

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ, МОНІТОРИНГ ТА ДІАГНОСТИКА В ЕНЕРГЕТИЦІ

ISSN 2786-7102 (Online). System Research in Energy. 2022. 1(70): 46–52

doi: <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.01.046>

УДК 629.083

Віталій Щепетов, д.т.н., проф., <https://orcid.org/0000-0002-8352-8307>

Світлана Ковтун, д.т.н., ст.досл., <https://orcid.org/0000-0002-6596-3460>

Сергій Харченко*, к.т.н., <https://orcid.org/0000-0001-9808-7607>

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна;

e-mail: info@ienenergy.kiev.ua

*Автор-кореспондент: nanoavia@ukr.net

ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ Cr–Si–B–MgC₂ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУР

Анотація. Представлено результати дослідження жаростійкості, а також тертя і зносу композиційних покриттів Cr–Si–B–MgC₂, реалізованих в парах тертя, за умов впливу підвищених температур. Обґрунтовано вибір композиції Cr–Si–B–MgC₂ та її оптимальний склад для напilenня зносостійких покриттів, навантажених тертям в умовах високих температур. Показано, що основний вплив на властивості, структуру та стабільність гетерогенних покриттів мають легуючі елементи за певних концентрацій, а також технологічні параметри нанесення покриттів. Встановлено, що утворенню складно-легованих високотемпературних утворень, які мають підвищений опір зносу, сприяють кремній та бор. Корегування мікротвердості покриттів реалізується за рахунок відсоткового вмісту кремнію, при цьому механічні властивості матеріалу підвищуються шляхом додаткового легування бором та карбідом магнію. Важливим також є параметри напilenня покриттів, від яких напряму залежить формування жарозносостійкого шару. Експериментально встановлено, що співвідношення витрати ацетилену і кисню ~20/25 л/хв забезпечують стабільність технологічних параметрів напilenня, однорідність хімічного складу та сталість властивостей покриттів. При навантаженні до 5,0 МПа, швидкості ковзання до 1,2 м/с і температурі до 700 °C покриття системи Cr–Si–B–MgC₂ виявляють стійку структурну пристосованість, що забезпечує мінімізацію параметрів тертя і зношування. Металографічний аналіз і профілографування зразків свідчать про те, що на поверхнях тертя відсутні помітні пошкодження, а окремі точки схоплювання локалізуються в тонкоплівкових поверхневих шарах. Встановлено, що залежність мікротвердості поверхневих структур від температури монотонна, проте спостерігається і стрибкоподібність, якщо відбуваються поліморфні перетворення або перетворення метастабільних станів на більш стабільні та стійкі при нагріванні та охолодженні. Показники мікротвердості рівномірні, тому що в оксидних структурах розчинені частинки вкраплень і домішок, які істотно впливають на мікротвердість, а отже, на властивості оксидів як простого, так і складного складів.

Ключові слова: захисні покриття, поверхневий шар, стійкість до окиснення, зносостійкість, жаростійкість.

1. Вступ

Характерною особливістю більшості деталей машин та механізмів об'єктів енергетики, які працюють в умовах високих технологічних навантажень, є необхідність збереження працездатності при підвищених температурах. Серед ряду показників експлуатаційних факторів температура трибосполучень займає одне з основних місць і є важливою характеристикою умов тертя, а теплові процеси, що виникають при цьому, безпосередньо впливають на формування фізико-хі-

мічних і механічних властивостей поверхневих шарів.

Відповідно до сучасних положень науки про тертя і зношування матеріалів, триботехнічні параметри, що характеризують контактну взаємодію, визначають, головним чином, стан і властивості поверхневих шарів. Тому в загальному комплексі заходів, спрямованих на розробку методів підвищення ефективності експлуатації об'єктів енергетики, їх трибофізичних систем та обладнання, важливого значення набувають технології поверхневого зміцнення.

© В. ЩЕПЕТОВ, С. КОВТУН, С. ХАРЧЕНКО, 2022

При всьому різноманітті конструктивних форм і функціональних особливостей трибосистем, вимога зносостійкості є загальною, та визначає їх безвідмовність і довговічність. Однак створення універсального покриття для захисту машин і механізмів від зносу, особливо в умовах підвищених температур, обмежено тією ж проблемою, що і отримання зносостійкого монолітного матеріалу, який відповідав би всім умовам, що реалізуються в практиці машинобудування. Загальний інтерес у цій галузі нерозривно пов'язаний зі створенням нових матеріалів, при розробці яких враховувалися б техніко-економічні обмеження, зумовлені вимогами виробництва, зокрема витрати дефіцитних і дорогих компонентів.

