

ЕЛЕКТРОДУГОВЕ НАПИЛЕННЯ ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ Fe–Al ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНОРІДНИХ СУЦІЛЬНИХ ТА ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ

Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Н.В. Вігілянська, І.А. Дем'янов, О.М. Бурлаченко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Досліджено механізм формування та структуру покриттів на основі системи залізо-алюміній, напилених електродуговим способом з використанням дротів суцільного перерізу і порошкового дроту. Досліджено гранулометричний склад, структуру та мікротвердість частинок (продуктів розпилення електродних дротів заліза і алюмінію), уловлених із струменя розпилення, а також структуру, фазовий склад та мікротвердість електродугових покриттів системи залізо-алюміній. Встановлено, що під час розпилювання дротів Fe+Al та Fe+AlMg взаємодії частинок в струмені не відбувається і продукти розпилення являють собою частинки заліза та алюмінію з відповідною твердістю. У цьому випадку утворення інтерметалідів в покриттях також не відбувається і вони мають гетерогенну структуру, що складається з компонентів на основі заліза і алюмінію. Встановлено, що інтерметалідна FeAl структура формується тільки після термообробки напилених покриттів при 650 °С. При напиленні порошкового дроту ПД(Fe–Al) в процесі плавлення оболонки і наповнювача відбувається міжфазна взаємодія, в результаті чого формуються покриття з мікротвердістю 2460±290 МПа, основною фазою в яких є інтерметалід Fe₃Al. Бібліогр. 21, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: електродугове напилення, інтерметалід, залізо-алюміній, покриття, дріт суцільного перерізу, порошковий дріт, мікроструктура

Сплави на основі алюмінідів заліза відносяться до числа перспективних конструкційних матеріалів, що призначені для роботи при температурах 600...1000 °С, характеризуються низькою вартістю, високим опором зношенню, корозії та окисленню, в тому числі в агресивних сірковмісних середовищах [1, 2].

Використання сплавів на основі алюмініду заліза в якості захисних покриттів багато в чому обумовлено можливістю підвищення терміну служби різноманітних елементів механізмів, що працюють в умовах підвищеного зношення та корозії, скорочення вартості виробів з покриттями в порівнянні з високолегованими сталями, а також можливістю використання простої та недорогой технології їх напилення [3, 4]. Своїми властивостями дані матеріали зобов'язані впорядкованій кристалічній структурі з міцними хімічними зв'язками в поєднанні з щільною упаковкою атомів, що призводить до підвищеної стійкості до повзучості, рекристалізації та високотемпературної корозії в порівнянні з традиційними металевими сплавами [5].

Покриття на основі інтерметалідів Fe–Al отримують методами газотермічного напилення: плазмовим [6], високошвидкісним газополумєним [7] і детонаційними [8]. В якості матеріалів для напилення при цих методах використовують порошки інтерметалідів, що одержуються метода-

ми розпилення [9], механічного легування та механо-хімічного синтезу [10, 11].

Альтернативним способом отримання залізо-алюмінієвих покриттів є електродугове напилення (ЕДН), при якому покриття формуються в результаті сумісного розпилення Fe- та Al-містких дротів. У разі використання в якості матеріалів, що напилюються, композиційних дротів FeAl [12] або порошкових дротів (ПД) [4], що складаються з оболонки заліза з наповнювачем порошка алюмінію, в результаті напилення відбувається взаємодія розплавів заліза та алюмінію з утворенням в покриттях інтерметалідних фаз Fe₃Al, FeAl. При напиленні шляхом сумісного розпилення дротів суцільного перерізу формуються покриття з псевдосплавною структурою [13], зокрема, при напиленні дротів заліза і алюмінію покриття складаються з вихідних компонентів заліза і алюмінію, їх оксидів і твердих розчинів на основі Fe, Al [14]. В цьому випадку синтезу інтерметалідних фаз Fe_xAl_y не відбувається або їх наявність не перевищує 5 мас. % [15], а формування інтерметалідів Fe₂Al₃, Fe₃Al і FeAl відбувається в випадку подальшої термообробки покриттів при 650 °С [14].

В Інституті електродугових зварювань ім. Є.О. Патона дослідження особливостей формування електродугових покриттів на основі системи Fe–Al ведуться з 1990-х років. Розроблені авторами [16] електродугові покриття системи сталь-алюміній,

Борисов Ю.С. – <https://orcid.org/0000-0002-6019-8464>, Борисова А.Л. – <https://orcid.org/0000-0002-7376-3370>, Вігілянська Н.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-2095>, Дем'янов І.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4536-9971>, Бурлаченко О.М. – <https://orcid.org/0000-0003-2277-4202>, © Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова, Н.В. Вігілянська, І.А. Дем'янов, О.М. Бурлаченко, 2021

що містять 10 % алюмінію, були застосовані Львівською філією ЦКБ «Союзернергоремонт» для захисту екранних труб котлоагрегатів від високотемпературної ($T \leq 550$ °C) сірчистої корозії при слабкому газообразивному зношуванні та успішно експлуатувалися на Бурштинській, Придністровській і Криворізькій ДРЕС-2 на протязі від 1 до 4 років.

