УДК 539.234:621.793.1 DOI: https://doi.org/10.37434/as2026.03.03

# КОРОЗІЙНА ТРИВКІСТЬ МАГНЕТРОННИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ FeAl

**Н.В. Вігілянська, К.В. Янцевич, О.В. Волос, В.Г. Задоя, Б.Т. Ткаченко**

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: pewinataliya@gmail.com

У роботі досліджено електрохімічну поведінку FeAl-покриттів із різним вмістом алюмінію, напилених методом магнетронного осадження, у різних агресивних середовищах. Покриття осаджували за допомогою модернізованої вакуумної установки ВУ-1Б із використанням двох мішеней заліза та алюмінію. Покриття наносили на нержавку сталь 08Х18Н10Т завтовшки 3 мкм. У результаті нанесення одержано покриття, основною фазою в яких є інтерметалід FeAl. Електрохімічну поведінку покриттів досліджували у потенціодинамічному режимі у 3 %-му розчині хлориду натрію та у 10 %-му розчині сульфатної кислоти при температурі 18…20 °С. Струм корозії магнетронних FeAl-покриттів на порядок вищий у сольовому розчині, ніж у розчині сульфатної кислоти, що свідчить про вищу корозійну тривкість розроблених покриттів у сольовому розчині. Показано, що покриття з вмістом алюмінію 55 ат. % (Fe55Al) мають вищу корозійну тривкість у порівнянні з покриттями Fe40Al та навіть перевищують тривкість нержавкої сталі 12Х18Н10Т. Підвищена тривкість Fe55Al покриття пояснюється наявністю в покритті лише інтерметалідної фази FeAl та відсутністю фази α-Fe, наявність якої в покритті Fe40Al сприяє збільшенню інтенсивності корозійних процесів. Отримані результати свідчать про доцільність використання магнетронних покриттів Fe55Al в якості захисного шару для деталей, що працюють в умовах впливу агресивних середовищ. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 2.

*Ключові слова: магнетронне осадження, покриття, корозійна тривкість, електроліт*

**Вступ.** Одним із актуальних напрямків підвищення експлуатаційних властивостей виробів є створення нових матеріалів, зокрема на основі інтерметалідів [1]. До перспективних інтерметалідних систем, які вирізняються комплексом унікальних фізико-хімічних, механічних і захисних властивостей, відносяться інтерметаліди на основі FeAl. Ці матеріали мають меншу питому масу, ніж багато інших жароміцних сталей та сплавів, і можуть з успіхом замінити коштовні інтерметалідні системи на основі нікелю, а саме, Ni–Al та Ni–Ti. Високі антикорозійні характеристики матеріалів на основі алюмінідів заліза забезпечують їхню тривкість у різних агресивних середовищах [2]. Але в якості конструкційних матеріалів алюміниди заліза у повному обсязі не знайшли свого застосування у промисловості внаслідок відсутності відносно простого та не дуже коштовного способу їх отримання. У зв'язку з цим, інтерметаліди заліза FeAl являють собою перспективний матеріал для розробки захисних покриттів.

Для отримання покриттів на основі FeAl застосовують методи газотермічного напилення, а саме: плазмово-дугове, детонаційне, електродугове, високошвидкісне газополуменеве [3–7]. Одним із методів напилення покриттів системи FeAl у вигляді тонких плівок є магнетронне осадження [8–12]. Такий спосіб формування інтерметалідних FeAl-покриттів дозволяє формувати щільні плівки з підвищеними захисними властивостями (тривкість до зносу, високотемпературного окиснення, корозійної тривкості).

**Метою роботи** було дослідити електрохімічну поведінку інтерметалідних FeAl-покриттів, отриманих методом магнетронного осадження, у різних агресивних середовищах.

**Об'єкти досліджень і методика експерименту.** Магнетронні FeAl-покриття осаджували з використанням модернізованої вакуумної установки ВУ-1БС, яка була оснащена модулем магнетронного розпилення на постійному струмі, що складається з двох магнетронів (рис. 1).

На першому магнетроні було встановлено мішень, яка поєднувала складові заліза та алюмінію, на другому – алюмінієву мішень. Покриття наносили на сталь 08Х18Н10Т. Склад покриття досліджували за допомогою Оже-спектрометра JUMP 9500 F. Електрохімічні дослідження покриттів проводили у модельних розчинах 10 %-му розчині $H_2SO_4$ та у 3 %-му розчині NaCl при температурі 18…20 °С [13]. Для вивчення механізму корозії сталі з покриттями в агресивних розчинах був використаний метод вольтамперометрії в потенціодинамічному режимі на потенціостаті П-5827М при швидкості розгортки 2 мВ/с [13]. Потенціали вимірювали відносно насиченого хлоридсрібного електрода порівняння. За даними поляризаційних вимірювань визначали потенціал ($E_c$) і струм корозії ($i_c$) для сталі з покриттями [14].

