

О.П. Уманський¹
А.Г. Довгаль²
О.П. Кулик³
О.М. Полярус⁴

ЗНОСОСТІЙКІ КОМПОЗИЦІЙНІ ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ SiC–Al₂O₃ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ

^{1,2}Національний авіаційний університет

проспект Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680

^{3,4}Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

вул. Кржижанівського, 3, Київ-142, Україна, 03680

E-mails: ¹kermet@voliacable.com; ²270579@ukr.net; ³o.kulic@ipms.kiev.ua; ⁴elena_polyarus@ukr.net

Досліджено структуру покривів з композиційного матеріалу, що містить зносостійку складову SiC–Al₂O₃ і металеву зв'язку Ni–Al, отриманих методом високошвидкісного повітряно-паливного нанесення на середньовуглецевих сталях. Вивчено триботехнічні характеристики отриманих покривів в умовах тертя без мастильних матеріалів на повітрі, визначено особливості та закономірності механізмів їх зношування.

Ключові слова: високошвидкісне повітряно-паливне напилення; змочування; зносостійкість; кераміка; покриття.

Постановка проблеми

Проблема підвищення зносо- і корозійної стійкості деталей машин є актуальною в умовах експлуатації устаткування за високих швидкостей і навантажень. Перспективними для таких умов роботи є керамічні матеріали, які мають високу стійкість в умовах інтенсивного зношування і до впливу агресивних середовищ. Цим вимогам відповідають керамічні композити на основі карбиду кремнію та оксиду алюмінію, які мають високий рівень фізико-механічних властивостей, а також є недорогими і недефіцитними матеріалами.

Ресурс паливо-перекачувальної апаратури визначається зносо- і корозійною стійкістю ущільнювальних елементів. Тому ці вузли є найбільш навантаженими. Їх контактна зона працює в умовах тертя без змащування в динамічному режимі, а в статичному режимі піддана впливу перекачуваного середовища – палива та всіх можливих присадок до нього і вміщеної води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Карбідокремнієві композиційні матеріали можуть застосовуватися як у вигляді компактних виробів [5], так і покриттів на поверхні деталей, що працюють у вузлах трибосполучень. Перевага застосування керамічних матеріалів як покриттів полягає в їх локальному використанні на тертьових поверхнях, що зумовлюють істотну економію цих матеріалів. Для нанесення газотермічними методами керамічних порошкових

композиційних матеріалів на сталеві поверхні необхідно введення в шихту металеві складові, яка забезпечувала б адгезійне зчеплення кераміки зі сталеву підкладкою і когезійне зчеплення між фазами покриття.

Металева складова має відповідати таким вимогам: між металеву та керамічну складовими повинен бути високий рівень змочування ($\theta \ll 90^\circ$) та відсутність активної хімічної взаємодії.

Натепер широке застосування в різних галузях промисловості для порошкових композицій набула технологія високошвидкісного повітряно-паливного нанесення (ВППН) зносостійких покриттів. Цей метод відрізняється від детонаційного плавністю і безперервністю процесу нанесення покриттів, а отже, неістотним динамічним впливом на деталь, а від плазмового більш низьким температурним впливом на деталь і відносно низькою вартістю обладнання [1].

Зносостійкою складовою композиту для нанесення ВППН покриттів обрано кераміку SiC–Al₂O₃, випробувану раніше як компактний керамічний матеріал і має високий рівень триботехнічних характеристик [5].

Як металеву зв'язку було обрано сплав на основі нікелю, який повинен забезпечити адгезію керамічної складові до сталеві підкладки і високу корозійну стійкість. Чистий нікель не змочує кераміку системи SiC–Al₂O₃ ($\theta = 116^\circ$).

Для поліпшення змочування в системі (SiC–Al₂O₃)–Ni до складу сплаву нікелю вводили поверхнево-активний елемент – алюміній.

Невеликі домішки алюмінію (5–10 мас.%) у нікелі істотно знижує контактні кути змочування до значень $\theta = 67^\circ \dots 53^\circ$, але при цьому між рідкою і твердою фазами відбувається активна хімічна взаємодія.