Застосування порошкових дротів на основі ферохромалюмінію дозволяє методом ЕДН отримувати покриття з високим рівнем фізико-механічних властивостей ($\sigma_{3\%} = 20,4$ МПа, модуль Юнга (E) – $7,83 \cdot 10^{-4}$ МПа, пористість – $4 \pm 0,7$ %, межа витривалості сталі 45 з покриттям (σ_{-1}) – 220 МПа) [17]. Розроблені покриття були успішно застосовані для відновлення деталей сільськогосподарської техніки ряду підприємств Молдови [18].

В роботі [19] відзначається, що порівняння покриттів, що наносяться методами газотермічного наплення з компактних дротів, з такими ж з порошкових дротів або гнучких шнурів показує, що останні забезпечують комплекс більш високих службових властивостей. Разом з тим детальних досліджень і порівняння особливостей формування інтерметалідних покриттів з компактних і порошкових матеріалів до теперішнього часу не проводилося.

Метою роботи є дослідження особливостей формування інтерметалідних Fe–Al покриттів в умовах електродугового наплення з використанням різнорідних та порошкових дротів.

Матеріали та методи дослідження. Наплення покриттів системи Fe–Al проводили електродуговим способом з використанням металізатора EM-14M. Покриття отримували шляхом сумісного розпилення дротів суцільного перерізу (сталевого дроту Св08А і алюмінієвого А99; сталевого дроту Св08А і дроту алюмінієвого сплаву АМг6). Для наплення покриттів на основі інтерметалідів Fe–Al було виготовлено порошковий дріт, що складався зі сталеві оболонки Ст08кп та наповнювача – порошку Al марки ПА-4.

Розрахунок для формування порошкового дроту складу 86Fe+14Al (мас. %), що складається з трубчастої металевої оболонки Ст08кп та порошку Al, полягає в розрахунку необхідної насипної щільності порошку Al, при якій порошок рівномірно заповнює всю порожнину металевої трубки діаметром 0,303 см. Насипна щільність порошку Al, що забезпечує рівномірне заповнення об'єму внутрішньої порожнини трубки, розраховується за формулою

$$\gamma_{п. Al} = \frac{P}{V_{тр}}$$

де P – маса порошку Al (14 г); $V_{тр}$ – об'єм порожнини металевої трубки, сформованої зі стрічки Ст08кп, який розраховується за формулою

$$V_{тр} = S_{тр} L_{тр},$$

де $S_{тр}$ – площа перетину металевої трубки, яка розраховується за формулою

$$S_{тр} = \frac{\pi D^2}{4} = 0,785 \cdot 0,303^2 = 0,072 \text{ см}^2,$$

а $L_{тр}$ розраховується за формулою

$$L_{тр} = \frac{P_{тр}}{B\delta\gamma_{ст}},$$

де $P_{тр}$ – маса трубки (86 г); B – ширина стрічки (1,2 см); δ – товщина стрічки (0,04 см); $\gamma_{ст}$ – густина Ст08кп (7,8 г/см³).

Звідси:

$$L_{тр} = \frac{86}{1,2 \cdot 0,04 \cdot 7,8} = 229,7 \text{ см},$$

$$V_{тр} = 229,7 \cdot 0,072 = 16,54 \text{ см}^3,$$

$$\gamma_{п. Al} = \frac{14}{16,54} = 0,85 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

В результаті проведених розрахунків встановлено, що для формування порошкового дроту з суміші складу 86Fe+14Al (мас. %), що відповідає формулі інтерметаліду Fe₃Al, необхідно використовувати порошок Al з насипною щільністю 0,85 г/см³. Для отримання такого порошку проведено обробку вихідного порошку Al (насипна щільність 1,3 г/см³) в атриторі протягом 75 хв при швидкості 400 об/хв та співвідношенні маси куль до маси шихти 7:1 з добавкою стеарату цинку в кількості 2 мас. % до досягнення насипної щільності порошку 0,85 г/см³.

Коефіцієнт заповнення виготовленого порошкового дроту ПД(Fe–Al) становить 16 %. Структура дроту представлена на рис. 1.

Діаметр використаних дротів як суцільного перерізу, так і порошкового дроту становив 2 мм.

