

ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ МЕТОДОМ НАДЗВУКОВОГО ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ПОРОШКІВ НА ОСНОВІ ІНТЕРМЕТАЛІДУ TiAl З НЕМЕТАЛЕВИМИ ТУГОПЛАВКИМИ СПЛУКАМИ SiC та Si₃N₄

Ю.С. Борисов, Н.В. Вігілянська, М.В. Коломицев, К.В. Янцевич, О.М. Бурлаченко, Т.В. Цимбаліста

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Представлені дослідження структурно-фазового стану, ерозійної та корозійної стійкості покриттів систем TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄, отриманих методом надзвукowego повітряно-газового плазмового напилення. В якості матеріалів для напилення використовували композиційні порошки, отримані методом механохімічного синтезу, на базі інтерметаліду TiAl з додаванням неметалевих тугоплавких сполук SiC та Si₃N₄. Порівняння фазового складу отриманих покриттів систем TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄ з фазовим складом композиційного порошку після механохімічного синтезу свідчить про проходження процесів взаємодії TiAl з неметалевими тугоплавкими сполуками, в результаті чого в покритті не спостерігаються фази SiC та Si₃N₄. Завдяки наявності в покриттях зміцнюючих фаз ерозійна стійкість композиційних покриттів підвищується відносно покриття інтерметаліду TiAl в 1,3...1,5 разів. Електрохімічними випробуваннями встановлено, що покриття систем TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄ здатні забезпечити протекторний захист сталевій, алюмінієвій та титановій основи в середовищі, що містить хлорид натрію, з підвищенням стійкості у 5...155 разів. На підставі проведених досліджень функціональних властивостей розроблених композиційних покриттів показана можливість їх використання для захисту деталей, що підвержені ерозійному зношенню та корозії. Бібліогр. 15, табл. 3, рис. 4

Ключові слова: інтерметалід, неметалева тугоплавка сполука, надзвукowe повітряно-газове плазмowe напилення, структура, фазовий склад, ерозійне зношення, корозійна стійкість

Вступ. Алюмініди титану завдяки низькій густині, високій питомій міцності, стійкості до впливу навколишнього середовища, жароміцності та жаростійкості знаходять застосування в якості матеріалів при виготовленні деяких компонентів в автомобільній та авіаційній промисловостях, таких як турбокомпресори, автомобільні турбонагнітачі, лопатки турбін низького тиску та ін. [1]. Однак основними недоліками, що обмежують широке практичне застосування алюмінідів титану, є їх крихкість, низька пластичність і тріщиностійкість у широкому інтервалі температур, а підвищена в'язкість ускладнює використання сплавів TiAl в умовах тертя поверхонь, що контактують [2].

З метою підвищення фізико-механічних властивостей виробів розробляються композиційні матеріали на основі систем TiAl – неметалева тугоплавка сполука (НТС) (напр. В₄C, SiC та ін.), для отримання яких в основному використовують методи порошкової металургії – гаряче ізостатичне пресування, реакційне спікання, високотемпературний синтез [3, 4].

Для отримання покриттів на основі TiAl найбільшого поширення набули методи вакуумного осадження, такі, як магнетронне, катодно-дугове, електронно-променеве, іонне осадження. Магнетронні покриття системи TiAl–BN підвищують

зносостійкість та жаростійкість виробу в порівнянні з покриттям TiAlN [5]. Покриття системи TiAl–SiC, отримані методом електронно-променевого нанесення, мають підвищену стійкість до циклічного окислення завдяки високій адгезії між покриттям та основою [6]. Покриття системи TiAlSiN, одержувані методами катодно-дугового, магнетронного та іонного осадження, мають високу міцність, мікротвердість і зносостійкість [7, 8].

Перспективним напрямом отримання захисних покриттів на основі інтерметаліду TiAl є газотермічне напилення, яке на відміну від вакуумних методів нанесення покриттів дозволяє наносити покриття товщиною в кілька міліметрів. Крім того, методи газотермічного напилення дозволяють проводити ремонт локальних пошкоджень деталей, які передчасно вийшли з ладу внаслідок корозії, ерозії, абразивного зношування або втоми.

