

Дмитриченко М.Ф.,*
 Приймак Л.Б.,*
 Довгаль А.Г.,*
 Білякович О.М.,*
 Савчук А.М.,**
 Туриця Ю.О.**

*Національний транспортний університет,
 м. Київ, Україна;

**Національний транспортний університет,
 м. Київ, Україна

E-mail: yuliya_tur@ukr.net

ВИБІР СКЛАДУ ПІДШАРУ ДЛЯ ТЕРМОБАР'ЄРНИХ ПОКРИТТІВ ТЕПЛОНАВАНТАЖЕНИХ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ

УДК 621.891:631.31

Досліджені адгезійні властивості композиту системи $Al_2O_3-ZrO_2$ в результаті змочування у вакуумі розплавами системи Ni-Al, з метою дослідження можливості використання цих сплавів у якості проміжного шару для сталевих деталей авіаційної наземної техніки, та високотемпературної поведінки цих розплавів на межі системи «кераміка-розплав». Встановлено, що розплав чистого нікелю не змочує кераміку системи $Al_2O_3-ZrO_2$, проте домішки алюмінію в нікель у обсязі 15 % суттєво інтенсифікують процес адгезійної взаємодії з утворенням контактних кутів $\theta = 20^\circ$. Розраховані основні параметри адгезійної взаємодії та досліджена структура контактної зони. Встановлена доцільність застосування вказаного сплаву Ni-15 % Al для проміжного шару покриття системи $Al_2O_3-ZrO_2$ для захисту сталевих теплонавантажених деталей авіаційної наземної техніки.

Ключові слова: авіаційна наземна техніка, теплозахисне покриття, адгезійні властивості, керамічний зразок.

Вступ

Раніше було ретельно досліджено використання кераміки системи SiC- $Al_2O_3-ZrO_2$ у якості зовнішнього шару теплозахисного покриття, а саме проведено його високотемпературне окиснення до температур 1600 °C та досліджена структура та фазовий склад зовнішнього шару окалини та встановлено, що в результаті окиснення на поверхні утворюються щільна шарувата структура селіманіту Al_2SiO_5 ромбовидної сингонії, що щільно екранує поверхню композиту від подальшого проникнення кисню та руйнації композиту та володіє достатньою адгезією до «матриці» композиту [1]. Матеріали цієї системи дуже ефективно використовуються і в якості нанесення покриттів на сталеві деталі, проте питання адгезії цієї композиційної кераміки до сталевих підкладок в умовах термічного циклювання не вирішені і дотепер. Покриття, що розробляється є багатофункціональним, тобто тепло- та зносо-захисним. А це значить, що його проміжний шар повинен мати якнайнижчу теплопровідність. Як відомо, найнижчу теплопровідність мають багатфазні системи з розорієнтованими структурами, що мають якнайбільшу поверхню міжфазного розділу, зокрема евтектики. Відомі теплозахисні композиції на базі оксидів рідкоземельних лактану і церію ($\lambda = 0,52 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) [2], проте не варто нагадувати вартість цих елементів та їх витрати в промисловому масштабі. Також відома низька теплопровідність стабілізованого оксидом ітрію оксиду цирконію ($\lambda = 2,1 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) [2]. Проте, також, композиція надто дорога для промислового використання. Відомо, що система оксидів алюмінію та цирконію в концентрації 68 % Al_2O_3 – 32 % ZrO_2 утворює евтектику при температурі плавлення 1910 °C [3], що володіє теплопровідністю за 1000 °C. ($\lambda = 2,71 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) та міцністю на згин 145 МПа, що дозволяє її рекомендувати як композицію для нанесення теплозахисного шару багатофункціональних покриттів. До того ж, оксид алюмінію не дуже коштовний та недефіцитний компонент, дещо дорожче оксид цирконію, проте він складає лише третину від всієї композиції. Тому керамічний композит складу 68 % Al_2O_3 – 32 % ZrO_2 було обрано як базовий для визначення металевих складників, що володіли б якнайкращою взаємодією з ним.

Мета роботи

Вивчення контактної взаємодії кераміки системи 68 % Al_2O_3 – 32 % ZrO_2 зі сплавами на основі нікелю. Дослідження адгезійних характеристик системи та вивчення взаємного впливу «кераміка-розплав» в результаті високотемпературної контактної взаємодії. Ретельне дослідження структури контактної зони та підкладки після взаємодії та визначення найбільш оптимальних технологічних режимів синтезу майбутнього термобар'єрного покриття.

