

## Фазовий і хімічний склад дифузійних титаноалюмохромових покриттів на основі сплаву ХН55ВМТКЮ

О.Е. Дацок<sup>1</sup>, В.Г. Хижняк<sup>1</sup>, Т.В. Лоскутова<sup>1</sup>, Н.А. Харченко<sup>2</sup>, Т.П. Говорун<sup>2</sup>, В.В. Сімкулет<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського»,  
просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна

<sup>2</sup> Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна,

<sup>3</sup> Технічний університет м. Кошице, вул. Баєрова, 1, 08001 Прешов, Словачка Республіка

(Отримано 12.02.2018; у відреагованій формі – 08.06.2018; опубліковано online 25.06.2018)

Проаналізовані основні аспекти процесу жаростійкості. Запропоновано перспективний спосіб отримання жаростійких дифузійних покриттів на сплаві ХН55ВМТКЮ. Процес одночасного насичення поверхні сплаву титаном, алюмінієм та хромом реалізовували в суміші порошоків металів, оксиду алюмінію  $Al_2O_3$  і хлористого амонію  $NH_4Cl$ . Досліджено фазовий та хімічний склад, структура, мікротвердість дифузійних багатокомпонентних покриттів на основі титану, алюмінію та хрому, що формуються на поверхні сплаву ХН55ВМТКЮ. Показано, що в результаті титаноалюмохромовування на поверхні сплавів утворюється багатофазне багатопшарове покриття, що складається з трьох зон: зони сполук, стовпчастої та перехідної зон. Мікротвердість відповідних зон змінюється в межах 3,8-10,8 ГПа.

**Ключові слова:** Жаростійкість, Жароміцний сплав, Дифузійні покриття, Титан, Алюміній, Хром, Фаза, Оксид, Структура, Мікротвердість.

DOI: [10.21272/jnep.10\(3\).03015](https://doi.org/10.21272/jnep.10(3).03015)

PACS numbers: 81.65.Lp, 68.55.Nq,  
62.20.Qp, 32.30Rj

### 1. ВСТУП

Жаростійкість матеріалів в окислювальному середовищі зумовлена властивостями оксидів металів, які утворюються на їх поверхні. Оксиди гальмують дифузію газів до підкладки та перешкоджають розвитку корозійних процесів. До основних елементів, які підвищують жаростійкість сплавів, відносять хром, кремній та алюміній.

У роботі [1] наведений масив даних про властивості жаростійких покриттів, які в теперішній час знаходяться на стадії дослідження, розробки або впроваджені у виробництво. Відомо, що дифузійні жаростійкі покриття можна наносити з газової фази в суміші порошоків Al та активаторів за участю рідкої фази (див., наприклад, [1-4]). На поверхні інструментів методом хімічного осадження з газової фази, методами хімічної термообробки (ХТО) формуються багатопшарові покриття на основі TiC, TiN або  $Al_2O_3$  [5-9]. В цій композиції саму високу жаростійкість має оксид алюмінію  $Al_2O_3$ . Надтверді сполуки TiC та TiN проявляють високу стійкість в умовах тертя ковзання без змащування, а також абразивного та ерозійного видів зношування. За останні роки були досягнуті певні успіхи в дослідженні властивостей подвійних Ti-Al та потрійних Ti-Al-Me титаноалюмінієвих сплавів [5, 10-12] як жаростійких матеріалів, що обумовлено утворенням на їх поверхні захисних оксидних плівок. Відомо, наприклад, що для утворення в сплаві Ti-Al захисної плівки  $Al_2O_3$  необхідно 60-70 % мас. Al, а їх практичне використання обмежене їх крихкістю. Що стосується потрійних сплавів на основі Ti, Al та Cr, то вони мають хороші захисні властивості при окисленні. Перша група сплавів Ti-Al-Cr на основі  $\tau$ -фази (TiAl) стійка для окислення в діапазоні температур 750-900 °C і схильна до відшарування при температурах вищих за 1000 °C. Друга

