

**ВПЛИВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕННЯ НА КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ ХРОМОСИЛІЦІЙОВАНОЇ СТАЛІ 45****І. С. Погребова**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**ORCID: 0000-0003-4247-3968****К. В. Янцевич**

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України

**ORCID: 0000-0002-3975-7727**

В роботі досліджено захисні властивості хромосиліцидних дифузійних покриттів, нанесених на сталь 45, отриманих газовим методом. Процес проводили впродовж 6 годин у замкнутому реакційному середовищі при тиску активної газової фази ( $10^4$  Па) та температурі 1323К. В якості вихідних реагентів для нанесення покриттів використовували порошки хрому, кремнію та чотирихлористий вуглець. Рентгеноструктурним пошаровим аналізом встановлено, що на поверхні сталі 45 дифузійний шар складається з двох зон – зовнішній до  $(10-15) \cdot 10^{-6}$  м, яка містить карбіди хрому  $Cr_{23}C_6$  і  $Cr_7C_3$  та внутрішній  $(60-80) \cdot 10^{-6}$  м, яка складається з твердого розчину кремнію та хрому  $\alpha$ -Fe. Загальна товщина покриттів складає 100 мкм. Мікротвердість – 19,5 ГПа. Встановлено, що хромосиліцидні покриття, отримані газовим методом, мають високу жаростійкість до температури 1000°C. Показано, що окисленні при температурах 700–800°C дифузійні хромосиліцидні покриття володіють більш високою корозійною стійкістю у різних агресивних середовищах та більш стійким пасивним станом, ніж неокислені. Ступінь захисту досягає 99,92–99,99%. На основі проведених досліджень було запропоновано новий спосіб нанесення дифузійних покриттів на поверхню вуглецевих сталей з подальшим окисленням. Отримані запропонованим способом хромосиліцидні покриття дозволяють рекомендувати їх для практичного використання в умовах одночасного впливу на вироби з вуглецевих сталей агресивних середовищ та підвищених температур.

**Ключові слова:** хромосиліціювання, покриття, жаростійкість, окислення, корозія.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** При вирішенні проблеми підвищення довговічності та надійності деталей машин, інструментів велике значення мають пошук і розробка нових захисних покриттів.

Відомо [1], що захисні покриття за характером їх формування поділяються на дві групи: дифузійні та пошарові покриття.

Покриття дифузійного типу – це покриття, склад яких є продукт взаємодії насичуючого середовища з металом основи. Їх отримують насиченням поверхні металу одним або декількома елементами для утворення захисного шару.

Покриття пошарового типу отримують напиленням на поверхню металу жаростійкого або корозійностійкого матеріалу (газотермічне напилення). Найбільш широко в техніці застосовують покриття дифузійного типу. Особливу увагу заслуговує дослідження властивостей та закономірностей формування дифузійних шарів, утворених декількома елементами (хромом і титаном, хромом і алюмінієм, хромом та кремнієм, молібдену та кремнію тощо), що дозволяє отримати більш високі експлуатаційні характеристики в порівнянні з насиченням одним елементом [2–7].

Для захисту від окислення металоконструкцій широко застосовують окалиностійкі покриття [6–8], що відрізняються простотою та зручністю технологічного нанесення їх на різні поверхні деталей. Шляхом підбору необхідних насичуючих компонентів можна значно підвищити жаростійкість захисного шару покриття. Також, можна додати, що при отриманні жаростійких покриттів необхідно, щоб покриття було здатним до самозаліковування, а також нечутливим до

невеликих пошкоджень з метою запобігання руйнуванню матеріалу основи, процес отримання покриття має бути простим.

Підвищення жаростійкості та корозійної стійкості вуглецевих сталей може бути досягнуто за рахунок нанесення на їх поверхню покриттів на основі молібдену та кремнію, ніобію та кремнію, ванадію та кремнію, хрому та кремнію, які утворюють на поверхневі захисні плівки оксидів [1, 3, 5].