Оптимальним щодо вибору металевої зв'язки виявився нікелевий розплав, що містить 15 мас.% Al, оскільки в системі (SiC–Al₂O₃)–(Ni–15% Al) утворюються контактні кути змочування 20°, при цьому не відбувається активної хімічної взаємодії, що призводить до утворення силіцидів нікелю. Як металеву складову для нанесення карбидокремнієвої кераміки SiC–Al₂O₃ на сталеву підкладку методом ВППН обрано металевий сплав Ni–15% Al [4].

Мета роботи – вироблення зносостійких покриттів із системи (SiC–Al₂O₃)–(Ni–15% Al) методом ВППН для застосування їх як тертьових поверхонь торцевих ущільнень відцентрових насосів, випробування цих покриттів на зносостійкість.

Основні результати дослідження

Мікроструктура покриття (рис. 1) являє собою композиційний матеріал, що складається з матриці на основі нікель-алюмінієвого сплаву, у якій рівномірно розподілені частинки кераміки SiC–Al₂O₃, а також окремі зерна карбиду кремнію та оксиду алюмінію (див. таблицю). Наявність окремих зерен SiC і Al₂O₃ пояснюється тим, що при подрібненні компактно кераміки, можливо, відбувся частковий поділ карбідної і оксидної фаз. Товщина покриттів змінюється в межах 100...150 мкм. Пористість покриття не перевищувала 5%. Розмір керамічних включень змінюється в межах 3...10 мкм.

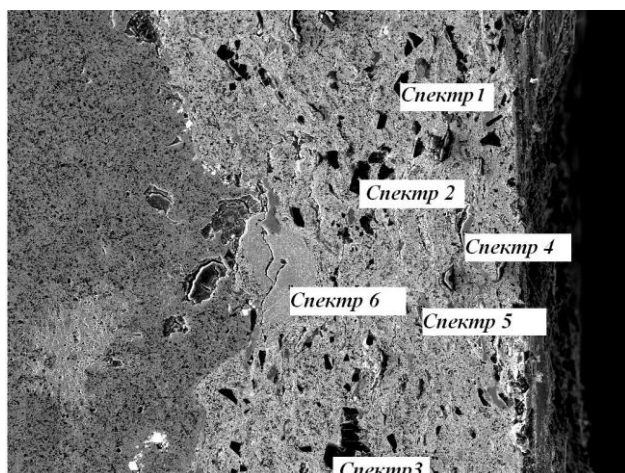


Рис. 1. Мікроструктура отриманих ВППН-покриттів із системи (SiC–50% Al₂O₃)–50% (Ni–15% Al)

Об'ємний вміст керамічних фаз у покритті не відповідає вихідному, що пояснюється технологічними втратами при нанесенні покриттів. Кількість керамічних компонентів в композиційному покритті становить 12...15% (рис. 1). Наявність цих фаз підтвердив і рентгенофазовий аналіз покриття, який показав наявність у ньому фаз SiC, Al₂O₃, Ni–Al.

Оскільки керамічні карбидокремнієві ВППН-покриття призначаються для роботи як робочих поверхонь деталей торцевих ущільнень відцентрових насосів, то і режими триботехнічних випробувань були обрані такими, які моделюють умови роботи контактної зони низько- і середньошвидкісних торцевих ущільнень.

Триботехнічні випробування проводилися за двома схемами: за постійного навантаження 6 МПа вивчали вплив швидкості тертя і за постійної швидкості 7 м/с досліджували вплив навантаження на інтенсивність зношування та коефіцієнти тертя відповідно.

Результати триботехнічних випробувань композиційних ВППН-покриттів за постійного навантаження показали, що зі збільшенням швидкості інтенсивність зношування зменшується з 48,9 мкм/км за швидкості випробувань 2 м/с до 30 мкм/км за швидкості 7 м/с. Ці значення більш ніж у два рази перевищують результати випробування сталевих зразків (рис. 2).

Коефіцієнти тертя при випробуванні покриттів залежно від швидкості тертя змінюються в межах 0,33...0,30. Для сталевих зразків без покриття менші значення коефіцієнтів тертя відповідають великим значенням інтенсивності зношування порівняно з покриттям. Це пояснюється тим, що випробовувалися різні класи матеріалів: сталі та композиційні покриття.