Одним з сучасних технологічних методів, що дозволяє наносити високоякісні покриття, які значно підвищують ресурс роботи деталей в умовах тертя при високих температурах, є детонаційно-газове напилення. Однак широке застосування детонаційних покриттів стримується недостатнім обсягом інформації про їх триботехнічні можливості (особливо в умовах підвищених температур), відсутністю науково обґрунтованих принципів їх оптимальної працездатності, а також обмеженістю асортименту порошкових матеріалів. Таким чином, розробка жарозносостійких покриттів, що мінімізують параметри тертя в умовах підвищених температур, є одним із пріоритетних напрямків сучасного триботехнічного матеріалознавства.

Мета роботи – узагальнити результати теоретичних та прикладних досліджень трибостійкості жарозносостійких покриттів Cr–Si–B–MgC₂, призначених для захисту деталей машин, що працюють за високотемпературного тертя.

2. Матеріали та методи

Досліджено закономірності тертя та зносу покриттів системи Cr–Si–B–MgC₂, отриманих детонаційно-газовим методом із порошкових матеріалів ресурсно-сировинної бази України [1]. Покриття товщиною 0,25–0,30 мм із шорсткістю $R_a = 0,55\text{--}0,35$ наносили на модернізованій установці «Дніпро-3» на кільцеві зразки зі сталі 45 (структура сорбіт-тростит). Випробування проводили на універсальній машині тертя типу УМТ-2 при підвищених температурах ($V = 1,5$ м/с, $P = 5,0$ МПа).

Рентгенофазовий аналіз покриттів здійснювали за допомогою дифрактометра ДРОН-УМ1 в Со-випромінюванні (напруга 25 кВ, струм 15 мА). Структуру досліджували за допомогою електронного сканувального мікроскопа Camscan. Для хімічного аналізу вторинних

структур використали програму ZAF-4FLS. Металографічне дослідження виконували на мікроскопі МІМ-8 і мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні 0,5 Н. Температуру вимірювали на відстані 1–2 мм від поверхні тертя хромель-капельними термопарами.

3. Результати та обговорення

Обґрунтований вибір компонентів композиції Cr–Si–B–MgC₂ [2] відповідає основним умовам сталого прояву структурної пристосованості та мінімізації показників тертя. Вибір оптимального складу покриттів передбачає оцінку впливу компонентів на структуру та властивості [3]. Вибір вихідної сировини порошку хрому, що є сертифікованим матеріалом, обумовлений можливістю його поетапного легування, особливо елементами з обмеженою розчинністю [4, 5].

Варіювання вмісту кремнію та бору суттєво впливає на гетерогенність та властивості покриттів. Максимальну мікротвердість мають покриття Cr–Si з вмістом кремнію ~25%, при цьому механічні властивості отриманого матеріалу можуть підвищуватися шляхом додаткового легування бором, оптимальний вміст якого ~12% та карбідом магнію ~10%. Введення кремнію, бору та карбіду магнію, що входять у твердий розчин хрому і зміцнюють його, сприяє утворенню складнолегованих високотемпературних сполук, зокрема карбідів, що викликають дисперсійне твердіння, завдяки чому підвищується опір зносу внаслідок утворення зміцнювальних фаз з високою термодинамічної стабільністю. Таким чином, позитивний вплив на структуру і властивості покриттів легуючі елементи надають лише при певних концентраціях, знайдених експериментально.

Висока якість багатокомпонентних покриттів забезпечується технологічними параметрами напилення. Була проведена серія експериментів, в яких оцінено вплив співвідношення робочих газів та ступеня заповнення стовбура газовою сумішшю на експлуатаційні характеристики покриттів. Напилення при витратах робочих газів (ацетилену та кисню) ~20/25 л/хв забезпечує стабільність властивостей покриттів, відносна щільність яких становить ~99%.

Дані мікрорентгеноспектрального аналізу покриттів Cr–Si–B–MgC₂ дозволили класифікувати структуру як тонкий конгломерат (>75% об'єму), який складається із ультрадисперсних включень, збагачених бором, та карбідів.