Газотермічні покриття на основі інтерметаліду TiAl отримують методами плазмового, надзвукowego плазмового, високошвидкісного газополуменевого та холодного газодинамічного напилення [9]. Підвищити стійкість до окислення та механічні властивості покриттів на основі бінарного сплаву TiAl вдається шляхом додавання легуючих елементів, таких як Cr, Si, V, Nb, W, Mo або Ta [9]. Застосування композиційних покриттів на

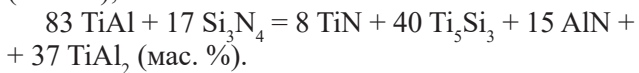
Борисов Ю.С. – <https://orcid.org/0000-0002-6019-8464>, Вігілянська Н.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-2095>, Коломицев М.В. – <https://orcid.org/0000-0003-0602-5615>, Янцевич К.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3975-7727>, Бурлаченко О.М. – <https://orcid.org/0000-0003-2277-4202>, Цимбаліста Т.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9569-7776>
© Ю.С. Борисов, Н.В. Вігілянська, М.В. Коломицев, К.В. Янцевич, О.М. Бурлаченко, Т.В. Цимбаліста, 2022

основі сплаву TiAl з додаванням в якості зміцнюючих компонентів неметалічних тугоплавких сполук, таких як SiC і Al₂O₃, дозволяє підвищити твердість і зносостійкість деталей з титанових сплавів, при цьому зносостійкість композиційних покриттів в 2,5 рази вище стійкості покриттів з інтерметаліду TiAl [10]. В якості матеріалів для напилення використовують композиційні порошки, отримані методом механічного легування.

В даний час є актуальними проблеми підвищення надійності роботи деталей газотурбінних двигунів та елементів газоперекачувальних агрегатів, які при експлуатації схильні до пошкоджень як від фізичного, зокрема, ерозійного впливу пилогазового потоку, так і від хімічного впливу: корозії при високих (деталі турбіни) і низьких температурах (деталі компресора, обв'язка двигуна).

Метою даної роботи є дослідження структури, фазового складу та властивостей (ерозійної та корозійної стійкості) композиційних покриттів на основі алюмініду титану систем TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄, отриманих методом надзвукового повітряно-газового плазмового напилення.

Матеріали та методики досліджень. Для надзвукового повітряно-газового плазмового напилення (НППГН) покриттів використовували порошки на базі інтерметаліду TiAl систем TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄. Композиційні порошки отримували методом механохімічного синтезу (МХС) порошків TiAl (ПВТ65Ю35), SiC, Si₃N₄ в планетарному млині протягом 1,5 год. Склад вихідних сумішей порошків було обрано на підставі термодинамічних розрахунків з визначенням найбільш ймовірних реакцій взаємодії інтерметаліду титану з неметалічними тугоплавкими сполуками (SiC та Si₃N₄):



Для забезпечення рівномірної подачі порошку в плазмовий струмінь перед напиленням порошки конгломерували 5%-им розчином полівінілового спирту з послідуочим відсіванням частинок з розмірним діапазоном 40...63 мкм. Для порівняння також було проведено напилення покриття з вихідного порошку TiAl. Характеристику порошків, які було використано в роботі, наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Характеристика порошків для НППГН покриттів

Склад, мас. %	Розмір частинок, мкм	Фазовий склад
65Ti–35Al	<80	TiAl, Ti ₃ Al
88TiAl–12SiC	40...63	TiAl, Ti ₃ Al, SiC, TiC, Ti ₅ Si ₃ , Ti ₃ AlC, аморфна фаза
83TiAl–17Si ₃ N ₄	40...63	TiAl, Ti ₃ Al, Si ₃ N ₄ , Ti ₅ Si ₃ , AlN, TiN, аморфна фаза

Напилення проводили на установці надзвукового повітряно-газового плазмового напилення Київ-С з використанням наступних технологічних параметрів: сила струму $I = 230 \text{ А}$, напруга $U = 380 \text{ В}$, витрата плазмоутворюючого газу (повітря) $Q_{\text{пр}} = 20 \text{ м}^3/\text{год}$, дистанція напилення $L = 160 \text{ мм}$. Покриття для досліджень наносили на зразки, виготовлені зі Ст3.

При проведенні металографічних досліджень застосовували оптичний мікроскоп Neophot-32 з пристроєм для цифрового фотографування; вимірювання, мікротвердості проводили на приладі ПМТ-3. Рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) покриттів проводили на установці «ДРОН-УМ-1» в монохроматизованому CuKα-випромінюванні.

