

ЗВАРЮВАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ З ШИХТОЮ У ВИГЛЯДІ ГРАНУЛЬОВАНОГО ПОРОШКУ

І.О. Рябцев¹, А.А. Бабінець¹, І.П. Лентюгов¹, Е. Нягай², А. Чуприньски³

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: a_babinets@ukr.net

²Верхньосілезький технологічний Інститут. E-mail: Jerzy.Niagaj@git.lukasiewicz.gov.pl

³Сілезький політехнічний інститут. E-mail: artur.czuprynski@polsl.pl

Проведені порівняльні експериментальні дослідження впливу типу та гранулометричного складу вихідних металічних гранульованих матеріалів, які використовувались у якості шихти порошкового дроту, на його зварювально-технологічні властивості при напавленні під флюсом. В якості шихти для дослідних дротів використовували порошок швидкорізальної сталі ПГ-Р6М5 грануляцією 50...300 та 200...250 мкм, отриманий методом розпилення металевого розплаву. Еталоном слугував порошковий дріт, шихта якого складається із феросплавів грануляцією 50...300 мкм, розрахований для забезпечення аналогічного хімічного складу напавленого металу та виготовлений за стандартною технологією. Експериментально визначено, що зварювально-технологічні характеристики дротів трьох типів знаходяться на високому рівні, при цьому процес напавлення порошковими дросами, шихта яких містить гранульований порошок ПГ-Р6М5, характеризується більшою стабільністю, що позначається на збільшенні коефіцієнтів розплавлення та напавлення, та зниженні коефіцієнта втрат у порівнянні із дросом-аналогом з шихтою із порошків феросплавів. Визначено також, що вміст шкідливих домішок в зразку, напавленому дослідними дросами із шихтою з гранульованих порошків, нижче ніж у зразку-еталоні. Відзначені вище закономірності свідчать про те, що використання гранульованого порошку в шихті порошкових дротів не тільки технічно можливо, а й приводить до підвищення однорідності порошкового дроту, що позитивно впливає на його зварювально-технологічні властивості. Бібліогр. 18, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: дугове напавлення, порошковий дріт, шихта порошкового дроту, гранулометричний склад порошків, феросплави, зварювально-технологічні властивості, напавлений метал, стабільність напавлення, металургійна спадковість

Вступ. Широко відомо, що експлуатаційні властивості напавлених деталей, в першу чергу, визначаються хімічним складом та структурою металу напавленого шару, тому для їх підвищення зазвичай використовують метод комплексного легування останнього [1–7]. Проте на сьогоднішній день технічні та економічні можливості такого підходу практично вичерпані. Крім того, легування напавленого металу для більшості способів напавлення, здійснюється за рахунок електродних або присадних матеріалів, в шихті яких, в основному, використовуються феросплави, що досить суттєво забруднені небажаними домішками.

Вміст небажаних і навіть шкідливих домішок у феросплавах може бути в 2...5 разів більше, ніж в порошках чистих металів. Наприклад, об'ємна доля домішок у феромарганці може досягати 0,4 %, у феротитані – 0,6 %, у феросиліції – 1,0 %. Одним з основних забруднюючих компонентів у феросплавах є сірка, вміст якої у високовуглецевому ферохромі складає до 0,08 %; у феротитані – до 0,1 %; у феромолібдені та феровольфрамі – до 0,2 %. При цьому вміст домішок у порошках чистих металів і сплавів, які виготовляють шляхом

розпилення металевого розплаву, значно нижчий. Зокрема, у гранульованому порошок марки ПГ-Р6М5 вміст сірки не перевищує 0,03 % [8–10].

Більшість небажаних домішок при дуговому напавленні переходять із феросплавів в напавлений метал, викликаючи тим самим певну негативну металургійну спадковість, та можуть погіршувати механічні та експлуатаційні властивості напавленого металу. У зв'язку з цим при напавленні або зварюванні існує багато хімічних та технологічних способів боротьби із шкідливими домішками для підвищення зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів та експлуатаційних властивостей напавленого ними металу [11–13].