Методика та матеріали

Вихідні керамічні зразки складу (мас.) 68 % Al_2O_3 –32 % ZrO_2 розміром 15 мм × 15 мм × 5 мм отримували методом порошкової металургії гарячим пресуванням. Вихідні порошки компонентів шихти були наступними: оксид алюмінію (ТУ 6-09-2486-77) і оксид цирконію (ТУ 6-09-03-350-73). Вихідна зернистість всіх порошків складала 40 - 50 мкм. У відповідному співвідношенні порошки перемішували протягом 30 хв у полімерній посудині на обертовому рольганзі. Після просіву ($d < 50$ мкм) шихту засипали в графітову пресформу, робочі поверхні якої захищали шаром нітриду бору для запобігання взаємодії між пресованим матеріалом і висококомічним графітом марки МПГ-7.

Гаряче пресування проводили на установці СПД-120 з індукційним нагрівом без захисної атмосфери. Температуру контролювали за допомогою пірометра. Навантаження прикладали за температури 800 °С, а розігрів припиняли за початку інтенсивного усадження (1470 °С). Отримані зразки з пористістю 2 - 3 % шліфували до 5 класу поверхні та видалення нерівномірного дефектного шару.

Для отримання нікелевих та нікельалюмінієвих сплавів з домішками алюмінію у кількості 10 та 15 % у вакуумній печі СШВЛ сплавили суміші відповідних порошків на етиловому спирті для рівномірного розміщення. Використовували наступні порошкові матеріали: нікель марка Н-0 (ГОСТ 849-70) і алюміній ПА-4 (ГОСТ 6058-73).

Дослідження змочування керамічної підкладки розплавом проводили на вакуумній установці «лежача крапля» [4], де в вакуумі 1,33 МПа підігрівали зразок «сплав на підкладці» до його повного розплавлення за температур, які на 50 - 100 °С перевищують температуру плавлення відповідних сплавів та за допомогою фотофіксації в часі спостерігали за контактними кутами змочування протягом 30 хв (у випадку відсутності змочування) крізь синій світлофільтр для отримання чіткого зображення цифрової камери. Контроль температури в печі здійснювали вольфрам-ренієвою термопарою ВР 5/20. Далі успішно змочені зразки різали алмазними колами для отримання шліфів і подальшого металографічного аналізу.

Металографічні, мікроструктурні і мікрорентгеноспектральні дослідження проводили суворо перпендикулярно поверхні розділу «крапля-кераміка» на електронному мікроскопі РЕМ-106И з використанням азотного мікрорентгеноспектрального аналізатора.

Результати дослідження і їх обговорення

Вихідна структура керамічних зразків до взаємодії з розплавом (рис. 1) підтверджує наявність трьох фазових ділянок: зерна оксиду алюмінію – темна фаза, евтектики оксид алюмінію – оксид цирконію (строката фаза), та окремих зерен оксиду цирконію – світла фаза.

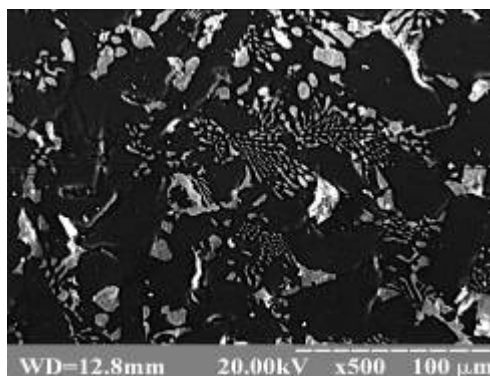


Рис. 1 – Вихідна структура керамічної підкладки складу Al_2O_3 -32 % ZrO_2 (зб. 500) після гарячого пресування шихти за температури 1470 °С та зернистості вихідних компонентів шихти 40 - 50 мкм

Як відомо [5], навіть невеликі домішки алюмінію в нікелі суттєво знижують поверхневий натяг краплі розплаву (табл. 1), що мусить в свою чергу суттєво поліпшити контактну взаємодію з твердою фазою.