Виходячи з досліджень особливостей формування покриттів з різнорідних дротів [13] і з огляду на літературні дані [14], для електродугового наплення покриттів на основі інтерметалідів Fe–Al було обрано наступні технологічні параметри:

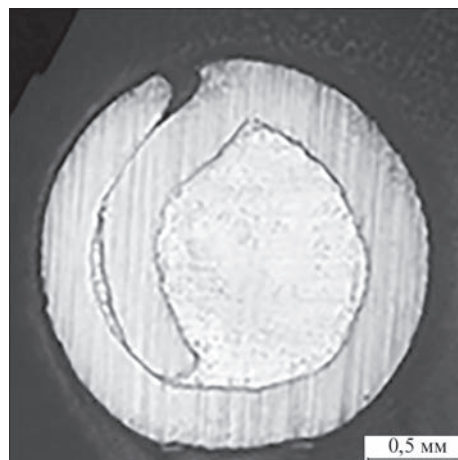


Рис. 1. Структура порошкового дроту ПД(Fe–Al)

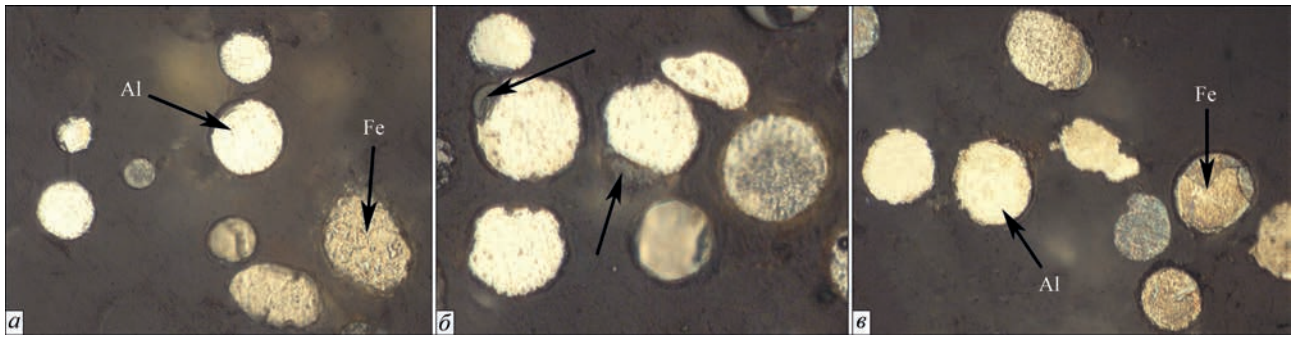


Рис. 2. Мікроструктура продуктів розпилення дротів: а, б – Fe+Al; в – Fe+AlMg; а, в – $\times 400$; б – $\times 800$

три процесу: струм – 200 А, напруга на електродах – 38 В, тиск стисненого повітря – 0,65 МПа, дистанція напильня – 200 мм. Даний режим напильня забезпечує стабільний процес плавлення електродних дротів, що використовуються.

З метою дослідження характеру розвитку процесів взаємодії частинок розплавів дротів, що утворюються при розпилюванні різномірних дротів суцільного перерізу Fe+Al і Fe+AlMg, при русі на дистанції напильня між собою та з навколишнім середовищем, визначення їх розмірів і дослідження структури проводили збір частинок продуктів розпилення в водяну ванну розміром $500 \times 500 \times 200$ мм. Ванна встановлюється під струмінь матеріалу, що напильнюється, на відстані 200 мм. В отриманому продукті досліджували структуру і дисперсність частинок металографічним методом шляхом вимірювання їх розміру на металографічних шліфах за допомогою оптичного мікроскопа. Для виявлення мікроструктури травлення металографічних шліфів частинок порошоків проводили 10%-им спиртовим розчином азотної кислоти протягом 4–5 хв.

При проведенні металографічних досліджень застосовували оптичний мікроскоп Neophot-32 з пристосуванням для цифрового фотографування, а вимірювання мікротвердості проводили на приладі ПМТ-3. Рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) покриттів виконували з використанням дифрактометра ДРОН-3 в CuK_α -випромінюванні з графітовим монохроматором при кроковому переміщенні $0,1^\circ$ та часом експозиції в кожній точці 4 с з подальшою комп'ютерною обробкою отриманих цифрових даних.

Результати досліджень. Дослідження мікроструктури частинок продуктів сумісного розпилення дротів Fe+Al, Fe+AlMg показало, що вони складаються з частинок заліза та алюмінію (рис. 2), тобто в процесі розпилення взаємодії між частинками заліза та алюмінію не виявлено. Частинки в основному мають сферичну форму, проте частинки неправильної витягнутої форми також зустрічаються. Мікротвердість розпилених частинок відповідає або мікротвердості чистого заліза (2500...2700 МПа), або чистого алюмінію (300...500 МПа).

