
Дослідження механічних характеристик детонаційних та плазмових покриттів з композиційних порошкових матеріалів на основі титану для деталей авіаційного призначення

Вячеслав Сироватка

Відділ матеріалознавства та інженерії високостійких поверхневих шарів, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича Національної академії наук України, Київ, Україна
ORCID 0000-0001-5034-2656

Для цитування цієї статті:

Сироватка Вячеслав. Дослідження механічних характеристик детонаційних та плазмових покриттів з композиційних порошкових матеріалів на основі титану для деталей авіаційного призначення. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. Vol. 4, No.1, 2025, pp. 93-102. doi: 10.46299/j.isjea.20250401.08.

Надійшла до редакції: 02 січня 2025 р.; **Схвалено:** 31 січня 2025 р.;

Опубліковано: 01 лютого 2025 р.

Анотація: Дослідження структури границі розділу покриття-основа методом оптичної мікроскопії показали високу якість покриттів. Відсутність несучільностей на границі між металом основи та покриттям, великих пор та порожнеч в структурі покриттів нема – це свідчить про необхідний рівень якісних покриттів при напilenні. Вказані фактори можуть забезпечити необхідний рівень механічних характеристик покриттів, в тому числі, триботехнічних. Проведені порівняльні дослідження поведінки детонаційних та плазмових покриттів в умовах сухого тертя в парах з титановим сплавом OT4 та нержавіючою сталлю марки 07X16H6. Наведені доріжки тертя на поверхні покриття та контртіла суттєво відрізняється для різних матеріалів. Аналіз їх поверхні дозволяє зробити висновок, що в парі тертя зі сталлю покриття поведуть себе по різному. Встановлено, що наявність в структурі покриттів нітридів та оксидів покращує характеристики тертя при роботі. Встановлено, що найбільш схильні до схоплення володіють пари, що вміщують однойменні метали. Найбільш високими показниками володіє покриття зі структурою з інтерметалідної матриці з включеннями твердих фаз у вигляді нітридів титану та алюмінію і оксидів. Досліджено окислення детонаційних та плазмових покриттів при температурі 900 °C у повітряному середовищі. Показано, що розроблені детонаційні та плазмові покриття мають більший опір окисленню, ніж титановий сплав VT-16 без покриття. Отримані результати показали можливість використання в машинобудуванні та аерокосмічній індустрії детонаційних покриттів на основі системи титан-алюміній з підвищеними триботехнічними властивостями та жаростійкістю.

Ключові слова: детонаційні та плазмові покриття, тертя, структура, інтерметалід, жаростійкість, титановий сплав.

1. Вступ

На даний час виникла потреба в якісно нових матеріалах, призначених для експлуатації в повітряній атмосфері при високих температурах, а також у матеріалах, які мають не тільки високі механічні властивості та жаростійкість, але й низку особливих фізичних та службових властивостей (електричних, магнітних та інших). Тому, незважаючи на велику кількість традиційних матеріалів, актуальною є розробка нових класів матеріалів, які відповідатимуть певному комплексу вимог, а саме: високі механічні властивості, максимальна жаростійкість, довгострокова фазова та структурна стабільність, і що дуже важливо – низька вартість та недифіцитність матеріалу.

Задовільнити цим вимогам можуть сплави на основі інтерметалідних сполук і, зокрема, алюмінідів титану. Низька дифузійна рухливість компонентів в інтерметалідних фазах пов'язана з упорядкованістю їхньої кристалічної структури, здатністю зберігати високу жаростійкість за рахунок утворення пласта окалини, яка виконує роль самозахисту, низькою питомою вагою алюмінію титану – властивості, які роблять цей клас матеріалів перспективним. У сучасній авіаційній, космічній техніці і особливо у турбінобудуванні знаходять практичне застосування сплави з урахуванням алюмінідів нікелю, меншою мірою – з урахуванням α -титану, і лише випробовуються деталі – дослідницькі зразки з урахуванням γ -TiAl.

2. Об'єкт і предмет дослідження

У статті досліджуються і вивчаються властивості алюмінідів титану з метою їх покращення за рахунок того, що були отримані порошки з гідриду титану, що не було розглянуто в інших працях, присвячених цій проблематиці.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи – дослідити вплив технології отримання сплавів, а саме, вплив різних факторів на властивості та структуру матеріалів та покриттів з інтерметалідів титану, які б відповідали потребам сучасного машинобудування та авіаційній галузі.

4. Аналіз літератури

Для розробників сплавів на основі γ -TiAl в даний час – це пошуки перспективних технологій отримання сплавів, у тому числі методами порошкової металургії, це накопичення експериментальних даних із впливу різних факторів на властивості та структуру матеріалів. Незважаючи на це, сплави на основі γ -TiAl зараз ще далекі від практичного застосування, їх дослідження необхідне через потенційні можливості скорочення маси і вартості деталей.

