УДК 669.586:620.193

Сухий К. М., Поліщук Ю. В., Бутиріна Т. Є., Грищак Д. В., Проценко В. С.

КОРОЗІЙНИЙ ЗАХИСТ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ БАГАТОШАРОВИМИ ЕЛЕКТРООСАДЖЕНИМИ ПОКРИТТЯМИ Zn–Fe–Cr

Анотація. *Розглянуто можливість застосування багатошарових електроосаджених покриттів Zn–Fe–Cr для корозійного захисту сталевих деталей та конструктивних елементів озброєння і військової техніки. Покриття формували послідовним осадженням цинку, заліза та хрому. Встановлено вплив товщини шарів на корозійну стійкість системи покриття в 3%-му розчині NaCl. Оптимальним виявилося покриття складу Zn 9 мкм–Fe 3 мкм–Cr 0,5 мкм, яке поєднувало протекторний захист цинку, функціональну роль проміжного шару заліза та захисно-декоративні властивості хромового шару.*

Ключові слова: *електроосадження; багатошарове покриття; цинк–залізо–хром; корозійний захист; військова техніка.*

Abstract. *The possibility of using multilayer electrodeposited Zn–Fe–Cr coatings for corrosion protection of steel parts and structural elements of weapons and military equipment is considered. The coatings were formed by sequential electrodeposition of zinc, iron, and chromium. The effect of layer thickness on the corrosion resistance of the coating system in 3% NaCl solution was determined. The Zn 9 μm–Fe 3 μm–Cr 0.5 μm coating was found to provide the best combination of sacrificial protection by zinc, the functional role of the intermediate iron layer, and protective and decorative properties of the chromium layer.*

Keywords: *electrodeposition; multilayer coating; zinc–iron–chromium; corrosion protection; military equipment.*

Корозійне руйнування сталевих деталей є одним із чинників, що негативно впливають на довговічність металевих конструкцій, вузлів та агрегатів, особливо за експлуатації в умовах підвищеної вологості та дії хлоридвмісних середовищ. Тому під час технічного обслуговування і ремонту озброєння та військової техніки важливим завданням є забезпечення ефективного захисту сталевих поверхонь від корозії та відновлення захисних властивостей деталей.

Перспективним способом вирішення цієї проблеми є застосування електроосаджених багатошарових покриттів, у яких окремі шари виконують різні функції [1]. У запропонованій системі Zn–Fe–Cr цинковий шар забезпечує протекторний захист сталевої основи, залізний шар виконує функцію проміжного шару, необхідного для нанесення хромового покриття, а хромовий шар забезпечує захисні та поверхневі властивості. Такий підхід дає змогу поєднати переваги різних металів в одній системі покриття.

Для формування багатошарового покриття на сталевій основі послідовно електроосаджували цинк, залізо та хром. Цинк осаджували з лужного цинкатного електроліту, залізо – зі слабкокислого цитратного електроліту на основі Fe(III) [2], а хром – із сульфатно-форміатного електроліту на основі Cr(III) [3]. Використання електролітів на основі тривалентного хрому дає змогу уникнути застосування високотоксичних сполук Cr(VI).

Корозійно-захисні властивості отриманих покриттів оцінювали у 3% водному розчині NaCl за природної аерації. Визначали швидкість корозії гравіметричним методом, контролювали зміну корозійного потенціалу та реєстрували поляризаційні криві. Додатковим критерієм захисної здатності був час до появи перших ознак червоної корозії сталевої основи.

Перший, цинковий, шар товщиною 9 мкм забезпечував протекторний захист сталевої основи. Водночас нанесення безпосередньо на цинк залізного шару не призводило до підвищення корозійної стійкості: для системи Zn–Fe червона корозія з'являлася раніше, ніж для моношарового цинкового покриття. Це свідчить про те, що проміжний шар заліза має виконувати насамперед технологічну функцію, забезпечуючи можливість адгезії якісного фінішного хромового шару.

