

УДК 621.785:669.046

Т.В. Лоскутова

Національний технічний університет України "КПІ", Київ, Україна

БУДОВА І ЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПЛЕКСНИХ ХРОМОТИТАНОАЛІТОВАНИХ ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ У8А

Background. Modern materials work under stringent conditions of simultaneous action of high production speeds, high temperatures, aggressive environments, and therefore the materials they are made of must have an integrated protective properties: to combine wear resistance, high crack resistance, chemical stability at elevated temperatures, high corrosion resistance. Despite the large number of known types of coatings and their methods of obtaining scientific aspects of creation of coatings with a wide range of protective properties is not sufficiently developed.

Objective. Study of phase and chemical compositions, structure and protective properties of coatings on U8A steel, obtained by combining of diffusion chromium plating with the subsequent titanium aluminizing.

Methods. The coating was applied on the surface of the U8A steel. On the first stage, the gas plating at a temperature of 1050 °C for 4 hours was carried out. On the second stage titanium aluminizing of powder coat at a temperature of 1050 °C for 4 hours was carried out. X-ray diffraction, electron-probe, metallographic, durometric studies were conducted using known methods of physical materials science. Corrosion tests by gasometrical method were carried out.

Results. It is shown that as a result of saturation on the steel surface a multilayer coating is formed consisting of carbides of chromium, titanium, intermetallic compounds of titanium, aluminum, chromium. It has been established that the microhardness of multilayer coatings based on chromium carbides, titanium carbides, intermetallic metals is 5.8–34.0 GPa. It is shown that the application of complex coatings based on chromium, titanium, aluminum increases the resistance of U8A steel in many aggressive environments.

Conclusions. Complex chromium, titanium, aluminum saturation of U8A steel allows obtaining coatings with a total width of 27.5–30.5 μm, which ensures high corrosion resistance in various industrially important aqueous corrosive solutions.

Keywords: steel U8A; diffusion coating; plating; titanium aluminizing; corrosion resistance; microhardness.

Вступ

Останнім часом до деталей машин, конструкцій, інструментів висувають комплексні вимоги, за яких металеві матеріали повинні одночасно поєднувати декілька фізико-хімічних властивостей. Використання при виготовленні виробів складних сплавів є в більшості випадків недоцільним, економічно та технологічно не завжди виправданим, оскільки за більшість експлуатаційних характеристик відповідає поверхневий шар матеріалу. Змінюючи через отримання дифузійних покриттів хімічний, фазовий склад, структуру поверхні матеріалів, можна істотно покращити її важливі експлуатаційні властивості: твердість, міцність, зносостійкість, жаростійкість, корозійну стійкість тощо [1–9]. Унаслідок такої обробки на виробі може формуватися градієнтна структура, яка буде поєднувати необхідні властивості поверхні із заданими властивостями матеріалу основи. Вибір комплексу "матеріал основи–покриття" залежить від умов експлуатації виробів і конкретних вимог до їх фізико-хімічних властивостей.

Відомо, що високу мікротвердість у покриттях забезпечують карбіди титану TiC (30,0–40,0 ГПа) та хрому Cr_7C_3 , $Cr_{26}C_6$ (16,0–18,0 ГПа), але вони мають невисокий температурний інтервал жаростійкості в атмосфері повітря [8]. Комплексні алітовані покриття мають низьку мікротвердість, але проявляють високі жаростійкість та корозійну стійкість за підвищених температур [3, 9]. Однак роботи, присвячені одержанню та дослідженню захисних властивостей багатшарових хромотитаноалітованих покриттів на вуглецевих сталях, мають обмежений характер [3, 9]. У зв'язку з цим становить певний інтерес створення комплексних хромотитаноалітованих покриттів, у яких кожен шар або фазова складова будуть виконувати свої функції при експлуатації металевих виробів у промислово важливих середовищах.

Постановка задачі

Метою роботи є дослідження хімічного та фазового складу, структури і захисних властивостей покриттів, отриманих поєднанням дифузійного хромування з подальшим титаноалітуванням сталі У8А.

Методика експерименту

Дифузійні покриття наносили на поверхню вуглецевої сталі У8А, що, як відомо [10], використовується як інструментальний матеріал, а також конструкційний матеріал у парах тертя в агресивних середовищах. Процес насичення проводили у два етапи. На першому етапі отримували шари на основі карбідів хрому [8]. Процес проводили в закритому реакційному просторі за зниженого тиску активної газової фази, температури 1050 °С, упродовж 4 год. Як вихідні реагенти використовували порошок хрому, чотирохлористий вуглець CCl_4 і деревне вугілля. На другому етапі хромовані зразки титаноалітували в суміші порошоків титану й алюмінію, хлористого амонію та оксиду алюмінію в контейнері з плавким затвором за умов зниженого тиску. Насичувальна суміш складалась із 10 % за масою порошку алюмінію, 40 % за масою порошку титану, 47 % за масою інертної речовини Al_2O_3 і 3 % за масою хлористого амонію NH_4Cl . Процес проводили за температури 1050 °С, протягом 4 год. Далі контейнер зі зразками охолоджували на повітрі.