група сплавів, багатих хромом, на основі фази Лавеса  $Ti(Al,Cr)_2$  стійка до окислення при температурах вищих за 900°C. У роботах [11, 12] показано, що сплави Ti-Al-Cr з  $\tau$ -фази та фази Лавеса демонструють високу стійкість до окислення при температурах до 1100°C. Кращу стійкість до окислення проявив сплав  $Ti_{0,25}Al_{0,55}Cr_{0,2}$ , що складається з  $\tau$ -фази (70-75 %) та фази Лавеса (25-30 %). Подальше підвищення стійкості до окислення можливе при легуванні сплаву в незначній кількості (0,1-0,5 % ат.) Hf, Si та іншими металами.

Мета роботи полягала у дослідженні фазового та хімічного складу, структури і мікротвердості дифузійних покриттів на основі Ti, Al та Cr, сформованих на поверхні жароміцного сплаву ХН55ВМТКЮ.

### 2. МЕТОДИКА ТА ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Титаноалюмохромовування проводили порошковим методом з використанням як вихідних компонентів Ti(15 % мас.); Al(15 % мас); Cr(25 % мас);  $Al_2O_3$ (40 % мас); і  $NH_4Cl$ (5 % мас). Хлористий амоній – активатор, продукти дисоціації якого (Cl, HCl) при взаємодії з порошками Ti, Al, Cr утворювали насичуючу фазу. Оксид алюмінію  $Al_2O_3$  був використаний в якості інертної добавки, яка попереджає спікання порошоків металів в процесі ХТО. Покриття наносили на жароміцний сплав ХН55ВМТКЮ на нікелевій основі наступного складу: Cr(14,8 %), Co(10,6 %), Ti(4,5 %), Al(0,7 %), W(5,2 %), Mo(2,1 %). Термічна обробка сплаву складається з двох гартувань: перше від 1200-1210 °C, при витримці 4 години; друге – від 1050 °C, 4 години витримки; охолодження на повітрі; старіння 850 °C; 8 год.

Рентгенофазовий аналіз був проведений з використанням установки ДРОН УМ-1 в мідному монохроматичному випромінюванні з використанням для

обробки результатів програми Powder Cell 2.2. Хімічний склад покриттів визначали на електронному мікроскопі Cam Scan 4D за допомогою приставки Energy 200 з програмою обробки результатів INCA-200. Вимірювання мікротвердості, товщини дифузійних шарів проводили на приладі ПМТ-3.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати досліджень фазового та хімічного складів, структури покриттів на основі жароміцному сплаву ХН55ВМТКЮ наведено на рис. 1-3.

Встановлено, що при трьохкомпонентному насиченні Ti, Al, та Cr на поверхні сплавів формується багатофазне багатшарове покриття, для якого, відповідно до загальноприйнятої в металознавстві тер-