Відомо, що титан та його сплави при роботі в парах тертя з металами схильні до значної адгезійної взаємодії, що супроводжується заїданням поверхні тертя. Одним з ефективних засобів захисту виробів з титану та його сплавів від зношування при терті ковзання без мастила або в умовах обмеженого мастила є напилення зносостійких покриттів [1-6]. Спорідненість хімічного складу основи та покриття, як відомо, у багатьох випадках створює сприятливі умови для міцної адгезії між ними – однієї з найважливіших умов високої працездатності виробу. У зв'язку з цим розробка зносостійких покриттів, що містять титан, для деталей аерокосмічної техніки, що виготовляються зі сплавів титану, представляється актуальною і перспективною. Сприятливі результати можливі при використанні таких покриттів і в медицині. Титанові сплави відносяться до біосумісних та корозійностійких матеріалів [7-9]. Однак їх використання для медичних об'єктів, зокрема, для протезів стегнового або колінного суглобів, недостатньо ефективно через низьку зносостійкість.

5. Методи досліджень

Покриття напиляли з порошку із середнім розміром 40,3 мкм. на підкладку з титанового сплаву VT16 (мас. %: 1,6-3,8Al%, 4,0- 4,5% V, 4,5-5,0 Mo%) за допомогою детонаційно-газової установки „Дніпро-5МА”, розробленої в Інституті проблем матеріалознавства НАН України та були нанесені плазмові покриття на установці УПУ-3Д.

Триботехнічні випробування проводили на машині тертя марки ВМТ-75 при торцевому терті циліндричного зразка ($h = 15$ мм, $d = 10$ мм) кільцевому контртілу. В якості контртіла

використовували титановий сплав марки ОТ-4, що містить 4% (мас.) Al і 1,5% (мас.) Mn і нержавіючу корозійно-стійку сталь марки 07X16H6, що містить 15,5-17,5 (мас.%) Cr і 5-8 (мас. %) Ni. Швидкість ковзання становила 0,5 м/с. У всіх випадках випробування проводили без мастильного матеріалу при навантаженні $P = 3,12$ МПа протягом 20 хвилин.

6. Результати досліджень

Дослідження структури межі розділу покриття – основа методом оптичної мікроскопії свідчить про високу якість покриттів, нанесених на підкладку (табл.1, табл.2). Відсутність несучільностей на межі між металом основи та покриттями, великих пор та порожнин у структурі покриттів – нема, що свідчить про їх якісне напilenня (рис.1, рис.2). Зазначені чинники сприятливі забезпеченню необхідного рівня механічних характеристик покриттів, зокрема, триботехнічних.

Таблиця 1. Рентгенофазовий аналіз детонаційних покриттів

Матеріал	Фаза
Покриття з порошку, отриманого за допомогою гідриду титану.	Ti, Ti_3N_{2-x} , TiN, Al_3Ti , AlN, AlN(куб.), AlTi, $\alpha-Al_2O_3$, $Al_{10}N_8O_3$.

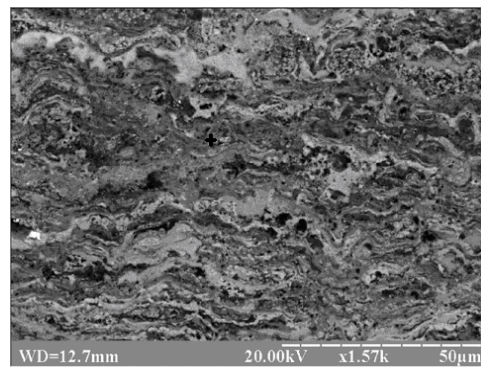
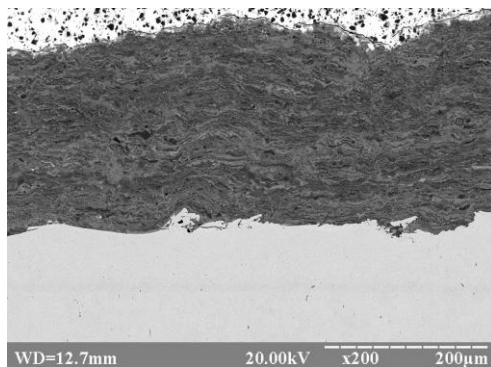


Рисунок 1. Структура детонаційних покриттів, отриманих за допомогою гідриду титану.

Таблиця 2. Рентгенофазовий аналіз плазмових покриттів

Матеріал	Фаза
Покриття з порошку, отриманого за допомогою гідриду титану.	AlTi, $Al_3Ti_5O_2$, $TiH_{0,66}$

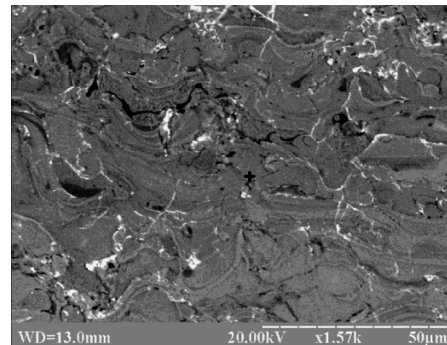
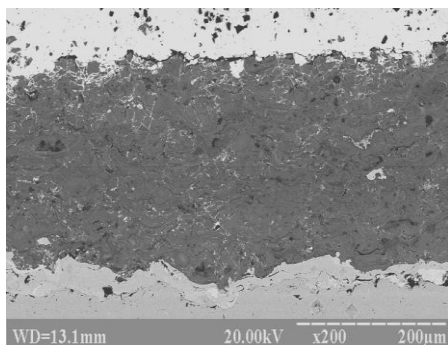


Рисунок 2. Структура плазмових покриттів, отриманих за допомогою гідриду титану.