**Результати експерименту та їхнє обговорення.** Режими осадження покриттів, їхні характеристики наведено в табл. 1. Встановлено [9], що на поверхні зразків з покриттями сформувалася щільна структура без пор.

Дослідження кінетики електродних потенціалів показало, що значення електродних потенціалів зразків із захисними покриттями при зануренні в електроліти стабілізуються через 20…30 хв. Стаціонарний потенціал для Fe40Al- та Fe55Al-покриттів

Авторське право © Автор(и)
© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026
Це стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

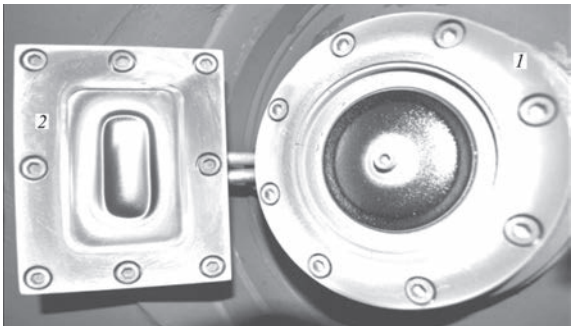


Рис. 1. Розташування магнетронів у вакуумній камері установки ВУ-1БС: *1* – магнетрон зі складної мішені Al + Fe; *2* – магнетрон із алюмінієвої мішені

у сольовому розчині стабілізується на рівні –0,36; –0,34 В та в розчині 10 % сульфатної кислоти –0,30; –0,24 В відповідно. Характерні поляризаційні криві зразків з покриттями наведено на рис. 2.

Аналіз поляризаційних кривих (рис. 2) показав, що хід кривих і характер електрохімічної поведінки покриттів із різним вмістом алюмінію як для сольового електроліту, так і для кислотного приблизно однаковий. Корозійний процес відбувається за катодним контролем. Результати електрохімічних випробувань магнетронних покриттів у різних електролітах наведено в табл. 2, де $E_{ст}$ – стаціонарний потенціал, В.

Виявлено, що тривкість покриттів у сольовому електроліті на порядок вища, ніж у кислотному, що обумовлено різним pH. Встановлено, що корозійна тривкість покриттів у розчинах електролітів залежить, головним чином, від їхнього фазового складу, а саме, з наявністю у фазовому складі покриття Fe40Al фази α-заліза, яка пришвидшує корозійне руйнування покриття та знижує його тривкість в агресивних електролітах. Так, тривкість Fe40Al покриття у сольовому розчині у 2,2 рази є нижчою, ніж у Fe55Al покриття. У агресивнішому середовищі (у розчині сульфатної кислоти) тривкість покриття системи Fe40Al є у 3,5 нижчою за покриття системи Fe55Al.

Результати електрохімічних випробувань показали, що покриття системи Fe40Al дещо поступаються за корозійною тривкістю нержавкій сталі 12Х18Н10Т у 1,6 разів у середовищі 3 %-го розчину NaCl та в 2,5 рази в середовищі 10 %-го розчину $H_2SO_4$. У свою чергу, покриття системи Fe55Al перевершують тривкість нержавкої сталі в 1,3 та 4,8 рази у сольовому середовищі та в розчині сульфатної кислоти відповідно. Таким чином встановлено, що магнетронні покриття системи FeAl з вмістом алюмінію на рівні 55 % завтовшки 3 мкм можуть застосуватися під час експлуатації в агресивних середовищах (наприклад, 3 % розчин NaCl) для захисту поверхонь деталей машин і механізмів. Проведені електрохімічні дослідження показали, що FeAl покриття, отримані методом магнетронного осадження, не поступаються за тривкістю плазмовим FeAl покриттям у сольовому електроліті [7].

