

# ДОСЛІДЖЕННЯ ЖАРОСТІЙКОСТІ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ З ІНТЕРМЕТАЛІДУ TiAl ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ДІАГРАМИ ОКИСЛЕННЯ

Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, О.П. Грищенко, Т.В. Цимбаліста, М.А. Васильківська

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Досліджено жаростійкість плазмових покриттів з інтерметаліду TiAl шляхом нагрівання в повітряному середовищі при температурах 700...1000 °С з визначенням зміни ваги зразка і побудови параметричної діаграми жаростійкості, а також фазовий склад покриттів до та після випробувань. Встановлено, що основним продуктом окислення покриття TiAl є оксид титану (TiO<sub>2</sub>), а за більш високих температур суміш оксидів TiO<sub>2</sub> і Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, у складі окалини виявлені нітрид титану (TiN), оксиди TiO, Ti<sub>2</sub>O, Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та інтерметалід Ti<sub>3</sub>Al. За кінетичними залежностями процесу окислення проведені розрахунки параметрів жаростійкості для температур 700...1000 °С, що дозволяє оцінювати довговічність покриття з інтерметаліду TiAl для будь-яких температур до 1000 °С. Розрахунки середньої швидкості окислення показали, що за допомогою діаграми жаростійкості можна визначити основні характеристики жаростійкості – питому втрату маси та глибину рівномірної корозії. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 6.

*Ключові слова:* плазмове напilenня, інтерметаліди, система Ti–Al, жаростійкість, окислення, параметрична діаграма

**Вступ.** Інтерметаліди (ІМ) є унікальним класом матеріалів з широким спектром корисних властивостей, завдяки чому вони застосовуються як конструкційні сплави та покриття, що забезпечують опір корозії.

Що стосується інтерметалідів титану (TiAl, Ti<sub>3</sub>Al), то завдяки таким характеристикам, як висока температура плавлення, низька щільність (удвічі менша, ніж у суперсплавів на основі нікелю (3,9...4,2 г/см<sup>3</sup>)), висока міцність у широкому діапазоні температур, підвищений опір повзучості та втомі, високий модуль пружності та хороша стійкість до окислення, можуть конкурувати з суперсплавом на основі нікелю в таких галузях, як авіація та ракетна техніка

Так, застосування алюмінію титану призводить до зниження ваги деталей на 20...30 %, витрат палива до 20 %, шуму на 50 % та викидів NO<sub>x</sub> на 80 % [1]. Інтерметалід TiAl можна застосовувати як захисний матеріал для титанових сплавів, так як він має більш високу стійкість до окислення, ніж звичайні сплави титану, а наявність проміжного дифузійного шару між покриттям і основою забезпечує хороше зчеплення на межі розділу без утворення крихких фаз.

Алюмініди титану перспективні для застосування в таких галузях, як медицина, хімічне та атомне машинобудування, де поряд з іншими особливими значення мають такі характеристики, як корозійна стійкість і жаростійкість при високих температурах.

Аналіз літературних даних [2–7] про жаростійкість інтерметаліду TiAl та сплавів на його основі

свідчать про те, що температурний інтервал їх застосування становить приблизно 600...850 °С (при більш високих температурах їх механічні властивості та опір окислення відносно невеликі). Відомо, що граничні робочі температури алюмінієвих сплавів становлять 450 °С, а титанових – 600...700 °С. У той же час оксид алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> має захисні властивості від окислення при температурах до 1425 °С.

Практично у всіх роботах, присвячених дослідженню процесів окислення інтерметалідів системи Ti–Al, міститься твердження про те, що основними продуктами окислення є оксиди титану TiO<sub>2</sub> і алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При цьому тільки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> здатний створювати суцільну плівку, що гальмує процес окислення.

Переважає утворення оксидної плівки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у порівнянні з TiO<sub>2</sub> залежить від вмісту Al в інтерметаліді, парціального тиску кисню та температури.

Так, у роботі [2], присвяченій дослідженню процесу окислення Al<sub>3</sub>Ti і TiAl, показано, що стабільність до окислення Al<sub>3</sub>Ti при 1000 °С протягом 48 год у 30 разів краще, ніж TiAl. В той час TiAl втрачає Al, переходить в Ti<sub>3</sub>Al на межі TiAl і окалини, а дифузія Ti через шар Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і утворення TiO<sub>2</sub> лише посилює окислення TiAl.

Як показують результати роботи [8], присвяченої дослідженню впливу парціального тиску кисню на окислення інтерметалідів системи Ti–Al, при температурах від кімнатної до 1000 °С вже при дуже низькому тиску (5 мбар) утворюється переважно Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а при підвищенні тиску кисню переважним процесом стає утворення TiO<sub>2</sub>. При 1000 °С утворюється нова оксидна фаза Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>.