Дослідження стійкості покриттів до ерозійного зношування виконували на відцентровому прискорювачі твердих частинок моделі ЦУК-3М при частоті обертання ротора установки $3000 \pm 50 \text{ об/хв}$. В якості абразивного матеріалу використовували кварцовий пісок з розміром частинок 0,2...0,4 мм, що відповідає реальному розміру частинок у газовому потоці, що перекачується, та розміру частинок, що надходять у повітря та зношують лопатки авіаційних газотурбінних двигунів [11, 12]. Дослідження виконували при фіксованих кутах атаки абразиву: 30° (дотичне обтікання) та 60° (лобове зіткнення). В якості показника зносостійкості прийняли інтенсивність зношування в міліграмах на кілограм (середня втрата маси зразків на 1 кг абразиву, що потрапив на зразок). Загальна кількість абразиву, витраченого для кожної серії зразків, становила 2 кг, кількість зразків із покриттям одного типу (товщина покриття приблизно 500 мкм) – 3 шт. Для порівняння були проведені випробування зразків з титанового сплаву ВТ6 та алюмінієвого сплаву АМг3.

В якості методу досліджень корозійної стійкості покриттів було вибрано потенціостатичний метод. Покриття товщиною 500 мкм наносили на зразки зі Ст3. Випробування проводили на потенціостаті П–5827М при швидкості розгорнення 20 мВ/с при температурі 18...20 °С. В якості електроліту використовували 3%-ий розчин NaCl. Стаціонарні потенціали вимірювали відносно хлорсрібного електрода. Швидкість та потенціал корозії покриттів знаходили графічним методом з поляризаційних кривих. Використовуючи значення струмів корозії, які визначали з поляризаційних кривих, був розрахований глибинний показник ($K_{\text{д}}$) корозії [13]. Для порівняння за тих же умов було проведено дослідження корозійної стійкості зразків зі сталі Ст3, сплавів ВТ6 та АМг3.