У таблиці показано зміну фізико-механічних властивостей покриттів під час поетапного легування матеріалу основи.

Таблиця. Фізико-механічні властивості покриттів

Склад	Товщина, мм	σ_v , ГПа	$\sigma_{зг}$, ГПа	$\sigma_{зч}$, ГПа	H_μ , МПа
Cr-Si	0,25–0,30	0,65–0,72	550–630	50–68	6,0–8,5
Cr-Si-B	0,25–0,30	0,72–0,79	670–760	68–76	8,5–10,5
Cr-Si-B-MgC ₂	0,25–0,30	0,79–0,82	760–840	76–90	10,5–12,3

На характеристики покриттів основний вплив мають структура та фазовий склад поверхневого шару та поверхневі плівки, що утворюються при терті. Отже, вивчення їх будови та властивостей є сучасним аспектом фізичної трибології і представляє важливе прикладне та наукове значення для забезпечення сталого прояву нормальних механохімічних процесів.

Результати випробувань з відповідною апроксимацією експериментальних даних, які підтверджують функціональну залежність інтенсивності зношування покриттів від температури поблизу поверхонь тертя, представлені на рис. 1.

Для отримання всебічної інформації додатково використовували метод вторинно-іонної мас-спектрометрії тонких поверхневих шарів, в яких протікають процеси структурно-термічного активування [6]. Цей метод дозволив проаналізувати зміну мікроструктури в тонких поверхневих шарах, встановити природу фаз, їх кристалічну структуру і параметри елементарної комірки, необхідні для ідентифікації фаз і складу в межах області їх однорідності. При аналізі реєстрували спектри позитивних вторинних іонів в діапазоні від 0 до 100 а. Для підвищення

чутливості використовували динамічний режим роботи [7].

Підтверджено, що поверхневі плівки, що екранують адгезійну взаємодію в зоні трибоконтакту, мають ультрадисперсну структуру і складаються із суміші фаз композиційного покриття та продуктів їх взаємодії з киснем повітря. За стехіометричним складом вони є складним важкоактивованим комплексом у вигляді дрібнодисперсної суміші оксидів Cr₂O₃, SiO₂, B₂O₃ і складних фаз типу силіцидо-оксидів CrSi₂O₄ і хроматів SiCrO₂, які перебувають в умовах контактних тисків і температур, що зумовлюють термостійкі поверхневі структури [8, 9]. Таким чином, формування вторинних структур обумовлено фазовим та хімічним складом поверхневого шару, з мікротвердістю 10–21 ГПа (при вихідній $15 \pm 0,5$ ГПа). Це пов'язано з впливом механічних і теплових імпульсів, а також дифузіїю легуючих елементів і атмосферного кисню, що викликають фазові перетворення, перерозподілу структурних складових та зміни при терті високодисперсної гетерогенної квазірівноважної зносостійкої структури. Слід зазначити, що за своєю будовою тонкоплівкові об'єкти