Борисов Ю.С. – <https://orcid.org/0000-0002-6019-8464>, Борисова А.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-7376-3370>, Грищенко О.П. – <https://orcid.org/0000-0003-2640-8656>, Цимбаліста Т.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9569-7776>, Васильківська М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-8311-6428>

© Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, О.П. Грищенко, Т.В. Цимбаліста, М.А. Васильківська, 2022

Основним фактором, що обмежує область застосування TiAl, є те, що цей сплав погано чинить опір окисленню при температурі вище 800 °С, оскільки зовнішній шар оксидної окалини складається з TiO<sub>2</sub> або суміші оксидів TiO<sub>2</sub> і Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, а не із захисного шару Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Через близьку спорідненість Ti та Al до кисню оксиди TiO<sub>2</sub> і Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з однаковою швидкістю ростуть конкурентно на поверхні TiAl у процесі окислення, що підтверджується діаграмою стану Ti–Al–O [7, 8]. Змішана окалина не може запобігати подальшому окисленню TiAl, тому TiAl має низьку стійкість до окислення при високих температурах.

Крім того, при окисленні на повітрі титан одночасно реагує з киснем та азотом. Розчинення азоту в решітці рутила призводить до утворення дефектної решітки, прискорення дифузії кисню і підвищення швидкості окислення. Утворення нітридів титану на повітрі перешкоджає формуванню захисного шару Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [9].

Що стосується робіт у галузі технології та застосування захисних покриттів на основі інтерметалідів системи Ti–Al, то вони дуже нечисленні. Відомі лише дослідження отримання покриттів методом магнетронного напилення. Так автори роботи [4] отримали покриття хорошої якості з TiAl<sub>2</sub>, яке показало високу стійкість при температурах 800...900 °С при окисленні на повітрі. У роботі [3] представлені результати одержання градієнтних та багатошарових покриттів з використанням методу магнетронного розпилення. При цьому в градієнтних покриттях вміст Al збільшувався в напрямку від основи до поверхні, а в багатошарових покриттях шари формувалися в тому ж напрямку від Ti<sub>3</sub>Al до TiAl і TiAl<sub>3</sub>. Покриття показали хорошу стійкість до окислення при температурі 750 °С.

Якщо механізм взаємодії інтерметалідів системи Ti–Al з киснем досить добре вивчений, то відомості про жаростійкість цих матеріалів у вигляді захисних покриттів нечисленні, а тим більше роботи з оцінки прогнозування їх довговічності в даний час відсутні.

У той же час задача дослідження жаростійкості покриттів полягає не тільки в тому, щоб оцінити роль покриття в захисті основного металу, але і в тому, щоб прогнозувати термін служби системи метал–захисне покриття в реальних умовах експлуатації.

Метою цієї роботи було дослідження жаростійкості плазмових покриттів з інтерметаліду TiAl і побудова параметричних діаграм окислення для оцінки довговічності покриттів при температурах до 1000 °С.

**Методика дослідження.** Для виготовлення зразків з покриттям використовували порошок TiAl (сплав ПВТ65Ю35) з розміром частинок ≤ 80 мкм.

Плазмове напилення (ПН) покриттів проводили на установці УПУ-8М при наступних параме-

трах:  $I = 500$  А,  $U = 40$  В, витрата плазмоутворюючого газу (Ar + N<sub>2</sub>) – 25 л/хв,  $L = 120$  мм.

Для дослідження жаростійкості покриттів зразки виготовляли із сталі марки Ст45 у вигляді «жолудів» діаметром 15 мм та завдовжки 20 мм (товщина покриття становила 700...800 мкм).

Дослідження жаростійкості як порошків, так і покриттів проводили методом безперервного зважування зразків при температурах 700...1000 °С та ізотермічній витримці до 6 год.

Ваговий метод (за збільшенням маси зразка) був обраний у зв'язку з тим, що при окисленні зразків системи Ti–Al можуть утворитися лише тверді продукти.

Установка для випробувань на жаростійкість дозволяла здійснювати зважування випробуваних зразків безпосередньо в печі, так як обладнана аналітичними вагами, на одному плечі коромисла яких підвішений зразок на тонкому платиновому дроті. Установка мала автоматичне регулювання температури з точністю ±5 °С, аналітичні ваги дозволяли забезпечувати точність ± 0,1 мг.

Для дослідження структури та фазового складу покриттів застосовували методи металографії (мікроскоп «Неофот-32», оснащений приставкою для цифрової зйомки); рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) виконували на дифрактометрі ДРОН-3 у CuKα-випромінюванні з графітовим монохроматором при кроковому переміщенні 0,1 градуси та часу експозиції в кожній точці 4 с з подальшою комп'ютерною обробкою цифрових даних. Ідентифікацію фаз робили за допомогою бази даних ASTM.

**Результати експериментів та їх обговорення.** В результаті аналізу кінетичних залежностей процесу окислення порошків TiAl було встановлено, що у всьому температурному інтервалі 700...1000 °С процес підпорядковується параболічному тимчасовому закону з показником параболи, близьким до 2, що свідчить про те, що лімітуючою ланкою процесу є дифузійна стадія (рис. 1). При цьому основним продуктом окислення порошку TiAl при температурі 700 °С є оксид титану TiO<sub>2</sub>, а при 800 °С і більш високих температурах крім TiO<sub>2</sub> утворюється Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 2).