Рентгеноструктурний аналіз проводили на установці ДРОН УМ-1 у мідному монохроматизованому випромінюванні з обробкою результатів у програмі Powder Cell 2.2. Пошаровий аналіз зразків проводили механічним шліфуванням поверхні на алмазному крузі. Товщина знятої дифузійної зони становила близько 15 мкм. Хімічний склад покриттів визначали мікрорентгеноспектральним аналізом з використанням енергодисперсійної приставки Energy 200 до сканувального електронного мікроскопа SamScan 4D з програмою обробки результатів INCA 200, похибка вимірювань $\pm 0,3\%$. Вимірювання проводили по перерізу дифузійного шару на поперечних шліфах зразків сталі з покриттям переміщенням мікрозонда в напрямку від поверхні дифузійного шару до відстані 20 мкм углиб матеріалу основи. Мікроструктурні дослідження проводили на електронному мікроскопі SamScan 4D після травлення зразків реактивом Мураками з подальшим травленням 3 %-ним розчином нітратної кислоти в етиловому спирті. Вимірювання мікротвердості та уточнення товщини дифузійного шару, а також його окремих фаз проводили на пристрої ПМТ-3 не менш ніж у 20 полях зору. Навантаження на індентор становило $H_m = 0,49$ Н, похибка вимірювань – 0,1 ГПа. Жаростійкість оцінювали за зміною маси зраз-

ків після їх окиснення за температури 800 °С упродовж 8 год в умовах природної аерації. Корозійні дослідження проводили для сталі У8А та сталі з покриттями за температури 20 °С в умовах природної аерації. Дослідження здійснювали в промислово важливих агресивних середовищах: 5 % H_2SO_4 , 20 % HNO_3 , 10 % CH_3COOH , 5 % $\text{HOOC}(\text{CH}_2)_4\text{COOH}$, технічній воді, 10 % Na_2CO_3 . Проводили не менш ніж 5 паралельних випробувань, виходячи з яких визначали середнє значення масометричного показника швидкості корозії K_m за формулою

$$K_m = \frac{g_2 - g_1}{S \cdot \tau}, \text{ г}/(\text{м}^2\text{-год}), \quad (1)$$

де g_1 і g_2 – маса металічного зразка до і після корозії відповідно, г; S – поверхня зразка, м^2 ; τ – тривалість процесу корозії, год.

Захисну дію покриттів оцінювали коефіцієнтом гальмування корозії (γ_n) за формулою

$$\gamma_n = \frac{K_m^c}{K_m^n}. \quad (2)$$

Ступінь захисту (Z) розраховували за формулою

$$Z = \left(\frac{K_m^c - K_m^n}{K_m^c} \right) \times 100 \%, \quad (3)$$

де K_m^c – масовий показник швидкості корозії сталі без покриття, $\text{г}/\text{м}^2\text{год}$; K_m^n – масовий показник швидкості корозії сталі з покриттям, $\text{г}/\text{м}^2\text{год}$.

Аналіз результатів

Рентгеноструктурним аналізом встановлено (рис. 1), що на поверхні сталі У8А після її хромовання формуються шари, які складаються зі сполуки FeCr ($a = 0,881$ нм, $c = 0,5446$ нм) та карбідів хрому Cr_2C_6 ($a = 1,0688$ нм), Cr_7C_3 ($a = 0,7081$ нм, $b = 1,2187$ нм, $c = 0,4545$ нм). Як показав мікроструктурний аналіз, отримані покриття мають три зони, які розміщені паралельно фронту дифузії, з чітко вираженою межею поділу покриття–основа (рис. 2). Перша зовнішня зона покриття – на основі сполуки FeCr – складається з дрібних рівновісних зерен, друга – на основі карбиду Cr_2C_6 – з дрібних стовпчастих кристалів. Безпосередньо до поверхні основи примикає третя зона зі стовпчастих та рівновісних кристалів карбиду хрому Cr_7C_3 . Загальна товщина покриттів – 15,0–

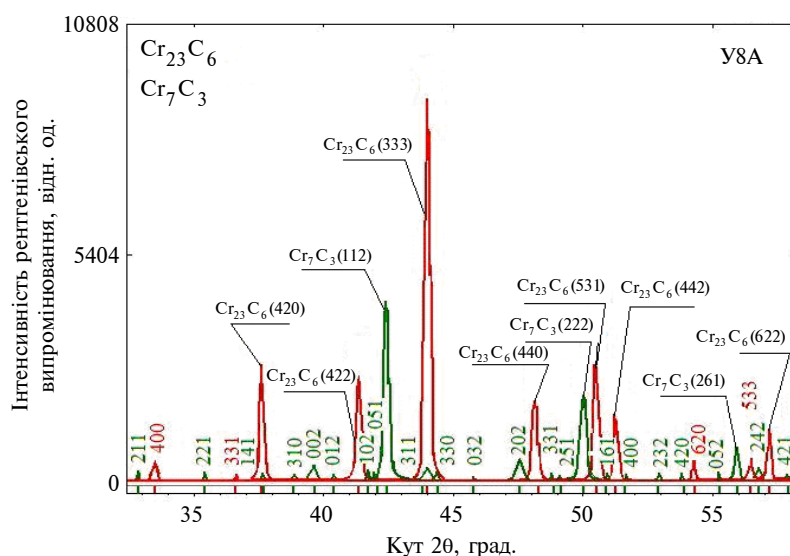


Рис. 1. Дифрактограма хромованої сталі У8А

16,0 мкм, товщина поверхневого шару на основі сполуки FeCr – 2,0–3,0 мкм. Мікротвердість отриманого покриття становить: для Cr_{23}C_6 – 18,0–16,2 ГПа, для Cr_7C_3 – 16,0–12,5 ГПа. Отримані дані корелюють з даними інших авторів [8].