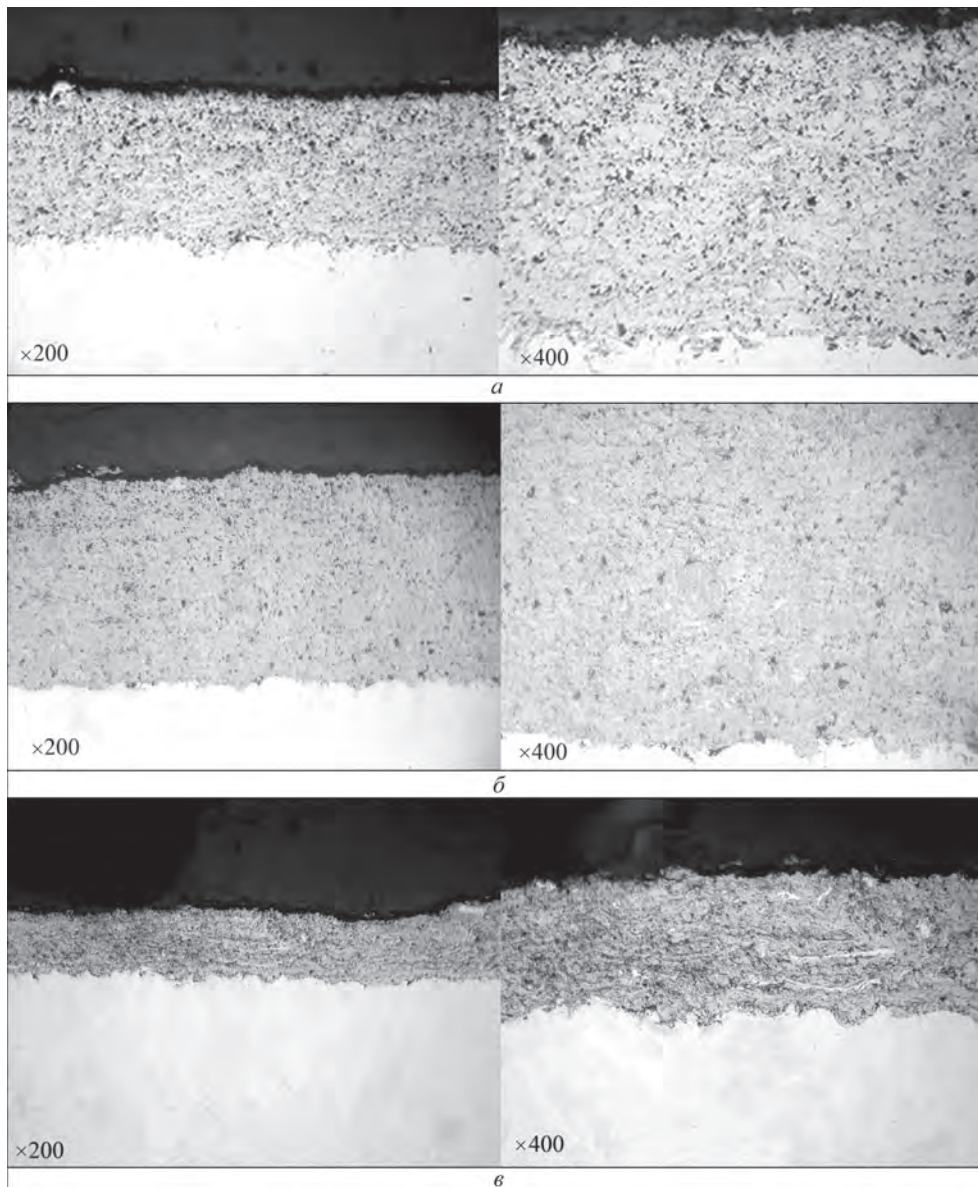


Рис. 1. Мікроструктура НПППН-покриттів: а – TiAl; б – TiAl-SiC; в – TiAl-Si₃N₄

Результати досліджень та їх обговорення.

Структура та фазовий склад покриттів.

Металографічним аналізом (рис. 1) встановлено, що в результаті напилення методом НПППН композиційних порошків TiAl-SiC та TiAl-Si₃N₄, як і у випадку напилення вихідного порошку TiAl, формуються покриття з однорідною щільною структурою, яка складається з ламелей, сформованих з повністю розплавлених і деформованих при формуванні шару частинок. Структурні елементи у покриттях є нерозрізненними. Пористість покриттів TiAl-SiC та TiAl-Si₃N₄ становить 3...4 %, покриття TiAl – 8 %.

Отримані дані РСФА (рис. 2) показують, в результаті фізико-хімічних процесів при напиленні покриттів з композиційних порошків спостерігаються деякі зміни у фазовому складі. В процесі напилення покриттів систем TiAl-SiC та TiAl-Si₃N₄ відбувається взаємодія компонентів композицій-

них порошків TiAl з неметалевими тугоплавкими сполуками і, на відміну від порошків після МХС, у покриттях відсутні вихідні фази SiC та Si₃N₄. Це свідчить про проходження екзотермічної (згідно з термодинамічними розрахунками) реакції в процесі напилення, яка робить додатковий внесок енергії в нагрівання частинок порошків. Внаслідок цього відбувається завершення процесу взаємодії TiAl з компонентами SiC та Si₃N₄ при напиленні, який не пройшов до кінця в процесі МХС порошків. Завдяки протіканню екзотермічної реакції та збільшенню теплової енергії частинок TiAl-SiC та TiAl-Si₃N₄ при напиленні підвищується доля частинок, що знаходяться в повністю розплавленому стані, і таким чином, формується щільна структура покриттів з меншою пористістю, ніж при напиленні вихідного порошку TiAl.

У покриттях обох систем зникла наявність аморфної фази в результаті проходження частин-

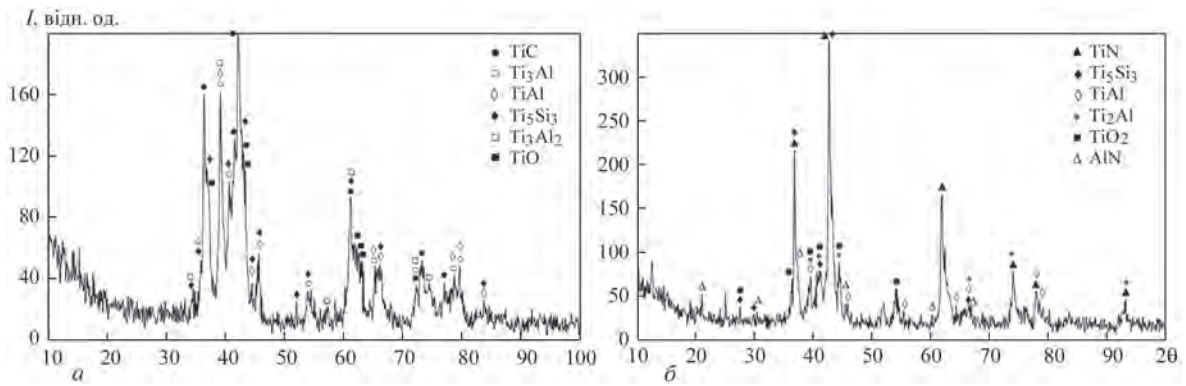


Рис. 2. Рентгенограми НПГПН-покриттів: а – TiAl-SiC; б – TiAl-Si₃N₄

ками композиційного порошку в струмені плазми зони нагріву до переходу в стадію плавлення з подальшим охолодженням розплаву з утворенням кристалічних фаз. У покриттях при напиленні формуються оксиди TiO та TiO₂, що обумовлено взаємодією матеріалу, що напилюється, з киснем навколишнього середовища. При напиленні покриття TiAl-SiC внаслідок фазових перетворень замість потрібної фази карбиду Ti₃AlC, яка була присутня у порошку, утворюється MAX-фаза Ti₃AlC₂.