Характеристики продуктів сумісного розпилення дротів Fe+Al та Fe+AlMg

Параметри частинок, мкм	Св08А+Al		Св08А+AlMg	
	Fe	Al	Fe	AlMg
Гранулометричний склад продуктів розпилення, %				
<40	18	35	23	30
40...50	19	25	22	28
50...60	18	18	18	20
60...70	12	8	12	12
70...80	12	8	9	8
80...90	8	1	6	1
90...100	7	2	5	1
>100	6	3	5	1
Середній розмір частинок, мкм				
d_{cp}	63	52	59	51
Мікротвердість, МПа				
$HV_{0,05}$	2570±810	320±90	2790±590	470±110

На деяких частинках алюмінію відзначається наявність куполоподібних утворень суцільної та порожнистої структури, які розташовані на їх поверхні (вказані стрілками на рис. 2, б). Напевно ці утворення являють собою оксид алюмінію, так як при проходженні частинок через розпилюючий струмінь на поверхні частинок алюмінію розвивається процес окислення з виникненням плівки оксиду. Подібне явище спостерігається при плазмовому напильні алюмініємістких матеріалів [20].

Характеристика продуктів сумісного розпилення дротів Fe+Al та Fe+AlMg представлена в таблиці.

Дослідження розміру розпилених частинок (таблиця) показало, що основна фракція частинок алюмінію (~ 60 %) має розмір <50 мкм, заліза (~ 50 %) – 40...70 мкм, середній розмір частинок алюмінію складає 51...52 мкм, заліза – 59...63 мкм. Відомо, що розмір частинок продуктів розпилення розплавів металу в основному залежить від величини їх поверхневого натягу [21]. Тому ця різниця в дисперсності отриманих продуктів розпилення різномірних дротів (Fe та Al) пов'язана з тим, що алюміній має менший коефіцієнт поверхневого натягу ($\sigma_{Al} = 914 \text{ МДж/м}^2$), ніж залізо ($\sigma_{Fe} = 1850 \text{ МДж/м}^2$), і в процесі сумісного розпилення відбувається більш інтенсивне розпилення розплаву алюмінію. Істотної різниці в дисперсності продуктів розпилення дроту чистого алюмінію і

дроту алюмінієвого сплаву АМг-6 не виявлено через незначну різницю їх коефіцієнтів поверхневого натягу.

В результаті металографічного (рис. 3) та рентгенофазового (рис. 4) аналізів напилених покриттів було встановлено, що покриття, отримані сумісним розпиленням дротів Св08А з алюмінієм (Fe+Al) та Св08А з алюмінієвим сплавом АМг6 (Fe+AlMg) складаються з суміші заліза і алюмінію. Мікротвердість ділянок покриттів Fe+Al та Fe+AlMg на основі заліза становить 2400...2600 МПа, алюмінію – 700...800 МПа.

Відомо, що утворення інтерметалідів Fe–Al можна здійснити шляхом термообробки покриттів, отриманих сумісним розпиленням дротів заліза та алюмінію [14]. У даній роботі термооброб-

ка покриття Fe+AlMg проведена при температурі 650 °С протягом двох годин з подальшим охолодженням у воді. Час обробки вибирався з розрахунків коефіцієнта дифузії алюмінію в залізо у твердій фазі. При такому режимі термообробки в покритті відбулося утворення інтерметалідних фаз Fe₂Al₅, Fe₃Al, FeAl (рис. 4, в), при цьому чистий алюміній і залізо методом РСФА не виявлені.

При порівнянні мікроструктури покриття після термообробки (рис. 5, а) з покриттям до термообробки (рис. 3, б) відзначається збільшення яскраво виражених оксидних прошарків з наявністю пористості по границях ламелей. При цьому чистого алюмінію та заліза в покритті не спостерігається, а складається воно з дифузійних шарів ламелярної структури. Це говорить про повне проходження дифузійних процесів при термообробці при обраному режимі. Мікротвердість покриття Fe+AlMg після термообробки становить 2750 ± 760 МПа.

У випадку напилання порошкового дроту, що містить в якості наповнювача порошок Al (ПД(Fe–Al)), прошарків чистого алюмінію в мікроструктурі покриття не спостерігається (рис. 5, б). Це говорить про те, що весь по-