Нанесення хромового шару суттєво змінювало корозійну поведінку системи. Для всіх досліджених варіантів Zn–Fe–Cr швидкість корозії була нижчою, ніж для двошарової системи Zn–Fe. Найкращі результати отримано для проміжного шару заліза товщиною 3 мкм. При його товщині 1 мкм захисні властивості погіршувалися, ймовірно, внаслідок недостатньої суцільності та підвищеної пористості шару. Збільшення товщини до 5 мкм також супроводжувалося зниженням корозійної стійкості, що може бути пов'язано зі зростанням внутрішніх напружень і схильності покриття до утворення тріщин.

Для хромового шару оптимальною в дослідженому діапазоні виявилася товщина 0,5 мкм. При товщині 0,1 мкм фінішний шар, імовірно, не є достатньо суцільним, тоді як збільшення його товщини до 1,0 мкм супроводжується певним зниженням захисних властивостей, що може бути пов'язано з підвищенням пористості та тріщинуватості покриття.

Електрохімічні дослідження дають змогу пояснити механізм захисної дії багатошарової системи. Корозійні потенціали покриттів цинк–залізо–хром знаходилися в інтервалі від –0,85 до –0,65 В. За цих умов хром та залізо перебувають переважно у пасивному стані, тоді як цинк може розчинятися через дефекти верхніх шарів. Таким чином, навіть за наявності пор та локальних дефектів у верхніх шарах цинк виконує роль протектора і забезпечує електрохімічний захист сталевої основи.

Найкращі результати отримано для тришарової системи Zn (9 мкм) + Fe (3 мкм) + Cr (0,5 мкм) (табл.). Час до появи червоної корозії для цього покриття становив 480 год за встановлених умов випробувань. Отримані результати показують, що оптимізація не тільки складу, але й товщини окремих електроосаджених шарів має принципове значення для забезпечення необхідної корозійної довговічності покриття.

Таблиця

Вплив товщини електроосаджених шарів на захисні властивості багатошарового покриття

Товщина цинкового шару, мкм	Товщина залізного шару, мкм	Товщина хромового шару, мкм	Час до появи червоної корозії, год
9	1	0,5	336
	3	0,5	480
	5	0,5	240
	3	0,1	360
	3	1,0	445

З практичної точки зору запропонована система може розглядатися як перспективний підхід до захисту сталевих поверхонь під час технічного обслуговування та ремонту озброєння і військової техніки. Електроосадження дає можливість формувати покриття безпосередньо на металевій поверхні, а варіювання умов процесу – регулювати товщину та властивості окремих шарів. Застосування багатошарової системи функціонально розподіляє завдання між компонентами покриття: цинк забезпечує протекторний захист, залізо – необхідний проміжний шар, а хром – захист поверхні та її експлуатаційні властивості.

Отже, використання оптимізованих багатошарових електроосаджених покриттів Zn–Fe–Cr може бути одним із напрямів удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту озброєння і військової техніки, пов'язаним із підвищенням корозійної довговічності сталевих деталей. Подальша практична оцінка такого підходу має передбачати випробування покриттів на конкретних деталях і конструктивних елементах військової техніки в умовах, наближених до реальної експлуатації.

Висновки

Показано перспективність застосування багатошарових електроосаджених покриттів Zn–Fe–Cr для підвищення корозійної стійкості сталевої основи.

Встановлено, що найбільш ефективною з досліджених є система Zn (9 мкм) + Fe (3 мкм) + Cr (0,5 мкм), яка поєднує протекторний захист цинкового шару із захисною дією фінішного хромового шару.

Виявлено, що зміна товщини проміжного залізного та фінішного хромового шарів суттєво впливає на корозійно-захисні властивості покриття. Оптимізація товщини шарів є необхідною умовою отримання максимальної корозійної довговічності.