Інших змін у фазовому складі покриттів в порівнянні зі складом вихідних композиційних порошоків TiAl-НТС, отриманих шляхом МХС (табл. 1), не виявлено. В покриттях зберігається фаза вихідного порошку TiAl, а також фази, передбачені термодинамічними розрахунками (Ti₅Si₃, TiC, AlN, TiN).

Мікротвердість покриттів TiAl-SiC та TiAl-Si₃N₄, яка становить 6610 ± 1070 та 6280 ± 950 МПа,

відповідно, за рахунок присутності в них твердих фаз карбідів, силіцидів та нітридів в середньому на 1300 МПа перевищує мікротвердість покриття TiAl, твердість якого складає 5150 ± 670 МПа.

Ерозійна стійкість. В результаті досліджень стійкості покриттів в умовах ерозійного зношення встановлено, що зносостійкість розроблених покриттів TiAl-SiC та TiAl-Si₃N₄ перевищує зносостійкість покриття з порошку інтерметаліду TiAl у 1,3...1,5 разів (табл. 2), що пояснюється наявністю в цих покриттях зміцнюючих фаз, які підвищують їх міцність та твердість.

Зовнішній вигляд зразків з покриттями після випробувань (рис. 3) свідчить, що механізми руйнування покриттів систем TiAl-НТС та покриття TiAl при однаковому впливі газоабразивного потоку дещо розрізняються. Це пояснюється внутрішньою будовою нанесених покриттів, зокрема наявністю пор в покриттях. Вплив пористості на характер зносу матеріалів можна розглядати з двох позицій. По-перше, пори та несучільності, зменшуючи живий переріз нанесеного шару і будучи концентраторами локальних напружень, здатні істотно знизити властивості міцності покриттів. По-друге, через особливості мікрорельєфу, які пов'язані з присутністю поверхневих дефектів, змінюються умови зношування зразків. У кожній точці кут атаки абразиву визначається розміром і формою пор і раковин. Як правило, умови зношування зразків у районі поверхневих дефектів виявляються жорсткішими, ніж безде-

Таблиця 2. Зведені результати випробувань на ерозійну стійкість НПГПН-покриттів TiAl-SiC, TiAl-Si₃N₄, TiAl та сплавів ВТ6 та АМг3

Матеріал покриття/сплаву	Середнє зношування покриття (мг/кг) при різних кутах атаки абразиву	
	30°	60°
TiAl-SiC	7,1 ± 1,1	10,8 ± 0,9
TiAl-Si ₃ N ₄	8,0 ± 0,8	12,2 ± 1,2
TiAl	10,3 ± 1,2	15,3 ± 0,9
Сплав ВТ6	6,2 ± 0,6	5,2 ± 0,7
Сплав АМг3	7,7 ± 1,1	5,4 ± 0,4

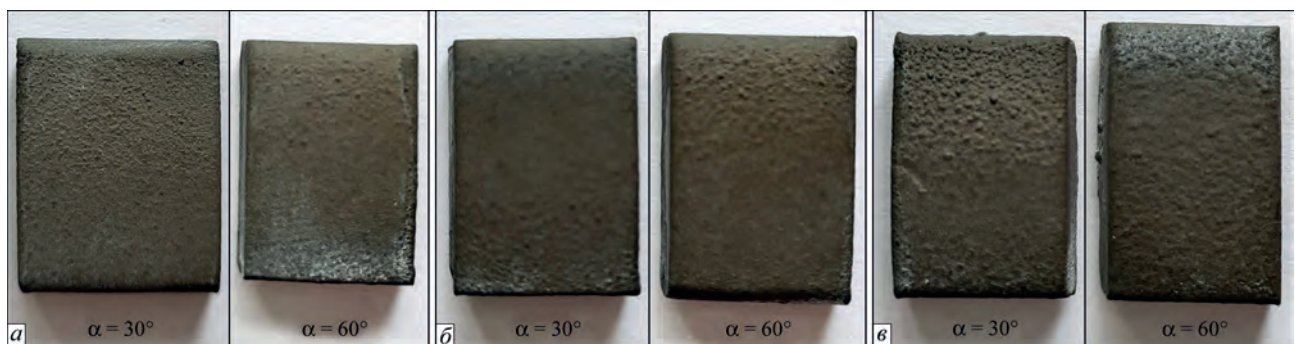


Рис. 3. Зовнішній вигляд поверхні зразків з НПГПН-покриттями після випробувань на ерозійну стійкість: а – TiAl-SiC; б – TiAl-Si₃N₄; в – TiAl

фектних плоских ділянках. Внаслідок впливу зазначених факторів можливе більш інтенсивне викришування більших блоків покриття TiAl під дією газоабразивного потоку, які спостерігаються на поверхні зразків після випробувань.