Таблиця 1

Поверхневий натяг сплаву Ni-Al в залежності від концентрації Al

C_{Al} , % (мас.) ($\sigma_{\text{Al}} = 770$ мН/м)	$\sigma_{\text{Ni-Al}}$, мН/м ($\sigma_{\text{Ni}} = 1700$ мН/м)
0	1700
10	1590
15	1550

Саме на цій підставі було і обрано алюміній в якості легуючої добавки в нікель. До того ж у кількості 15 % (мас.) алюміній з нікелем утворюють стійкий інтерметалід Ni_3Al , що відрізняється високою хімічною та термічною стійкістю та гарною адгезією до сталей, титанових сплавів та тугоплавких сполук [6, 7]. Кінетика зміни крайових кутів змочування в часі для різного вмісту домішок алюмінію наведена на рис. 2. Як видно з наведеного рисунку домішка у кількості 15 % призводить до повного змочування кераміки $\theta = 20^\circ$ вже на 5-тій хвилині контактної взаємодії, та утворює міцний адгезійний зв'язок з керамічною підкладкою (табл. 2), робота якого розрахована за відомою методикою [8].

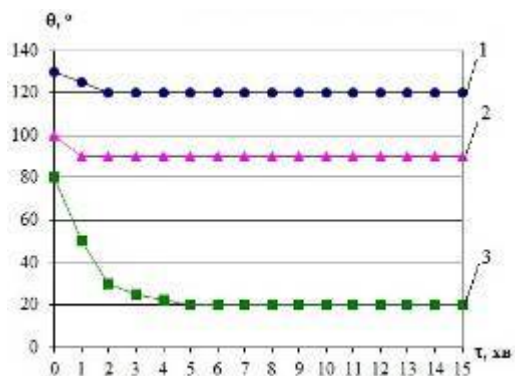


Рис. 2 – Кінетика кутів змочування кераміки 68 % Al_2O_3 -32 % ZrO_2 розплавами системи Ni-Al:
1 – 100 % Ni; 2 – Ni – 10 % Al; 3 – Ni – 15% Al

Таблиця 2

Енергетичні параметри змочування кераміки Al_2O_3 -32% ZrO_2 сплавами Ni-Al (вакуум 1,33 МПа)

C_{Al} , % (мас.)	Час контактування до стабілізації кута θ , хв	Температура, °C	Контактний кут θ , град	Робота адгезії, мДж/м ² $W_A = \sigma_{жсг} (1 + \cos \theta)$
0	2	1560	120	850
10	1	1520	90	1590
15	5	1520	20	3006

Електронне зображення перехідної зони «розплав - кераміка» при збільшенні 500 наведено на рис. 3 у вторинних (а) та у пружно відбитих електронах (б). Вона характеризується чіткою та значно подовженою лінійною розподілу, що свідчить не лише про поверхнево - активну але і про суттєву міжфазну взаємодію. Оскільки викривлення контактної поверхні від умовної площини у складну поверхню значно збільшує її площу і ще більше поліпшує її адгезійні властивості.

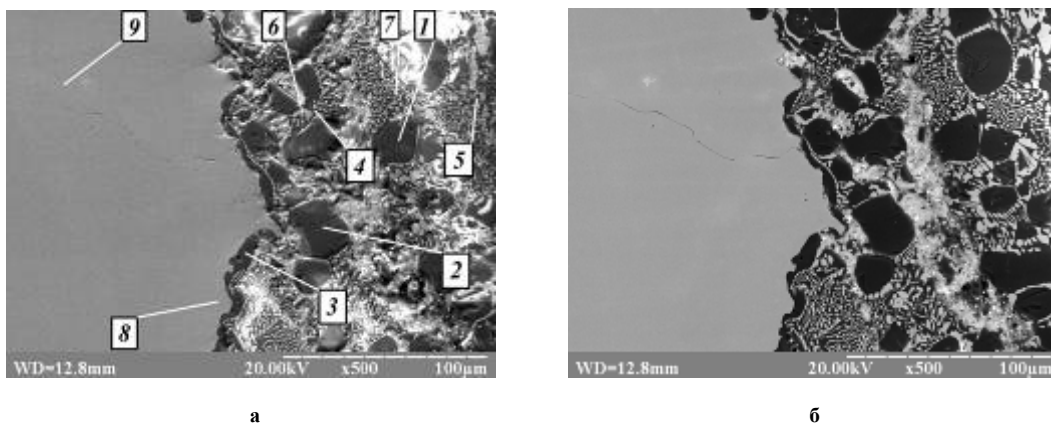


Рис. 3 – Електронна фотোগрафія збільшення 500 перехідної зони розплавів Ni_3Al та тугоплавкої кераміки складу Al_2O_3 -32% ZrO_2 у вторинних електронах (а), у відбитих електронах (б) та результати хімічного аналізу вказаних фаз рис. 3 (а)