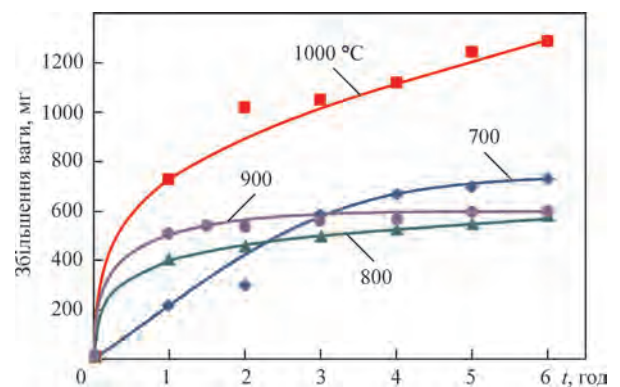


Рис. 1. Кінетичні залежності окислення порошку TiAl

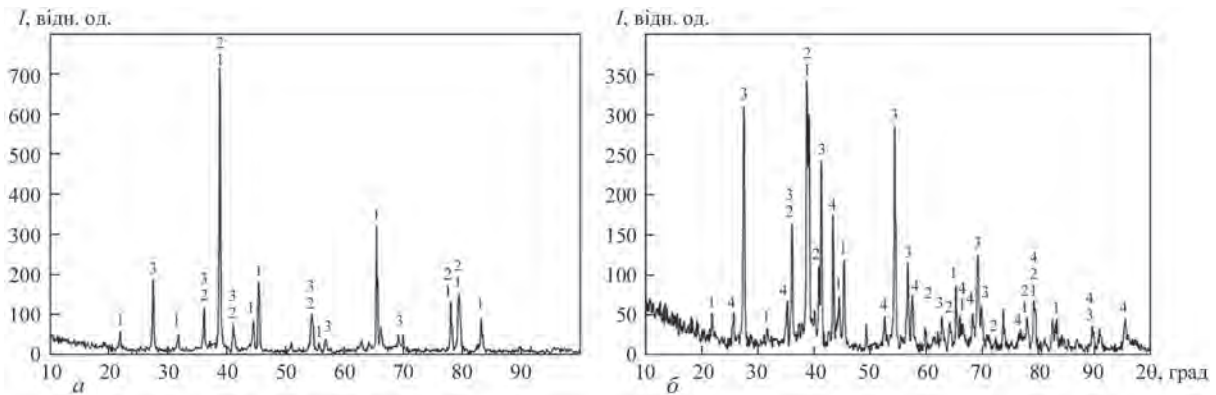


Рис. 2. Рентгенограми порошку TiAl після окислення при температурах, °C: а – 700; б – 800; 1 – TiAl; 2 –  $Ti_3Al$ ; 3 –  $TiO_2$ ; 4 –  $Al_2O_3$

Процеси окислення плазмових покриттів і порошків описуються параболічною залежністю (рис. 3), проте швидкість розвитку процесу у першому випадку істотно вище (див. рис. 1), причиною чого є розмір поверхні, що контактує з киснем.

При порівнянні фазового складу покриттів, що пройшли випробування на жаростійкість, з покриттями у вихідному стані (рис. 4) було встановлено, що в результаті окислення при всіх температурах збільшується вміст  $TiO_2$  і  $TiN$  – фаз, які утворилися в покритті ще в процесі наплення в результаті взаємодії частинок порошку з повітрям, що міститься у плазмовому струмені. Крім того, у продуктах окислення крім  $TiO_2$  виявлені в невеликих кількостях оксиди титану  $TiO$ ,  $Ti_2O$ ,  $Ti_2O_3$ , як і у разі окислення порошку TiAl при температурах 800 °C і вище утворюється  $Al_2O_3$ . Кількість оксиду  $TiO_2$  із підвищенням температури зростає.

При металографічному аналізі покриттів, що пройшли випробування на жаростійкість (рис. 5), було встановлено, що покриття залишаються щільними, без відшарування від основи, а на їх поверхні утворюється оксидна плівка.

Слід зазначити, що товщина оксидної плівки при підвищенні температури випробувань збільшується, а при 900 °C вона має чітку двошарову структуру.