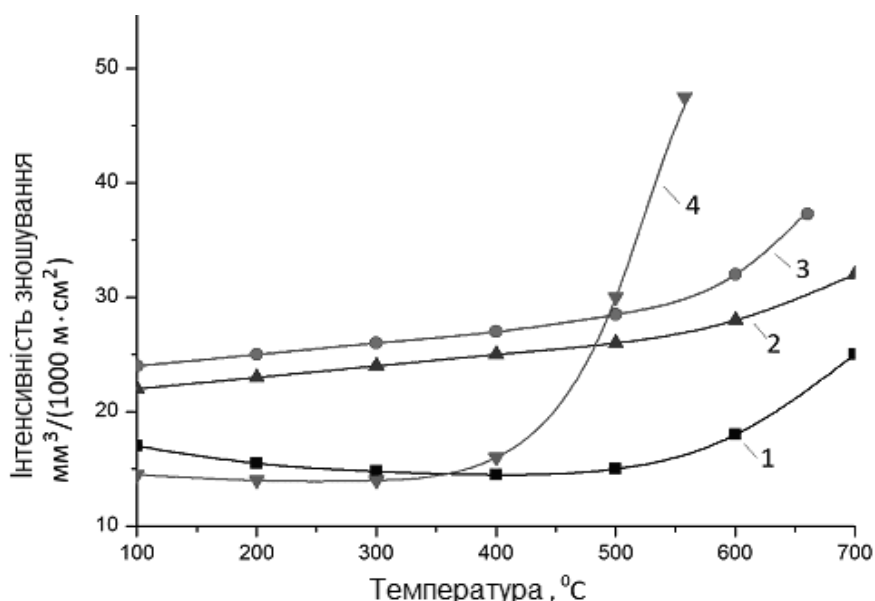


Рис. 1. Графіки залежностей інтенсивності зношування різних покриттів: Cr-Si-B-MgC₂ (1), Al₂O₃-Cr₂O₃ (2), Ni-Cr-Al-B (3), WC-Co (4)

близькі до дисперсно-зміцненого композиційного матеріалу. Як відомо, такі матеріали мають унікальне поєднання високої пластичності та міцності, які відрізняються високою стабільністю в часі [10, 11].

На рис. 2 представлено електронну фотографію поверхневої структури покриття. Характер розподілу дисперсних включень орієнтований у напрямку силових впливів при навантаженні тертям, що є підтвердженням формування зносостійких поверхневих структур за механізмами самоадаптації [12].

Металографічний аналіз зразків свідчать про те, що на поверхні тертя відсутні помітні ушкодження, а окремі точки схоплювання, що виникають за даних умов тертя, локалізуються в найтонших поверхневих шарах.

З енергетичної точки зору, дану трансформацію вторинних структур можна розглядати як адекватні елементарні механізми адаптації поверхневих шарів у процесі структурної пристосовуваності системи тертя. Так, з одного боку, внаслідок статистичних закономірностей фазоутворення, фрагментація вторинних структур на різних ділянках контактних поверхонь не збігається, але їх адитивний розподіл являє собою стійкий структурно-часовий стан, а з іншого – формування структури поверхневого шару не є змінним, а управляється мінімальними принципами дисипативних процесів [13, 14].

З підвищенням температури комплекс поверхневих явищ інтенсифікується, що обумовлено спотворенням кристалічних решіток при пластичній деформації за рахунок флуктуючих

напруг, що виникають при терті. Крім того, поява точкових та багатовимірних дефектів активують трибохімічні реакції. У результаті при досягненні критичної температури, яка для випробуваного покриття (рис. 1, крива 1) становить ~700 °C, набувають розвитку деструкційні процеси, які зумовлюють перехід до неприпустимих пошкоджень, з подальшим роззміцненням та можливим руйнуванням.

Тонкоплівковий конгломерат оксидних фаз, що перешкоджає адгезійно-молекулярній взаємодії контактних поверхонь, є складним об'єктом, інтегральні властивості якого, у свою чергу, залежать від індивідуальних властивостей простих оксидів. Мікротвердість оксидів компонентів, що входять до складу покриття, та характер їхньої залежності від температури представлені на рис. 3.

Мікротвердість оксиду хрому при підвищенні температури монотонно знижується. При цьому метастабільний оксид хрому CrO₃ при температурі ~350–400 °C переходить у Cr₂O₃, про що свідчить зміна мікротвердості. Утворення Cr₂O₃ супроводжується також зменшенням об'єму. Мікротвердість ж термічно стійкого борного ангідриду поступово знижується аж до температури плавлення.

Мікротвердість поверхневих плівок, що є оксидами подвійних сполук типу шпінелі, такі як MgO–Cr₂O₃, MgO–SiO₂, Cr₂O₃–SiO₂ і Cr₂O₃–V₂O₅, при підвищенні температури монотонно зменшується; крім того, можна вважати, що шпінелі схильні до утворення твердих розчинів з простими оксидами дво- і тривалентних металів. Встановлено, що мікротвердість силікатів