Останні роки найпоширенішим типом захисних високотемпературних покриттів для виробів, які працюють в окислювальних середовищах, є силіцидні покриття, що здатні формувати на поверхні самозаліковуючу оксидну плівку [9–13]. Підвищити пластичність при високих температурах силіцидного шару можливо за рахунок насичення титаном. За рахунок одночасного насичення кремнієм та титаном утворюються щільні плівки з оксиду титану та кремнію.

З метою підвищення окалиностійкості розглядаються захисні покриття, на основі силіциду молібдену [9]. В роботі [10] відмічено, що силіцидний шар з товщиною 100 мкм захищає молібденовий сплав від високотемпературної корозії протягом 20 год, але після зазначеного часу відбувається руйнування його через утворення тріщини на поверхні. Але практичного застосування у промисловості ці покриття не знайшли. Це пов'язано з недостатністю простих способів нанесення цих покриттів.

На основі проведеного аналізу вітчизняних та закордонних досліджень можна зробити висновок, що підвищити термін дії деталей машин та вузлів можливо за рахунок отримання їх на поверхні захисного шару здатного до самозаліковування.

В даній роботі метою було дослідити захисні властивості хромосиліцидних дифузійних покриттів, нанесених на вуглецеву сталь 45.

Хромосиліціювання – відомий спосіб хіміко-термічної обробки, який незважаючи на перспективність його використання не набув до цього часу широкого застосування в промисловості [3, 5]. Це пов'язано з недостатністю простих способів нанесення дифузійних покриттів, відсутністю цілеспрямованих досліджень їх складу, структури та захисних властивостей.

В роботі нами було запропоновано спосіб отримання хромосиліцидних покриттів, який за своїми властивостями (жаростійкістю, корозійною стійкістю) зовсім не поступаються іншим хромосиліцидним покриттям, які були отримані іншими методами (наприклад електролізним), та мають високу жаростійкість порівняно з силіцидними покриттями.

Відповідно до поставленої мети нами було необхідно вирішити такі завдання: дослідити закономірності високотемпературного окиснення хромосиліцидних покриттів на поверхні сталі та можливість додатково підвищити корозійну стійкість покриттів за рахунок ізотермічного окиснення, розробити рекомендації з їх практичного використання.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Дифузійні хромосиліцидні покриття наносили на сталь 45 газовим методом у спеціально розробленій в НТУУ «КПІ імені І. Сікорського» установці, яка мала спеціальну реакційну камеру нової конструкції [14]. В конструкції робочої камери при нанесенні хромосиліцидного покриття вперше було застосовано реакційний стакан з графітовим дном, що дало можливість підвищити активність газової фази та пришвидшити процес формування дифузійних шарів. Процес проводили впродовж 6 годин у замкнутому реакційному середовищі при тиску активної газової фази ( $10^4$  Па) та температурі 1323К. В якості вихідних реагентів для нанесення покриттів використовували порошки хрому, кремнію та чотирихлористий вуглець.

Дослідження мікроструктури покриттів проводили на оптичному мікроскопі Neophot 21. Рентгеноструктурний аналіз проводили на установці ДРОН-3-М у монохроматичному  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні. Хімічний склад покриттів визначали мікрорентгеноспектральним аналізом використанням енергодисперсійної приставки Energy 200 до скануючого електронного мікроскопа CamScan 4D з програмою обробки результатів INCA 200, похибка вимірювань  $\pm 0,3\%$ .

Жаростійкість покриттів вивчали у спеціально розробленій шахтній печі (при температурах ізотермічної витримки 700–100°C та часі окиснення 1–6 годин). Дослідження проводили з використанням аналітичних терезів марки АДВ-200 та терморегулятора марки ЕПД-120. За даними масометричних досліджень будували залежності  $\Delta m/s - \tau$ , де  $\Delta m$  – зміна маси зразків з поверхні (S) за час випробування  $\tau$  [15, 17].

Корозійні випробування проводили масометричним методом на зразках зі сталі та сталі з хромосиліцидними покриттями у 10% розчинах сульфатної, соляної кислот на протязі 24–576 годин. Корозійну стійкість сталі та покриттів оцінювали масометричним показником корозії  $\text{Км}(\text{г}/\text{м}^2\text{год})$ , захисну дію покриттів – коефіцієнтом гальмування корозії ( $\gamma$ ) та ступенем їх захисту (Z, %) [15, 16].