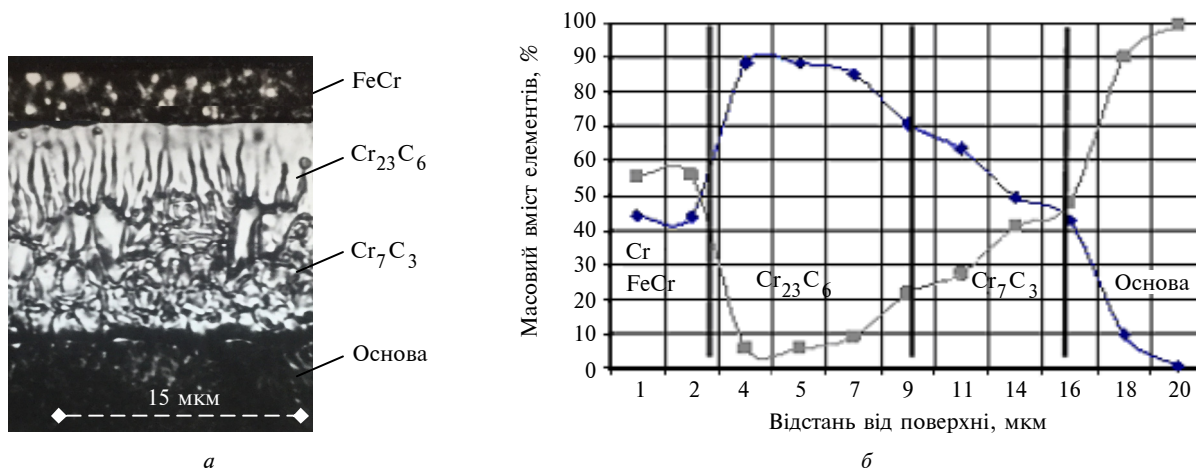
Мікрорентгеноспектральним аналізом був вивчений хімічний склад покриттів такого типу (рис. 2). Встановлено, що у фазі FeCr , яка, відповідно до результатів рентгеноструктурного аналізу, розміщена на зовнішній стороні покриття, розчиняється 44,5–44,0 % за масою хрому, 55,5–55,9 % за масою заліза. Безпосередньо під нею розміщується шар карбідів, масовий вміст хрому в яких плавно знижується від 91,4 % на поверхні до 47,6 % на межі поділу покриття–основа. Масовий вміст заліза в покритті, навпаки, збільшується від 8,7 до 52,4 %. Крім

того, за прийнятими умовами насичення спостерігається незначна дифузія хрому в основу сталі (0,6 % за масою на межі поділу покриття–основа).

Комплексні покриття, отримані титаноалітуванням попередньо хромованої сталі, згідно з даними мікроструктурного аналізу (рис. 3), складаються з шарів, які ідуть паралельно фронту дифузії, з чітко вираженою межею поділу покриття–основа. Відповідно до результатів мікроструктурного, мікрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного аналізів та вимірювання мікротвердості в покритті можна визначити три зони, які ідентифікували за кольором, наявністю

кількох фазових складових та мікротвердості. Металографічно перша гетерогенна зона складається з фази світло-сірого кольору з окремими сірими включеннями, друга – майже безпористий шар сірого кольору, третя – світло-сіра зона, з дрібними порами, які розміщені на межі поділу покриття–матриця. Слід зазначити, що наявність пор не призводить до відшарування покриття.

Дифрактограми, зняті з поверхні зразків з покриттям досліджуваного типу (рис. 4), фіксують наявність дифракційних максимумів, характерних для інтерметалідів титану і алюмінію та титану і хрому: Ti_3Al ($a = 0,5800$ нм, $c = 0,4648$ нм), Ti_3Al_2 , TiCr_2 ($a = 0,6948$ нм). Зняття з поверхні покриття 15 мкм супроводжується зменшенням інтенсивності дифракційних

Рис. 2. Мікроструктура зламу хромованої сталі У8А (електронний мікроскоп, $\times 1400$) (а) та розподіл хімічних елементів по перерізу покриття (б)