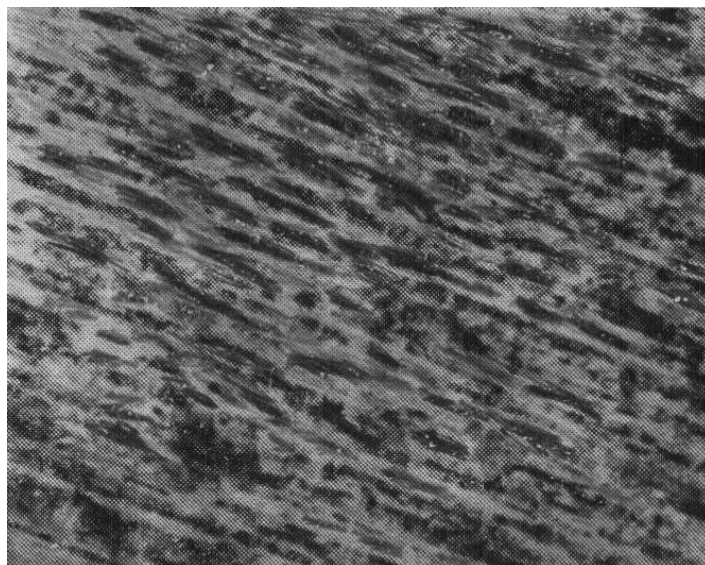


Рис. 2. Ілюстрація електронно-мікроскопічної поверхні тертя покриття Cr–Si–B–MgC₂ після випробування за температури 500 °C: ×20000

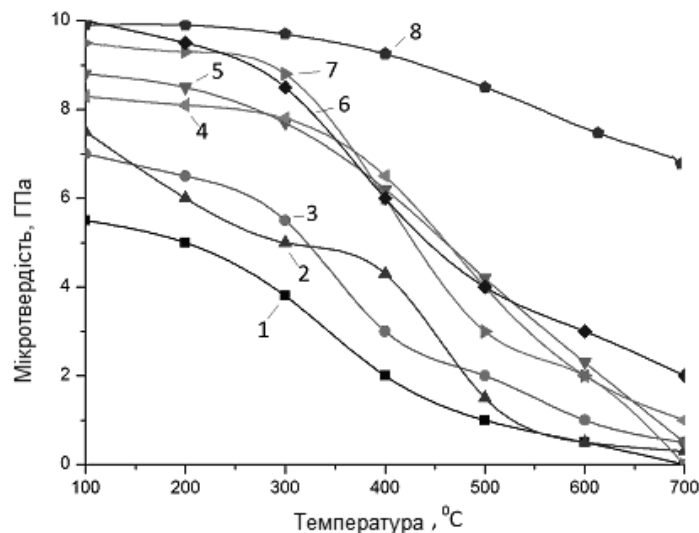


Рис. 3. Графіки температурної залежності мікротвердості оксидних плівок компонентів, що входять до складу покриття: 1 – B_2O_3 ; 2 – $MgO-SiO_2$; 3 – $Cr_2O_3-B_2O_3$; 4 – $MgO-Cr_2O_3$; 5 – CrO ; 6 – SiO_2 ; 7 – $Cr_2O_3-SiO_2$; 8 – Cr_2O_3

магнію $MgO-SiO_2$ зменшується при всіх температурах, якщо в них розчинений хром.

4. Висновки

Вивчено склад, структуру, трибо- та жаростійкість покриттів $Cr-Si-B-MgC_2$, отриманих газотермічними методами з елементів ресурсно-сировинної бази України. Висока адгезія, фізико-механічні характеристики, жаростійкість та опір зносу таких покриттів при роботі в умовах підвищених температур відповідає аналогічним властивостям жароміцних високолегованих сплавів.

Оксидні структури, карбіди, що утворюються в умовах високотемпературного зношування на поверхнях тертя детонаційних покриттів, залежно від хімічного складу можуть перебувати в різних станах. При підвищених температурах оксидні структури переходять у більш стабільний стан, що обумовлює зміну їх механічних властивостей.

Залежність мікротвердості поверхневих структур від температури монотонна, проте спостерігається і стрибкоподібність, якщо відбуваються поліморфні перетворення або перетворення метастабільних станів на більш стабільні та стійкі при нагріванні та охолодженні. Показники мікротвердості рівномірні, тому що в оксидних структурах розчинені частинки вкраплень і домішок, які істотно впливають на мікротвердість, а отже, на властивості оксидів як простого, так і складного складів.

Посилання

1. Композиційний зносостійкий матеріал: патент 125777 Україна.; Бабак В.П., Щепетов В.В., Харченко С.Д. та ін.; опубл. 01.06.2022, Бюл. № 22.