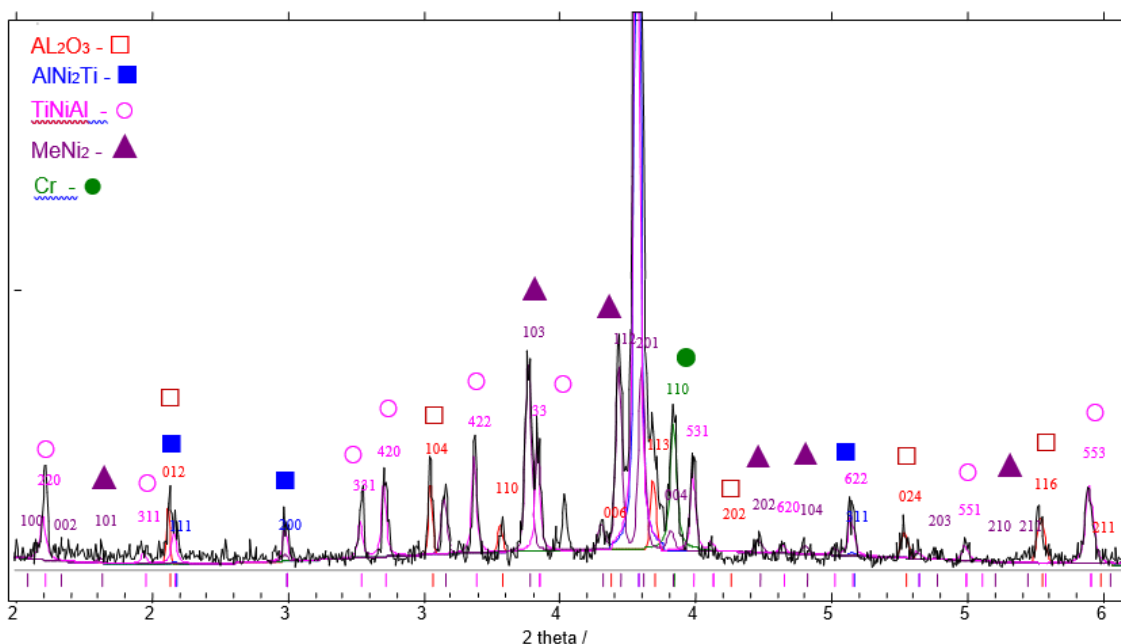
мінології, можна визначити зони сполук, стовпчастої та перехідної зон.

Особливістю будови покриттів, отриманих за запропонованим способом, є наявність зони, яка складається з шарів сполук:  $Al_2O_3$ ;  $TiNiAl$  (*g*-фаза);  $AlNi_2Ti$  (фаза Хастлера).

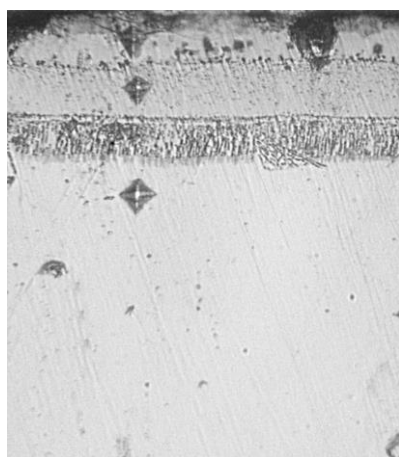
Загальна товщина цієї зони 38,0 – 40,0 мкм. Безпосередньо до перехідної зони примикає зона стовпчастих кристалів: світлі кристали на темному фоні (електронний мікроскоп) (рис.2б).

Межі між шарами зон I, II, III, на структурі в оптичному мікроскопі (рис.2а) слабо розвинені, це, в основному, прямі лінії. Покриття непористі.

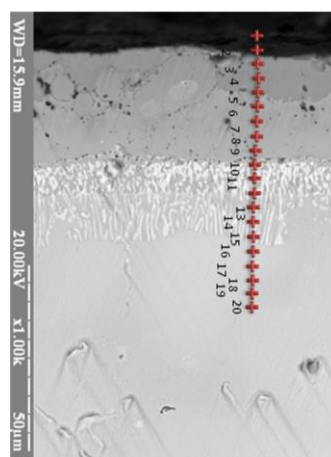
Стовпчасті кристали на електронографічному знімку (рис.2б) мають світлий (майже білий колір) і розташовані на темному фоні – сполука  $MeNi_2$ , яка на межі зон II – III відповідає наступному складу:



**Рис. 1** – Рентгенограма титаноалюмохромованого покриття на основі сплаву ХН55ВМТКЮ (поверхня). Випромінювання  $CuK_{\alpha 1}$  з довжиною хвилі  $\lambda = 0,1541841$  нм. Насичуюча суміш: Ti (15 % мас.); Al (15 % мас.); Cr (25 % мас.);  $Al_2O_3$  (40 % мас.); і  $NH_4Cl$  (5 % мас.);  $\tau = 4$  години