Аналіз структурних складових (табл. 3, рис. 3) дозволяє зауважити наступне: підкладка зберігає свою вихідну морфологію – зерна оксиду алюмінію (рис. 3, спектри 1 - 3) та евтектики оксиду алюмінію (рис. 3, спектри 4 - 5) – оксиду цирконію (рис. 3, спектри 6 - 7) за винятком наступних несуттєвих змін. У примежевій зоні керамічної підкладки відбувається остаточний переплав залишків оксиду цирконію та утворення евтектики.

Таблиця 3

Хімічний склад фаз до рис. 3, а

Спектри	Ni	O	Al	Zr
Спектр 1	0,33	30,67	69,00	-
Спектр 2	-	55,88	44,12	-
Спектр 3	-	52,05	47,95	-
Спектр 4	-	28,49	59,60	11,91
Спектр 5	-	30,45	58,16	9,18
Спектр 6	0,59	18,73	5,98	74,70
Спектр 7	0,01	19,14	3,15	77,7
Спектр 8	83,79	0,87	14,00	1,34
Спектр 9	84,72	0,91	14,37	-

Більш наглядно структуру керамічної підкладки після контактної взаємодії можна розглянути у зображенні, що у відбитих електронах. Вона дуже подібна до вихідної структури керамічної підкладки (рис. 1). Металевий розплав зберігає свою концентрацію (рис. 3, спектри 8, 9) за винятком певного випаровування алюмінію, та несуттєвого дифузійного проникнення решти елементів, зокрема кисню та цирконію.

Для більш ретельного дослідження фазового складу на межі розподілу та особливості її морфології було ретельно вивчено контактну зону на межі «розплав-кераміка» за збільшення 1000. Результати такого дослідження структури та мікрорентгеноспектрального аналізу представлені на рис. 4. На електронному знімку відразу помітно, що реальна довжина межі переходу «розплав-кераміка» суттєво довша (майже вдвічі), ніж умовно проведена по прямій лінії між двома сусідніми крапками, що однозначно свідчить, що і площа поверхні розділу «розплав-кераміка» значно більша, ніж умовна геометрична площа контакту наявна по площині без викривлень. Мікрорентгеноспектральний аналіз різних ділянок фазового контрасту дає можливість робити висновки, що нікель алюмінієвий розплав контактує з рештою керамічної підкладки крізь дуже тонкий (5 - 10 мкм), але неперервний прошарок з оксиду алюмінію (рис. 4, (б), спектр 4). В одному з попередніх досліджень [9] було встановлено, що при контактуванні розплаву інтерметаліду Ni_3Al та Al_2O_3 було виявлено дрібнодисперсну евтектичну структуру цих компонентів. Це явище спостерігається і на рис. 4 (б) у вигляді ділянок, де світла фаза розплаву Ni_3Al (рис. 4, спектр 7) при охолодженні зупинила спробу захопити в себе частинку досить пластифікованої на той час темної фази Al_2O_3 (рис. 4, спектр 4).