2. Becker, S., Schulz, K., Scherhauser, D. et al. Variations in strain affect friction and microstructure evolution in copper under a reciprocating tribological load. *Journal of Materials Research*. 2021. 36. P. 970—981.
3. Louda P., Sharko A., Stepanchikov D. Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses. *Materials*. 2021. 14. 2090. <https://doi.org/10.3390/ma14092090>
4. Babak, V.P., Shchepetov, V.V., Nedaiborshch, S.D. Wear resistance of nanocomposite coatings with dry lubricant under vacuum. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016, (1), nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2016_1_9
5. Tokaruk V.V., Mikosianchyk O.O., Mnatsakanov R.G., Rohozhyna N.O. Microgeometrical characteristics of electrospark coatings in the initial state. *Problems of Tribology*. 2020. Vol. 25, No 4/98. P. 33—39.
6. Babak V.P., Shchepetov V.V., Harchenko S.D. Antifriction Nanocomposite Coatings that Contain Magnesium Carbide. *J. Journal of Friction and Wear*. 2019. 40(6). P. 593—598. doi.org/10.3103/S1068366619060035.
7. Ткаченко Л.А., Шаулов А.Ю., Берлин А.А. Защитные жаропрочные покрытия углеродных материалов. *Неорганические материалы*. 2012. Т. 48, № 3. С. 261—271.
8. Varvarov V.V. Analiz mehanizmv disipacii zovnishn'oi energii pri anomal'no niz'komu terti ta znoshuvanni. *Molod' i sil's'kogospodars'ka tehnika u HHI storichchi: HV Mizhnar. forum molodi, Harkiv: HNTUSG im. Petra Vasilenka*, 2019. P. 11
9. Мубояджян С.А., Будинковский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий. *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 1. С. 17—20.

10. Баньковская И.Б., Васильева И.А., Коловертнов Д.В. Процессы окисления композиции кремний-бор-борид циркония в интервале температур 1000–1300 °С. *Физика и химия стекла*. 2012. Т. 38 (3). С. 409–416.
11. Agüero A., Muelas R., Pastor A., Osgerby S. Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components. *Surface & Coatings Technology*. 2005. No. 200. P. 1219–1224.
12. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Цымбалиста Т.В., Капорик Н.И., Васильковская М.А. Жаростойкие

газотермические покрытия на основе интерметаллида FeAlCr с добавкой CeO₂. *Автоматическая сварка*. 2019. № 9. С. 31–39.

13. Agüero A., Muelas R., Gutierrez M., Van Vulpen R., Osgerby S., Banks J.P. Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components. *Surface & Coatings Technology*. 2007. No. 201. P. 6253–6260.

14. Malinovsky Yu.A., Danilina G.V., Datsenko S.Yu. and other Quasi-static features of the formulation of deformation-wave problems during friction and wear. *Metallurgical and mining industry*. 2018. No. 3. P. 66–71.

COATINGS PROPERTIES Cr–Si–B–MgC₂ IN HIGH TEMPERATURES CONDITIONS

Vitalii Shchepetov, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8352-8307>

Svitlana Kovtun, Dr. Sci. (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6596-3460>

Serhii Kharchenko*, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0001-9808-7607>

Institute of General Energy on NAS of Ukraine, 172 Antonovycha Str., Kyiv, 03150, Ukraine;

e-mail: info@ienergy.kiev.ua

*Corresponding author: nanoavia@ukr.net

Abstract. Heat resistance, as well as friction and wear of composite coatings Cr–Si–B–MgC₂ under conditions of elevated temperatures implemented in friction pairs, were investigated. The selection of the Cr–Si–B–MgC₂ composition and its optimal composition for spraying wear-resistant coatings loaded with friction at high temperatures are substantiated. Indicated the main influence on the properties, structure, and stability of heterogeneous coatings is exerted by alloying elements at certain concentrations, as well as technological parameters of coating application. It has been established that silicon and boron contribute to the formation of complex-alloyed high-temperature formations with increased wear resistance. The microhardness of coatings correction is realized due to the silicon percentage content, while the mechanical properties of the material are increased by additional doping with boron and magnesium carbide. The parameters of sputtering of coatings are also important, on which the formation of a heat-resistant layer directly depends. It was experimentally established that the ratio of consumption of acetylene and oxygen ~20/25 l/min ensures the stability of technological parameters of sputtering, homogeneity of the chemical composition and constancy of coating properties. At a load of up to 5.0 MPa, a sliding speed of up to 1.2 m/s and a temperature of up to 700 °C, the coatings of the Cr–Si–B–MgC₂ system show stable structural adaptability, which ensures the minimization of friction and wear parameters. Metallographic analysis and profilography of the samples indicate that there are no visible damages on the friction surfaces, and individual sticking points are localized in thin film surface layers. It was established that the dependence of the microhardness of the surface structures on the temperature is monotonic, but jumps are also observed if polymorphic transformations or transformations of metastable states into more stable and stable ones during heating and cooling occur. Microhardness indicators are uniform because particles of inclusions and impurities are dissolved in the oxide structures, which significantly affect the microhardness, and therefore, the properties of oxides of both simple and complex compositions.