**Таблиця 1. Параметри осадження та характеристики FeAl-покриттів**

| Система покриття | Потужність магнетрона, Вт | | Швидкість осадження, нм/хв | | Товщина покриттів, мкм | Хімічний склад покриттів (кількість алюмінію), ат. % | Фазовий склад покриттів |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_{Fe}$ | $P_{Al}$ | $V_{Fe}$ | $V_{Al}$ | | | |
| Fe40Al | 830 | 1040 | 24 | 29 | 3 | 39,6 | FeAl, α-Fe |
| Fe55Al | 830 | 700 | 24 | 19,6 | 3 | 54,6 | FeAl |

**Таблиця 2. Результати електрохімічних випробувань покриттів**

| Система покриття | Електроліт | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 % NaCl | | | 10 % $H_2SO_4$ | | |
| | $E_{ст}$, В | $E_c$, В | $i_c$, А/см$^2$ | $E_{ст}$, В | $E_c$, В | $i_c$, А/см$^2$ |
| Fe40Al | –0,36 | –0,32 | $2,6 \cdot 10^{-6}$ | –0,30 | –0,26 | $4,9 \cdot 10^{-5}$ |
| Fe55Al | –0,34 | –0,30 | $1,2 \cdot 10^{-6}$ | –0,24 | –0,22 | $1,4 \cdot 10^{-5}$ |
| 12Х18Н10Т | –0,20 | –0,18 | $1,6 \cdot 10^{-6}$ | –0,20 | –0,22 | $6,8 \cdot 10^{-5}$ |

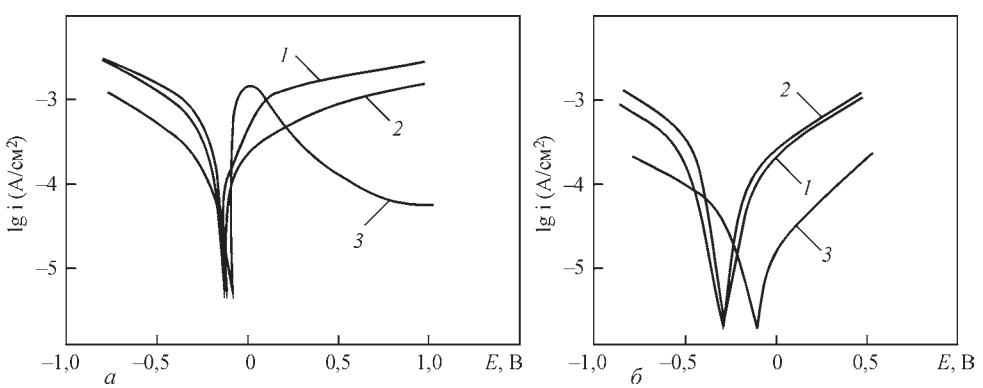


Рис. 2. Поляризаційні криві магнетронних FeAl-покриттів у 10 % $H_2SO_4$ (*а*) та в 3 % NaCl (*б*) при 20 °С та швидкості розгортки потенціалу 2 мВ/с: *1* – Fe40Al, *2* – Fe55Al, *3* – сталь 08Х18Н10Т

## Висновки

Покриття системи FeAl завтовшки 3 мкм було одержано методом магнетронного осадження з різним вмістом алюмінію, який регулювали шляхом зміни параметрів процесу осадження.

Показано, що корозійна тривкість покриттів FeAl залежить як від виду агресивного середовища, так і від їхнього фазового складу. Встановлено, що покриття системи Fe40Al у досліджених умовах демонструють нижчу корозійну тривкість порівняно з покриттям Fe55Al, що обумовлено наявністю фази α-Fe. Отримані результати дозволяють рекомендувати покриття системи Fe55Al, отримані методом магнетронного осадження, для захисту поверхонь деталей машин і механізмів, що працюють в умовах дії сольового електроліту.