Вміст ділянок мікрорентгеноспектрального аналізу

| Спектр | C | O | Al | Si | Ni |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Спектр 1 | 47,53 | 0,00 | 0,00 | 52,47 | 0,00 |
| Спектр 2 | 21,11 | 23,44 | 22,45 | 32,89 | 0,00 |
| Спектр 3 | 16,90 | 31,14 | 30,86 | 20,77 | 0,33 |
| Спектр 4 | 0,00 | 54,02 | 45,98 | 0,00 | 0,00 |
| Спектр 5 | 0,00 | 53,03 | 46,97 | 0,00 | 0,00 |
| Спектр 6 | 7,84 | 0,00 | 20,39 | 0,00 | 71,77 |
| Max | 47,53 | 54,02 | 46,97 | 52,47 | 71,77 |
| Min | 7,84 | 23,44 | 20,39 | 20,77 | 0,33 |

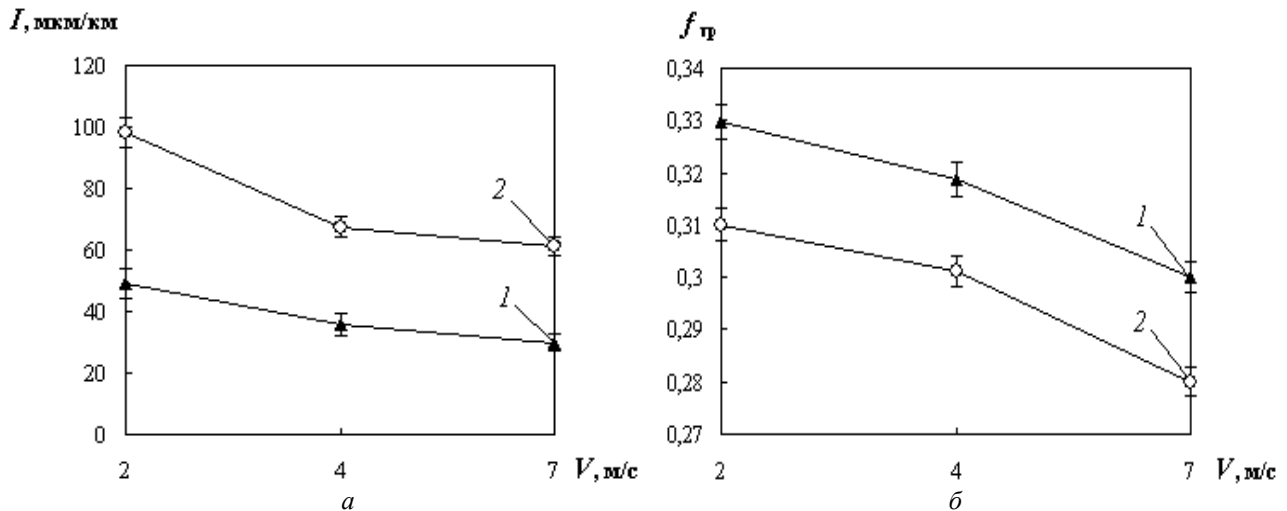


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування (а) і коефіцієнта тертя (б) від швидкості тертя за навантаження 6 МПа: 1 – ВВПН-покриття (SiC–Al₂O₃)–(Ni–Al); 2 – загартована сталь 45

Випробування зразків з покриттями за постійної швидкості 7 м/с показали (рис. 3), що зі збільшенням навантаження інтенсивність зношування незначно збільшується з 20,4 мкм/км, якщо $P = 2$ МПа, до 30 мкм/км, якщо $P = 6$ МПа. Інтенсивність зношування сталевих зразків зі збільшенням навантаження різко зростає з 41,6 до 61 мкм/км. Коефіцієнти тертя під час випробування за умов $P = 6$ МПа, $V = 7$ м/с становлять 0,28 для сталевих зразків і 0,30 для ВВПН-покриттів. Таким чином, за найбільш жорстких умов випробування інтенсивність зношування зразків з покриттями в два рази менша, ніж цей показник зразків із загартованої сталі 45 (рис. 3).

Інтенсивність зношування контртіла під час випробувань не перевищувала 10 мкм/км.

Для пояснення отриманих результатів поверхні тертя зразків з покриттями були досліджені на електронному мікроскопі «САМЕВАХ SX 50». Структура зони тертя композиційних покриттів являє собою лускату поверхню без істотних пошкоджень (рис. 4).

За більш ретельного дослідження у разі збільшення $\times 3000$ (рис. 5) поверхня тертя покриттів являє собою суцільну оксидну плівку складного складу, що містить оксиди заліза, алюмінію та нікелю.