Інтенсивність зношування досліджуваних покриттів є вищою в 1,5 рази при дослідженні зразків під кутом атаки абразиву 60° . Відомо, що за ступенем опору газоабразивному впливу (залежно від кута атаки абразивних частинок) порошкові матеріали та покриття умовно поділяються на дві групи [14]: $\alpha < 35^\circ$ – максимальне зношування для пластичних та $\alpha > 45^\circ$ – для крихких матеріалів. Таким чином, покриття TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄ зношуються як крихкі матеріали. Отже раціональним буде використання розроблених покриттів при кутах атаки абразиву, які не перевищують 30° , що відповідає фактичним кутам атаки частинок поверхні лопаток відцентрових коліс компресорів нафтогазового обладнання [11].

Встановлено також, що при куті атаки абразиву 60° зносостійкість НПППН-покриттів TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄ у 2,0...2,4 рази нижче за зносостійкість зразків зі сплавів ВТ6 і АМг3. В свою чергу при куті атаки абразиву 30° зносостійкість композиційних покриттів нижче зносостійкості сплавів ВТ6 і АМг3 всього в 1,1...1,3 рази, а покриття TiAl–SiC дещо перевищує зносостійкість сплаву АМг3 (в 1,1 рази).

Корозійна стійкість. Електрохімічні дослідження показали, що корозія НПППН-покриттів відбувається з водневою деполяризацією з гальмуванням анодного розчинення. Відсутність пасивації покриттів обумовлено тим, що 3%-ий розчин NaCl відноситься до агресивного середовища з високим вмістом Cl⁻, в присутності якого відбувається витіснення кисню з поверхні електрода та унеможливлення утворення пасивної плівки на поверхні покриттів.

Кінетика корозійного процесу покриттів систем TiAl–НТС, на відміну від покриття інтерметаліду

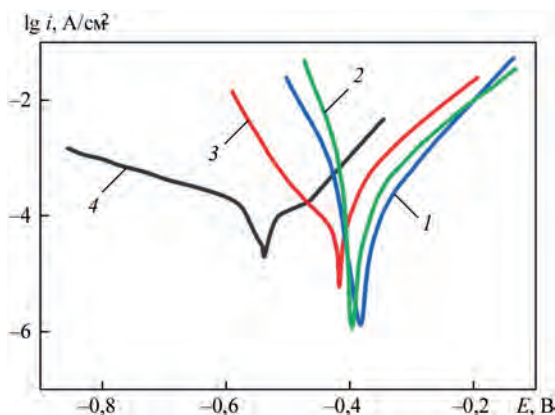


Рис. 4. Поляризаційні криві НПППН-покриттів TiAl–SiC (крива 1), TiAl–Si₃N₄ (крива 2), TiAl (крива 3) та сталі Ст3 (крива 4) у 3%-му розчині NaCl

Таблиця 3. Результати електрохімічних досліджень НПППН-покриттів у 3%-му розчині NaCl

Покриття	Електрохімічні характеристики			
	$E_{ср}$, В	E_c , В	i_c , А/см ²	$K_{п}$, мм/рік
TiAl–SiC	–0,44	–0,40	$4,2 \cdot 10^{-7}$	0,019
TiAl–Si ₃ N ₄	–0,42	–0,38	$4,8 \cdot 10^{-7}$	0,023
TiAl	–0,48	–0,42	$6,4 \cdot 10^{-6}$	0,045

Примітка. i_c (А/см²) для сталі Ст3 – $6,5 \cdot 10^{-5}$; сплаву АМг3 – $2,6 \cdot 10^{-5}$; сплаву ВТ6 – $2,4 \cdot 10^{-6}$.

TiAl, проходить зі зсувом потенціалів корозії у позитивну сторону та зниженням струмів корозії (рис. 4).