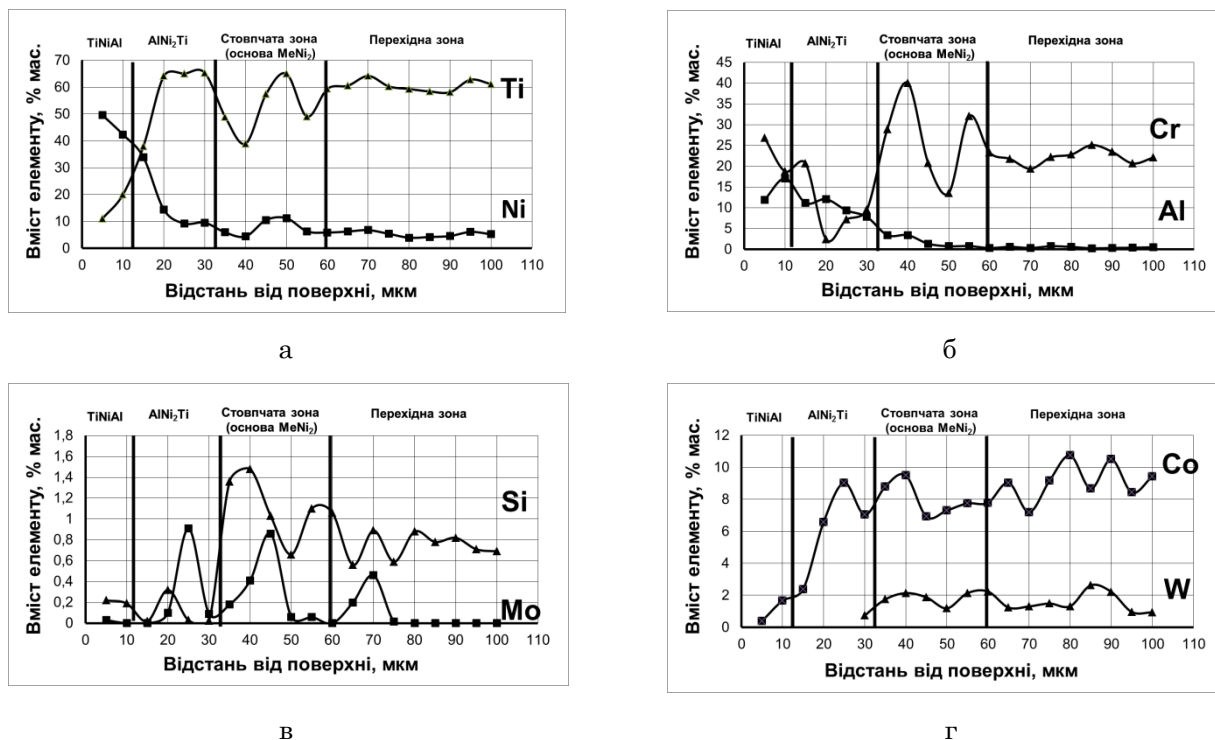


а



б

**Рис. 2** – Мікроструктури сплаву ХН55ВМТКЮ після титаноалюмохромовання: а – оптичний мікроскоп; б – електронний мікроскоп



**Рис. 3** – Розподіл елементів за товщиною в титаноалюмохромованому покритті на основі сплаву ХН55ВМТКЮ: Тi та Ni (а); Al та Cr (б); Мо та Si (в); Со та W (г). Насичуюча суміш: Тi (15 % мас.); Al (15 % мас.); Cr (25 % мас.); Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (40 % мас.); і NH<sub>4</sub>Cl (5 % мас.);  $t = 1070\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau = 4$  години

Ni<sub>57</sub>Al<sub>13</sub>Cr<sub>10</sub>Ti<sub>10</sub>Co<sub>10</sub>, біля перехідної зони – Ni<sub>56</sub>Al<sub>4</sub>Cr<sub>20</sub>Ti<sub>10</sub>Co<sub>10</sub>. Серед насичуючих елементів Тi, Al і Cr максимальну концентрацію в покритті мають Тi та Cr; вміст Тi в g – фазі досягає 50 % мас., а потім монотонно зменшується за товщиною шару фази MeNi<sub>2</sub> (Ti<sub>10</sub>Al<sub>10</sub>Cr<sub>5</sub> Ni<sub>65</sub>Co<sub>10</sub>).