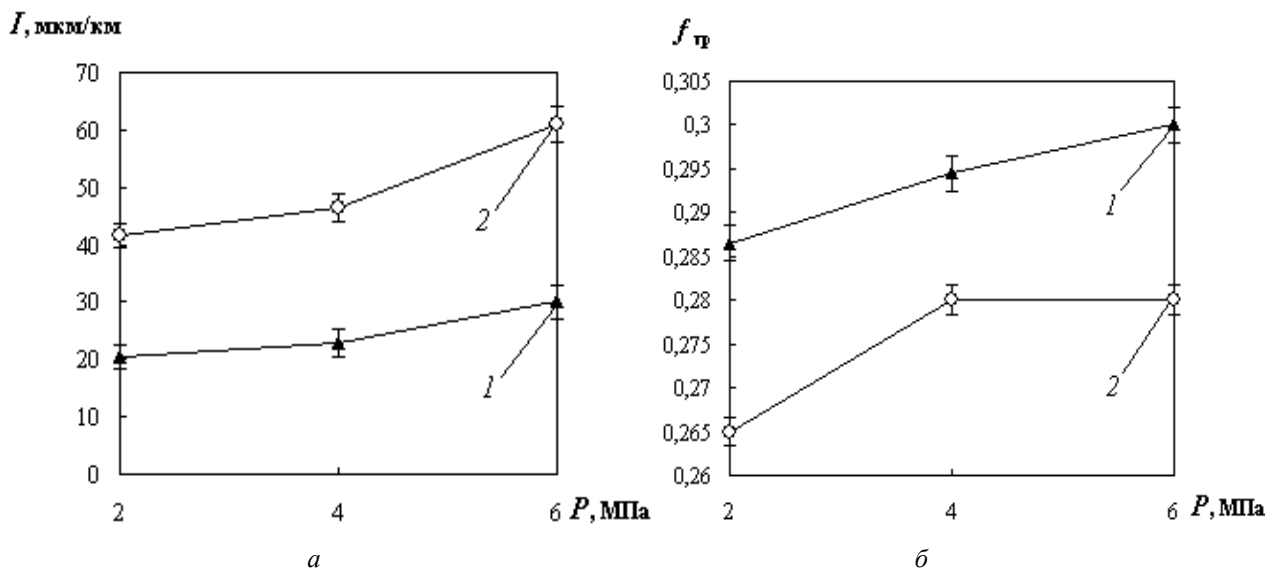


Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування (а) і коефіцієнта тертя (б) від навантаження за швидкості тертя 7 м/с: 1 – ВВПН-покриття (SiC–Al₂O₃)–(Ni–Al); 2 – загартована сталь 45

Наявність заліза в оксидній плівці пояснюється тим, що в процесі випробувань унаслідок виникнення на локальних ділянках у зоні тертя високих температур відбувається окиснення заліза на поверхні контртіла і перенесення його на поверхню композиційного покриття.

Такий механізм зношування описано в праці [3], в якій він віднесений до окиснювального типу і є сприятливим щодо зносостійкості пари тертя, оскільки продукти взаємодії відіграють роль твердого мастила. Утворена на поверхні покриття в процесі тертя плівка на основі оксидів заліза, алюмінію і нікелю не має істотних пошкоджень і, очевидно, має високу адгезію до поверхні покриття (рис. 4).

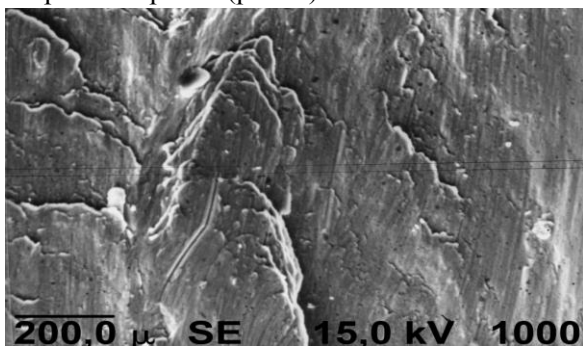


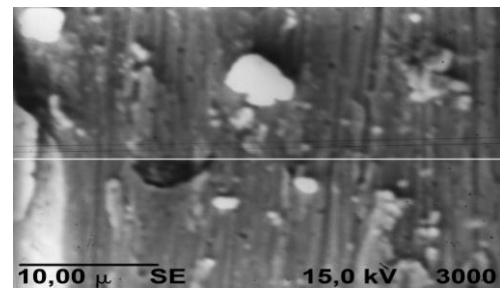
Рис. 4. Мікроструктура типових ділянок поверхні тертя зразків з ВППН-покриттям ×1000

Поверхнева плівка складається з оксидів із вкрапленнями компонентів кераміки незначно підвищує коефіцієнт тертя близько 0,02 порівняно з неокисненою поверхнею загартованої сталі 45.