У роботах [14–16] показано, що використання гранульованих матеріалів певних типів, отриманих шляхом розпилення металевого розплаву, в якості шихти порошкових дротів дозволяє отримати більшу рівномірність заповнення порошкового дроту та покращити стабільність дугового процесу та, як наслідок, підвищити якість формування напавленого металу та понизити вміст шкідливих домішок, що позитивно позначається на його експлуатаційних властивостях.

Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>, Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>, Нягай Е. – <https://orcid.org/0009-0001-6831-1548>, Чуприньски А. – <https://orcid.org/0000-0001-9337-8325>

© І.О. Рябцев, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов, Е. Нягай, А. Чуприньски, 2024

Мета роботи полягає у порівняльному дослідженні впливу типу та гранулометричного складу гранульованих порошків швидкорізальної сталі Р6М5, які використовувались у якості шихти порошкових електродних дротів замість композиції із феросплавів, на його зварювально-технологічні властивості та якість формування наплавленого металу при електродуговому наплавленні.

Матеріали та методики досліджень. Для електродугового наплавлення дослідних зразків було виготовлено три партії дослідних порошкових електродних дротів із складом шихти трьох різних типів, які забезпечують отримання наплавленого металу однакового хімічного складу – інструментальної низьколегованої сталі 30В2ХМФ. Для цього було розраховано склад відповідних дротів, коефіцієнт заповнення яких складав ~ 30 %, діаметр – 2,0 мм. Конструкція дротів – трубчаста з перекриттям країв.

В якості шихти для дроту № 1 був обраний гранульований порошок марки ПГ-Р6М5, грануляція порошку стандартна – 50...300 мкм. У шихті дроту № 2 використовували такий же порошок, однак його гранулометричний склад було обмежено більш вузькими межами – 200...250 мкм. Також було розраховано склад та виготовлено порошковий дріт № 3, який би забезпечував отримання наплавленого металу аналогічного хімічного складу до дротів № 1 та 2, проте шихта якого складалась із феросплавів стандартної грануляції – 50...300 мкм [11]. Визначення та обмеження гранулометричного складу порошків виконували за допомогою ситового аналізу.

Наплавлення виконували автоматичним дуговим способом під шаром флюсу АН-26 на однакових режимах: швидкість подачі дроту – 120 м/год, що відповідало силі струму ~ 200 А, напрузі – 30 В, швидкості наплавлення – 18 м/год. Попередньо зразки підігрівали до температури 280...300 °С для уникнення гарячих тріщин.

З метою уникнення впливу перемішування наплавленого металу з основним (сталь S235 за EN 10025-2), наплавлення кожного зразка виконували в п'ять шарів. Визначення хімічного складу, який здійснювали спектральним методом, та твердості металу виконували в п'ятому наплавленому шарі кожного зразка після його шліфування.

Зварювально-технологічні властивості дослідних дротів оцінювали за такими параметрами:

- характер збудження дуги (легкий, середній, ускладнений);
- стабільність горіння дуги (стабільне, задовільне, нестабільне);
- якість формування наплавленого валика (якісне, задовільне, неякісне);
- якість відділення шлакової кірки (легке, задовільне, ускладнене);
- тип та наявність дефектів в наплавленому металі (відсутні, поодинокі, значна кількість);
- характеристики плавлення (коефіцієнти розплавлення, наплавлення, втрат).

Для розрахунку коефіцієнтів розплавлення (α_p), наплавлення (α_n) та втрат (ψ) на вигар та розбризкування визначали масу пластин та дротів перед наплавленням та після нього, а також фіксували час наплавлення. Відповідні коефіцієнти визначали, використовуючи широковідомі вирази:

$$\alpha_p = G_p / (I \cdot t), \tag{1}$$

$$\alpha_n = G_n / (I \cdot t), \tag{2}$$

$$\psi = ((\alpha_p - \alpha_n) / \alpha_p) \cdot 100 \% \tag{3}$$

де G_p – маса розплавленого металу, г; G_n – маса наплавленого металу, г; I – зварювальний струм, А; t – час наплавлення, год.