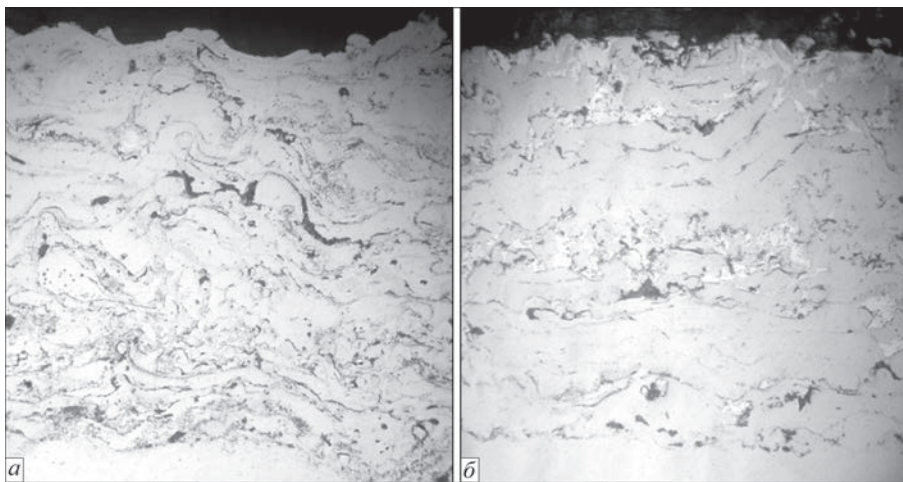


Рис. 3. Мікроструктура електродугових покриттів (×200): а – Fe+Al; б – Fe+AlMg

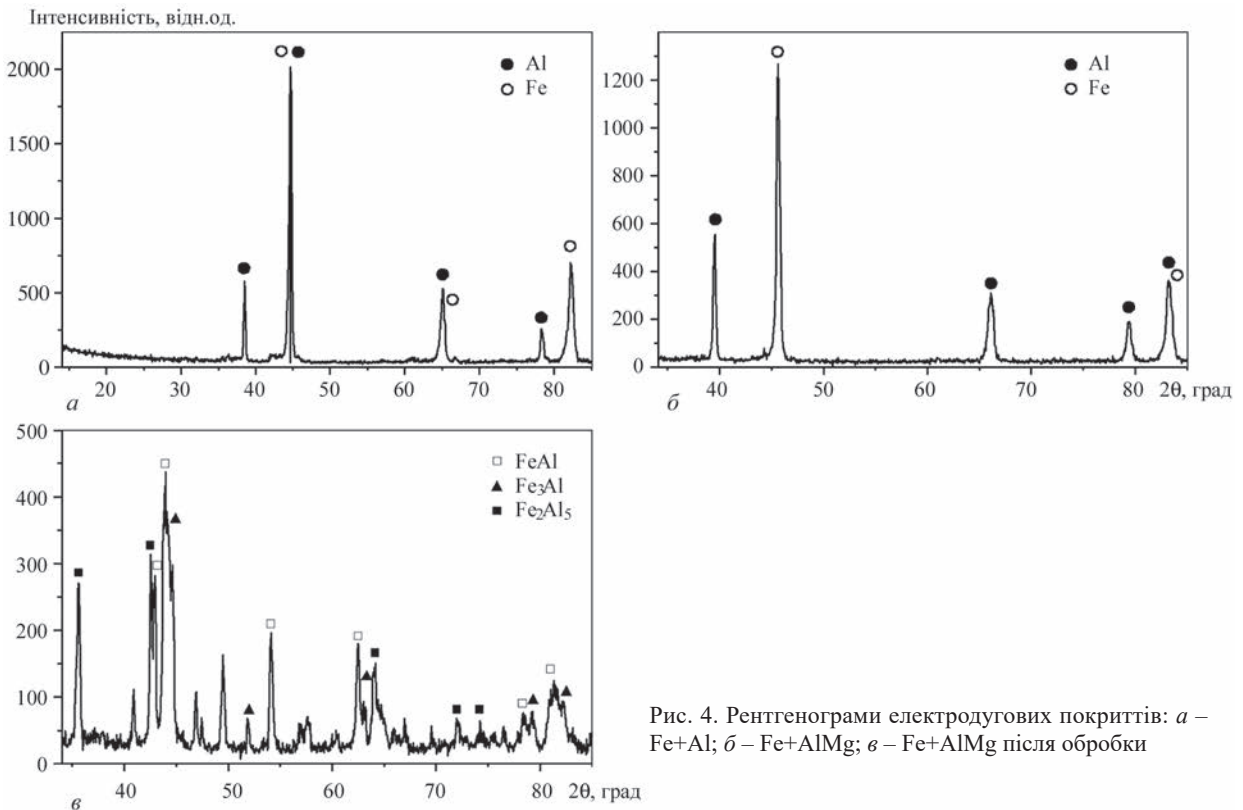


Рис. 4. Рентгенограми електродугових покриттів: а – Fe+Al; б – Fe+AlMg; в – Fe+AlMg після обробки

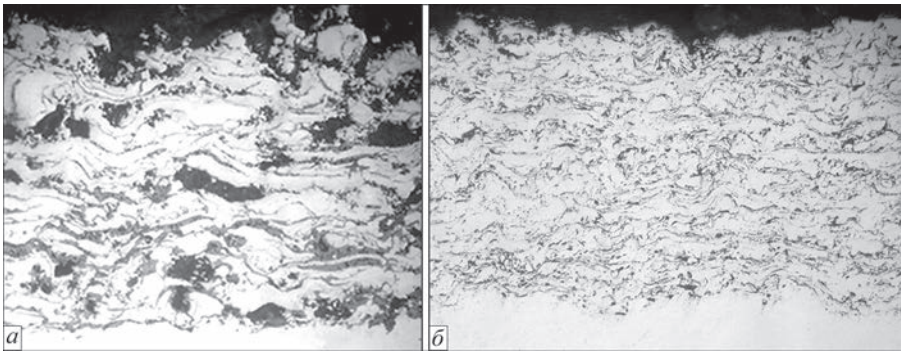


Рис. 5. Мікроструктура (×400) електродугового покриття Fe+AlMg після термообробки (а) та з порошкового дроту ПД(Fe–Al) (б), ×200