Роль керамічних вкраплень SiC–Al₂O₃ у ВППН-покритті при терті в парі зі сталевим контртілом полягає і в дисперсному зміцненні поверхневих шарів покриття. Розмір керамічних вкраплень варіюється в межах 3...10 мкм, вони, з одного боку, перешкоджають процесу пошкодження оксидної плівки, а з другого боку, очевидно, сприяють підвищенню її адгезії до основи покриття за рахунок активної взаємодії компонентів покриття з оксидами.

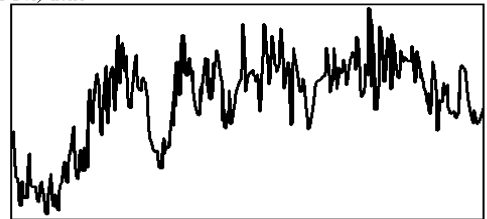
Порівняльну діаграму триботехнічних характеристик покриттів, отриманих методом ВППН з композиції (SiC–Al₂O₃)–(Ni–Al) і твердого сплаву ВК-8 [2], випробуваних за швидкості 10 м/с і навантаження 2 МПа, а також зразків із загартованої сталі 45 без покриття за швидкості 7 м/с і навантаження 6 МПа, показано на рис. 6.

Покриття з композиційного матеріалу системи (SiC–Al₂O₃)–(Ni–Al) незначно поступаються за зносостійкістю покриттів з твердого сплаву ВК-8, але в своєму складі містять менше дорогих компонентів. Цей композит може бути рекомендований для використання як ВППН покриття робочих поверхонь торцевих ущільнень відцентрових насосів.



a

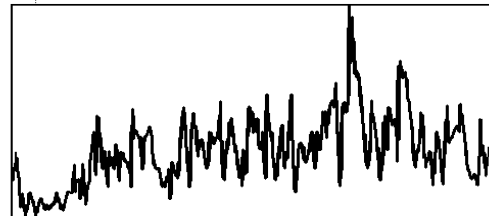
60 Ni, lmn



35,24 L, мкм

б

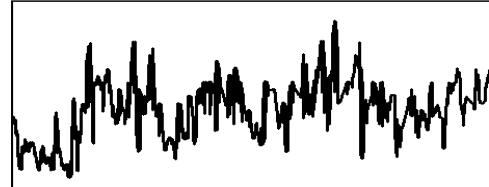
40 Al, lmn



35,24 L, мкм

в

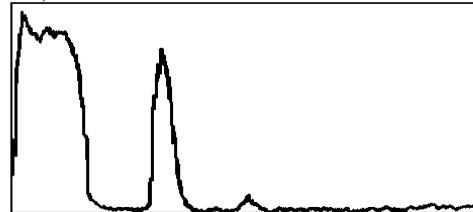
30 O, lmn



35,24 L, мкм

г

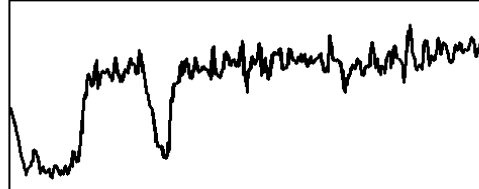
1000 Si, lmn



35,24 L, мкм

д

200 Fe, lmn



35,24 L, мкм

е

Рис. 5. Мікроструктура ×3000 ділянки доріжки тертя ВППН-покриття (a) і розподіл у ній нікелю (б), алюмінію (в), кисню (г), кремнію (д), заліза (е)