Проводячи аналіз поведінки матеріалів при терті (табл.3), можна зробити висновок, що у випадку зі сталлю вона значною мірою суттєво відрізняється для різних матеріалів у парі сталі з твердим і не схильним до взаємодії з ним з адгезійним покриттям на основі

алюмінідів титану і хімічно стійкі включення нітриду титану ($H_{\mu} = 20,5$ ГПа), і нітриду алюмінію ($H_{\mu} = 12,5$ ГПа). Цьому відповідають мінімальні втрати маси об'єктів, що розглядаються, які контактують у процесі тертя. При чому, зносу у зазначених парах тертя більшою мірою відноситься головним чином менш тверде сталеве контртіло. Поверхні доріжок тертя на обох компонентах пари тертя сталеве контртіло-покриття після приробки мають стабільний профіль без подряпин, заїдань. При цьому, поверхня менш твердого контртіла закономірно характеризується вищою шорсткістю(рис.3-рис.6).

Таблиця 3. Результати триботехнічних випробувань детонаційних та плазмових покриттів

Покриття	Порошковий матеріал	Контртіло	Коефіцієнт тертя	Знос покриття, г/см ³
детонаційне	TiAl+AlTi ₃ (CBC)	OT4	0,29	$4,67 \cdot 10^{-8}$
		07X16H6	0,39	$1,43 \cdot 10^{-6}$
	TiAl(з TiH ₂)	OT4	0,27	$3,821 \cdot 10^{-8}$
		07X16H6	0,41	$7,89 \cdot 10^{-7}$
плазмове	TiAl+AlTi ₃ (CBC)	OT4	0,32	$8,917 \cdot 10^{-8}$
		07X16H6	0,36	$2,755 \cdot 10^{-6}$
	TiAl(з TiH ₂)	OT4	0,28	$1,418 \cdot 10^{-6}$
		07X16H6	0,36	$3,197 \cdot 10^{-6}$

Ефект від наявності у структурі нітридів можна вважати закономірним, оскільки покриття з нітридів титану відомі, як зносостійкі та широко використовуються для зниження коефіцієнта тертя робочих поверхонь, наприклад, ріжучого інструменту, особливо при обробці сталей. Це пояснюється тим, що нітридтитанові покриття мають стійкість до дифузії та хімічній взаємодії між залізом.

Найгіршим партнером роботи в парі з титановим сплавом було покриття отримане детонаційним напиленням з порошку на основі TiAl, отриманого за допомогою гідриду титану (рис.3). На поверхні покриття можна побачити нарости матеріалу. На відміну від покриття поверхня тертя контртіла є однорідними подряпинами з згладженим профілем, але при цьому є місця виривів матеріалу. Можна припустити, що структурні складові покриття по-різному взаємодіють із поверхнею контртіла. Основною причиною цього явища є активна адгезійна взаємодія контактуючих сухих поверхонь хімічно споріднених фаз у покритті та контртілі, що призводить до уловлювання в умовах підвищених температур, що виникають при терті без змащування. При цьому тверді включення нітридів і оксидів роблять подряпину більш м'якої поверхні титанового контртіла. Необхідно відзначити, що поруч із твердими фазами покриття має місце і більш м'які (TiAl, Al), що у свою чергу негативно впливає на його опір зносу плазмових покриттів нітридтитанові покриття мають високу стійкість до дифузії та хімічної взаємодії із залізом.

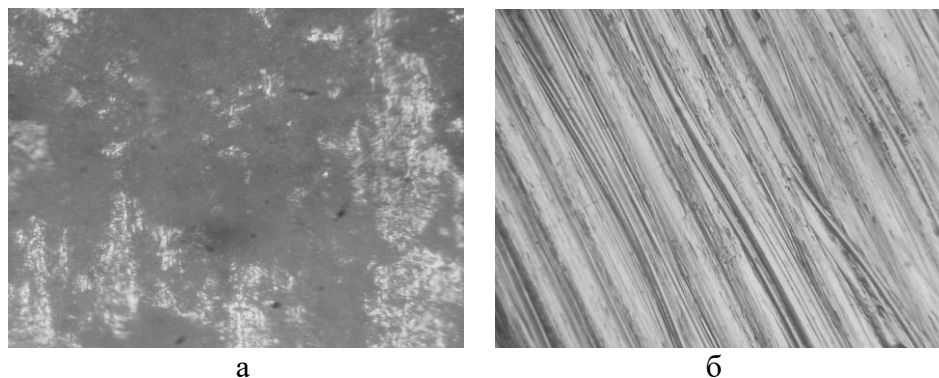


Рисунок 3. Характер зношення пар тертя титанового сплаву OT4 (а) з детонаційним покриттям з порошку на основі TiAl, отриманого за допомогою гідриду титану (б) (x 400).