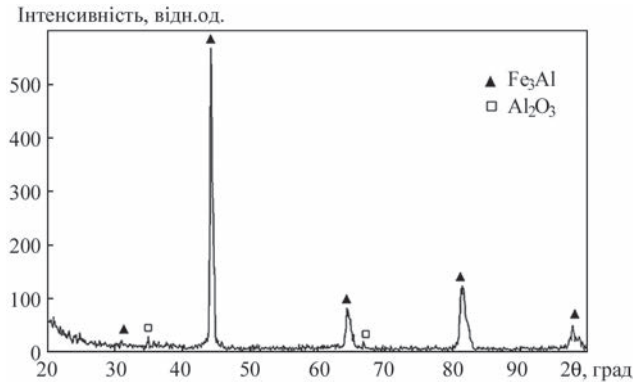


Рис. 6. Рентгенограма електродугового покриття, отриманого напильненням порошкового дроту ПД(Fe–Al)

рошок алюмінію в процесі напильнення прореагував з розплавом сталеві оболонки або окислився. Мікротвердість покриття становить 2460 ± 290 МПа.

Рентгеноструктурним фазовим аналізом покриття ПД(Fe–Al) (рис. 6) встановлено, що воно складається з фази Fe₃Al, на яку і був розрахований склад порошкового дроту, з домішками оксиду алюмінію Al₂O₃. Це свідчить про те, що в процесі напильнення ПД відбулася повна взаємодія розплавів сталеві оболонки з алюмінієвим наповнювачем з утворенням інтерметаліду та незначне окислення частинок алюмінію.

Висновки

1. Дослідження процесу диспергування розплавів різнорідних дротів Fe та Al в умовах електродугового напильнення показало, що в результаті сумісного розпилення дротів взаємодії частинок при русі в потоці не відбувається, а продукти розпилення складаються з окремих частинок заліза та алюмінію. Дисперсність продуктів розпилення дротів заліза та алюмінію визначається величинами поверхневого натягу розплавів цих матеріалів і їх середній розмір становить 59...63 мкм при використанні дроту Св08А та 51...52 мкм у випадку дротів А99 і АМг-6.

2. При нанесенні покриттів електродуговим способом у випадку сумісного напильнення дротів заліза та алюмінію структура покриття складається з ламелей Fe та Al. Інтерметалідна FeAl-структура покриття в

цьому випадку формується шляхом термообробки покриття при 650 °С протягом двох годин.

3. При використанні порошкового дроту, що складається зі сталеві оболонки та наповнювача (порошку алюмінію), в процесі електродугового напильнення формуються інтерметалідні покриття, основною фазою яких є

Fe₃Al, яка є продуктом міжфазної взаємодії розплавів оболонки (Fe) і порошкового наповнювача (Al).

Список літератури

1. Deevi, S.C., Sikka, V.K. (1996) Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. *Intermetallics*, 4(5), 357–375. DOI: [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00056-9)
2. Stoloff, N. S. (1998). Iron aluminides: present status and future prospects. *Materials Science and Engineering: A*, 258(1-2), 1–14. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(98\)00909-5](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(98)00909-5)
3. Yang, D.-M., Tian B.-H., Cao Y. (2011) Microstructures and properties of FeAl coatings prepared by LPPS, APS and HVOF. *Proc. of ITSC 2011*, 1229–1234.
4. Xu, B., Zhu, Z., Ma, S. et al. (2004) Sliding wear behavior of Fe–Al and Fe–Al/WC coatings prepared by high velocity arc spraying. *Wear*, 257(11), 1089–1095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.05.012>
5. Guilemany, J. M., Cinca, N., Casas, L., Molins, E. (2009) Ordering and disordering processes in MA and MM intermetallic iron aluminide powders. *J. of Materials Science*, 44(8), 2152–2161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3296-z>
6. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Вігілянська Н.В. та ін. (2020) Покриття на основі інтерметалідів Fe–Al, які отримані методами плазмового і надзвукового повітряно-газового плазмового напильнення. *Автоматичне зварювання*, 7, 32–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.07.04>.
7. Guilemany, J.M., Cinca, N., Fernández, J., Sampath, S. (2008) Erosion, Abrasive, and Friction Wear Behavior of Iron Aluminide Coatings Sprayed by HVOF. *J. of Thermal Spray Technology*, 17(5-6), 762–773. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9252-7>
8. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Астахов Е.А. и др. (2017) Детонационные покрытия из порошков интерметаллидов системы Fe–Al, полученных методом механохимического синтеза. *Автоматическая сварка*, 4, 25–31.
9. Prasad, Y.V.R.K., Sastry, D., Sundar, R., Deevi, Seetharama (2001) Optimization of hot workability and hot deformation mechanisms in FeAl and Fe₃Al based alloys. *Proceedings of the International Symposium on Structural Intermetallics*.
10. Rajath Hegde, M.M., Surendranathan, A.O. (2009) Synthesis, characterization and annealing of mechanically alloyed nanostructured FeAl powder. *Frontiers of Materials Science in China*, 3(3), 310–318. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11706-009-0021-4>
11. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Бурлаченко А.Н. и др. (2017) Структура и свойства легированных порошков на основе интерметаллида Fe₃Al для газотермического напильнения, полученных методом механохимического синтеза. *Автоматическая сварка*, 9, 40–47.
12. Матвейшин Е.Н. (2009) Прочностные и триботехнические свойства железо-алюминиевых и медно-алюминиевых металлизационных покрытий. *Проблеми трибології*, 4, 54–57.
13. Борисов Ю.С., Вігілянська Н.В., Демьянов и др. (2013) Исследование влияния режимов электродугового напильнения на структуру и свойства псевдосплавных покрытий. *Автоматическая сварка*, 12, 11–17.
14. Chen, Y., Liang, X., Wei, S. et al. (2009) Heat treatment induced intermetallic phase transition of arc-sprayed coating