## Список літератури/References


1. Zamanzade, M., Barnoush, A., Motz, C. (2016) A review on the properties of iron aluminide intermetallics. *Crystals,* 6**(1)**, 10. DOI: https://doi.org/10.3390/cryst6010010
2. Palm, M., Stein, F., Dehm, G. (2019) Iron aluminides. *Annual Review of Mater. Research*, **49**, 297–326. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070218-125911
3. Guilemany, J.M., Cinca, N. (2007) High-temperature oxidation of Fe–40Al coatings obtained by HVOF thermal spray. *Intermetallics,* 15(**10**), 1384–1394. DOI: https://doi.org/10.1016/j.intermet.2007.04.013
4. Cinca, N., Guilemany, J.M. (2012) Thermal spraying of transition metal aluminides: An overview. *Intermetallics,* **24**, 60–72. DOI: https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.01.020
5. Borisov, Yu.S., Borisova, A.L., Vigilianska, N.V. et al. (2020) Coatings based on Fe-Al intermetallics produced by the methods of plasma and supersonic air-gas plasma spraying. *The Paton Welding J.*, **7**, 32–40. DOI: https://doi.org/10.37434/as2020.07.04
6. Senderowski, C., Bojar, Z. (2008) Cas detonation spray forming of Fe-Al coatings in the presence of interlayer. *Surface Coatings Technology*, 202(**15**), 3538–3548. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.12.029
7. Vihilianska, N.V., Gryshchenko, O.P., Iantsevitch, C.V. et al. (2022) Corrosion strength of plasma coatings based on composite powders with FeAl intermetallic. *The Paton Welding J.,* **12**, 35–39. DOI: https://doi.org/10.37434/tpwj2022.12.05
8. Cherif, S.M., Boussigne, K., Roussigne, Y. (2007) Growth and magnetic study of sputtered Fe/Al multilayers. *Materials Science and Engineering,* 138(**1**), 16–21. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.12.009
9. Borisov, Yu.S., Kuznetsov, M.V., Tkachenko, B.T. et al. (2017) Investigation of process of formation of structure and properties in magnetron nanolayer FeAl-coatings. *The Paton Welding J.,* **7,** 24–29. DOI: https://doi.org/10.15407/as2017.08.04
10. Stönner, T., Hanžel, D., Baretzky, B. et al. (1998) Characterization and oxidation of magnetron sputtered Fe-Al intermetallic alloys. *Hyperfine Interactions,* **112**, 155–160. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1011017517588
11. Billard, A., Sanchette, F. (2001) Main features of magnetron sputtered aluminium-transition metal alloy coatings. *Surface and Coatings Technology,* **142-144**, 218–224. DOI: https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01197-5
12. Liu, Z., Gao, W., Wang, F. (1998) Oxidation behaviour of FeAl intermetallic coatings produced by magnetron sputter deposition. *Scripta Materialia,* 39(**11**), 1497–1502. DOI: https://doi.org/10.1016/S1359-6462(98)00360-1
13. (2003) *ASM Handbook, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection*. ASM International. V. 13A, 1135.
14. Сахненко М.Д., Вєдь М.В., Ярошок Т.П. (2005) *Основи теорії корозії та захисту металів*. Харків, НТУ ХПІ. Sahnenko, M.D., Vyed, M.V., Yaroshok, T.P. (2005) *Fundamentals of the theory of corrosion and protection of metals*. Kharkiv, NTU KhPI [in Ukrainian].


## CORROSION RESISTANCE OF MAGNETRON FeAl SYSTEM COATINGS


N.V. Vigilianska, C.V. Iantsevitch, O.V. Volos, V.G. Zadoya, B.T. Tkachenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: pewinataliya@gmail.com



The paper studied the electrochemical behaviour of FeAl-coatings with different aluminium contents applied by magnetron deposition in various aggressive environments. The coatings were deposited using a modernized VU-1B vacuum installation with two injection targets of iron and aluminium. The coatings were applied to stainless steel 08Kh18N10T with a thickness of 3 μm. The produced coatings predominantly consist of the FeAl intermetallic phase. The electrochemical behaviour of the coatings was studied in a potentiodynamic mode with 3 % sodium chloride and 10 % sulfate acid at a temperature of 18…20 °C. The corrosion current of magnetron FeAl-coatings is an order of magnitude higher in sodium chloride solution than in sulfuric acid, indicating better corrosion resistance in the latter. It has been shown that the coatings containing 55 at. % aluminium (Fe55Al) exhibit higher corrosion resistance compared to Fe40Al coatings and even surpass that of 12Kh18N10T stainless steel. The improved resistance of Fe55Al coatings is attributed to the presence of a single FeAl intermetallic phase and the absence of the α-Fe phase, the presence of which in Fe40Al coatings corresponds to increased corrosion processes. The obtained results demonstrate the suitability of Fe55Al magnetron coatings as protective layers for components operating in aggressive environments. 14 Ref., 2 Tabl., 2 Fig.



*Keywords: magnetron deposition, coating, corrosion resistance, electrolyte*



**ORCID**
Вігілянська Н.В. – https://orcid.org/0000-0001-8576-2095, Янцевич К.В. – https://orcid.org/0000-0002-3975-7727,
Волос О.В. – https://orcid.org/0000-0002-9073-2840, Задоя В.Г. – https://orcid.org/0000-0002-1286-985X,
Ткаченко Б.Т. – https://orcid.org/0009-0008-6734-4242


**КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ**
Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів


**АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ**
Н.В. Вігілянська
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: pewinataliya@gmail.com



**РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ**
Н.В. Вігілянська, К.В. Янцевич, О.В. Волос, В.Г. Задоя, Б.Т. Ткаченко (2026) Корозійна тривкість магнетронних покриттів системи FeAl. *Автоматичне зварювання*, **03**, 20–22. DOI: https://doi.org/10.37434/as2026.03.03
**ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ**
https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as
Отримано 10.02.2026
Отримано у переглянутому вигляді 23.03.2026
Підписано до друку 14.05.2026
Оприлюднено 20.05.2026