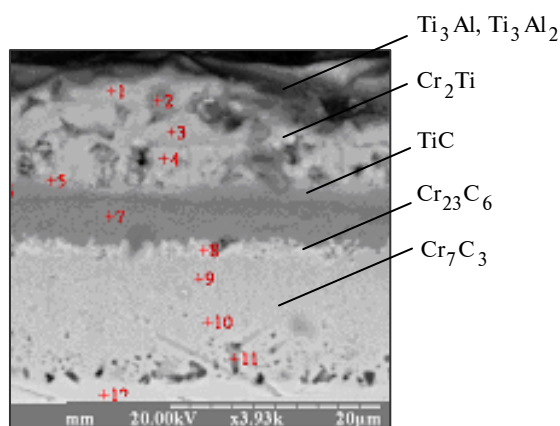


Рис. 3. Мікроструктура хромованої сталі У8А після комплексного титаноалітування

максимумів, які належать фазі Ti_3Al , і зникненням піків, що відповідають фазі $TiCr_2$, однак з'являються піки на основі карбиду титану TiC ($a = 0,4326$ нм) і карбідів хрому Cr_7C_3 ($a = 0,7029-0,7052$ нм, $b = 1,2127-1,2141$ нм, $c = 0,4521-0,4524$ нм), $Cr_{23}C_6$ ($a = 1,0645$). Слід відзначити також, що періоди ґратки визначених сполук покриття деякою мірою відрізняються від табличних даних [11], що, напевно, пов'язано із взаємним легуванням отриманих фаз як елементами, що входять до складу покриття, так і залізом основи.

Загальна товщина хромотитаноалітованого покриття становить 27,5–30,5 мкм. Товщина першого шару (на основі інтерметалідів Ti_3Al , Ti_3Al_2 , Cr_2Ti) – 11,0–12,5 мкм, другого (на основі карбиду титану TiC) – 5,5–6,0 мкм, третього (на основі карбідів хрому Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$) – 11,0–12,0 мкм. Визначене зменшення товщини шару

карбідів хрому після титаноалітування хромованої сталі У8А (з 15,0–16,0 до 11,0–12,0 мкм) свідчить про те, що вивільнений із карбідної фази хром бере участь в утворенні сполуки Cr_2Ti , а вуглець формує шар карбиду титану TiC . Таким чином, змінюючи товщину шару карбідів хрому й умови титаноалітування, можна сприяти утворенню покриттів з різними товщиною, складом та властивостями.

Мікрорентгеноспектральним аналізом був вивчений хімічний склад покриттів (рис. 5). Встановлено, що у фазі Ti_3Al , яка, відповідно до результатів рентгеноструктурного аналізу, розміщена на зовнішній стороні покриття, розчиняється 10,9–8,98 % за масою алюмінію, 47,01–44,9 % за масою титану, 28,74–32,9 % за масою хрому, 13,35–13,22 % за масою заліза. Безпосередньо під цією фазою розміщується зона, яка має підвищений масовий вміст хрому – 66,04 %, масовий вміст інших елементів у ній становить: титану – 24,34 %, алюмінію – 5,73 %, заліза – 3,89 %. Згідно з діаграмою стану $Ti-Cr$, таке співвідношення компонентів відповідає фазі Лавеса $TiCr_2$ [11]. Під цим шаром розміщена зона, яка, відповідно до даних рентгеноструктурного аналізу, відповідає фазі на основі карбиду титану, що містить 79,83–80,0 % за масою титану, масовий вміст інших елементів у ній різко знижується і становить 0,16–0,12 % алюмінію та 0,26 % хрому. Слід зазначити, що ця зона не містить заліза. З просуванням углиб у покритті спостерігається зона з підвищеним масовим вмістом заліза – 42,25 %, масовий вміст хрому в ній становить 44,00 %, титану – 10,99 %, алюмінію – 2,77 %, що від-

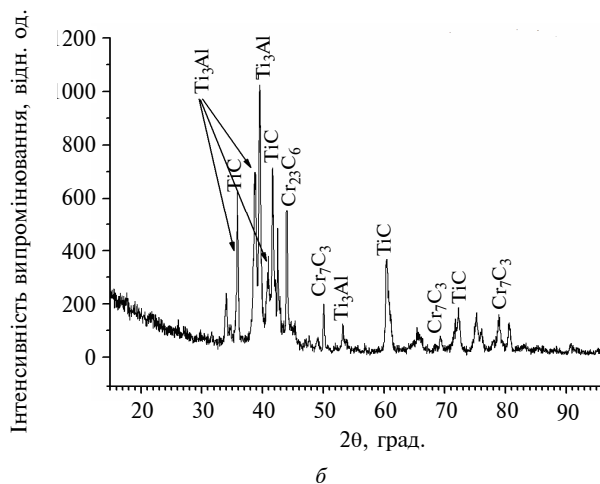
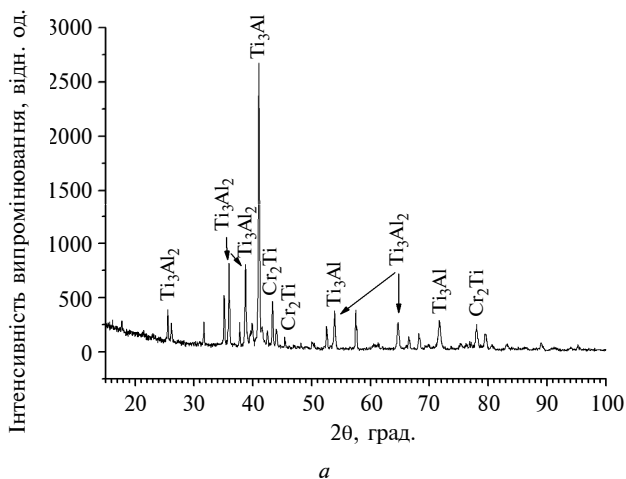


Рис. 4. Дифрактограма хромованої сталі У8А після комплексного титаноалітування: а – поверхня, б – на відстані 15 мкм від поверхні