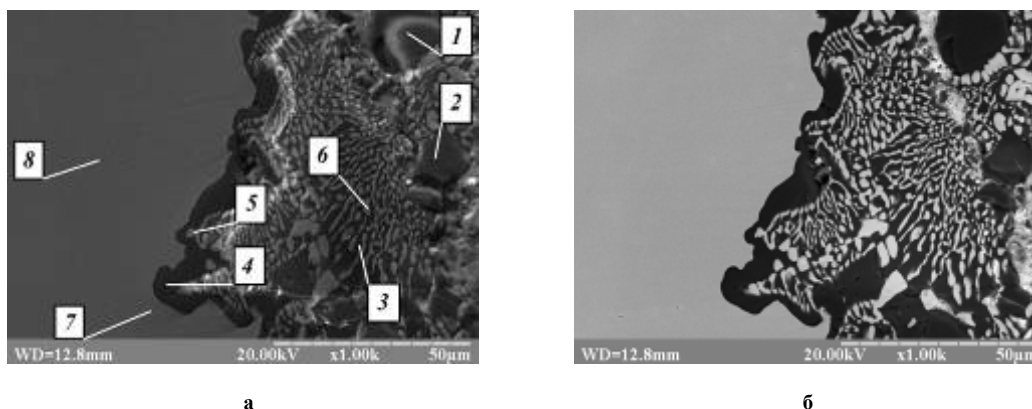


Рис. 4 – Електронна фотографія збільшення 1000 перехідної зони розплав Ni_3Al та тугоплавкої кераміки складу Al_2O_3 -32% ZrO_2 у вторинних електронах (а), у відбитих електронах (б) та результати хімічного аналізу вказаних фаз рис. 4 (а)

Відразу ж під таким складним та неперервним шаром розташовується евтектика Al_2O_3 - ZrO_2 – це строката структура темної та світлої фази (рис. 4, спектри 3 та 6). Також у безпосередній близькості до

зони розподілу «розплав-кераміка» спостерігаються поодинокі одиничні зерна оксиду алюмінію (рис. 4, спектри 1 та 2) розміром 25 та 15 мкм відповідно, з оплавленими межами та частково «розчиненими» (насправді це дрібнодисперсна механічна суміш) в евтектичній структурі.

Проведений мікрорентгеноспектральний аналіз контактної зони «розплав - кераміка» за збільшень 500 та 1000 дозволяє зробити наступний важливий висновок – при обробленні нанесеного покриття висококонцентрованими джерелами енергії (плазмовим пальником або лазером) проміжний шар покриття з металоподобного Ni_3Al буде здебільшого контактувати не з одиничними зернами оксиду алюмінію, що мають теплопровідність $\lambda = 35 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, а з дрібнодисперсною структурою евтектичної морфології оксид алюмінію – оксид цирконію, що має теплопровідність $\lambda = 2,71 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$, що значно не погіршить теплозахисних властивостей термобар'єрного покриття.

Таблиця 4

Хімічний склад фаз до рис. 4, а

Спектри	Ni	O	Al	Zr
Спектр 1	-	30,67	69,33	-
Спектр 2	-	45,88	54,12	-
Спектр 3	-	42,05	57,95	-
Спектр 4	0,85	28,09	59,20	11,84
Спектр 5	1,19	18,73	5,98	74,10
Спектр 6	0,01	19,19	3,10	77,7
Спектр 7	82,79	0,87	15,00	1,34
Спектр 8	84,72	0,91	14,37	-

Про зміну структури керамічної підкладки на глибині 500 мкм після контактної взаємодії з розплавом за температури $1520 \text{ }^\circ\text{C}$ можна робити висновки з рис. 5.

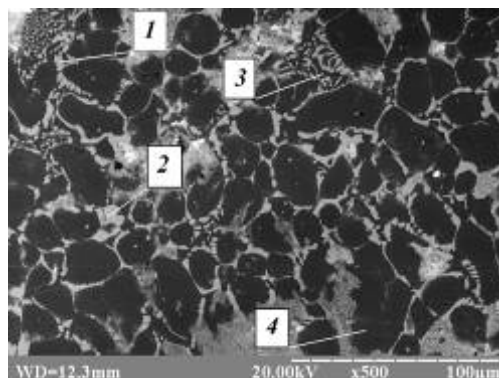


Рис. 5 – Електронна фотографія збільшення 500 кераміки складу Al_2O_3 -32 % ZrO_2 у відбитих електронах після контактної взаємодії з розплавом Ni-15 % Al та результати хімічного аналізу вказаних фаз рис. 5

Таблиця 5

Хімічний склад фаз до рис. 5, а

Спектри	Ni	O	Al	Zr
Спектр 1	0,01	19,19	3,10	77,7
Спектр 2	0,36	20,17	-	79,47
Спектр 3	-	37,47	62,53	-
Спектр 4	-	30,67	69,33	-