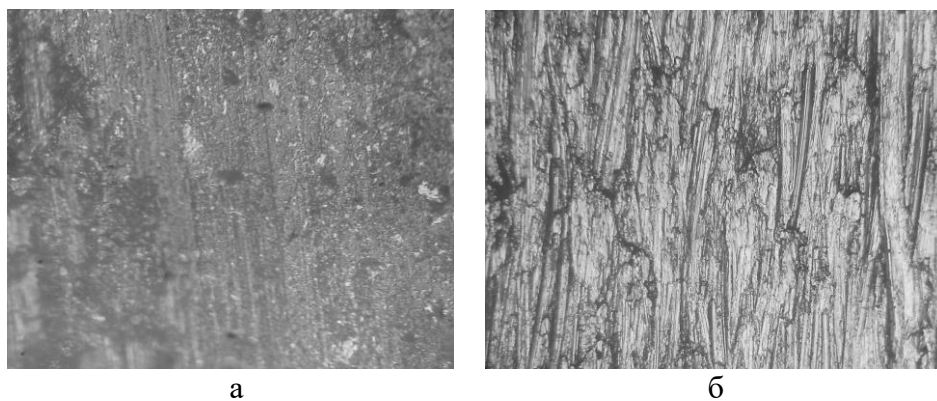


Рисунок 4. Характер зношення пар тертя титанового сплаву 07X16H6 (а) з детонаційним покриттям з порошку на основі TiAl, отриманого за допомогою гідриду титану (б) (x 400).

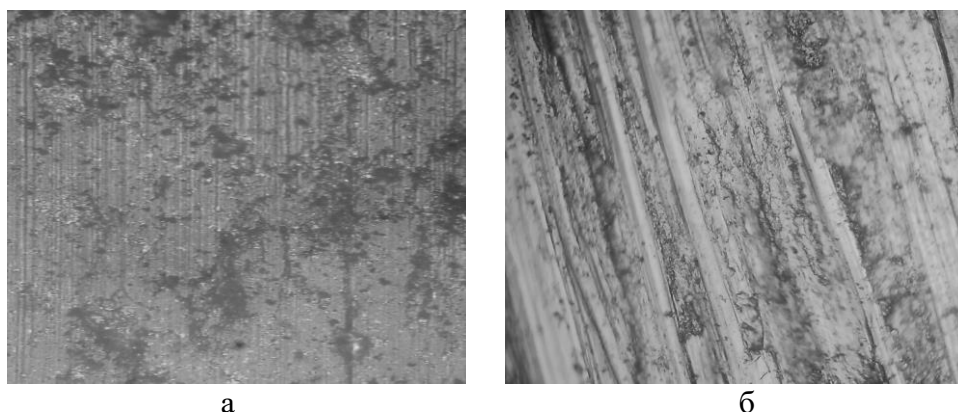


Рисунок 5. Характер зношення пар тертя титанового сплаву OT4 (а) з плазмовим покриттям з порошку на основі TiAl, отриманого за допомогою гідриду титану (б) (x 400).

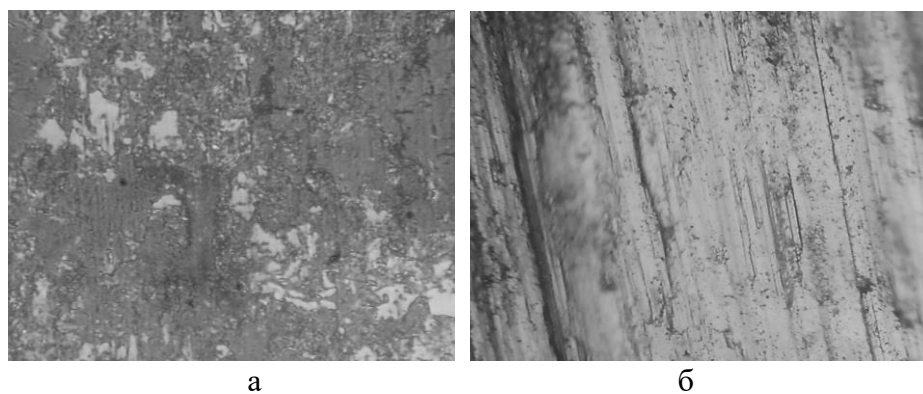


Рисунок 6. Характер зношення пар тертя нержавіючої сталі 07X16H6 (а) з плазмовим покриттям з порошку на основі TiAl, отриманого за допомогою гідриду титану (б) (x400).

Для забезпечення максимального рівня жаростійкості в матеріалах цієї системи Ti-Al питання фазоутворення в умовах високих температур, незважаючи на велику кількість досліджень [10-19], залишаються ключовими для досягнення максимального рівня жаростійкості в матеріалах цієї системи. При цьому, експериментальні і розрахункові дані звичайно не збігаються. Проблема при термодинамічних розрахунках полягає в складності точного врахування усіх факторів [20-26], що впливають на формування оксидів (температури, парціальних тисків кисню і азоту, корозійного середовища, термодинамічної активності титана та алюмінію, розчинення кисню в сплаві та дисперсність). Ці фактори визначають необхідний вміст алюмінію, достатній для утворення суцільної окалини Al_2O_3 .