Окрім візуальної, оцінку стабільності дугового процесу виконували, аналізуючи інтегральні величини, які визначають його енергетичний стан, такі як, наприклад, напруга та струм дуги при багаторазовій їх фіксації [17]. Згідно з методикою, аналізували відхилення від середнього поточних значень величин струму та напруги на дузі за розрахованими коефіцієнтами варіації. Параметри режиму протягом процесу наплавлення фіксували за допомогою цифрового записуючого мультиметра ANENG AN9002, оснащеного високошвидкісним аналого-цифровим перетворювачем.

Результати досліджень та їх обговорення. Візуально метал, наплавлений всіма типами дослідних дротів, має однаково високу якість формування, дефекти відсутні, якість відділення шлакової кірки – задовільна (рис. 1). Результати спектрального аналізу та вимірювання твердості наплавленого металу показали (табл. 1), що метал, наплавлений дослідними дротами трьох типів, має

Таблиця 1. Хімічний склад та твердість металу, наплавленого дослідними дротами

Номер	Вміст хімічних елементів в наплавленому металі, %									Твердість, HRC
	C	Cr	Mo	W	V	Mn	Si	S	P	
1	0,19	1,2	1,64	1,70	0,50	0,3	0,56	0,020	0,022	30...32
2	0,19	1,2	1,71	1,74	0,51	0,3	0,56	0,021	0,024	29...31
3	0,25	1,38	1,27	1,63	0,35	0,38	0,73	0,027	0,037	28...32
*	0,2...0,3	1,0...1,4	1,0...1,7	1,5...2,0	0,3...0,5	0,3...0,5	0,3...0,5	≤0,04	≤0,04	30...35

Примітка. *Дано розрахунковий склад та твердість наплавленого металу.



Рис. 1. Зовнішній вид зразків, наплавлених дротами № 1–3 в п’ять шарів (а) та їх поперечні макрошліфи (б)

практично однаковий хімічний склад та твердість, що забезпечує отримання наплавленого металу типу низьколегованої інструментальної сталі 30B2ХМФ. Слід відзначити дещо меншу, у порівнянні з шихтою із феросплавів, забрудненість сіркою та фосфором металу, наплавленого дротами з шихтою із порошку з чистих металів. Це пояснюється меншим вмістом цих елементів у порошках швидкорізальної сталі Р6М5.

Порівняльна оцінка зварювально-технологічних властивостей дослідних дротів (табл. 2) показала, що вони знаходяться приблизно на однаковому рівні, проте дроти № 1 та 2 із шихтою, яка складається із гранульованого порошку марки ПГ-Р6М5, мають в 1,2...1,3 рази вищі коефіцієнти розплавлення та наплавлення у порівнянні із дротом-аналогом з шихтою із феросплавів. Так само, дроти № 1 та 2 мають нижчий у 2,9...4,2 рази коефіцієнт втрат при наплавленні у порівнянні із дротом-аналогом.

Аналіз даних по величині струму та напруги, отриманих під час наплавлення дослідними дро-

тами показав (табл. 3), що найбільш стабільним є процес наплавлення дротом № 1 – він характеризується найменшим діапазоном відхилення значень від середнього по величині струму та напруги. Найменшою стабільністю характеризується процес наплавлення дротом-аналогом № 3, з шихтою із феросплавів, що, очевидно, може бути пояснено тим, що кінетика перебігу процесу плавлення порошкового дроту, в якому містяться компоненти однакового складу та типу (гранульований порошок ПГ-Р6М5), а також мають ідентичні фізичні властивості, (густина, температура плавлення, електропровідність тощо) буде характеризуватися

Таблиця 3. Порівняльна оцінка стабільності процесу дугового наплавлення дослідними дротами

Параметр	Марка дроту		
	№ 1	№ 2	№ 3
Задана величина напруги, В	28,0		
Мінімальне значення напруги, В	26,03	25,91	25,27
Максимальне значення напруги, В	32,39	32,72	36,41
Середнє значення напруги, В	29,45	29,19	29,46
Діапазон відхилення по напрузі, В	-1,97/+1,45	-2,09/+4,72	-2,73/+8,41
Коефіцієнт варіації по напрузі на дузі K_u , %	4,72	4,99	6,07
Задана величина струму, А	200,0		
Мінімальне значення струму, А	136,4	127,8	128,6
Максимальне значення струму, А	252,0	266,0	312,0
Середнє значення струму, А	194,8	194,9	214,6
Діапазон відхилення по струму, А	-63,6/+52,0	-72,2/+66,0	-71,4/+112,0
Коефіцієнт варіації по струму K_I , %	14,12	14,71	16,18