В результаті такої взаємодії цілком зберігається фазовий склад вихідної керамічної підкладки, що була отримана гарячим пресування шихти в співвідношенні 68 % Al_2O_3 – 32 % ZrO_2 за температури $1470 \text{ }^\circ\text{C}$. В ній цілком зберігаються фази оксиду алюмінію (рис. 5, спектри 3 та 4) та оксиду цирконію (рис. 5, спектри 1 та 2), проте в нього спостерігається незначне дифузійне проникнення нікелю. Зернистість оксиду алюмінію у вільному вигляді суттєво зменшилась з 40 - 50 мкм до 10 - 20 мкм (рис. 5). А оксид цирконію виявлено як у вільному вигляді так і в складі евтектики, що щільно оточує зерна оксиду алюмінію. Все це дає змогу зробити висновок, що структура підкладки на глибині 500 мкм під розплавом зберігаються у вихідному вигляді, а значить можна допустити гіпотезу, що зберігаються і властивості керамічної підкладки.

Висновки

Тож у результаті виконання дослідження наведеного в статті можна зробити наступні висновки:

- в результаті дослідження контактної взаємодії теплозахисної кераміки складу 68 % Al_2O_3 – 32 % ZrO_2 що має частково евтектичну структуру а частково вільні компоненти з розплавами системи Ni-Al, було підібрано склад металевого підшару для нанесення теплозахисних покриттів – Ni – 15 % Al, що в твердому стані має структуру інтерметаліду Ni_3Al ;
- було встановлено, що Ni у чистому вигляді не змочує кераміку Al_2O_3 -32 % ZrO_2 , але домішки алюмінію у кількості 15 % суттєво знижують силу поверхневого натягу і суттєво інтенсифікують контактну взаємодію з утворенням контактних кутів змочування $\theta = 20^\circ$;
- в результаті дослідження контактної зони системи «розплав - кераміка» у твердому стані було встановлено, що має місце не лише поверхнево-активна, а і міжфазна взаємодія розплаву, зокрема з оксидом алюмінію, суттєвої хімічної взаємодії не відбувається, за винятком не суттєвого дифузійного проникнення елементів, всі компоненти та структурні складові системи зберігається у майже вихідному вигляді;
- проведене дослідження містить вельми цінну інформацію стосовно розробки технологічних умов нанесення термобар'єрного шару покриття та його подальшої обробки.

Література

1. A.G. Dovgal. Development of the Thermal Barrier Coating for Heat Affected Components of Aircraft Ground Support Equipment // Proceeding of the National Aviation University. – № 4 (61). – 2014. – P. 100–104.
2. Z.H.Xu, L.M.He, R.D.Mu, S.M.He et al. Double-ceramic-layer thermal barrier coatings based on $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7(\text{LZ7C3})/\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7(\text{LC})$ deposited by electron-beam-physical vapor deposition / Applied Surface Science. – 2010. – V. 256. – P. 3661-3668.
3. Бережной А.С. Многокомпонентные системы окислов. / А.С. Бережной – К.: «Наукова думка». – 1970. – 544 с.
4. Панасюк А.Д., Уманский А.П., Довгаль А.Г. Исследование контактного взаимодействия керамики $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$ с никелем, алюминием и никель-алюминиевыми сплавами // Адгезия расплавов и пайка материалов. – № 43. – 2010. – С. 55-63.
5. Ниженко В. И., Флока Л. И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов (одно- и двухкомпонентные системы): Справочник. – М.: Металлургия, 1981. – 208 с.
6. Коновал В.П., Довгаль А.Г., Уманский А.П., Панасюк А.Д., Субботин В.И. Композиционные материалы системы $(\text{Ti,Cr})\text{V}_2\text{-NiAl}$ с различным соотношением структурных составляющих для нанесения покрытий // Труды III-й международной самсоновской конференции «Материаловедение тугоплавких соединений». – К.: 2012. – С. 168.
7. Коновал В. П., Пугачевська Є. П., Довгаль А. Г. Контактна взаємодія матеріалів на основі дигідриду титану-хрому із сполуками на основі нікелю // Матеріали II конференції молодих учених «Реальність та перспективи матеріалознавства», 21-25 червня 2011 року. – К.: 2011. – С. 50-51.
8. Найдич Ю. В. Контактные явления в металлических расплавах. – К.: Наук, думка, – 1972. – 196 с.
9. Довгаль А. Г., Вронская О. С., Костенко А. Д. Разработка газотермических карбидокремниевых покрытий с повышенным уровнем износостойкости // Проблемы трибологии. – № 4. – 2013. – С. 33-39.