Keywords: protective coatings, surface layer, resistance to oxidation, wear resistance, heat resistance.

References

1. Composite wear-resistant material: Patent No. 125777 of Ukraine.; C22C 27/06; Babak V.P., Shchepetov V.V., Kharchenko S.D. et al; Appl. from 01.06.2022; Bul. No. 22 [in Ukrainian].
2. Becker, S., Schulz, K., Scherhauf, D. et al. (2021). Variations in strain affect friction and microstructure evolution in copper under a reciprocating tribological load. *Journal of Materials Research*, 36, 970–981.
3. Louda, P., Sharko, A., & Stepanchikov, D. (2021). Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses. *Materials*, 14, 2090. <https://doi.org/10.3390/ma14092090>
4. Babak, V.P., Shchepetov, V.V., Nedaiborshch, S.D. (2016). Wear resistance of nanocomposite coatings with dry lubricant under vacuum. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), nbuv.gov.ua/UJRN/Nvngu_2016_1_9
5. Tokaruk, V.V., Mikosianchyk, O.O., Mnatsakanov, R.G., & Rohozhyna, N.O. (2020). Microgeometrical characteristics of electrospark coatings in the initial state. *Problems of Tribology*, Vol. 25, No 4/98, 33–39.
6. Babak, V.P., Shchepetov, V.V., Harchenko, S.D. (2019). Antifriction Nanocomposite Coatings that Contain Magnesium Carbide. *J. Journal of Friction and Wear*, 40(6), 593–598. <https://doi.org/10.3103/S1068366619060035>
7. Tkachenko, L.A., Shaulov, A.Yu., & Berlin, A.A. (2012). Protective heat-resistant coatings of carbon materials. *Inorganic materials*. Vol. 48, No. 3, 261–271 [in Russian].
8. Varvarov, V.V. (2019). Analiz mehanizmv dissipacii zovnishn'oi energii pri anomal'no niz'komu terti ta znoshuvanni. *Molod' i sil's'kogospodars'ka tehnika u HHI storichchi: HV Mizhnar. forum molodi, Harkiv: HNTUSG im. Petra Vasilenka*, P. 11
9. Mubojajian, S.A., Budinovsky, S.A., Gayamov, A.M., & Matveev, P.V. (2013). High-temperature heat-resistant coatings and heat-resistant layers for heat-protective coatings. *Aviation materials and technologies*, 1, 17–20 [in Russian].
10. Bankovskaya, I.B., Vasilieva, I.A., & Kolovertnov, D.V. (2012). Oxidation processes of the silicon-boron-zirconium composition in the temperature range 1000–1300 °C. *Physics and chemistry of glass*, 38 (3), 409–416 [in Russian].
11. Agüero, A., Muelas, R., Pastor, A., & Osgerby, S. (2005). Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components. *Surface & Coatings Technology*, 200, 1219–1224.
12. Borisov, Y.S., Borisova, A.L., Tsybalista, T.V., Kaporik, N.I., & Vasilkovskaya, M.A. (2019). Heat-resistant gas-thermal coatings based on FeAlCr intermetallic with the addition of CeO₂. *Automatic welding*, 9, 31–39.
13. Agüero, A., Muelas, R., Gutierrez, M., Van, Vulpen R., Osgerby, S., & Banks, J.P. (2007). Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components. *Surface & Coatings Technology*, 201, 6253–6260.
14. Malinovsky, Yu.A., Danilina, G.V., Datsenko, S.Yu. et al. (2018). Quasi-static features of the formulation of deformation-wave problems during friction and wear. *Metallurgical and mining industry*, 3, 66–71.

Надійшла до редколегії: 07.09.2022