонаційно-газові покриття з легованого карбіду кремнію. Збільшення температури практично не погіршує їхніх трибологічних характеристик, оскільки на поверхнях тертя інтенсивно утворюються вторинні структури з високими антифрикційними властивостями (рис. 6).

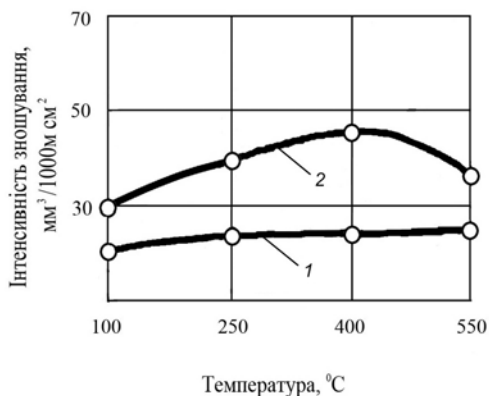


Рис. 6. Залежність інтенсивності зношування детонаційно-газових покриттів від температури: 1 – покриття на основі карбіду кремнію; 2 – покриття із твердого сплаву BK15

Примусовий підігрів інтенсифікує процеси взаємодії активованої пластичною деформацією поверхні тертя з киснем повітря, у результаті чого утворюються рівномірно розподілені по поверхні тертя плівки вторинних структур. Природа їхнього утворення за-

лежить від умов тертя, матеріалу пари тертя, наявності та складу середовища в зоні контакту.

Рентгеноструктурний аналіз оксидних структур, утворених на поверхнях тертя, виконаний на установці УРС-50I, не дозволив однозначно виявити їхній фазовий склад, що, на нашу думку, обумовлено їхньою незначною товщиною. Можна припустити, що фазовий склад оксидних плівок відповідає їхньому складу в умовах тертя при кімнатних температурах, тобто, у зазорі тертя утворюється дрібнодисперсна суміш окислів  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  муліта та  $\text{Al}_2\text{Si}_5$ .

У ряді робіт [21; 22] висловлюється припущення, що за підвищених температур оптимальна товщина оксидних плівок на поверхнях тертя становить близько 10 мкм, за меншої товщини шару оксидів їхні захисні властивості знижуються. Аналізуючи дослідження, проведені в роботах [16–18; 21–23], а також власні дані, наведені вище, можна припустити, що оксидна плівка на робочих поверхнях досліджених покриттів з карбіду кремнію складається зі шпінелі  $\text{Al}_2\text{Si}_5$  та окислів  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

У роботах [16–18] вказується на взаємозв'язок між механічними властивостями оксидних плівок і матеріалом, на поверхні якого вони утворюються. Чим твердіше плівки окислів, що утворюються, і м'якше метал основи, тим при меншому зусиллі вони руйнуються [19].

Захисні властивості окисних плівок істотно залежать від їхньої товщини і складу [20–22]. Окисел  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в цьому відношенні має деякі переваги перед іншими окислами, що утворюються, а саме: менша в порівнянні з матеріалом покриття твердість, стабільність кристалічних ґраток і відсутність структурних модифікацій, висока адгезія до підкладки.

Подальше підвищення температури випробувань не впливає на вид зношування, спостерігається стійкий процес нормального механо-хімічного зношування. Він характеризується відносно низькими значеннями інтенсивності зношування і коефіцієнту тертя, який залежить від роботи тертя, що у цьому випадку визначається механічними властивостями оксидних плівок, їхнім зв'язком з основним матеріалом і здатністю до диспергування.

Фазовий аналіз приповерхневих деформованих у процесі тертя шарів отриманих покриттів з легованого карбіду кремнію, ви-

конаний рентгеноструктурним методом на установці УРС-50И в Си-випромінюванні показав, що по складу ці області покриття після випробувань на тертя при підвищених температурах не відрізняються від вихідного складу порошку, що напилюється. Цей експериментальний факт говорить про високу термодинамічну стійкість і стабільність фазового складу досліджуваних покриттів з легованого карбиду кремнію.

На рис. 7. представлено поверхні тертя покриття з легованого карбиду кремнію при різних температурах. Нагрівання покриттів на 300°C (від 100°C до 400°C) не змінює зовнішній вигляд поверхні тертя, що вказує на сталість механізму тертя та зношування.