Поступила в редакцию 27.09.2017

Dmitrichenko N.F., Priymak L.B., Dovgal A.G., Bilyakovich O.N., Savchuk A.N., Turitsya Y.A. **Selection of the sublayer content for the thermal barrier coating heat affected components of aircraft ground support equipment.**

Adhesive behavior of components composite $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ when wetting in vacuum by the Ni-Al components melt have been researched, in order to investigate the possibility of this alloys application as an intermediate layer for the steel elements of aircraft ground support equipment, and high temperature behavior of this melts on border of the system "ceramics-melt". It has been established, that the melts of pure nickel does not wet the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ components ceramics, however admixtures of the aluminium in nickel in rate of 15% substantially intensify the process of adhesive interaction forming the contact angles $\theta = 20^\circ$. Main figures of adhesive interaction have been calculated and the structure of contact area has been researched. Application advisability of specified alloy Ni-15 % Al for the intermediate layer of the coating system $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ for protection of steel heat-bearing elements of aircraft ground support equipment has been detected.

Key words: aviation ground technology, heat-protective coating, adhesion properties, ceramic sample.

References

1. A.G. Dovgal. Development of the Thermal Barrier Coating for Heat Affected Components of Aircraft Ground Support Equipment. Proceeding of the National Aviation University. № 4 (61). 2014. P. 100–104.
2. Z.H.Xu, L.M.He,R.D.Mu, S.M.He et al. Double-ceramic-layer thermal barrier coatings based on $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7(\text{LZ7C3})/\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7(\text{LC})$ deposited by electron-beam-physical vapor deposition. Applied Surface Science. 2010. V. 256. P. 3661-3668.
3. Dovgal A. G., Vronskaya O. S., Kostenko A. D. Razrabotka gazotermicheskikh karbidokremnievyykh pokrytiy s povyishennym urovnem iznosostoykosti. Problemi tribologiyi. # 4. 2013. S. 33–39.3. Berezhnoy A.S. Mnogokomponentnyie sistemyi okislov. A.S. Berezhnoy. K.: «Naukova dumka». 1970. 544 p.
4. A.D. Panasyuk, A.P. Umanskiy, A.G. Dovgal Issledovanie kontaktnogo vzaimodeystviya keramiki $\text{SiC-Al}_2\text{O}_3$ s nikelom, alyuminiem i nikel-alyuminievymi splavami. Adgeziya rasplavov i payka materialov. #43. 2010. P. 55-63.
5. Nizhenko V. I., Floka L. I. Poverhnostnoe natyazhenie zhidkikh metallov i splavov (odno- i dvuhkomponentnyie sistemyi): Spravochnik. M. Metallurgiya, 1981. 208 p.
6. Konoval V.P., Dovgal A.G., Umanskiy A.P., Panasyuk A.D., Subbotin V.I. Kompozitsionnyie materialy i sistemyi (Ti,Cr)B₂-NiAl s razlichnym sootnosheniem strukturnykh sostavlyayuschikh dlya naneseniya pokrytiy. Trudyi III-y mezhdunarodnoy samsonovskoy konferentsii «Materialovedenie tugoplavkikh soedineniy». K. 2012. P. 168.
7. Konoval V. P., Pugachevska E. P., Dovgal A. G. Kontaktna vzaemodiyia materIalliv na osnovi diboridu titanu-hromu Iz spolukami na osnovi nIkelyu. MaterIali II konferentsiyi molodih uchenih «RealnIst ta perspektivi materIaloznavstva», 21-25 chervnya 2011 roku. K.: 2011. P. 50-51.
8. Naydich Yu. V. Kontaktnyye yavleniya v metallicheskikh rasplavah. K. Nauk, dumka, 1972. 196 p.
9. Dovgal A. G., Vronskaya O. S., Kostenko A. D. Razrabotka gazotermicheskikh karbidokremnievyykh pokrytiy s povyishennym urovnem iznosostoykosti. Problemi tribologiyi. # 4. 2013. P. 33–39.