Запропонована система Zn–Fe–Cr може розглядатися як перспективний напрям удосконалення технічного обслуговування і ремонту сталевих деталей та конструктивних елементів озброєння і військової техніки шляхом підвищення їх корозійної стійкості.

Список використаних джерел:

1. Aliofkhazraei M., Walsh F.C., Zangari G., Kockar H., Alper M., Rizal C., Magagnin L., Protsenko V., Arunachalam R., Rezvanian A., Moein A., Assareh S., Allahyarzadeh M.H. Development of electrodeposited multilayer coatings: a review of fabrication, microstructure, properties and applications // Appl. Surf. Sci. Adv. – 2021. – Vol. 6. – Art. No. 100141. https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100141.

2. Protsenko V.S., Danilov F.I. The corrosion-protective traits of electroplated multilayer zinc-iron-chromium deposits // Met. Finish. – 2010. – Vol. 108. – No. 5. – P. 28-32. https://doi.org/10.1016/S0026-0576(10)80106-0.

3. Protsenko V., Danilov F. Kinetics and mechanism of chromium electrodeposition from formate and oxalate solutions of Cr(III) compounds // Electrochim. Acta. – 2009. – Vol. 54. – P. 5666-5672. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.04.072.

Сухий Костянтин Михайлович *– доктор технічних наук, професор, ректор Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, інд. 49010, e-mail: k.m.sukhyi@ust.edu.ua ORCID https://orcid.org/0009-0000-8217-0350.*

Поліщук Юлія Валеріївна *– кандидат технічних наук, доцент, директор наукового центру інноваційних матеріалів і технологій, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, інд. 49010, e-mail: yu.v.polishchuk@ust.edu.ua ORCID https://orcid.org/0000-0003-1552-4117.*

Бутиріна Тетяна Євгенівна *– кандидат хімічних наук, доцент, докторант кафедри фізичної хімії, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, інд. 49010, e-mail: t.e.butyrina@ust.edu.ua ORCID https://orcid.org/0000-0002-0619-6783.*

Грищак Дмитро Вікторович *– кандидат технічних наук, генеральний директор Державного підприємства "Конструкторське бюро "Південне" ім. М. К. Янгеля", 49008, вул. Криворізька 3, м. Дніпро, інд. 49010, e-mail: info@yuzhnoya.com ORCID https://orcid.org/0009-0009-8428-6520.*

Проценко Вячеслав Сергійович *– доктор хімічних наук, професор, професор кафедри фізичної хімії Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, інд. 49010, e-mail: v.s.protsenko@ust.edu.ua ORCID https://orcid.org/0000-0002-5959-0426.*

Sukhyy Kostiantyn Myhkailovych *– Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of the Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 2 Lazariana St., Postcode 49010, e-mail: k.m.sukhyi@ust.edu.ua ORCID https://orcid.org/0009-0000-8217-0350.*

Polishchuk Yuliya Valeriivna *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific Center for Innovative Materials and Technologies, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 2 Lazariana St., Postcode 49010, e-mail: yu.v.polishchuk@ust.edu.ua ORCID https://orcid.org/0000-0003-1552-4117.*

Butyrina Tetyana Evhenivna *– Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Doctor of Sciences candidate, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 2 Lazariana St., Postcode 49010, e-mail: t.e.butyrina@ust.edu.ua ORCID https://orcid.org/0000-0002-0619-6783.*

Hryshchak Dmytro Viktorovych *– Candidate of Technical Sciences, General Director of the Complex of the Yuzhnoye State Design Office (Yuzhnoye SDO), 49008, Dnipro, 3 Kryvorizka St., Postcode 49010, e-mail: info@yuzhnoya.com ORCID https://orcid.org/0009-0009-8428-6520.*

Protsenko Vyacheslav Sergiyovych *– Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at the Department of Physical Chemistry, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, 2 Lazariana St., Postcode 49010, e-mail: v.s.protsenko@ust.edu.ua ORCID https://orcid.org/0000-0002-5959-0426.*