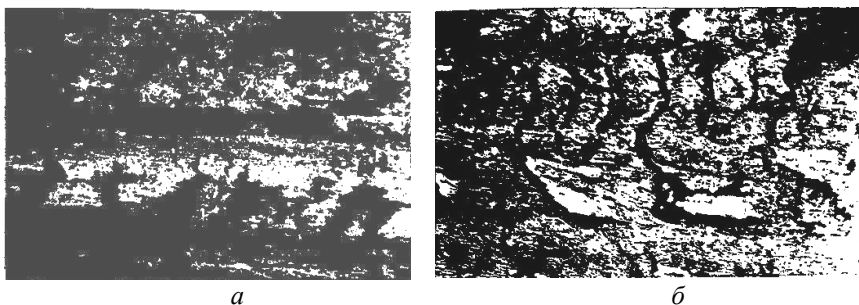


Рис. 7. Зовнішній вигляд поверхні тертя детонаційно-газового покриття з легованого карбиду кремнію при різних температурах:  
*a* – 100 °C; *б* – 400 °C;  $\times 320$

Таким чином, зносостійкість детонаційних покриттів з легованого карбиду кремнію за високих температур зумовлена як властивостями металвміщуючих фаз напиленого шару, так і властивостями оксидних плівок, що утворюються і активно перешкоджають процесам схоплювання, зменшують вплив тертя на матеріал покриття, чим визначають високі антифрикційні характеристики пари тертя. Отримані результати проведених високотемпературних випробувань детонаційно-газових покриттів з легованого карбиду кремнію дозволяють рекомендувати використовувати їх у вузлах тертя, що працюють за підвищених температур на повітрі.

**Висновки.** Висока зносостійкість і низький коефіцієнт тертя досліджених детонаційно-газових покриттів з легованого карбиду кремнію визначаються здатністю утворювати в умовах тертя в по-

вітряному середовищі оксидні плівки, що складаються, як правило, із суміші оксидів металів, що входять до складу покриття, і шпінельних фаз, які збільшують ефект екранування третюх поверхонь. Високі триботехнічні характеристики отриманих покриттів визначаються також термодинамічною стійкістю дрібнодисперсних фаз, що входять до складу покриттів, їхньою стабільністю в широкому діапазоні тисків, швидкостей ковзання та температур. Домінуючим видом зношування отриманих покриттів є механо-хімічне зношування при роботі з різномірними та однойменними матеріалами контртіл, що дозволяє мінімізувати сумарне зношування пари тертя. Проведені порівняльні випробування отриманих покриттів з покриттями із твердого сплаву на основі карбіду вольфраму ВК15 дозволяють рекомендувати детонаційно-газові покриття з легованого карбіду кремнію для заміни вольфрамвміщуючих покриттів у вузлах тертя, що працюють у важких умовах на повітрі, як при кімнатних, так і при підвищених температурах.

#### Список літератури

1. *Конструкционные материалы*. Под ред. Б. Н. Арзамасова. – М. «Машиностроение». 1990. – 247с.
2. *Технология конструкционных материалов* / под ред. А. М. Дальского. М. «Машиностроение», 1985. – 318с.
3. *Степанчук А.Н.* Технология порошковой металлургии / [А.Н. Степанчук, И.И. Билык, П.А. Бойко] // – К.: Вища школа, 1989.– 415с.
4. *Скорород В.В.* Порошковые материалы на основе тугоплавких металлов и соединений / [В.В. Скорород] // К.: Техніка, 1982.–167с.
5. *Федорченко И.М.* Композиционные спеченные антифрикционные материалы / [И.М. Федорченко, Л.И. Пугина] // – К.: Наук. думка, 1980. – 403 с.
6. *Кулик А.Я.* Газотермическое напыление композиционных порошков / [А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин] // – Л.: Машиностроение, 1985. – 197 с.
7. *Носовский И.Г.* Вакуумная установка для исследования схватывания при трении металлов / И.Г. Носовский, Э.В. Исаев, Г.А. Крушинин // Проблемы трения и изнашивания. – К.: Техника, 1973. – С. 46–50.
8. *Костецкий Б. И.* Механохимические процессы при граничном трении / [Б. И. Костецкий, М. Э. Натансон, Л.И. Вернадский] // – М.: Наука, 1972. – 170 с.