Експериментально встановлено, що температурний інтервал застосування γ -алюмініду титану, що зберігає, згідно з діаграмою стану, стабільність від 49 до 66% [10], обмежується 750-800 °С. При цих температурах в поверхневому шарі матеріалів цього класу зазвичай утворюється окалина, що складається з суміші оксидів Al_2O_3 і TiO_2 . Наявність рутила небажана, оскільки цей оксид не в змозі забезпечити захист металевого підшару від проникнення в нього кисню і, до того ж, швидко руйнується.

Одним з перспективних напрямів підвищення жаростійкості сплавів на основі алюмінідів титану до рівня 900-1100 °С при забезпеченні задовільної тріщиностійкості є введення в них хром замість частини алюмінію. Розробка жаростійкого сплаву з прийнятними властивостями на основі системи Ti-Al-Cr дозволяє виділити два напрямки.

До *першого* відносяться спроби використовувати як основу γ -алюмінід титану, що має досить хороші механічні властивості, і за рахунок легування підвищити жаростійкість сплаву з 800 до 1100 °С. Встановлено, що надмірний вміст хрому в матеріалах першого напрямку викликає їх хрущення. Так, [21] повідомляється, що покриття Ti-50Al-20Cr було визнано крихким через великий вміст у двофазній структурі екстремально крихкої фази Лавеса - $Ti(Cr,Al)_2$. Саме у цій фазі, що містить 37 - 42 ат. % Al відводиться ключова роль у формуванні на поверхні окислюваного сплаву суцільного захисного шару Al_2O_3 . Крім того, на межі покриття з γ -підкладкою (Ti-47Al-2Cr-2Ta) були виявлені реакційні Cr-збагачені зони, що ведуть до зниження тріщиностійкості. Наступні дослідження в цій галузі були спрямовані на пошук складу з меншим вмістом хрому та підвищенням за рахунок цього втомних характеристик композиції "покриття-підкладка".

Дослідження, виконані в [20,22] показали, що покриття зі зменшеним вмістом хрому до 12 % за рахунок збільшення вмісту титану до 37 ат. % і відповідно - фази, напилене плазмовим методом, забезпечує за висновком авторів успішний захист підкладки Ti-48Al-2Cr-2Nb після витримки при 1000 °С на повітрі протягом 500 годин. Проте, із залежностей, наведених у цій роботі видно, що зростання маси зразків, що окислюються, і при 800 °С і при 1000 °С за рахунок проникнення в покриття кисню все-таки тривало. Оцінка тріщиностійкості покриття після витримки при 1000 °С здійснювалася вивченням відбитка індентора при вимірюванні мікротвердості. І хоча, на відміну від сплавів першої генерації, структура яких складалася в основному з фази Лавеса, що страждають від інтенсивного розтріскування вже при навантаженні 100 г, нове покриття характеризувалося більш високою тріщиностійкістю (на відбитку від індентора Віккерса під навантаженням 1000г/15с скануючої мікроскопії були зафіксовані тільки невеликі ізольовані тріщини довжиною 1-3 мкм), а в зоні зчеплення покриття з підкладкою хромсодержащих крихких включень виявлено не було, проте цей результат не був визнаний остаточним і роботи зі зниження вмісту хрому в сплаві були продовжені.

Склад Ti-52Al-5Cr був виділений як найбільш перспективний. Цей сплав при мінімальній кількості хрому і збереженні структури у вигляді γ -фази, що має сприятливу з точки зору досягнення задовільних характеристик міцності тетрагональні гранецентровані грати ($L1_2$), забезпечив стійкість до окислення при 1000 °С в повітряному середовищі. Однак, цей результат був оцінений тільки як багатообіцяючий, оскільки повітряне середовище в цьому експерименті було піддано спеціальному осушуванню. Без цієї процедури в окалині, що утворюється, поряд з оксидом алюмінію, були виявлені рутил і титан-збагачені ділянки, які є провідниками для проникнення кисню вглиб сплаву (джерела швидкого розтріскування окалини). При цьому необхідно підкреслити, що об'єктом дослідження служили литі сплави, від яких покриття відрізняються наявністю пір, що здатне зробити істотний негативний вплив і на характеристики міцності і на стійкість до окислення.

В [20] було показано, що мікролегування скандією зазначеного вище сплаву Ti-52Al-5Cr, здатне забезпечити досягнення необхідної стійкості до окислення принаймні не нижче, ніж при 900 °С, на повітрі без додаткового осушення.