Аналіз результатів корозійних досліджень показав, що НПППН-покриття TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄ по корозійній стійкості переважають покриття інтерметаліду TiAl приблизно на один порядок з показниками струму корозії $4,2 \cdot 10^{-7}$ А/см², $4,8 \cdot 10^{-7}$ та $6,4 \cdot 10^{-6}$, відповідно (табл. 3).

Підвищення корозійної стійкості можна пояснити наявністю в покриттях систем TiAl–НТС силіциду титану Ti₅Si₃, який, як відомо [15], суттєво підвищує корозійну стійкість покриттів та сплавів у різних агресивних середовищах, що обумовлено наявністю міцних ковалентних зв'язків метал – неметал, а також зв'язків Si–Si.

Окрім того, корозійна стійкість отриманих покриттів TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄ перевищує корозійну стійкість Ст3 у 135...155 разів, сплаву АМг3 – у 24...62 рази, сплаву ВТ6 – у 5...6 разів.

Висновки

1. Методом надзвукового повітряно-газового плазмового напилення з використанням композиційних порошків, отриманих методом механохімічного синтезу, сформовані покриття на базі інтерметаліду TiAl з добавками неметалевих тугоплавких сполук SiC та Si₃N₄. В результаті напилення формуються гетерофазні покриття з щільною структурою твердістю 6,3...6,6 ГПа та пористістю 3...4%.

2. Встановлено, що в процесі напилення покриттів систем TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄ відбувається взаємодія компонентів композиційних порошків TiAl з неметалевими тугоплавкими сполуками і, на відміну від порошків після механохімічного синтезу, у покриттях відсутні вихідні фази SiC та Si₃N₄.

3. Проведені дослідження ерозійної стійкості покриттів показали, що завдяки наявності в розроблених покриттях твердих фаз стійкість в умовах ерозійного зношення в 1,3...1,5 разів перевищує стійкість покриттів з порошку інтерметаліду TiAl. За характером зношування покриття TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄ відносяться до класу крихких, та рекомендуються для застосування в умовах абразивного зношення при кутах атаки абразиву, які не перевищують 30° .

4. Електрохімічні дослідження показали, що покриття TiAl–SiC та TiAl–Si₃N₄ завдяки наявності в них фази силіциду титану по корозійній стійкості в 3%-му розчині NaCl переважають покриття інтерметаліду TiAl приблизно на один порядок, а також перевищують корозійну стійкість Ст3 у 135...155 разів, сплаву АМГ3 – у 24...62 рази, сплаву ВТ6 – у 5...6 разів.