- prepared by the wires combination of aluminum-cathode and steel-anode. *Applied Surface Science*, 255(19), 8299–8304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.05.142>
15. Chmielewski, T., Siwek, P., Chmielewski, M. et al. (2018) Structure and Selected Properties of Arc Sprayed Coatings Containing In-Situ Fabricated Fe–Al Intermetallic Phases. *Metals*, 8(12), 1059. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8121059>
 16. Борисова А.Л., Губенко Б.Г., Костин, В.А. и др. (1990) Особенности формирования и структура электрометаллизационных покрытий системы сталь–алюминий. *Автоматическая сварка*, 8, 41–44.
 17. Borisova, A.L., Mitz, I.V., Kleymann, A. (2000) Arc Sprayed Coatings of Ferroalloy-Base Flux-Cored Wires. *Thermal Spray Surface Engineering Via Applied Research: Proc. of the 1st International Thermal Spray Conference*, Montreal, Canada.
 18. Борисова А.Л., Клейман А.Ш. (1990) Влияние алюминия на структуру и физико-механические свойства покрытий из порошковых проволок с наполнителем из феррохрома. *Прочность деталей сельскохозяйственной техники. Сб. науч. тр.*, Кишинев, 27–33.
 19. Борисов Ю.С., Коржик В.Н., Козьяков И.А. (1995) Газопламенные покрытия системы Fe–B из порошковых проволок и гибких шнуров. *Автоматическая сварка*, 12, 12–25.
 20. Кулик А.Я., Борисов Ю.С. и др. (1985) *Газотермическое напыление композиционных порошков*. Ленинград, Машиностроение.
 21. Агеев В.А., Белашенко В.Е., Фельдман И.Э., Черноиванов А.В. (1989) Анализ методов управления параметрами напыляемых частиц при электродуговой металлизации. *Сварочное производство*, 12, 30–32.