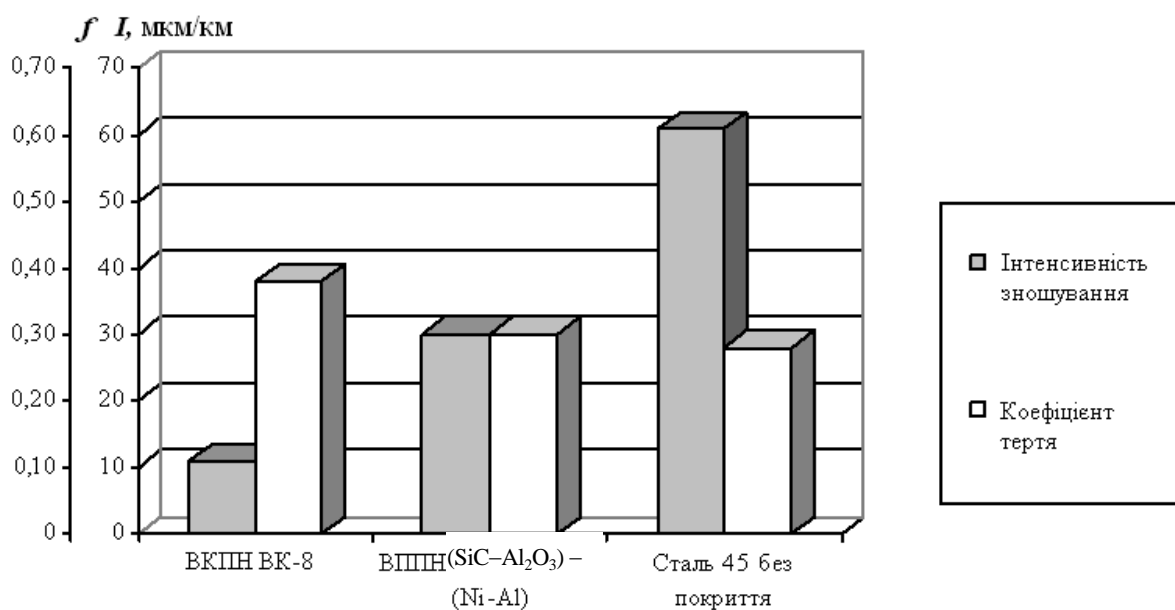


Рис. 6. Інтенсивність зношування і коефіцієнти тертя

Висновки

1. Отримано нові композиційні металокерамічні ВКПН-покриття системи (SiC–Al₂O₃)–(Ni–Al) на сталі. Структура цих покриттів являє собою металокерамічну матрицю, у якій рівномірно розподілені 12–15% тугоплавких сполук SiC–Al₂O₃. Товщина покриття варіюється в межах 100–150 мкм.

2. Досліджено триботехнічні характеристики ВКПН-покриттів у широкому діапазоні навантажувально-швидкісних параметрів, встановлено, що за найбільш жорстких режимів випробувань ($P = 6$ МПа і $V = 7$ м/с) інтенсивність зношування покриття становить 30 мкм/км, що в 2 рази перевищує зносостійкість сталі.

3. Установлено механізми зношування ВКПН-покриттів і сталі в умовах тертя без маслинистих матеріалів у парі зі сталевим контртілом. Показано, що високі значення триботехнічних характеристик ВКПН-покриттів пояснюються утворенням у процесі тертя складних плівок на основі оксидів заліза, нікелю та алюмінію, тобто реалізується окиснювальний механізм зношування.

Література

1. *Высокоскоростное воздушно-топливное напыление – современный метод нанесения жаро- и износостойких металлических и композиционных покрытий* / В.М. Кисель, Ю.И. Евдокименко,

В.Х. Кадыров, Г.А. Фролов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 8/44. – С. 31–35.

2. *Износ- и окислостойкие покрытия на основе TiCN* / И.А. Подчерняева, А.Д. Панасюк, Ю.И. Евдокименко и др. // *Порошковая металлургия*. – 2001. – № 5/6. – С. 57–68.

3. *Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении* / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.

4. *Панасюк А.Д. Исследование контактного взаимодействия керамики SiC–Al₂O₃ с никелем, алюминием и никель-алюминиевыми сплавами* / А.Д. Панасюк, А.П. Уманский, А.Г. Довгаль // *Адгезия расплавов и пайка материалов*. – 2010 – № 43. – С. 55–63.

5. *Уманский А.П. Влияние состава и структуры карбидокремниевых композитов на износостойкость и механизмы их изнашивания при трении в паре с керамическим контртелом* / А.П. Уманский, А.Г. Довгаль, А. Д. Костенко // *Проблеми трибології*. – 2011. – № 3. – С. 81–88.