До *другого* напрямку відносяться спроби використовувати триалюмінід титану, що має прийнятну жаростійкість. Оскільки інтерметалід $TiAl_3$, на відміну від $\gamma-TiAl$, що має впорядковану гранецентровану гратку ($L1_0$) з невеликим ступенем тетрагональності ($c/a=1,02$), має тетрагональну гратку (DO_{22}) і є екстремально крихкою фазою, отримати з нього на основі сплав з необхідними механічними властивостями можна також шляхом його легування. Спроби створення матеріалів, в цьому напрямку, в основному зводяться до перетворення впорядкованої тетрагональної кристалічної гратки $TiAl_3$ (DO_{22}) кубічну ($L1_0$) зі збільшеною кількістю систем ковзання за рахунок легування хромом. Склади багатьох досліджених сплавів на основі триалюмініду титану містять близьку до мінімальної для цієї фази кількість алюмінію (66-67 ат.%) та 8- 10 ат. % хрому. Наприклад, в [21] злиток, що має склад 67Al-8Cr-25Ti, був підданий окисленню (200 циклів за годину) в печі на повітрі при 1200 °C. Відзначено високий опір окисленню, підтверджений формуванням окалини переважно у вигляді $\alpha-Al_2O_3$. Тим не менш, рентгенівські дослідження окалини дозволили зафіксувати присутність у ній рутила. Протягом усього експерименту відбувалося зменшення питомої ваги зразка, що окислюється.

В огляді [26], присвяченому газотермічним покриттям на основі кубічного триалюмініду титану, наведені результати окислення при 815 °C (500 годин/циклів) покриттів марки AL153, що мають склад (66Al-9Cr-25Ti) дуже близький до вищезгаданого зливка. Покриття напилювалося LPPS - методом на підкладку із сплаву Ti-47Al-2Cr-2Nb. Протягом циклічних випробувань структура системи "покриття- підкладка" гомогенізувалася і Al дифундував на підкладку, перетворюючи фазу $\alpha_2+\gamma$ сплаву TiAl на збагачену алюмінієм γ - фазу на межі розділу з покриттям. У роботі зазначається, що це покриття не забезпечувало абсолютний захист через утворення сітки тріщин, що виникає через локальні механічні напруження при термоциклюванні. Це явище спостерігалось в процесі напилення або перших циклів термоокислення для підкладок Ti- і TiAl-сплавів. Надалі розвиток тріщин у ході формування окалини із суміші оксидів, збагаченої Al_2O_3 , не відбувалося і, таким чином, загальний рівень захисту підтримувався. Товщина покриттів була близько 200 мкм. Результати контролю зміни питомої маси зразків із покриттями свідчать про високу стабільність властивостей покриттів.

Проте, слід зазначити, що в ході окислення безперервне зростання питомої маси зразків все-таки мало місце. Застосування APS методу напилення покриття на повітрі замість LPPS дозволило одержати за оцінкою авторів виключно якісне покриття, яке після напилення мало менше 0,1% кисню у формі Al_2O_3 . Було встановлено, що це покриття на Ti- і TiAl - підкладках більш тріщиностійке, проте після 25 циклів розвиток тріщин мало місце. Застосування ще одного широко застосовуваного методу напилення (HVOF) дозволило отримати покриття з фазовим складом близьким до складу покриття, отриманого методом APS, хоча в деяких випадках інтенсивність рентгенівських піків фази Al_2O_3 була для HVOF-покриттів слабше. Наприкінці цієї роботи зазначено, що розроблені покриття забезпечують винятковий захист від окислення підкладок з різних сплавів на основі титану.

При цьому, експериментальні і розрахункові дані звичайно не збігаються. Проблема при термодинамічних розрахунках полягає в складності точного врахування усіх факторів, що впливають на формування оксидів (температури, парціальних тисків кисню і азоту, корозійного середовища, термодинамічної активності титана та алюмінію, розчинення кисню в сплаві та дисперсність). Ці фактори визначають необхідний вміст алюмінію, достатній для утворення суцільної окалини Al_2O_3 .

Випробування проводили в електропічі марки СНОЛ 2.3.1,3/11И2 при 900 °C. Піч використовується для проведення різних видів термообробки матеріалів в стаціонарних умовах. Загальний час окислення у повітрі складав 28 годин для всіх зразків різного складу. Зразки з покриттями у вертикальному положенні розміщували у керамічному човнику, який за допомогою маніпулятора вводився у піч. Зразки у човнику встановлювали таким чином, щоб кожен зразок стояв окремо один від одного. Перед

завантаженням у човник було проведено вимірювання ваги досліджуваних зразків на аналітичних терезах марки ВЛР-200 з точністю $\pm 0,00005$ г.

Проведені експериментальні дослідження на зразках титанового сплаву марки ВТ-16 (10 мм в діаметрі та 25 мм по висоті), на які було напилено детонаційно-газовим і плазмовим методом покриття з порошків на основі $TiAl+AlTi_3$ (СВС) та $TiAl$, отриманого за допомогою гідриду титану, показали, що покриття стійке на повітрі до $900^\circ C$ (табл. 4.). На поверхні утворюється суцільний шар з оксиду алюмінію, що захищає поверхню від наступного окислення на повітрі.