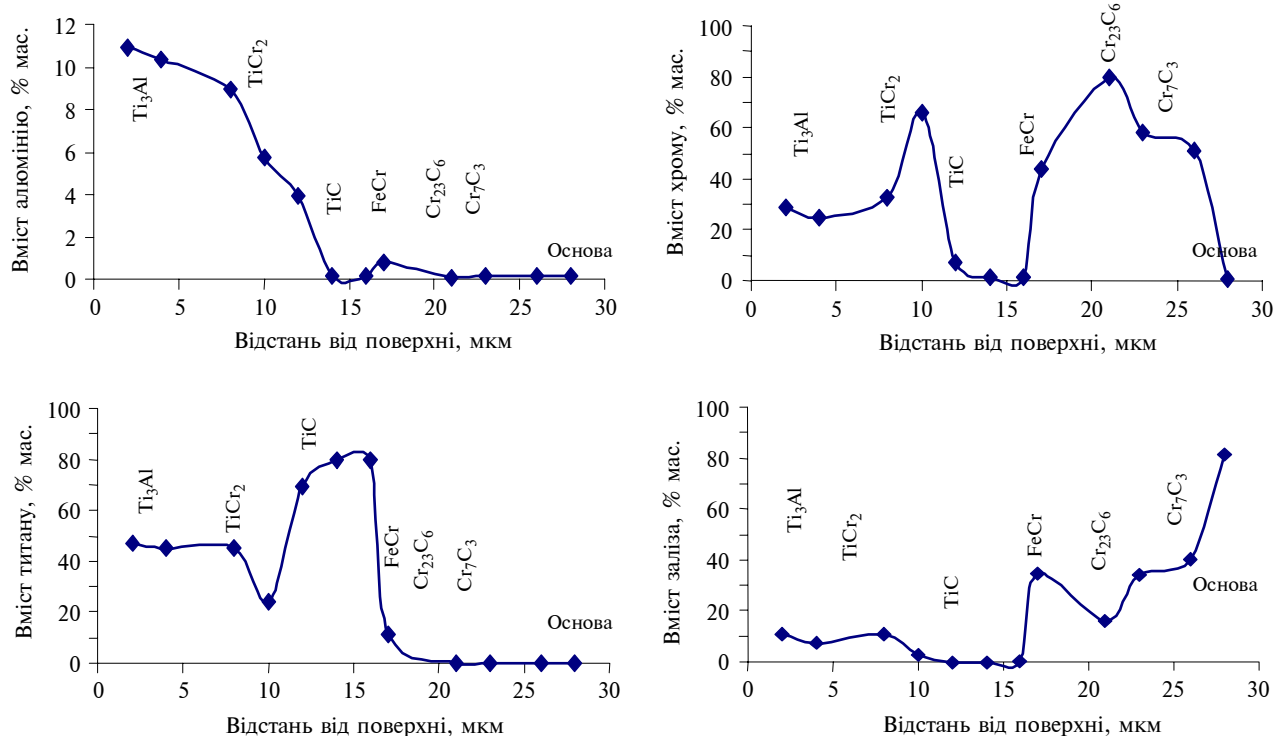


Рис. 5. Розподіл елементів по перерізу покриттів, хромтитаноалітованих на сталі У8А

повідляє фазі $FeCr$, яка залишилась після попереднього хромування. До основи примикає зона, в якій титан, алюміній майже зникають (0,12–0,03 % за масою титану, 0,07–0,17 % за масою алюмінію), а масовий вміст хрому та заліза різко підвищуються – 80,04–50,98 та 19,77–48,88 % відповідно, що відповідає фазам на основі карбідів хрому Cr_7C_3 , $Cr_{26}C_6$. Спостерігається також деяка дифузія елементів покриття в основу (0,17 % за масою алюмінію, 0,03 % за масою титану, 0,81 % за масою хрому), що буде підвищувати адгезію покриття. Слід зазначити, що отримані дані добре узгоджуються з результатами рентгеноструктурного аналізу.

Мікротвердість зовнішнього шару на основі інтерметалідів становить 5,8 ГПа на поверхні і поступово збільшується до 10,0 ГПа в напрямку основи. Безпосередньо під цим шаром розміщено шар на основі карбиду титану з мікротвердістю 30,0–34,0 ГПа. До основи примикає шар на основі карбідів хрому, твердість якого становить 22,0 ГПа біля межі з карбідом титану і поступово знижується до 14,0 ГПа, що перевищує значення мікротвердості хромованого шару. Це зумовлено зміною хімічного складу дифузійних шарів за рахунок їх взаємного легування. Слід відзначити, що такий розподіл мікротвердості по перерізу покриття при-

зводить до зменшення внутрішніх напружень у покритті і сприяє підвищенню його зчеплення з основою.