Для визначення жаростійкості та корозійної стійкості покриттів здійснювали не менше п'яти паралельних випробувань, за якими розраховувалось середнє значення масометричного показника швидкості корозії. Розходження результатів паралельних випробувань не більше 6–10%.

Електрохімічну поведінку сталі і сталі з покриттями досліджували методом зняття поляризаційних кривих на потенціостаті ПП-50. 1.1 в потенціодинамічному режимі з використанням програматора ПР-8.

Встановлено, що комплексні покриття за участю хрому та кремнію, нанесені на поверхню сталі 45, згідно з даними мікроструктурного аналізу (рис. 1), складаються з двох зон, які розташовані паралельно до поверхні насичення.

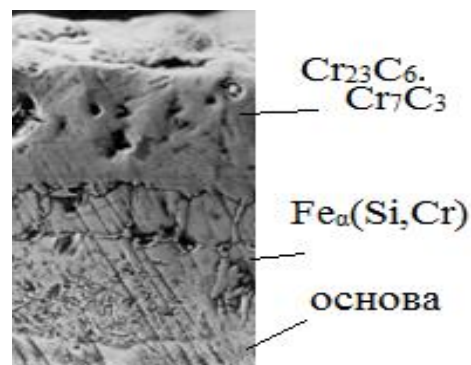


Рисунок 1 – Мікроструктура сталі 45 з комплексним дифузійним покриттям на основі хрому та кремнію ( $\times 500$ )

Загальна товщина покриттів становить 90,0–100,0 мкм. Рентгеноструктурним пошаровим аналізом встановлено, що поверхні сталі 45 дифузійний шар складається з двох зон – зовнішній до  $(10-15) \cdot 10^{-6}$  м, яка містить карбіди хрому  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (переважно  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) та внутрішній  $(60-80) \cdot 10^{-6}$  м, що представляє собою твердий розчин кремнію та хрому у  $\alpha$ -залізі. Мікротвердість складала 19,5 ГПа.

Мікрорентгеноспектральним аналізом встановлено, що на зовнішній зоні покриття, на основі карбідів хрому ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ) міститься до 52,87% ат. хрому, крім того в ній розчиняється невелика кількість кремнію (до 0,15% ат.). Безпосередньо під нею розташовується зона на основі  $\alpha$ -заліза, яка містить 9,87–5,55% ат. хрому, 8,15–3,89% ат. кремнію [18].

Дослідження на жаростійкість і корозійну стійкість сталі 45 та хромосиліцидній сталі 45

виявили захисну дію покриттів до окислення при підвищених температурах, вплив покриттів на корозію сталі в різних агресивних середовищах.

Для вивчення кінетики окиснення хромосиліцидних покриттів за дослідними даними нами були побудовані залежності збільшення маси зразків від часу окиснення при температурах 700–800°C. Кінетичні залежності окислення сталі 45 та хромосиліцидної сталі 45 представлені на рис. 2.

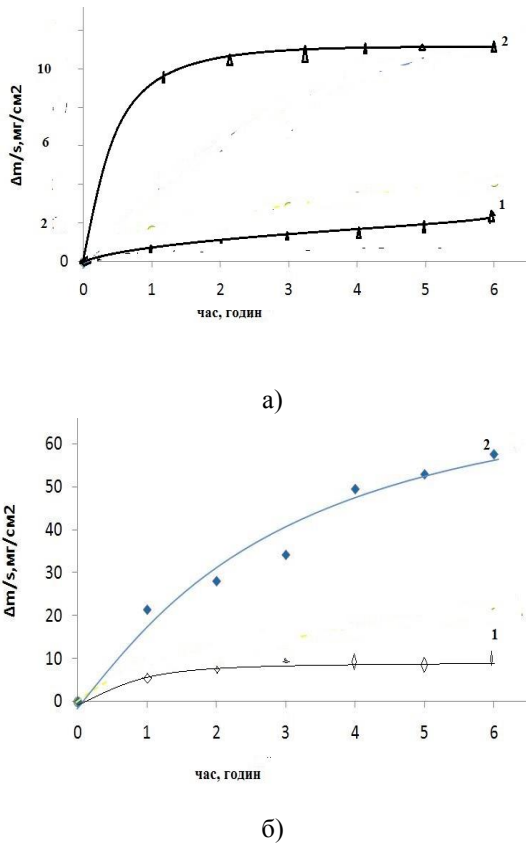


Рисунок 2 – Кінетичні криві окислення сталі 45 (2) та сталі 45 з дифузійними хромосиліцидними покриттями (1) при температурі 700°C (а) та 800°C (б)