References

1. Deevi, S.C., Sikka, V.K. (1996) Nickel and iron aluminides: An overview on properties, processing, and applications. *Intermetallics*, 4(5), 357–375. DOI: [https://doi.org/10.1016/0966-9795\(95\)00056-9](https://doi.org/10.1016/0966-9795(95)00056-9)
2. Stoloff, N. S. (1998). Iron aluminides: Present status and future prospects. *Mater. Sci. and Engin.: A*, 258(1-2), 1–14. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(98\)00909-5](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(98)00909-5)
3. Yang, D.-M., Tian B.-H., Cao Y. (2011) Microstructures and properties of FeAl coatings prepared by LPPS, APS and HVOF. *Proc. of ITSC'2011*, 1229–1234.
4. Xu, B., Zhu, Z., Ma, S. et al. (2004) Sliding wear behavior of Fe–Al and Fe–Al/WC coatings prepared by high velocity arc spraying. *Wear*, 257(11), 1089–1095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.05.012>
5. Guilemany, J. M., Cinca, N., Casas, L., Molins, E. (2009) Ordering and disordering processes in MA and MM intermetallic iron aluminide powders. *J. of Mater. Sci.*, 44(8), 2152–2161. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3296-z>
6. Borisov, Yu.S., Borisova, A.L., Vigilyanska, N.V. et al. (2020) Coatings based on Fe-Al intermetallics produced by the methods of plasma and supersonic plasma gas-air spraying. *The Paton Welding J.*, 7, 29-37. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.07.04>.
7. Guilemany, J.M., Cinca, N., Fernández, J., Sampath, S. (2008) Erosion, abrasive, and friction wear behavior of iron aluminide coatings sprayed by HVOF. *J. of Thermal Spray Technol.*, 17(5-6), 762–773. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9252-7>
8. Borisov, Yu.S., Borisova, A.L., Astakhov, E.A. et al. (2017) Detonation coatings of intermetallic powders of Fe–Al system produced using mechanical alloying. *The Paton Welding J.*, 4, 23–29.
9. Prasad, Y.V.R.K., Sastry, D., Sundar, R., Deevi, Seetharama (2001) Optimization of hot workability and hot deformation mechanisms in FeAl and Fe₃Al based alloys. *In: Proc. of the Int. Symposium on Structural Intermetallics*.
10. Rajath Hegde, M.M., Surendranathan, A.O. (2009) Synthesis, characterization and annealing of mechanically alloyed nanostructured FeAl powder. *Frontiers of Materials Sci. in China*, 3(3), 310–318. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11706-009-0021-4>
11. Borisov, Yu.S., Borisova, A.L., Burlachenko A.N. et al. (2017) Structure and properties of alloyed powders based on Fe₃Al intermetallic for thermal spraying produced using mechanochemical synthesis method. *The Paton Welding J.*, 9, 33–39.
12. Matvejshtin, E.N. (2009) Strength and tribotechnical properties of iron-aluminium and copper-aluminium metalized coatings. *Problemy Tribologii*, 4, 54–57 [in Russian].
13. Borisov, Yu.S., Vigilyanskaya, N.V., Demyanov, I.A. (2013) Study of effect of electric arc spraying modes on structure and properties of pseudoalloy coatings. *The Paton Welding J.*, 12, 9–15.
14. Chen, Y., Liang, X., Wei, S. et al. (2009) Heat treatment induced intermetallic phase transition of arc-sprayed coating prepared by the wires combination of aluminum-cathode and steel-anode. *Applied Surface Science*, 255(19), 8299–8304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.05.142>
15. Chmielewski, T., Siwek, P., Chmielewski, M. et al. (2018) Structure and selected properties of arc sprayed coatings containing in-situ fabricated Fe–Al intermetallic phases. *Metals*, 8(12), 1059. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8121059>
16. Borisova, A.L., Gubenko, B.G., Kostin, V.A. et al. (1990) Peculiarities of formation and structure of electrometallized coatings of steel-aluminium system. *Avtomatich. Svarka*, 8, 41–44 [in Russian].
17. Borisova, A.L., Mitz, I.V., Kleymann, A. (2000) Arc sprayed coatings of ferroalloy-base flux-cored wires.: *In: Proc. of the 1st Int. Thermal Spray Conf. on Thermal Spray Surface Engineering Via Applied Research* (Montreal, Canada).
18. Borisova, A.L., Mitz, I.V., Kleymann, A.Sh. (1990) Influence of aluminium on structure and physicomechanical properties of coatings from flux-cored wires with ferrochromium filler. *In: Strength of parts of agricultural technique. Transact., Kishinev*, 27–33 [in Russian].
19. Borisov, Yu.S., Korzhik, V.N. Kozzyakov, I.A. (1995) Flame coatings of Fe–B system from flux-cored wires and flexible cords. *Avtomatich. Svarka*, 12, 12–25 [in Russian].
20. Kulik, A.Ya., Borisov, Yu.S. et al. (1985) *Thermal spraying of composite powders*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
21. Ageev, V.A., Belashchenko, V.E., Feldman, I.E., Chernoiwanov, A.V. (1989) Analysis of methods for control of parameters of sprayed particles in electric arc metallization. *Svarochn. Proizvodstvo*, 12, 30–32.

ELECTRIC ARC SPRAYING OF INTERMETALIC Fe–Al COATINGS USING DIFFERENT SOLID AND POWDER WIRES

Yu.S. Borisov, A.L. Borisova, N.V. Vihilianska, I.A. Demianov, O.M. Burlachenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The mechanism of formation and structure of coatings based on the system iron-aluminum, sprayed by electric arc method using wires of solid cross-section and flux-cored wire were investigated. The grain-size composition, structure and microhardness of particles (spraying products of electrode wires of iron and aluminum) captured from the spraying jet, as well as the structure, phase composition and microhardness of electric arc coatings of the system iron-aluminum were studied. It was found that during spraying of Fe + Al and Fe + AlMg wires, the interaction of particles in the jet does not occur and the products of spraying represent particles of iron and aluminum with the appropriate hardness. In this case, the formation of intermetallics in the coatings also does not occur and they have a heterogeneous structure consisting of the components based on iron and aluminum. It was found that intermetallic FeAl structure is formed only after heat treatment of sprayed coatings at 650 °C. During spraying of flux-cored wire PD(Fe–Al) in the process of melting the sheath and the filler, the interphase interaction occurs, which results in the formation of coatings with a microhardness of 2460 ± 290 MPa, the main phase of which is intermetallic Fe₃Al. 21 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: electric arc spraying, intermetallic, iron-aluminum, coating, solid cross-section wire, flux-cored wire, microstructure

Надійшла до редакції 09.02.2021