Таблиця 4. Стійкість покриттів до окислення

Покриття	Порошковий матеріал	Приріст маси $\Delta m/S$, г/мм ²
Детонаційне	$TiAl+AlTi_3$ (СВС)	$1,26 \cdot 10^{-4}$
	$TiAl$ (з TiH_2)	$1,395 \cdot 10^{-4}$
Плазмове	$TiAl+AlTi_3$ (СВС)	$0,998 \cdot 10^{-4}$
	$TiAl$ (з TiH_2)	$1,617 \cdot 10^{-4}$
Титановий сплав ВТ-16 без покриття	—	$10,01 \cdot 10^{-4}$

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Отримані результати показують доцільність подальшої роботи в цьому напрямку та дослідженні у майбутньому багатофункційних покриттів з цього класу матеріалів.

8. Висновки

Проведено порівняльні дослідження, пов'язані з оптимізацією технології нанесення покриттів з розробленого порошку $TiAl$, отриманого за допомогою гідриду титану. Визначено технологічні режими та напилено детонаційні та плазмові покриття з цих порошкових матеріалів. Досліджено їх мікроструктуру та фазовий склад вихідних порошків і покриттів з них.

Проведені порівняльні дослідження поведінки детонаційних та плазмових покриттів в умовах сухого тертя в парах з титановим сплавом ОТ4 та нержавіючою сталлю марки 07X16H6. Встановлено, що наявність в структурі покриттів нітридів та оксидів покращує характеристики тертя при роботі. Встановлено, що найбільш схильні до схоплення володіють пари, що вміщують однойменні метали. Найбільш високими показниками володіє покриття зі структурою з інтерметалідної матриці з включеннями твердих фаз у вигляді нітридів титану та алюмінію і оксидів.

Досліджено окислення детонаційних та плазмових покриттів при температурі $900^\circ C$ у повітряному середовищі. Показано, що розроблені детонаційні та плазмові покриття мають більший опір окисленню, ніж титановий сплав ВТ-16 без покриття.

Одержані результати показують можливість використання в деталях для авіаційної призначення та Імашинобудуванні детонаційних та плазмових покриттів на основі системи $Ti-Al$ з підвищеними механічними властивостями та жаростійкістю.

Список літератури:

- 1) О.Р. Umansky, V.L. Syrovatka, M.S. Storozhenko, M.S. Yakovleva, M.A. Vasylykivska, T.L. Talako, A.I. Letsko Features of obtaining composite powder materials and coatings from them - 2019 - Powder Metallurgy, No. 05/06, Kyiv: I.M. Frantsevich Institute of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, pp. 137-143.

- 2) Barabash, V.A., Demidik, A.N., Syrovatka, V.L., Terentiev, A.E., Kostenko, A.D. Effect of Coating Deposition Methods on the Properties of Titanium Aluminide Materials. Powder Metallurgy and Metal Ceramic., 2016, 55(3-4), pp. 236–240.
- 3) Gogaev K.O., Barabash V.A., Demidik, A.N., Varchenko, V.T., Syrovatka, V.L. Wear-Resistant High-Temperature Composite Slide Bearings Based on Titanium Aluminides. Powder Metallurgy and Metal Ceramic link is disabled, 2018, 57(3-4), pp. 186–189.
- 4) Syrovatka, V.L., Umanskiy, A.P., Yakovlieva, M.S., Martsenyuk, I.S., Labunets, V.F. Oxidation Resistance of Iron Aluminide Materials. Powder Metallurgy and Metal Ceramic, 2019, 58(1-2), p. 29–35.
- 5) Umanskiy, O.P., Syrovatka, V.L., Storozhenko, M.S., Talako, T.L., Letsko, A.I. Production of Composite Titanium Diboride Powder Materials and Coatings. Powder Metallurgy and Metal Ceramic., 2019, 58(5-6), pp. 356–360.
- 6) Brady M.A., Brindley W.J., Smalalek J.L., Locci I.E. Oxidation and protection of γ -titanium aluminides // JOM.- 1996.-№11.-P.46-50.
- 7) A.F. Ilyushchenko, A.I. Kulak, V.A. Okovitiy et al. Plasma Spraying of Bioceramic Coatings // Advanced Technologies in Materials Production and Restoration of Industrial Surfaces. Proc. 2nd International Conf. Minsk, 1997.-p.16-17.
- 8) A.F. Ilyushenko, A.I. Kulak, V.A. Okovitiy et al. Development of bioceramic plasma coatings // „Progressive technologies of mechanical engineering and modernity ” , September 9-12, 1997. Proceedings of the international scientific-technical conference Sevastopol, 1997-. p.115-116.
- 9) V.A. Okovity, A. Ph. Iluschenco, A.I. Kulak. Technological concept of the formation of biocompatible plasma spray coating. //International conference „Techologia, 97 ” - P.670-671.
- 10) Dettenwanger F., Schman E., Ruhle M. Microstructure Study of Oxidized TiAl // Oxidation of Metals.-1998.-P.269-282.
- 11) Gauthier V., Dettenwanger F., Schutze M. Oxidation behavior of γ -TiAl coated with zirconia thermal barriers // Intermetallics.1998.-№10.-P.667-674.
- 12) Structural intermetallics / By ed. Y.W. Kim, D.M. Dimiduk, M.V. Nathal et al. – TMS: Warrendale (PA),1997.-P.531.
- 13) Evans A.G., Mumm D.B., Hutchinson J.W. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings // Progress in Materials Science. – 2001.- №46.-P.505-533.
- 14) Skorokhod V.V., Uvarova I.V., Ragula A.V. Physicochemical kinetics in nanostructured systems - Akadempriodyka, 2001.-180 p.
- 15) Ilyushchenko A.F., Ivashko V.S., Okovitiy V.A., Sobolevskiy S.B. Heat-protective coatings based on ZrO₂. - Minsk: Research Institute of PM and OP, 1998.-128p.
- 16) Oliker V.E., Kresanov V.S. Scandium-containing gamma titanium aluminide alloys and coating for aerospace structural parts // Advanced materials and processes for gas turbines. TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).-2003.-P.293-300.
- 17) Prytulyak A.A., Gridasova T.Y., Alekseev O.F. Investigation of the influence of production methods on the properties of ZrO₂ powders intended for plasma coatings // Metal Science and Metal Processing.2004.-No.3.-p.69-71.
- 18) Zhu D., Nesbitt J.A., Barrett C.A. Furnace cyclic oxidation behavior of multicomponent low conductivity thermal barriers coatings // J. of Thermal spray technology.-2004.-13,№1.-P.84-92.
- 19) Oliker V.E., Pritulyak A.A., Syrovatka V.L., Grichishkin E.F., Gridasova T.Ya. Formation and high-temperature oxidation of thermal-barrier coatings with Ti-Al-Cr bindings layer. Powder Metallurgy and Metal Ceramic. 2007,46(9-10), p.483-491.
- 20) Oliker V.E., Kresanov V.S. Structure and properties of detonation coatings based on γ -TiAl // Powder Metallurgy .-2000.-11/12.-C.82-88.
- 21) G.H. Meir, D. Appalonia, R.A. Perkins, K.T. Chiang. Oxidation of Ti-base alloys // Oxidation of High Temperature Intermetallic. Eds.: T. Grobstein, J. Doychak, The Minerals, Metals and Materials Soc., Warrendale, (1988), p.185.