Як раніше відзначалося, результати дослідження показали, що швидкість зростання оксидного шару на порошках і покриттях з інтерметаліду TiAl є дифузійно-контрольованим процесом (параболічне окислення, рис. 1, 5). При

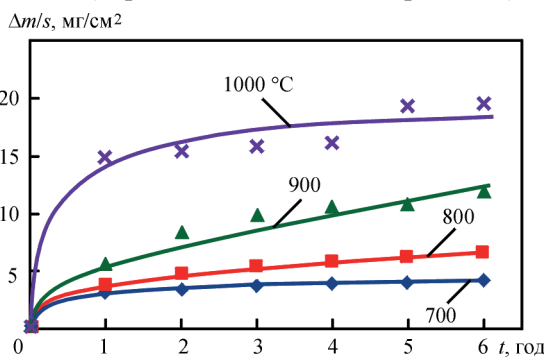


Рис. 3. Кінетичні залежності окислення плазмових покриттів

цьому може спостерігатися або дифузія катіонів металів через оксид до поверхні та їх взаємодія з киснем на оксид/газ, або дифузія аніонів кисню через оксид всередину та їх взаємодія з металом на метал/оксид. Судячи з двошарової структури окалини, тут має місце поєднання обох процесів.

Однією з важливих характеристик захисних жаростійких покриттів є прогноз довговічності їхньої служби. Такий прогноз можна зробити шляхом побудови параметричних діаграм жаростійкості [10, 11].

Параметрична діаграма жаростійкості є залежністю втрати (збільшення) маси матеріалу покриття при окисленні від жаростійкості. Параметр жаростійкості – це фізична величина, швидкість зміни в часі якої пропорційна (з протилежним знаком) істинній швидкості окислення матеріалу покриття, обчисленої за величинами відносних втрат (збільшення) його маси.

Методика для побудови параметричних діаграм полягає у визначенні величин  $n$  і  $Q$ , де  $n$  – показник ступеня параболічної залежності процесу окислення,  $Q$  – енергія активації.

Показник  $n$  визначається із експериментальної кінетичної залежності питомого приросту (втрати маси)  $q$  від часу  $t$ :

$$q^n = K \cdot t,$$

де  $K$  – константа швидкості окислення, яка при побудові в логарифмічних координатах « $\lg q - \lg t$ » перетворюється в лінійну залежність:

$$n \lg q = \lg K + \lg t \text{ або } \lg q = 1/n \lg K + 1/n \lg t.$$

Звідси  $n = \text{ctg } \alpha$  в координатах час– $\Delta m/s$ , мг/см<sup>2</sup>, де  $\alpha$  – кут нахилу прямої до осі абсцис або може бути розрахований за формулою:

$$n = \lg \frac{t_2}{t_1} / \lg \frac{q_2}{q_1}, \quad (1)$$

де  $t_1, t_2$  – два значення часу (год) на кінетичній залежності, що досить далеко віддалені один від одного;  $q_1$  і  $q_2$  – питомі збільшення (втрата) маси покриття (г/см<sup>2</sup>) за час окислення, що відповідають значенням  $t_1$  і  $t_2$ .