References

1. Kisel, V.M.; Yevdokimenko, Yu.I.; Kadirov, V.K.; Frolov, G.A. 2007. *High-velocity air fuel deposition is the modern technique for acquisition of heat-proof and wear-proof metal and composition coatings*. Aircraft and space equipment and technology. N 8/44: 31–35 (in Russian).

2. Podchernayeva, I.A.; Panasyk, A.D.; Yevdokimenko, Yu.I. et al. 2001. *Wear-proof and scale-resistant coating on the basis of TiCN*. Powder Metallurgy and Metal Ceramics. N 5/6: 57–68 (in Russian).

3. Kostetskii, B.I.; Nosovskii, I.G.; Karaulov, A.K. 1976. *Surface Strength of Materials in Friction*. Kyiv, Tekhnika. 296 p. (in Russian).

4. Panasyuk, A.D.; Umansky, A.P.; Dovgal, A.G. 2010. *Research of contact interaction of ceramic*

SiC–Al₂O₃ with nickel, aluminium and nickel-aluminium alloys. Alloys adhesion and materials soldering. N 43: 55–63 (in Russian).

5. Umanskyi, A.P.; Dovgal, A.G.; Kostenko, A.D. 2011. *Influence of composition and structure of silicon carbide composites on wear resistance and their wear mechanisms during friction together with a ceramic counterbody*. Problems of tribology. N 3: 81–88 (in Russian).

Стаття надійшла до редакції 08.04.2013.

Уманський Олександр Павлович. Доктор технічних наук. Професор.

Кафедра технологій аеропортів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Освіта: Київський політехнічний інститут, Київ, Україна (1979)

Напрямок наукової діяльності: поверхнева інженерія високостійких поверхневих шарів.

Кількість публікацій: 149.

E-mail: kermet@voliacable.com

Довгаль Андрій Григорович. Асистент.

Кафедра технологій аеропортів, Національний авіаційний університет, Київ, Україна.

Освіта: Національний авіаційний університет, Київ, Україна (2002).

Напрямок наукової діяльності: тертя та зношування в машинах, підвищення та відновлення зносостійкості.

Кількість публікацій: 25.

E-mail: 270579@ukr.net

Кулик Ольга Петрівна. Кандидат хімічних наук. Старший науковий співробітник.

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича, Київ, Україна.

Освіта: Київський політехнічний інститут, Київ, Україна (1971).

Напрямок наукової діяльності: фізична хімія конструкційних матеріалів та покриттів.

Кількість публікацій: 85.

E-mail: o.kulic@ipms.kiev.ua

Полярус Олена Миколаївна. Кандидат технічних наук. Науковий співробітник.

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича, Київ, Україна.

Освіта: Національний технічний університет України («Київський політехнічний інститут»), Київ, Україна (2007).

Напрямок наукової діяльності: поверхнева інженерія високостійких поверхневих шарів.

Кількість публікацій: 35.

E-mail: elena_polyarus@ukr.net

A. Umanskyi¹, A. Dovgal², O. Kulyk³, O. Poliarus⁴. Wearproof composition coatings on the basis of SiC–Al₂O₃ for restoration and reinforcement of the components of aircraft ground support equipment

^{1,2}National Aviation University, Kosmonavta Komarova, avenue 1, Kyiv, Ukraine, 03680

^{3,4}Frantsevich Institute for Problems of Material Science, Krzhizhanovskogo street, 3, Kyiv-142, Ukraine, 03680

E-mails: ¹kermet@voliacable.com; ²270579@ukr.net; ³o.kulic@ipms.kiev.ua; ⁴elena_polyarus@ukr.net

On the ground of research of a contact interaction of the melts of the system Ni–Al with the ceramics of SiC–Al₂O₃ content, the possibility of wearproof coating deposition of the system SiC–Al₂O₃–Ni–Al by gas-flame techniques has been proved. Technological features of their acquisition also have been studied. The structure of coatings from composition material that contains the SiC–Al₂O₃ wearproof component and Ni–Al metallic binder, deposited by the method of high velocity air fuel deposition (HVOF) on medium-carbon steel steels has been researched. Tribotechnical descriptions of the deposited coatings under the conditions of friction without lubricating materials in the air environment in wide range of speed-load modes of the “pin-on-disk” layout have been studied. The features and regularities of their wear mechanisms retaining the constant speed and constant load have been determined.