Список літератури/References

- Noda, T. (1998) Application of cast gamma TiAl for automobiles. *Intermetallics*, 6 (7-8), 709–713. doi:10.1016/s0966-9795(98)00060-0
- Лобанов Л.М., Аснис Ю.А., Піскун Н.В., Статкевич І.І. (2020) Вдосконалення механічних властивостей β-стабілізованих інтерметалідів системи TiAl методом зонної перекристалізації. *Допов. Нац. акад. наук Укр.*, 8, 51–56. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.08.051>
Lobanov, L.M., Asnis, Yu.A., Piskun, N.V., Statkevych, I.I. (2020) Improvement of mechanical properties of β-stable intermetallics of TiAl system by floating-zone refining. *Dopov. NANU*, 8, 51–56. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.08.051>
- Zhang, W., Yang, Y.Q., Zhao, G.M. et al. (2014) Interfacial reaction studies of B₄C-coated and C-coated SiC fiber reinforced Ti–43Al–9V composites. *Intermetallics*, 50, 14–19. doi:10.1016/j.intermet.2014.02.003
- Liu, C., Huang, L.J., Geng, L. et al. (2015) In Situ Synthesis of (TiC+Ti₃SiC₂+Ti₅Si₃)/Ti6Al4V Composites with Tailored Two-scale Architecture. *Advanced Engineering Materials*, 17(7), 933–941. doi:10.1002/adem.201400585
- Jong-Keuk, P., Jong-Young, C., Hyeong-Tag, J., Young-Joon, B. (2009) Structure, hardness and thermal stability of TiAlBN coatings grown by alternating deposition of TiAlN and BN. *Vacuum*, 84(4), 483–487. doi:10.1016/j.vacuum.2009.10.013
- Shahid, M.R., Subhani, T., Shengkai, G. Mirza, J.A. (Ed.). (2003) *Study of cyclic oxidation behavior of anti-oxidation coatings on a super alloy*. Pakistan: Doctor AQ Khan Research Labs, Islamabad, Pakistan.
- Li, G., Li, L., Han, M. et al. (2019) The Performance of TiAlSiN Coated Cemented Carbide Tools Enhanced by Inserting Ti Interlayers. *Metals*, 9(9), 918. doi:10.3390/met9090918
- Fager, H., Andersson, J.M., Lu, J. et al. (2013) Growth of hard amorphous TiAlSiN thin films by cathodic arc evaporation. *Surface and Coatings Technology*, 235, 376–382. doi:10.1016/j.surfcoat.2013.07.014
- Gizynski, M., Miyazaki, S., Sienkiewicz, J. et al. (2017) Formation and subsequent phase evolution of metastable Ti–Al alloy coatings by kinetic spraying of gas atomized powders. *Surface and Coatings Technology*, 315, 240–249. doi:10.1016/j.surfcoat.2017.02.053
- Machette, K.E., Popoola, A.P.I., Adebisi, D.I., Fayomi, O.S.I. (2017) Influence of SiC-Ti/Al on the Microstructural and Mechanical Properties of Deposited Ti–6V–4Al Alloy with Cold Spray Technique. *Procedia Manufacturing*, 7, 549–555. doi:10.1016/j.promfg.2016.12.069
- Парайко Ю.І. (2011) Закономірності зношування робочих поверхонь газоперекачуючого обладнання та розроблення технологій підвищення їх ресурсу. *Проблеми тертя та зношування*, 56, 71–83.
Parajko, Yu.I. (2011) Regulations of wear of operating surfaces of gas-compressor unit and development of technologies of their service life increase. *Problemy Tertya ta Znoshuvannya*, 56, 71–83 [in Ukrainian].
- Михайлов Д.А. (2014) Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций. *Прогресивні технології і системи машинобудування*, 4, 50, 126–131.
Mikhailov, D.A. (2014) Main features of operation of GTE compressor blades and classification of their service functions. *Progresywni Tekhnologii i Systemy Mashynobudovannya*, 4(50), 126–131 [in Russian].
- Жук Н.П. (2006) *Курс теории коррозии и защиты металлов*. Москва, ООО ТИД «Альянс».
Zhuk, N.P. (2006) *Course of theory of corrosion and protection of metals*. Moscow, LLC TID Alliance [in Russian].
- Кулу П. (1988) *Зносостійкість порошкових матеріалів та покриттів*. Таллінн–Валгус.
Kulu, P. (1988) *Wear resistance of powder materials and coatings*. Tallin, Valgus [in Ukrainian].
- Liu, L. Xu, J., Li, Zh. (2013) Electrochemical Characterization of Ti₃Si₂/TiC Nanocomposite Coating in HCl Solution. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 8, 5086–5101.

FORMATION OF COMPOSITE COATINGS BY THE METHOD OF ULTRASONIC PLASMA SPRAYING OF POWDERS BASED ON THE INTERMETALLIC TiAl WITH NON-METALLIC REFRACTORY COMPOUNDS SiC AND Si₃N₄

Yu.S. Borisov, N.V. Vigilianska, M.V. Kolomytsev, K.V. Iantsevitch, O.M. Burlachenko, T.V. Tsymbalistaya

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Studies of the structural-phase state, erosion and corrosion resistance of coatings of the systems TiAl–SiC and TiAl–Si₃N₄, produced by the method of supersonic air-gas plasma spraying, are presented. As materials for spraying, composite powders, produced by the method of mechanic and chemical synthesis based on intermetallic TiAl with the addition of non-metallic refractory compounds SiC and Si₃N₄ were used. Comparison of the phase composition of the produced coatings of the systems TiAl–SiC and TiAl–Si₃N₄ with the phase composition of the composite powder after mechanic and chemical synthesis indicates the course of processes of interaction of TiAl with non-metallic refractory compounds, as a result of which the phases of SiC and Si₃N₄ are not observed in the coating. Due to the presence of strengthening phases in the coatings, the erosion resistance of the composite coatings increases by 1.3...1.5 times as compared to the TiAl intermetallic coating. Electrochemical tests established that the coatings of the systems TiAl–SiC and TiAl–Si₃N₄ are capable to provide protection of steel, aluminium and titanium base in an environment containing sodium chloride with a 5...155 times increase in resistance. On the basis of the conducted studies of functional properties of the developed composite coatings, the possibility of their use for the protection of parts subjected to erosive wear and corrosion is shown. 15 Ref., 3 Tabl., 4 Fig.

Keywords: intermetallic, non-metallic refractory compound, supersonic air-gas plasma spraying, structure, phase composition, erosive wear, corrosion resistance

Надійшла до редакції 30.05.2022