22) S. Taniguchi, T. Shibata, S. Itoh. Oxidation Behaviour of TiAl at High Temperatures in Purified Oxygen. Mater.Trans. JIM, 32 (2) (1991), p. 151.

23) K.L. Luthra. Stability of Protective Oxide Films on Ti-Base Alloys // Oxidation of Metals, 36 (5/6)1991, p.475

24) Oliker V.Yu., Syrovatka V.L., Gridasova T.Y., Grechishkin E.F., Yakovleva M.S., Eliseeva E.N. Influence of gas environments on the structural evolution and phase composition of detonation coatings applied from Ti-Al-B mechanical-alloy powders. Powder Metallurgy

25) S. Becker, A. Rahmel, M. Schorr, M. Schutze. Mechanism of Isothermal Oxidation of Intermetallic TiAl and of TiAl Alloys. Oxidation of Metals, 38 (5/6) (1992), p.427

26) Y.F. Cheng, F.Dettenwanger, J. Mayer, E. Schumann and M. Ruhle. Identification of a new phase formed during the oxidation of titanium aluminium // Scripta Materials, 34 (5), (1996), P.707-711.

Investigation of mechanical characteristics of detonation and plasma coatings from composite powder materials based on titanium for aircraft parts

Viacheslav Syrovatka

Department of highly-persistent surface layers material science and engineering Frantsevich Institute for Problems of Materials Science National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID 0000-0001-5034-2656

Abstract: The structure of the coating-substrate interface was studied by optical microscopy, and the high quality of the coatings was shown. The absence of discontinuities at the border between the base metal and the coating, there are no large pores and voids in the structure of the coatings - this indicates the necessary level of quality coatings during sputtering. The specified factors can ensure the required level of mechanical characteristics of coatings, including tribotechnical ones. Comparative studies of the behavior of detonation and plasma coatings under conditions of dry friction in pairs with titanium alloy OT4 and stainless steel 07X16H6 were conducted. The specified friction tracks on the surface of the coating and the counterbody differ significantly for different materials. The analysis of their surface allows us to conclude that the coating behaves differently in friction with steel. It was established that the presence of nitride and oxide coatings in the structure improves friction characteristics during operation. It was established that the most susceptible to seizure are the pairs containing the metals of the same name. The coating with a structure of an intermetallic matrix with inclusions of solid phases in the form of titanium and aluminum nitrides and oxides has the highest indicators. Oxidation of detonation and plasma coatings at a temperature of 900 °C in an air environment was investigated. It is shown that the developed detonation and plasma coatings have a higher resistance to oxidation than titanium alloy VT-16 without coating. The obtained results showed the possibility of using detonation coatings based on the titanium-aluminum system with increased tribotechnical properties and heat resistance in machine building and the aerospace industry.

Key words: detonation and plasma coatings, friction, structure, intermetallic, heat resistance, titanium alloy.