9. Крагельский И.В. Молекулярно механическая теория трения / И.В. Крагельский // Трение и износ в машинах, Т. 3. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. – С. 178–183.

10. Крагельский И.В. Трение и износ трения / [И.В. Крагельский] // – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

11. Крагельский И.В. О природе контактного предварительного смещения твердых тел / И.В. Крагельский, Н.М. Михин // Докл. АН СССР, 1963, Т. 153, №1. – С. 30–34.

12. Носовский И.Г. Влияние типа решетки, температуры и скорости скольжения на процесс схватывания при трении металлов. / И.Г. Носовский, Э.В. Исаев // Проблемы трения и изнашивания. – К.: Техника. 1973, №6, – С. 73–78.

13. Костецкий Б.И. Износостойкость и антифрикционность деталей машин / [Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский] // – К.: Техника, 1965. – 206 с.

14. Носовский И.Г. О роли кристаллического строения при трении и схватывании металлов / И.Г. Носовский, Э.В. Исаев, Б.И. Костецкий // Докл. АН СССР, 1971, Т. 198, №1. – С. 79–83.

15. Чичинадзе А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении / [А.В. Чичинадзе] // – М.: Наука, 1967. – 230 с.

6. Айбиндер С. Б. Исследование трения и сцепления твердых тел / С.Б. Айбиндер // Обзор работ, Рига: Изд-во Латв. ССР, 1966. – 98 с.

17. Крагельский И.В. Коэффициенты трения. Справочное пособие / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова // – М.: Машгиз, 1962. – 220 с.

18. Молодык Н.В. Восстановление деталей машин / [Н.В. Молодык, А.С. Зенкин] // Восстановление деталей машин. – М.: Машиностроение, – 1989. – 479 с.

19. Крагельский И.В. Узлы трения машин: Справочник / [И.В. Крагельский, Н.М. Михин] // – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

20. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / [Б.И. Костецкий] // – К.: Техника, 1970. – 395 с.

21. Чеповецкий И.Х. Триботехнология формирования поверхностей / [И.Х. Чеповецкий, С.А. Ющенко, А.В. Бараболя и др.] // АН УССР, Институт сверхтвердых материалов. – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.

22. Кершенбаум В.Я. Механическое формирование поверхностей трения / [В.Я. Коршегбаум] // – М.: Машиностроение, 1987. – 232 с.

23. Шестеренков В.И. Детонационные покрытия на основе тугоплавких соединений. // Жаростойкие и теплостойкие покрытия / В.И. Шестеренков, Е.А. Астахов // – Л.: Наука, 1969. – С. 256 – 261.

**Панарин В.Е., Фараджаллах М.А., Корбут Е.В. Триботехнические характеристики детонационно-газовых покрытий на основе**

**карбида кремния** // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 57. – С.226–239.

В работе исследована интенсивность изнашивания и коэффициенты трения детонационно-газовых покрытий из карбида кремния, легированного оксидами хрома и алюминия, в широком диапазоне параметров трения и температур. Показано, что механо-химический механизм износа является преобладающим, из-за чего, благодаря образованию оптимальных оксидных пленок, к исследованным покрытиям можно подбирать пары трения из разных материалов с минимальным суммарным износом. Полученные покрытия из карбида кремния можно рассматривать как альтернативные для замены покрытий из карбида вольфрама.

Рис. 7, табл. 1, список лит.: 23 наим.

*Panarin V.E., Faradjallah M.A., Korbut E.V.* **Tribotechnic characteristics of detonation-gas coatings containing silicon carbide**

In work the wear process intensity and friction coefficient of detonation-gas coatings containing silicon carbide was alloyed chrome and aluminum oxides, in a wide range of friction parameters and temperatures, is investigated. It is shown that the mechanic-chemical mechanism of wear is prevailing because of formation optimum oxide films; to the investigated coatings it is possible to select friction pair of different materials with the minimum total wear. The obtained coatings of silicon carbide can be considered as alternative for replacement of tungsten carbide coatings.

**Ключові слова:** монокарбід кремнію, тверді сплави, детонаційні покриття, механо-хімічне зношування, трибоокиснення.

Стаття надійшла до редакції 14.02.2012