Результати проведених корозійних досліджень показали, що одержані хромтитаноалітовані покриття підвищують жаростійкість сталі У8А при окисненні її в умовах природної аерації та корозійну стійкість у різних промислових важливих агресивних середовищах. Так, після 8 год окиснення за температури 800 °С зміни маси хромтитаноалітованих зразків майже не спостерігалось, у той час як однокомпонентні хромові та титанові покриття мають переважно невисоку жаростійкість за температур вище 800 °С [2]. Зміна маси зразків, що відбувається внаслідок їх окиснення на повітрі за температури 800 °С, збільшується при переході від хромтитаноалітованих до хромованих і титанованих зразків і найбільшою є у зразків із вихідної сталі У8А. На поверхні окиснених покриттів фіксується поява невеликих за товщиною оксидних плівок хрому, титану, алюмінію (Cr_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3), що, як відомо, загальмовують процеси дифузії в поверхневому шарі при високотемпературному окисненні [3, 5].

Корозійна стійкість отриманих хромтитаноалітованих покриттів у досліджуваних середовищах підвищується в такому напрямі: 5 % H_2SO_4 – 20 % HNO_3 – 10 % CH_3COOH –

Таблиця. Захисні властивості хромтитаноалітованих дифузійних покриттів, нанесених на сталь У8А (температура – 25 °С)

Середовище/час	Масовий показник швидкості корозії сталі без покриття, K_M^c , г/м ² год	Масовий показник швидкості корозії сталі з покриттям, $K_M^п$, г/м ² год	Коефіцієнт гальмування корозії γ	Ступінь захисту Z, %
5 % H ₂ SO ₄ , 48 год/96 год	129,001/97,388	12,600/32,250	10,24/6,12	90/84
20 % HNO ₃ , 48 год	280,332	0,314	891,46	99
10 % CH ₃ COOH, 48 год/96 год/114 год	10,934/10,300/9,745	0,297/0,167/0,150	38,70/61,76/65,03	97/98/98
5 % HOOC(CH ₂) ₄ COOH, 48 год/96 год/ 114 год/552 год	0,470/0,420/ 0,400/0,778	0,192/0,107/ 0,090/0,020	2,46/3,92/ 4,47/38,56	59/74/ 77/97
H ₂ O тех., 48 год/96 год/ 114 год/552 год	0,073/0,062/ 0,057/0,053	0,018/0,012/ 0,010/0,005	4,16/5,28/ 5,57/10,89	76/81/ 82/91
10 % Na ₂ CO ₃ , 48 год/96 год/ 114 год/552 год	0,007/0,005/ 0,004/0,003	0,030/0,016/ 0,013/0,005	0,24/0,34/ 0,34/0,48	Стимулює корозію

5 % HOOC(CH₂)₄COOH – 10 % Na₂CO₃ – технічна вода. Отримані покриття, залежно від часу випробувань, підвищують стійкість сталі в 891 раз у розчині 20 % HNO₃, у 38–65 разів у розчині 10 % CH₃COOH, у 2–38 разів у насиченому розчині HOOC(CH₂)₄COOH, у 4–10 разів у водопровідній воді та в 6–10 разів у розчині 5 % H₂SO₄, однак збільшують у 2–5 разів швидкість корозії сталі У8А у розчині 10 % Na₂CO₃ (таблиця).

Це зумовлено як зміною характеру депляризації корозійного процесу (від водневої та воднево-окиснювальної відповідно у розчинах сульфатної та нітратної кислот до переважно кисневої у воді, розчинах соди та органічних кислот), так і різним впливом аніонів (активуючим – іонів HSO₄⁻, SO₄⁻, пасивуючим – іонів NO₃⁻, CO₃²⁻ і органічних кислот) на анодне розчинення металів.

Захисна дія комплексних хромтитаноалітованих покриттів у розчинах сульфатної, нітратної та оцтової кислот пов'язана насамперед із наявністю в їх поверхневих шарах алюмінію, який за рахунок високої перенапруги при виділенні водню та схильності до пасивації проявляє більшу, ніж сталь, корозійну стійкість у цих середовищах. Але алюміній має невисоку корозійну стійкість у лужних електролітах та розчинах вуглекислого натрію, що зумовлює стимулювання процесу корозії у 10 % Na₂CO₃.

При тривалих корозійних випробуваннях, які супроводжуються руйнуванням більш глибоких поверхневих шарів, захисні властивості покриттів забезпечують, вірогідно, сполуки титану (TiC, Cr₂Ti), оскільки титан та його сплави мають більш високу корозійну стійкість, ніж алюміній у розчинах більшості мінеральних та органічних кислот [8]. У зв'язку з цим захисна дія отриманих дифузійних шарів в усіх досліджуваних розчинах (крім сірчаної кислоти) підвищується. Зниження їх захисних властивостей у розчині 5 % H₂SO₄ зумовлене низькою перенапругою водню на карбідах хрому та утворенням після розчинення поверхневих шарів на основі сполук алюмінію, титану та хрому гальванічної пари, в якій залізо виступає в ролі анода. Це призводить до зниження захисних властивостей покриттів та підвищення з часом швидкості їх корозії в розчинах сірчаної кислоти.