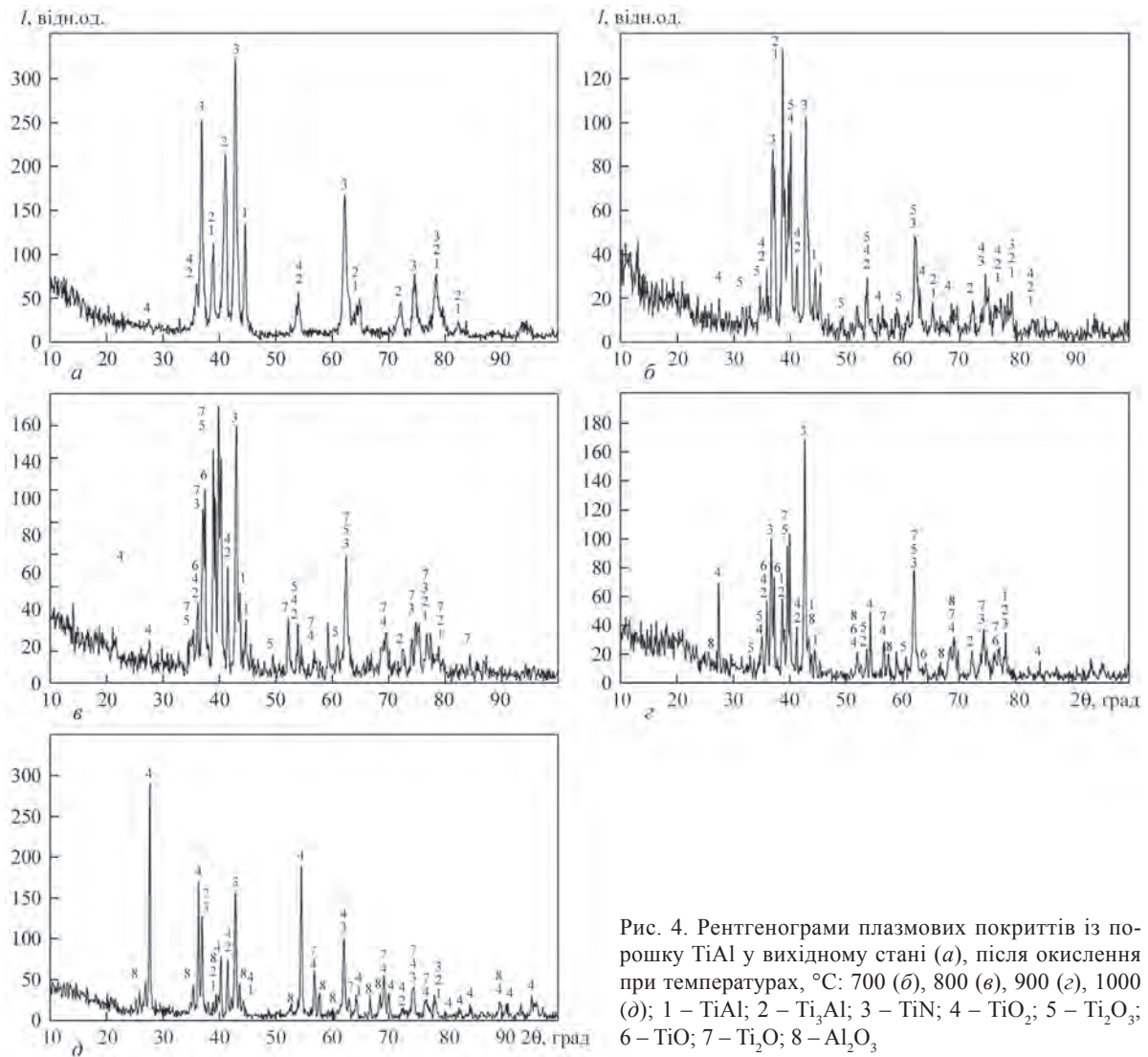


Рис. 4. Рентгенограми плазмових покриттів із порошку TiAl у вихідному стані (а), після окислення при температурах, °С: 700 (б), 800 (в), 900 (г), 1000 (д); 1 – TiAl; 2 – Ti<sub>3</sub>Al; 3 – TiN; 4 – TiO<sub>2</sub>; 5 – Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 6 – TiO; 7 – Ti<sub>2</sub>O; 8 – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

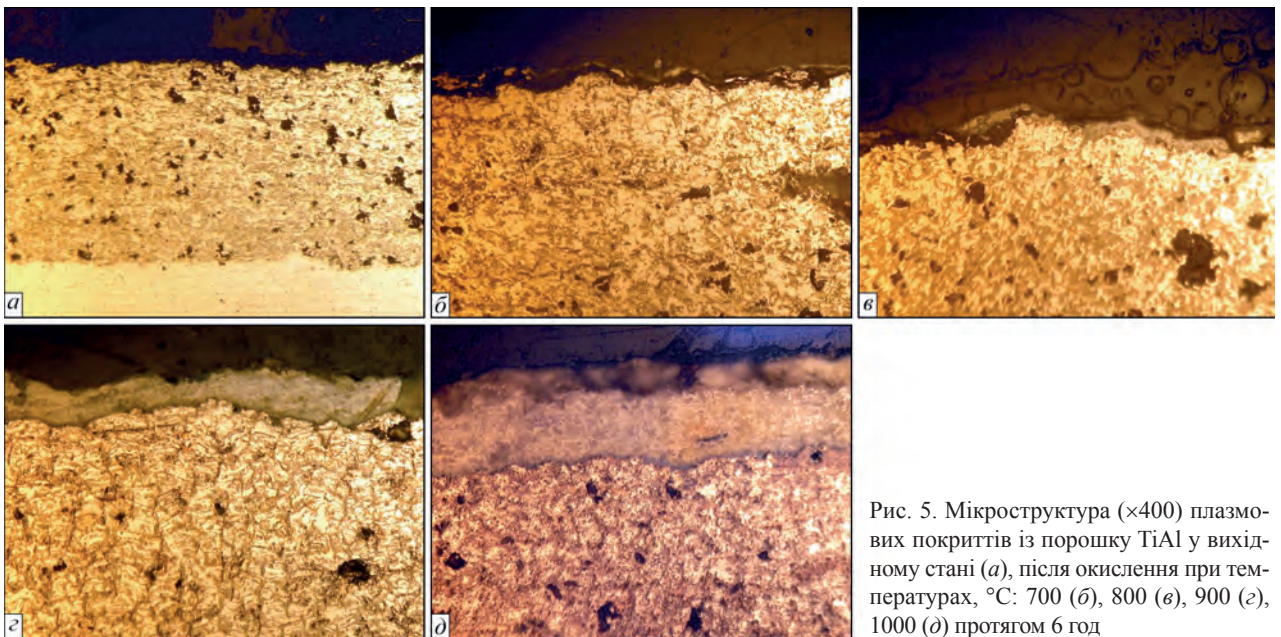


Рис. 5. Мікроструктура (×400) плазмових покриттів із порошку TiAl у вихідному стані (а), після окислення при температурах, °С: 700 (б), 800 (в), 900 (г), 1000 (д) протягом 6 год

Точність розрахунку показника ступеня  $n$  за формулою (1) тим вище, чим далі віддалені один від одного значення  $t_1$  і  $t_2$ .