Як можна побачити з наведених експериментальних даних, залежності збільшення маси зразків від часу ізотермічної витримки окиснення при всіх вказаних температурах мають параболічний характер, що може свідчити про дифузійний механізм процесу окиснення досліджених покриттів.

Проведені масометричні дослідження показали, що швидкість окислення покриттів, які були нанесені на сталь 45, після однієї години випробувань складає, відповідно, ( $\text{mg}/(\text{cm}^2)$ ): при температурі 800°C – 1,64; при температурі 1000°C – 3,74, а вже після шести годин випробувань швидкість їх окислення складає, відповідно, при температурі 800°C – 2,42; при температурі 1000°C – 7,64.

Невисока швидкість окислення хромосиліцидних покриттів може бути обумовлена утворенням захисних шарів хрому, що входить до складу твердого розчину покриття на сталі 45,

невеликим вмістом заліза у їх карбідних фазах, значно більшою часткою у них карбіду  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ , який має більш високу стійкість до окислення, ніж карбід  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  [2, 4].

Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що на поверхні сталі 45 з комплексними хромосиліцидними покриттями фіксується поява оксидних плівок хрому ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) та  $\text{SiO}_2$  які, як відомо, можуть загальмовувати процеси дифузії в поверхневому шарі при високотемпературному окисленні [2]. Дійсно, встановлено, що вміст кремнію у дифузійному шарі значно підвищує жаростійкість сталі [12].

Отже, хромосиліцидування сталі 45 приводить до підвищення її жаростійкості при температурах 700–800°C у 5–25 разів.

Високотемпературне ізотермічне окислення хромосиліцидних покриттів підвищує їх захисну дію при кислотній корозії сталі та підвищує схильність до пасивації. Так, неокислені хромосиліцидні покриття зменшують швидкість корозії сталі 45 у 10%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при 20°C у 2,22 рази, а окислені на протязі 3 годин при 700°C у 152 рази (таблиця 1).

Таблиця 1 – Корозійна стійкість хромосиліцидних покриттів окислених при різних температурах на сталі 45 у розчинах 10%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  та 10%  $\text{HCl}$

Температура, °C	$K_m, 10^{-3}$ $\text{кг}/\text{м}^2\text{год}$	$\gamma$	Z, %
10 % $\text{H}_2\text{SO}_4$			
–	15,2	2,2	51,1
700	0,12	152	99,98
800	0,095	170	99,99
10 % $\text{HCl}$			
–	13,1	2,0	50,2
700	0,18	120	99,98
800	0,092	142	99,99

Час корозійних випробувань 48 годин  
 $K_m(\text{г}/\text{м}^2\text{год})$  для сталі 45 у 10%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  та 10 %  $\text{HCl}$  – 30,25; 26,87

Наведені результати масометричних досліджень перебувають у задовільному співвідношенні з даними візуального огляду досліджуваних зразків. На поверхні сталі 45 з хромосиліцидним покриттям після витримки їх у 10% розчинах сірчаної та соляної кислот утворюються продукти корозії у вигляді темної плівки, а згодом і відшарування, а також спостерігається зміна кольору розчину до зеленого. Це пов'язано з переходом у розчин легуючого компоненту – хрому та утворенням іонів  $\text{Cr}^{3+}$  ( $\text{Cr}=\text{Cr}^{3+}+3e$ ). Зразки з окисленими хромосиліцидними покриттями після корозійних випробувань у даних агресивних середовищах залишаються неушкодженими, вкриваються блискучою плівкою, а візуальних змін не було зафіксовано, навіть при тривалих випробуваннях (до 576 годин).