Висновки

Дифузійне титаноалітування попередньо хромованої сталі У8А дає змогу отримати на її поверхні комплексні хромтитаноалітовані покриття із загальною товщиною 27,5–30,5 мкм, які мають високу корозійну стійкість у різних промислово важливих водних розчинах. Мікротвердість першої зони на основі інтерметалідів Ti₃Al, Ti₃Al₂, Cr₂Ti становить 5,8 ГПа на поверхні і поступово збільшується до 10,0 ГПа в напрямку

основи, другої – карбиду титана TiC – 30,0–34,0 ГПа, третьої на основі карбідів хрому – Cr_7C_3 , $Cr_{26}C_6$ – 22,0 ГПа біля межі з карбідом титану і поступово знижується до 14,0 ГПа на межі поділу покриття–основа. Запропоновані в роботі методи нанесення покриттів і матеріали не дорогі, не дефіцитні. Технологічні прийоми легко реалізуються в умовах сучасного виробництва України. Це дає можливість рекоменду-

вати їх для використання в умовах одночасного впливу на металеві вироби механічних навантажень та дії агресивних середовищ.

У перспективі доцільно дослідити жаростійкість та зносостійкість отриманих покриттів для рекомендації їх подальшого використання за умов одночасної дії високих температур, агресивних середовищ і тертя та зношування.

Список літератури

1. Структура и фазовый состав поверхностного слоя на сталях после алитирования / А.В. Голованов, А.Г. Радюк, В.И. Славов и др. // *Материаловедение и термическая обработка металлов*. – 2008. – № 6. – С. 42–45.
2. Титаноалітування технічного заліза в закритому реакційному просторі в середовищі хлору / В.Г. Хижняк, М.В. Аршук, Д.В. Лесечко, Т.В. Лоскутова // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. – 2009. – № 4. – С. 92–96.
3. Ворошин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А. Теория и технология химико-термической обработки. – М.: Новое знание, 2010. – С. 220–280.
4. Дифузійне хромоалітування попередньо хромованої сталі У8А / Т.В. Лоскутова, С.С. Левашов, І.С. Погребова, В.Г. Хижняк // *Фізико-хімічна механіка матеріалів. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів*. – 2012. – № 8. – С. 250–255.
5. Жаростійкість комплексних покриттів, отриманих хромоалітуванням попередньо хромованої сталі У8А / Т.В. Лоскутова, В.Г. Хижняк, С.С. Левашов, І.С. Погребова // *Вісник СевНТУ. Сер. Механіка, енергетика, екологія*. – 2012. – № 120. – С. 151–155.
6. Choquet P.A., Naylor E.R., Rapp R.A. Simultaneous chromizing and aluminizing of iron-base alloys // *J. Mater. Sci.* – 1989. – 121. – P. 413–418.
7. Geib F.G., Rapp R.A. Simultaneous chromizing-aluminizing coatings of low-alloy steels by halide-activated pack-cementation process // *Oxidation of Metals*. – 1993. – 40. – P. 213–228.
8. Карбідні покриття на сталях і твердих сплавах / В.Ф. Лоскутов, В.Г. Хижняк, І.С. Погребова та ін. – Тернопіль: Лілея, 1998. – С. 85–130.
9. Земсков Г.В., Коган Р.Л. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – С. 55–73.
10. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: Металлургия, 1985. – С. 120–123.
11. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – Т. 2. – С. 604–607.
12. Жаростійкість і корозійна стійкість комплексних хромоалітованих покриттів на титановому сплаві ВТ6 / І.Я. Смокович, І.С. Погребова, Т.В. Лоскутова, В.Г. Хижняк // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. – 2013. – № 1. – С. 84–88.
13. Справочник химика / Под ред. Б.П. Никольский. – М.: Химия, 1968. – С. 880–887.

References

1. A.V. Golovanov et al., “The structure and phase composition of outer zone of steel after aluminizing”, *Materialovedenye i Termicheskaya Obrabotka Metallov*, no. 6, pp. 42–45, 2008 (in Russian).
2. V.G. Khyzhnyak et al., “Titanium aluminizing of technical iron in the closed reactionary space in the chlorine medium”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 4, pp. 92–96, 2009 (in Ukrainian).
3. L.G. Voroshnyn et al., *Theory and Technology of Thermochemical Treatment*. Moscow, Russia: Novoe Znaniye, 2010, pp. 220–280 (in Russian).
4. T.V. Loskutova et al., “Diffusion chrome aluminizing of prechromized steel U8A”, *Fizyko-Khimichna Mekhanika Materialiv. Problemy Koroziji ta Protikorozijnoho Zakhystu Materialiv*, no. 8, pp. 250–255, 2012 (in Ukrainian).
5. T.V. Loskutova et al., “Heat resistance of complex coatings obtained by chrome aluminizing of pre chromized steel U8A”, *Visnyk SevNTU. Ser. Mekhanika, Enerhetyka, Ekolohiya*, no. 120, pp. 151–155, 2012 (in Ukrainian).
6. P.A. Choquet et al., “Simultaneous chromizing and aluminizing of iron-base alloys”, *J. Mater. Sci.*, vol. 121, pp. 413–418, 1989.
7. F.G. Geib and R.A. Rapp, “Simultaneous chromizing-aluminizing coatings of low-alloy steels by halide-activated pack-cementation process”, *Oxidation of Metals*, vol. 40, pp. 213–228, 1993.
8. V.F. Loskutov et al., *Carbide Coatings on Steel and Hard Alloys*. Ternopil, USSR: Lileya, 1998, pp. 85–130 (in Ukrainian).