Keywords: ceramics; coating; high velocity air fuel spraying; wear resistance; wetting.

Umansky Alexander. Doctor of Engineering. Professor.

Airports Technology Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Education: Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine (1979).

Research area: superficial engineering of superficial layers of improved resistance.

Publications: 149.

E-mail: kermet@voliacable.com

Dovgal Andrey. Assistant.

Airports Technology Department, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Education: National Aviation University, Kyiv, Ukraine (2002).

Research area: friction and wear of equipment, improvement and recovery of wear resistance.

Publications: 25.

E-mail: 270579@ukr.net

Kulyk Olga. Candidate of Chemistry. Senior Researcher.

Frantsevich Institute for Problems of Material Science, Kyiv, Ukraine.

Education: Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine (1971)

Research area: physical chemistry of structural materials and coating.

Publications: 85.

E-mail: o.kulic@ipms.kiev.ua

Poliarus Olena. Candidate of Engineering. Researcher Assistant.

Frantsevich Institute for Problems of Material Science, Kyiv, Ukraine.

Education: National Technical University of Ukraine ("Kyiv Polytechnic Institute"), Kyiv, Ukraine (2007).

Research area: superficial engineering of superficial layers of improved resistance.

Publications: 35.

E-mail: elena_polyarus@ukr.net

А.П. Уманский¹, А.Г. Довгаль², О.П. Кулик³, Е.Н. Полярус⁴. Износостойкие композиционные покрытия на основе SiC-Al₂O₃ для восстановления и упрочнения деталей авиационной наземной техники

^{1,2}Національний авіаційний університет, просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, Україна, 03680

^{3,4}Інститут проблем матеріалознавства ім. І.Н. Францевича, ул. Кржижановського, 3, Київ-142, Україна, 03680

E-mails: ¹kerm@voliacable.com; ²270579@ukr.net; ³o.kulic@ipms.kiev.ua; ⁴elena_polyarus@ukr.net

На основании изучения контактного взаимодействия керамики состава SiC-Al₂O₃ с расплавами системы Ni-Al доказана возможность нанесения износостойких покрытий системы SiC-Al₂O₃-Ni-Al, нанесенных газотермическими методами. Установлены технологические особенности их получения. Исследована структура покрытий из композиционного материала, содержащего износостойкую составляющую SiC-Al₂O₃ и металлическую связку Ni-Al, полученных методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления на среднеуглеродистых сталях. Рассмотрены триботехнические характеристики полученных покрытий в условиях трения без смазочных материалов на воздухе в широком диапазоне нагрузочно-скоростных параметров по схеме «плоскость-плоскость». Определены особенности и закономерности механизмов их изнашивания при постоянной нагрузке и постоянной скорости.

Ключевые слова: высокоскоростное воздушно-топливное напыление; износостойкость; керамика; покрытие; смачивание.

Уманский Александр Павлович. Доктор технических наук. Профессор.

Кафедра технологий аэропортов, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Образование: Киевский политехнический институт, Киев, Украина (1979).

Направление научной деятельности: поверхностная инженерия высокостойких поверхностных слоев.

Количество публикаций: 149.

E-mail: kerm@voliacable.com

Довгаль Андрей Григорьевич. Ассистент.

Кафедра технологий аэропортов, Национальный авиационный университет, Киев, Украина.

Образование: Национальный авиационный университет, Киев, Украина (2002).

Направление научной деятельности: трение и износ в машинах, повышение и восстановление износостойкости,

Количество публикаций: 25.

E-mail: 270579@ukr.net

Кулик Ольга Петровна. Кандидат химических наук. Старший научный сотрудник.

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, Украина.

Образование: Киевский политехнический институт, Киев, Украина (1971).

Направление научной деятельности: физическая химия конструкционных материалов и покрытий.

Количество публикаций: 85.

E-mail: o.kulic@ipms.kiev.ua

Полярус Елена Николаевна. Кандидат технических наук. Научный сотрудник.

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, Украина.

Образование: Национальный технический университет Украины («Киевский политехнический институт»), Киев, Украина (2007).

Направление научной деятельности: поверхностная инженерия высокостойких поверхностных слоев.

Количество публикаций: 35.

E-mail: elena_polyarus@ukr.net