Проведені вольтамперометричні випробування у 10% розчині  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (рисунок 3) показали, що

окислені хромосиліцидні покриття при температурі 700–800°C на протязі 2–3 годин характеризуються більшою схильністю до пасивації, ніж неокислені. Потенціал вільної корозії сталі (E<sub>c</sub>) термічно окислених покриттів зміщується в більш позитивну сторону, струм корозії знижується на два-три порядки ( $i_c=10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>). Здатність покриттів до пасивування пов'язано, як було наведено раніше, з утворенням на поверхні покриття суцільного шару оксиду Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Наявність кремнію 8,15–7,2% сприяє гальмуванню розчиненню заліза – основи та хрому з поверхневого шару покриття.

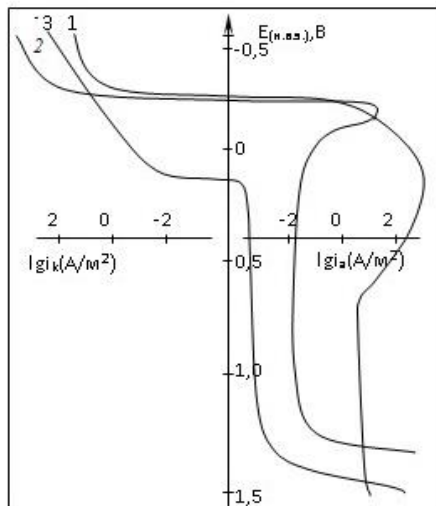


Рисунок 3 – Поляризаційні криві сталі 45 (1) та сталі 45 з хромосиліцидними покриттями (3) та з покриттями, окисленими при температурі 700°C на протязі 1 години (2) у 10% розчині H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

На основі проведених досліджень було запропоновано новий спосіб нанесення покриттів на поверхню вуглецевих сталей з подальшим окисленням [20]. При застосуванні цієї технології на поверхні вуглецевих сталей з хромосиліцидними покриттями утворюється захисна плівка, яка здатна підвищити корозійну стійкість у розчинах кислот.

Таким чином, хромосиліцидні покриття мають високу жаростійкість до 1000°C, а додатково підвищити корозійну стійкість покриттів можливо за рахунок ізотермічного окислення. Хромосиліцидні покриття можна рекомендувати для захисту деталей машин, які працюють при підвищених температурах у різних агресивних середовищах.

**ВИСНОВКИ.** Дифузійні покриття, отримані при комплексному насиченні сталі 45 хромом і кремнієм газовим методом склалися з двох зон – зовнішньої, яка містить карбіди хрому Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> та внутрішньої, що представляє собою твердий розчин кремнію та хрому α-залізі. Загальна товщина покриття – 100 мкм. Мікротвердість складала 19,5 ГПа.

Насичення сталі 45 хромом та кремнієм веде до зростання жаростійкості до температури 1000°C за

рахунок формування на поверхні захисних покриттів оксидних плівок Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та SiO<sub>2</sub>, які гальмують проникнення кисню вглиб матриці.

Термічно окислені хромосиліцидні покриття підвищують корозійну стійкість сталі 45 у кислих водних середовищах у 50–170 раз. Показано, що окислені хромосиліцидні покриття при температурах 700–800°C характеризуються більшою схильністю до пасивації, ніж неокислені.