9. G.V. Zemskov and R.L. Kogan, *Multicomponent Diffusion Saturation of Metals and Alloys*. Moscow, USSR: Metallurgiya, 1978, pp. 55–73 (in Russian).
10. M.Y. Holdshiteyn *et al.*, *Special Steel*. Moscow, USSR: Metallurgiya, 1985, pp. 120–123 (in Russian).
11. *Phase Equilibrium Diagrams of Binary Metallic Systems*, N.P. Lyakisheva, Ed, vol. 2. Moscow, Russia: Mashynostroenie, 1997, pp. 604–607 (in Russian).
12. I.Ya. Smokovich *et al.*, “Heat resistance and corrosion resistance of complex chromium+aluminum diffusion coatings on titanium alloy VT6”, *Naukovi Visti NTUU KPI*, no. 1, pp. 84–88, 2013 (in Ukrainian).
13. *Directory Himika*, B.P. Nicholas, Ed. Moscow, USSR: Khimiya, 1968, pp. 880–887 (in Russian).

Т.В. Лоскутова

БУДОВА І ЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПЛЕКСНИХ ХРОМОТИТАНОАЛІТОВАНИХ ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ У8А

Проблематика. Сучасні металеві вироби працюють в жорстких умовах одночасної дії високих виробничих швидкостей, підвищених температур, агресивних середовищ, і тому матеріали, з яких вони виготовлені, повинні мати комплексні захисні властивості: поєднувати опір зносу, високу тріщиностійкість, хімічну стабільність за підвищених температур, високу корозійну стійкість. Незважаючи на велику кількість відомих типів покриттів та методів їх отримання, наукові аспекти створення покриттів з широким комплексом захисних властивостей розроблені недостатньо.

Мета досліджень. Дослідження фазових, хімічних складів, структури і захисних властивостей покриттів на сталі У8А, отриманих поєднанням дифузійного хромування з подальшим титаноалітуванням.

Методика реалізації. Покриття наносили на поверхню сталі У8А. На першому етапі проводили газове хромування за температури 1050 °С упродовж 4 год; на другому – титаноалітування порошковим методом за температури 1050 °С протягом 4 год. Рентгеноструктурні, мікрорентгеноспектральні, металографічні, дюраметричні дослідження були виконані з використанням відомих методів фізичного матеріалознавства. Корозійні випробування проводили масометричним методом.

Результати досліджень. Показано, що в результаті насичення на поверхні сталі формуються багат шарові покриття, що складаються з карбідів хрому, титану, інтерметалідів титану, алюмінію, хрому. Встановлено, що мікротвердість багат шарових покриттів на основі карбідів хрому, карбідів титану, інтерметалідів становить 5,8–34,0 ГПа. Показано, що нанесення комплексних хромтитаноалітованих покриттів підвищує стійкість сталі У8А у багатьох агресивних середовищах.

Висновки. Комплексне хромтитаноалітування сталі У8А дає змогу отримати на її поверхні покриття загальною товщиною 27,5–30,5 мкм, яке забезпечує високу корозійну стійкість у різних промислово важливих водних агресивних розчинах.

Ключові слова: сталь У8А; дифузійні покриття; хромування; титаноалітування; корозійна стійкість; мікротвердість.

Т.В. Лоскутова

СТРОЕНИЕ И ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПЛЕКСНЫХ ХРОМТИТАНАЛИТИРОВАННЫХ ДИФУЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА СТАЛИ У8А

Проблематика. Современные металлические изделия работают в жестких условиях одновременного воздействия высоких производственных скоростей, повышенных температур, агрессивных сред, и поэтому материалы, из которых они изготовлены, должны иметь комплексные защитные свойства: сочетать сопротивление износу, высокую трещиностойкость, химическую стабильность при повышенных температурах, высокую коррозионную стойкость. Несмотря на большое количество известных типов покрытий и методов их получения, научные аспекты создания покрытий с широким комплексом защитных свойств разработаны недостаточно.

Цель исследований. Исследование фазового, химического составов, структуры и защитных свойств покрытий на стали У8А, полученных путем объединения диффузионного хромирования с последующим титаналитированием.

Методика реализации. Покрытие наносили на поверхность стали У8А. На первом этапе проводили газовое хромирование при температуре 1050 °С в течение 4 ч. На втором – титаналитирование порошковым методом при температуре 1050 °С в течение 4 ч. Рентгеноструктурные, микрорентгеноспектральные, металлографические, дюраметрические исследования были выполнены с использованием известных методов физического материаловедения. Коррозионные испытания проводили массометрическим методом.

Результаты исследований. Показано, что в результате насыщения на поверхности стали формируются многослойные покрытия, состоящие из карбидов хрома, титана, интерметаллидов титана, алюминия, хрома. Установлено, что микротвердость многослойных покрытий на основе карбидов хрому, карбидов титана, интерметаллидов составляет 5,8–34,0 ГПа. Показано, что нанесение комплексных хромтитаналитированных покрытий повышает стойкость стали У8А во многих агрессивных средах.

Выводы. Комплексное хромтитаналитирование стали У8А позволяет получить на ее поверхности покрытие общей шириной 27,5–30,5 мкм, которое обеспечивает высокую коррозионную стойкость в различных промышленно важных водных агрессивных растворах.

Ключевые слова: сталь У8А; диффузионные покрытия; хромирование; титаналитирование; коррозионная стойкость; микротвердость.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
5 жовтня 2015 року