Енергію активації процесу окислення ( $Q$ ) визначають, використовуючи температурну залежність  $K = K_0 \cdot \exp(-Q/RT)$  через тангенс кута  $\varphi$ , що

Таблиця 1. Результати розрахунку параметрів жаростійкості плазмових покриттів

Температура, К	$10^3/T, 1/K$	Час окислення, год	$\lg t$	Питомий приріст маси, мг/см <sup>2</sup>	$\lg q$	$(Qlge)/RT$	Параметр жаростійкості, (P)
973	1,027	1	0	3,185	0,503	11,986	11,986
		2	0,301	3,450	0,538		11,685
		3	0,477	3,715	0,570		11,509
		4	0,602	3,842	0,584		11,384
		5	0,699	4,057	0,608		11,287
		6	0,778	4,234	0,627		11,208
1073	0,932	1	0	3,740	0,572	10,869	10,869
		2	0,301	4,805	0,682		10,568
		3	0,477	5,446	0,736		10,392
		4	0,602	5,940	0,770		10,267
		5	0,699	6,320	0,800		10,170
		6	0,778	6,680	0,825		10,091
1173	0,852	1	0	5,674	0,754	9,925	9,925
		2	0,301	8,468	0,928		9,624
		3	0,477	10,00	1,000		9,448
		4	0,602	10,58	1,025		9,323
		5	0,699	10,858	1,036		9,226
		6	0,778	11,862	1,074		9,147
1273	0,785	1	0	14,887	1,173	9,16	9,160
		2	0,301	15,42	1,188		8,860
		3	0,477	15,84	1,200		8,684
		4	0,602	16,18	1,209		8,560
		5	0,699	19,40	1,288		8,462
		6	0,778	19,63	1,293		8,383

утворений прямою на графіку  $\lg q - 1/T$  після логарифмування:  $\lg K = \lg K(-Q/RT) lge$ .

Енергію активації можна розрахувати також за формулою:

$$Q = \frac{n \lg q_2/q_1 \cdot R}{\lg e \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}, \quad (2)$$

де  $e$  – основа натуральних логарифмів;  $R$  – універсальна газова постійна;  $T_1$  і  $T_2$  – досить далеко віддалені один від одного на графіку  $\lg q - 1/T$  значення температури, К;  $q_1, q_2$  – питомі збільшення (втрата) маси, що відповідають значенням температур  $T_1$  і  $T_2$ .

Як і при розрахунку величини  $n$  в цьому випадку рекомендується вибирати значення  $T_1$  і  $T_2$ , що досить далеко віддалені один від одного.

Величина параметра жаростійкості ( $P$ ) визначається виходячи з величини енергії активації процесу окислення покриття, розрахованої за формулами (1) і (2), а також використовуючи результати випробувань, проведених для отримання залежностей  $\lg q - \lg t$  і  $\lg q - 1/T$ :

$$P = \frac{Q lge}{RT} - \lg t. \quad (3)$$

Результати розрахунку параметра жаростійкості на підставі дослідження кінетичних залежностей процесу окислення плазмових покриттів при температурах 700...1000 °С представлені в табл. 1.

Проведені дослідження дозволили шляхом побудови параметричних діаграм жаростійкості (рис. 6)

проводити оцінку довговічності захисних покриттів для будь-яких температур до 1000 °С (номограма).

Параметричним методом можна розрахувати середню швидкість корозії (окислення) металу [12]. Питома втрата (збільшення) маси та глибина корозії металу (товщина плівки) при заданих температурі та часу впливу окисного середовища можуть бути визначені двома способами. Один з

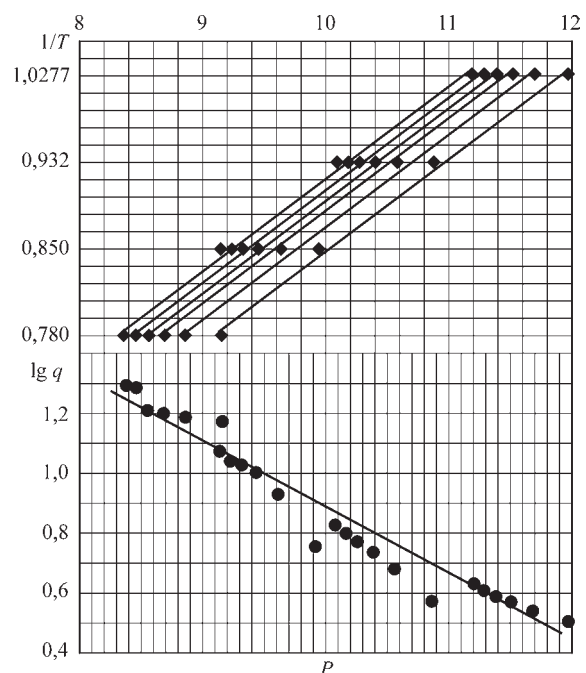


Рис. 6. Поєднана параметрична діаграма стану плазмового покриття з номограмою

Таблиця 2. Розрахунки середньої швидкості корозії (окислення) TiAl плазмового покриття за допомогою параметричної діаграми жаростійкості