Високий комплекс фізико-хімічних властивостей хромосиліцидних покриттів, отриманих запропонованим способом, дозволяє рекомендувати їх для практичного використання в умовах одночасного впливу на вироби з вуглецевих сталей агресивних середовищ та підвищених температур.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Дубинин Г. Н. Диффузионное хромирование сплавов. Москва : Машиностроение, 1984. 452 с.
2. Лоскутов В. Ф., Хижняк В. Г., Погребова І. С., Горбатюк Р. М., Бочар І. Й. Карбідні покриття на сталях і твердих сплавах. Тернопіль : Лілея, 1998. 144 с.
3. Ворошнин Л. Г., Пантелеенко Ф. И., Константинов В. М. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО. Минск : ФТИ; Новополоцк : ПГУ. 2001. 148 с.
4. Лоскутова Т. В., Сігова В. І., Хижняк В. Г., Лоскутов В. Ф. Комплексні карбідні покриття на металах і сплавах : Монографія. Суми : Вид-во СумДУ, 2009. 190 с.
5. Земсков Г. В., Коган Р. Л. Многокомпонентные диффузионное насыщение металлов и сплавов. Москва : Metallurgy, 1978. 208 с.
6. Иванова Т. И., Соколов А. Г., Конев С. К., Сивенков А. В. Покрытия для деталей машиностроения. 1989. 89 с.
7. Лобанов М. Л., Кардонина Н. И., Россина Н. Г., Юровских А. С. Защитные покрытия : учеб. пособие. Екатеринбург, 2014. 200 с.
8. Бялбжеский А. В., Цирлин М. С., Красилов Б. И. Высокотемпературная коррозия и защита сверхтупоплавких металлов. Москва : Атомиздат, 1977. 224 с.
9. He Naoran, Xu Junqiang, Miao Xin, Liu Qi, Bo Xinwei. Preparation, Modification and Oxidation Resistance of Silicide Coatings on Mo and Mo Alloys Substrates : a Review. *Materials Reports*. 2019. V. 33 №19. P. 3227–3235.
10. Zhang Yong, Wfng Xiongyu, Yu Jing, Cao Weicheng, Feng Pengfa, Jiao Shengjie. Advances in Surface Modification of Molybdenum and Molybdenum Alloys at Elevated Temperature. *Materials Reports*. 2017. V. 31. № 7. P. 83–87.
11. Дзядикувич Ю. Шляхи підвищення жаростійкості виробів із тупоплавких металів від високотемпературного окислення. *Українська наука : минуле сучасне, майбутнє*. 2008. № 13. С. 20–28.
12. Liang A. N., Changqi G., Jiangang Jia, Qin Ma. Review on Anti-Oxidation Coatings of Metal

Silicide. *Journal of Chinese Society for Corrosion and protection*. 2021. 41. 3. P. 298–306.

13. Gaillard-Allemand B., Vilasi M., Belmonte T., Steinmetz J. Silicide Coatings for Niobium: Mechanisms of Chromium and Silicon Codeposition by Pack Cementation. *Materials Science Forum*. 2001. P. 727–734.

14. Лоскутов В.Ф., Погребова І.С., Лоскутова Т.В., Янцевич К.В., Нестеренко Ю.В. Спосіб нанесення карбідних покриттів. Патент України на винахід 50193 А ; власник НТУУ «КПІ» ; опубл. 15.10.2002. Бюл. № 10.

15. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов : учебное пособие. Москва : Альянс, 2014. 472 с.

16. Стоєв П. І., Литовченко С. В., Гірка І. О., Грицина В. Т. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник. Харків, 2020. 216 с.

17. Мальцева Г. Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии : Учеб. пособие / Под

ред. д.т.н., проф. С. Н. Виноградова. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. 212 с.

18. Лоскутов В. Ф., Погребова І. С., Бобіна М. М., Янцевич К. В., Добровольский В. Д., Карпец М. В. Вибір раціонального складу вихідних реагентів та режимів ведення процесу при хромосиліційованні вуглецевих сталей. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2007. № 3. Т. 8. С. 618–621.

19. Алексеенко Л. Е., Княжева В. М., Ширин Н. Г. Влияние примесных элементов на формирование карбидохромовых покрытий на их коррозионно-защитные свойства. *Защита металлов*. 1998. Т. 34. №4. С. 360–365.

20. Лоскутов В. Ф., Чернега С. М., Погребова І. С., Янцевич К. В. Патент України на винахід 62739А. МПК С23С12/00. Спосіб нанесення силіцидних покриттів на поверхню сталей / власник НТУУ «КПІ» ; заявл. 14.05.2003. Бюл. № 12.

## INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE OXIDATION ON CORROSION RESISTANCE OF CHROMOSYLCATED STEEL 45

**I. Pogrebova**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**ORCID: 0000-0003-4247-3968**

**C. Iantsevitch**

E. O. Paton Electric Welding Institute, NASU

**ORCID: 0000-0002-3975-7727**

**Purpose.** Improving the heat resistance and corrosion resistance of carbon steels can be achieved by applying to their surface coatings based on molybdenum and silicon, niobium and silicon, vanadium and silicon, chromium and silicon, which form on the surface protective films of oxides. In this work properties of chromosilicide diffusion coatings applied to steel 45 obtained by the gas method are investigated. **Methodology.** Diffusion chromosilicide coatings were applied to steel 45 by the gas method. The process was carried out for 6 hours in a closed reaction medium at the pressure of the active gas phase ( $10^6$  Pa) and a temperature of 1323K. In the work was studied phase and chemical compositions of diffusion coatings. The heat resistance of the coatings was studied in a specially designed shaft furnace. Corrosion tests were performed by massometric method. The electrochemical behavior of steel and coated steel was studied by the method of removing polarization curves on the potentiostat PI-50.1.1. **Results.** X-ray diffraction layer analysis revealed that the diffusion layer on the surface of steel 45 consists of two zones - the outer (10–15)  $10^{-6}$  m, which contains chromium carbides  $Cr_{23}C_6$  and  $Cr_7C_3$  and inner (60–80)  $10^{-6}$  m, which consists of a solid solution of silicon and chromium  $\alpha$ -Fe. The total thickness of the coatings is 100  $\mu$ m. Microhardness – 19.5 GPa. It was found that chromosilicide coatings obtained by the gas method have high heat resistance up to 1000 °C. It is shown that diffusion chromosilicide coatings oxidized at temperatures of 700–800°C have higher corrosion resistance in various aggressive environments and a more stable passive state than non-oxidized ones. The degree of protection reaches 99,92–99,99%. Based on the research, a new method of diffusion coatings on the surface of carbon steels with subsequent oxidation was proposed. **Practical value.** Chromosilicide coatings can be recommended for the protection of machine parts operating at elevated temperatures in various aggressive solution. References 20, tables 1, figures 3.

**Key words:** chromosilicon, coating, heat resistance, oxidation, corrosion.

### REFERENCES

1. Dubinin, G. N. (1984). Diffuzionnoe hromirovanie splavov [Diffusion chromium of alloys]. Moskva: Mashinostroenie, 452 p. [in Russian]

2. Loskutov, V. F., Hizhnyak, V. G., Pogrebova, I. S., Gorbatyuk, R. M., Bochar, I. Y. (1998). Karbidni pokryttya na stalyah i tverdyh splavah [Carbide coatings on steels and hard alloys]. Ternopil, 144 p. [in Ukraine]

3. Voroshnin, L. G., Panteleenko, F. I., Konstantinov, V. M. (2001). Teoriya i praktika polucheniya zaschitnykh pokrytyiy s pomoschyu HTO [Theory and practice of obtaining protective coatings using chemical treatment]. Minsk : FTI; Novopolotsk: PGU. 148 p. [in Russian]

4. Loskutova, T. V., Sigova, V. I., Hizhnyak, V. G., Loskutov, V. F. (2009). Kompleksni karbidni pokryttya na metalah i splavah [Complex carbide coating on metals and alloys.]. Sumy, 190 p. [in Ukraine]

5. Zemskov, G. V., Kogan, R. L. (1978). Mnogokomponentnyie diffuzionnoe nasyischenie metallov i splavov [Multicomponent diffusion saturation of metals and alloys]. Moskva, 208 p. [in Russian]

6. Ivanova, T. I., Sokolov, A. G., Konev, S. K., Sivenkov, A. V. (1989). Pokrytyiya dlya detaley mashinostroeniya [Coatings for machine building parts]. 89 p. [in Russian]