В зоні стовпчастих кристалів титан зосереджений в основному в темній зоні – фаза MeNi<sub>2</sub>, де його концентрація становить 7,5-9,8 % мас. Максимальна концентрація хрому для зони стовпчастих кристалів досягає 60 % мас. З наведених вище результатів видно, що хром більшою частиною знаходиться в світлих кристалах. Слід зазначити, що молібден, який присутній в зоні стовпчастих кристалів в кількості 0,63-1,5 % мас., розчиняється лише в світлих кристалах.

Мікротвердість шарів титаноалюмохромового покриття змінюється від 3,8 до 10,8 ГПа.

Максимально мікротвердість була встановлена для шару стовпчастих кристалів – 9,8-10,8 ГПа, для шару сполуки TiNiAl – 5,8-6,2; для шару сполуки AlNi<sub>2</sub>Ti – 5,8-6,8; перехідної зони – 3,8-4,0 ГПа

Таким чином, титаноалюмохромові покриття на

основі сплаву ХН55ВМТКЮ мають значну концентрацію Тi, Al та Cr, вони практично непористі із окремими складовими, що мають значну мікротвердість і можуть бути перспективними при експлуатації в умовах дії високих температур.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Установлена можливість утворення на поверхні сплаву ХН55ВМТКЮ, методом дифузійної металізації в порошковій суміші Тi(15% мас.); Al(15% мас); Cr(25% мас); Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(40% мас); і NH<sub>4</sub>Cl(5% мас) при  $t = 1070\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau = 4$  години, багатокомпонентних покриттів на основі Тi, Al і Cr.

2. Показано, що титаноалюмохромовані покриття складаються з фаз: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; g-фаза TiNiAl; фаза Хастлера AlNi<sub>2</sub>Ti; MeNi<sub>2</sub> – зона стовпчастих кристалів, та визначена мікротвердість шарів покриття, ГПа: TiNiAl (5,8-6,2); AlNi<sub>2</sub>Ti (5,8-6,8); стовпчаста зона (9,8-10,8); перехідна зона (3,8-4,0), що дозволить провести подальші систематичні дослідження механічних властивостей та жаростійкості титаноалюмохромованого сплаву ХН55ВМТКЮ.

### Phase and Chemical Composition of Diffusion Titanium-Aluminum-Chromium Coatings Based on ХН55ВМТКЮ Alloy

O.E. Datsiuk<sup>1</sup>, V.G. Hignjak<sup>1</sup>, T. V. Loskutova<sup>1</sup>, N.A. Harchenko<sup>2</sup>, T.P. Hovorun<sup>2</sup>, V. V. Simkulet<sup>3</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine “I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37, Peremoha Prosp., 03056 Kyiv, Ukraine,

<sup>2</sup> Sumy State University, 2, Rimsky Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine,

<sup>3</sup> Technical University of Kosice, 1, Bayerova Str., 08001 Preshov, Slovak Republic

The main aspects of the heat resistance process are analyzed. A promising method is proposed for obtaining heat-resistant diffuse coatings on the alloy ХН55ВМТКЮ. The process of simultaneous saturation of the alloy surface with titanium, aluminum and chromium was realized in a mixture of metal powders, aluminum oxide  $Al_2O_3$  and ammonium chloride  $NH_4Cl$ . The phase and chemical compositions, structure, microhardness of diffuse multicomponent coatings based on titanium, aluminum and chromium, which are formed on the surface of alloy ХН55ВМТКЮ, are studied. It is shown that, as a result of titanium-alumochromination, a multi-phase multilayer coating is formed on the surface of the alloys, consisting of three zones: bond zones, columnar and transition zones. The microhardness of the corresponding zones varies in the range 3,8-10,8 GPa.

**Keywords:** Heat resistance, Refractory alloy, Diffusion coatings, Titanium, Aluminum, Chromium, Phase, Oxide, Structure, Microhardness.