Температура, К	$q_2$	$q_1$	$V_q$
1023	5,52	4,52	0,25
1113	6,57	5,58	0,2475

них – аналітичний, що полягає в наступному: обчислюють параметр за формулою (3), потім із відповідної точки на осі  $P$  параметричної діаграми (рис. 6) проводять ординату до перетину з параметричною лінією і з точки їх перетину – абсциси до осі  $\lg q$ , де можна прочитати шукану величину втрати (збільшення) маси чи глибини корозії металу (товщини плівки). За заданими значеннями температури та часу окислення металу визначають за параметричною діаграмою величину втрати (збільшення) маси або глибини корозії (товщини плівки). Потім за допомогою співвідношення  $v = q/t$  визначають середню швидкість корозії металу протягом заданого часу. При цьому мають на увазі, що окислення починається коли метал має чисту поверхню, тобто до моменту, коли  $t = 0$  метал не окислюється. Якщо потрібно визначити середню швидкість корозії для інтервалу часу  $t_1 - t_2$ , то з параметричної діаграми знаходять відповідні початку і кінця цього інтервалу величини  $q_1$  і  $q_2$ , а потім середню швидкість обчислюють за формулою

$$V_q = \frac{q_2 - q_1}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

Другий спосіб визначення характеристик жаростійкості – графічний, він більш простий, тому що не вимагає жодних обчислень. В цьому випадку для зручності користування параметричною діаграмою, щоб не розраховувати значення параметрів, діаграму поєднують з номограмою  $P-1/T$  (рис. 6), причому осі  $P$  номограми і діаграми паралельні, мають однаковий масштаб, а початок координат на обох осях розташовано друг проти друга. При спільному використанні діаграми та номограми характеристики жаростійкості визначають за розрахованими даними параметра жаростійкості, знаходячи спочатку на осі  $1/T$  номограми значення заданої температури, потім – лінію заданого часу на номограмі, а вже за ними – параметр (на верхній осі діаграми) і так далі, як у першому випадку. Всі ці операції зводяться до переміщень по номограмі та діаграмі. Як приклад в табл. 2 наведено результати розрахунку для  $t_1 = 1,5$  год,  $t_2 = 5,5$  год.

## Висновки

1. Жаростійкість порошків TiAl зі сплаву ПВТ65Ю35 та плазмових покриттів з нього досліджували шляхом нагрівання в середовищі повітря до 700...1000 °С з визначенням зміни

ваги зразка і побудови параметричної діаграми жаростійкості.

2. В результаті аналізу кінетичних залежностей процесу окислення порошків TiAl встановлено, що в усьому температурному інтервалі 700...1000 °С процес підпорядковується параболічному закону, тобто лімітуючою стадією є дифузія. Основним продуктом окислення при температурі 700 °С є оксид титану  $TiO_2$ , а при 800 °С і більш високих температурах утворюється також оксид алюмінію  $Al_2O_3$ .

3. При окисленні покриттів у дослідженому температурному інтервалі в якості додаткових фаз виявлено оксиди титану –  $TiO_2$  та  $Ti_2O_3$ . Кількість оксиду  $TiO_2$  з підвищенням температури зростає.

4. Товщина оксидної плівки при підвищенні температури випробувань збільшується, а при 900 °С вона має чітку двошарову структуру, що свідчить про те, що в процесі дифузії утворення оксидної плівки відбувається як на границі метал–оксид, так і оксид–газ.

5. Встановлено, що питомий приріст маси ( $mg/cm^2 \cdot год$ ) покриття TiAl при температурах 700...900 °С становив 0,18...0,62 і збільшився до 3,28 при 1000 °С.

6. Використання побудованої параметричної діаграми жаростійкості дозволяє оцінювати довговічність покриттів на основі TiAl для будь-яких температур до 1000 °С.