7. Lobanov, M. L., Kardonina, N. I., Rossina, N. G., Yurovskih, A. S. (2014). Zashchitnyie pokryitiya: ucheb. Posobie [Protective coatings: textbook allowance]. Ekaterinburg, 200 p. [in Russian]
8. Byalobzheskiy, A. V., Tsirlin, M. S., Krasilov, B. I. (1977). Vvisokotemperaturnaya korroziya i zashchita sverhtugoplavkikh metallov [High-temperature corrosion and protection of ultra-refractory metals]. Moskva: Atomizdat, 224 p. [in Russian]
9. He, Haoran, Xu, Junqiang, Miao, Xin, Liu, Qi, Bo, Xinwei. (2019). Preparation, Modification and Oxidation Resistance of Silicide Coatings on Mo and Mo Alloys Substrates: a Review. *Materials Reports*. V. 33 (19). pp. 3227–3235.
10. Zhang, Yong, Wfng, Xiongyu, Yu, Jing, Cao, Weicheng, Feng, Pengfa, Jiao, Shengjie. (2017). Advances in Surface Modification of Molybdenum and Molybdenum Alloys at Elevated Temperature. *Materials Reports*. V. 31 (7). pp. 83–87.
11. Dzyadikevich, Yu. (2008). Shlyahi pidvischennya zharostiykosti virobiv iz tugoplavkikh metaliv vid visokotemperaturnogo okislennya [Ways to increase the heat resistance of refractory metals from high temperature oxidation]. *Ukrayinska nauka: minule suchasne, maybutne*. Issue 13. pp. 20–28.
12. Liang, A. N., Changqi, G., Jianguang, Jia, Qin, Ma. (2021). Review on Anti-Oxidation Coatings of Metal Silicide. *Journal of Chinese Society for Corrosion and protection*. 41(3). pp. 298–306.
13. Gaillard-Allemand, B., Vilasi, M., Belmonte, T., Steinmetz, J. (2001). Silicide Coatings for Niobium: Mechanisms of Chromium and Silicon Codeposition by Pack Cementation. *Material Science Forum*. pp. 727–734.
14. Loskutov, V. F., Pogrebova, I. S., Loskutova, T. V., Yantsevich, K. V., Nesterenko, Yu. V. (2002). Sposib nanesennya karbidnih pokrittiv [The method of applying carbide coatings]. Patent Ukrayini na vinahid 50193 A; vlasnik NTUU «KPI»; opubl. 15.10.2002. Byul. 10. [in Ukraine]
15. Zhuk, N. P. (2014). Kurs teorii korrozii i zashchityi metallov: uchebnoe posobie [Course in the theory of corrosion and protection of metals: a textbook]. Moskva: Alyans, 472 p. [in Russian]
16. Stoev, P. I., Litovchenko, S. V., Girka, I. O., Gritsina, V. T. (2020). Himichna korozija ta zahist metaliv: navchalniy posibnik [Chemical corrosion and protection of metals: a textbook]. Harkiv, 216 p. [in Ukrainian]
17. Maltseva, G. N. (2000). Korroziya i zashchita oborudovaniya ot korrozii: Ucheb. Posobie. Pod red. d.t.n., prof. S. N. Vinogradova [Corrosion and protection of equipment against corrosion: Textbook allowance / Ed. Dr. Sc. (Eng.), prof. S. N. Vinogradov]. Penza, 212 p. [in Russian]
18. Loskutov, V. F., Pogrebova, I. S., Bobina, M. M., Yantsevich, K. V., Dobrovolskiy, V. D., Karpets, M. V. (2007). Vibir ratsionalnogo skladu vihidnih reagentiv ta rezhimiv vedennya protsesu pri hromosilitsiyuvanni vugletsevih staley [Selection of rational composition of starting reagents and modes of process during chromosilication of carbon steels]. *Fizika i hmiya tverdogo tlla*. 3 (8). pp. 618–621. [in Ukrainian]
19. Alekseenko, L. E., Knyazheva, V. M., Shirin, N. G. (1998). Vliyanie primesnyih elementov na formirovanie karbidohromovyih pokryitiy na ih korrozionno-zashchitnyie svoystva [Influence of impurity elements on the formation of carbidochrome coatings on their corrosion protection properties]. *Zashchita metallov*. 34 (4). pp. 360–365. [in Russian]
20. Loskutov, V. F., Chernega, S. M., Pogrebova, I. S., Yantsevich, K. V. (2003). Sposib nanesennya siltsidnih pokrittiv na poverhnyu staley [Method of applying silicide coatings on steel surface]. Patent Ukrayini na vinahid 62739A. / vlasnik NTUU «KPI»; zayavl. 14.05.2003. Byul. 12. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 11.12.2021