## Фазовый и химический состав диффузионных титаноалюмохромированных покрытий на основе сплава ХН55ВМТКЮ

О.Э. Дацюк<sup>1</sup>, В.Г. Хижняк<sup>1</sup>, Т.В. Лоскутова<sup>1</sup>, Н.А. Харченко<sup>2</sup>, Т.П. Говорун<sup>2</sup>, В.В. Симкулет<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сикорського», просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна,*

<sup>2</sup> *Сумський державний університет, ул. Римського-Корсакова, 2, 40007 Суми, Україна,*

<sup>3</sup> *Технічний університет г. Кошице, ул. Баєрова, 1, 08001 Прешов, Словачка Республіка*

Проанализированы основные аспекты процесса жаростойкости. Предложен перспективный способ получения жаростойких диффузных покрытий на сплаве ХН55ВМТКЮ. Процесс одновременного насыщения поверхности сплава титаном, алюминием и хромом реализовывали в смеси порошков металлов, оксида алюминия  $Al_2O_3$  и хлористого аммония  $NH_4Cl$ . Исследовано фазовый и химический составы, структура, микротвердость диффузных многокомпонентных покрытий на основе титана, алюминия и хрома, которые формируются на поверхности сплава ХН55ВМТКЮ. Показано, что в результате титаноалюмохромирования на поверхности сплавов образуется многофазное многослойное покрытие, состоящее из трех зон: зоны соединений, столбчатой и переходной зон. Микротвердость соответствующих зон изменяется в пределах 3,8-10,8 ГПа.

**Ключевые слова:** Жаростойкость, Жаропрочный сплав, Диффузионные покрытия, Титан, Алюминий, Хром, Фаза, Оксид, Структура, Микротвердость.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. R. Streiff, *Journal de physique IV. Colloque C9, supplement au journal de physique III* **3**, 17 (1993).
2. M. Coral, M. Pytel, K. Dychton, A. Nowotnik, *J. Miner. Mater. Charact. Eng.* **11** No8, 853 (2012).
3. P. Vissuttipitukul, N. Simvanutpong, P. Wangyao, *Mater. Transact.* **51** No 5, 982 (2010).
4. M. Frohlich, R. Braun, C. Leyens, *Mater. Sci. Forum Trans. Tech. Publications* **638-642**, 1306 (2010).
5. N.A. Kharchenko, V.G. Khyzhniak, T.P. Hovorun, A.I. Degula, *J. Nano- Electron. Phys.* **6** No 4, 04021 (2014).
6. A.E. Anderson, *Metal Progress* **128**, 41 (1985).
7. V.G. Khyzhniak, M.V. Arshuk, T.V. Loskutova, *Metaloznavstvo i termichna obrobka metaliv* **4**, 730, (2016) (in Russian).
8. V.M. Beresnev, S.S. Grankin, S.Yu. Novikov, U.S. Nyemchenko, O.V. Sobol', P.V. Turbin, *J. Nano- Electron. Phys.* **6** No 4, 04011 (2014).
9. D.A. Kolesnikov, U.S. Nyemchenko, V.M. Beresnev, O.V. Sobol', V.A. Novikov, S.V. Lytovchenko, V.A. Stolbovoi, I.Yu. Goncharov, P.V. Turbin, L.V. Malikov, *J. Nano- Electron. Phys.* **8** No 3, 03045 (2016).
10. V.G. Khyzhniak, T.V. Loskutova, O.E. Datsyuk, I.S. Pohrebova, N.A. Kharchenko, T.P. Hovorun, A.I. Dehula, I.Ya. Smokovich, Ya.O. Kravchenko, *High Temp. Mater. Process.* **20** No3, 267 (2016).
11. G.S. Rabinovich, D.S. Wilkinson, S.C. Veldhuis, G.K. Dosbaeva, G.C. Weaterly, *Intermetallics* **14**, 189 (2006).
12. O.M. Barabash, Yu.V. Melman, D.V. Mirakle, M.V. Karpets, *Intermetallics* **11**, 953 (2003).