## Список літератури

1. Поварова К.Б., Антонова А.В., Банних И.О. (2003) Высокотемпературное окисление сплавов на основе TiAl. *Металлы*, 5, 61–72.  
Povarova, K.B., Antonova, A.V., Bannykh, I.O. (2003) High-temperature oxidation of TiAl-based alloys. *Metally*, 5, 61–72 [in Russian].
2. Umakoshi Y., Yamaguchi M., Sakagami T., Yamane T. (1989) Oxidation resistance of intermetallic compounds  $Al_3Ti$  and TiAl. *Journal of materials science*, 24, 1599–1603.
3. Leyens C., Peters M., Kaysser W. (1997) Intermetallic Ti–Al coatings for protection of titanium alloys: oxidation and mechanical behavior. *Surface and Coatings Technology*, 94–95, 34–40.
4. Liu, Z., Wang, G. (2005) Isothermal oxidation behavior of  $Ti_3Al$ -based alloy at 700 and 1000 °C in air. *Materials Science and Engineering A*, 397, 50–57.
5. Ostrovskaya, O., Badini, C., Baudana, G. et al. (2018) Thermogravimetric investigation on oxidation kinetics of complex Ti–Al alloys. *Intermetallics*, 93, 244–250.
6. Dai J., Zhu J., Chen Ch., Weng F. (2018) High temperature oxidation behavior and research status of modifications on improving high temperature oxidation resistance of titanium alloys and titanium aluminides: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 685, 784–798.
7. Leyens, C., Peters, M., Kaysser, W.A. (1996) Influence of intermetallic Ti–Al coatings on the creep properties of timental 1100. *Scripta Materialia*, 35(12), 1423–1428.
8. Das K., Choudhury P., Das S. (2002) The Al–O–Ti (Aluminum–Oxygen–Titanium) System. *Journal of Phase Equilibria*, 23(6), 525–536.
9. Ilatovskaia, M., Savinykh, G., Fabrichnaya, O. (2017) Thermodynamic Description of the Ti–Al–O System Based on Experimental Data. *J. Phase Equilib. Diffus.*, 38, 175–184.

10. Никитин В.И. (1976) *Расчет жаростойкости металлов*. Москва, Metallurgiya.
- Nikitin, V.I. (1976) *Calculation of heat-resistance of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Гимельфарб В.Н. (1980) *Построение параметрической диаграммы окисления самофлюсующихся сплавов*. Известия АН БССР.
- Gimelfarb, V.N. (1980) *Construction of parametric diagram of self-fluxing alloy oxidation*. Izvestiya BSSR [in Russian].
12. Никитин В.И. (1981) Метод прогнозирования долговечности защитных покрытий. *Физ.-хим. механика материалов*, 3, 95–99.
- Nikitin, V.I. (1981) Method of service life prediction of protective coatings. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialov*, 3, 95–99 [in Russian].

## INVESTIGATION OF HEAT RESISTANCE OF PLASMA COATINGS FROM TiAl INTERMETALLIC WITH APPLICATION OF PARAMETRIC OXIDATION DIAGRAM

Yu.S. Borysov, A.L. Borysova, O.P. Gryshchenko, T.V. Tsymbalista, M.A. Vasylykivska

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

Heat resistance of plasma coatings from TiAl intermetallic was studied by heating in air environment at temperatures of 700...1000 °C with determination of the change of sample weight and plotting of the parametric diagram of heat resistance, as well as phase composition of coatings before and after testing. It was determined that titanium oxide TiAl ( $TiO_2$ ) is the main product of coating oxidation, and at higher temperatures it is a mixture of  $TiO_2$  and  $Al_2O_3$  oxides. Titanium nitride (TiN), TiO,  $Ti_2O$ ,  $Ti_2O_3$  oxides and  $Ti_3Al$  intermetallic were found in the scale composition. Kinetic dependencies of oxidation process were used to perform calculations of heat resistance parameters for temperatures of 700...1000 °C that allows assessment of durability of TiAl intermetallic coating for any temperatures up to 1000 °C. Calculations of average oxidation rate showed that heat resistance diagrams can be used to determine the main heat resistance characteristics: specific weight loss and uniform corrosion depth. 12 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

*Keywords: plasma spraying, intermetallics, Ti–Al system, heat resistance, oxidation, parameteric diagram*

Надійшла до редакції 16.06.2022

### КОНФЕРЕНЦІЯ



## ЗВАРЮВАННЯ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ



м. Київ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона  
17 листопада 2022 р.

#### Тематика конференції

- Зварювання та споріднені технології з'єднання та обробки перспективних конструкційних і функціональних матеріалів, фізико-хімічні процеси при їх реалізації
- Фізична та конструкційна міцність матеріалів, зварних з'єднань і конструкцій, їх діагностика та продовження ресурсу експлуатації
- Автоматизація і роботизація технологій з'єднання та обробки матеріалів, математичне моделювання процесів та інформаційні технології
- Створення нових функціональних та конструкційних матеріалів і технологій їх отримання методами спеціальної електрометалургії
- Нові процеси і технології нанесення покриттів різного призначення та інженерія поверхні
- Матеріали, технології і виробни медичного призначення
- Адитивні технології отримання виробів і елементів конструкцій на основі лазерних, електронно-променевих і дугових джерел енергії
- Технології ремонту та відновлення інфраструктурних і промислових об'єктів.

#### Контрольні дати

Подання заявок для участі в конференції  
(доповідь наживо / on-line доповідь / стендова доповідь / без доповіді)

– тез доповідей	до 20.10.2022
– без доповіді	до 10.11.2022
Розсилка програми та збірки тез конференції	до 04.11.2022
Оплата організаційного внеску	до 16.11.2022

Організаційний комітет конференції  
тел./факс: (38044) 205-23-90  
E-mail: journal@paton.kiev.ua  
www.pwi-scientists.com/ukr/wtd2022