Таблиця 2. Порівняльна оцінка зварювально-технологічних властивостей дослідних дротів

Параметр	Тип дроту		
	№ 1	№ 2	№ 3
Характер збудження дуги	легкий	легкий	легкий
Стабільність горіння дуги	стабільне	стабільне	стабільне
Якість формування наплавленого валика	якісне	якісне	якісне
Якість відділення шлакової кірки	задовільне	задовільне	задовільне
Наявність видимих дефектів (пори, тріщини, несплавлення і т.п.)	немає	немає	немає
Коефіцієнти, %:			
– розплавлення α_p	17,1	16,2	13,6
– наплавлення α_n	16,8	15,8	12,6
– втрат ψ	1,75	2,47	7,35

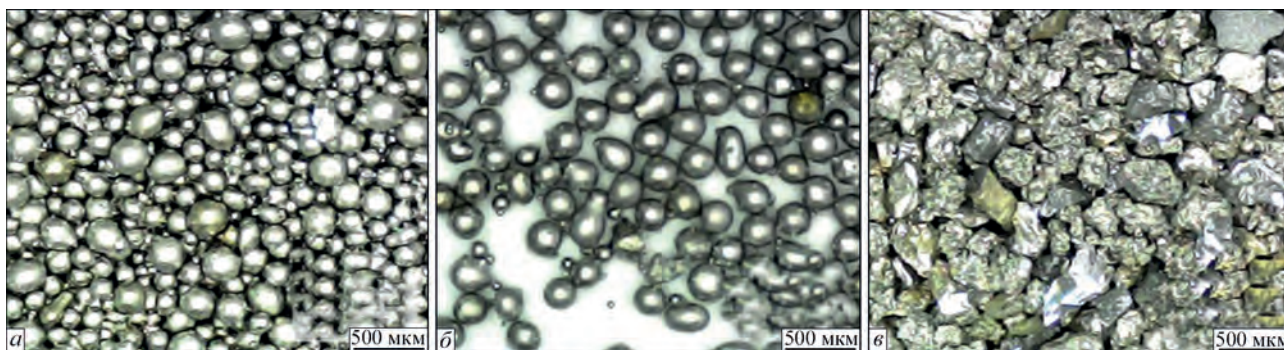


Рис. 2. Зовнішній вигляд зразків шихти з порошку Р6М5 грануляцією 50...300 мкм (а) та 200...250 (б), а також феросплавів грануляцією 50...300 мкм (в)

більшою стабільністю у порівнянні з кінетикою плавлення дроту, в шихті якого знаходяться феросплави та інші компоненти, в яких ці характеристики різняться [18].

Дещо вищі зварювально-технологічні властивості дроту № 1 у порівнянні з дротом № 2 (обидва мають шихту з гранульованого порошку Р6М5) може бути пояснено, на нашу думку, різницею у гранулометричному складі використаних порошків. У дроті № 1 використовувались порошки, які складаються з глобулярних частинок розміром 50...300 мкм, а в дроті № 2 – ті ж частинки, але розміром 200...250 мкм (рис. 2).

Очевидно, що при застосуванні для шихти дроту компонентів майже однакового, досить великого розміру (200...250 мкм), під час виготовлення дроту між компонентами утворюються пустоти, що може впливати на кінетику плавлення порошкового електродного дроту. При використанні в шихті порошків з широким діапазоном гранулометричного складу – від 50 до 300 мкм – таких пустот у шихті утворюється значно менше, що пов'язано з більш високою щільністю та однорідністю порошкового дроту, який плавиться більш стабільно.

Висновки

1. Комплексним порівняльним дослідженням зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для дугового наплавлення, в шихті яких використано матеріали двох різних типів – гранульовані порошки та феросплави, встановлено, що використання в шихті порошкових дротів гранульованих матеріалів забезпечує отримання більш високих зварювально-технологічних властивостей, підвищення стабільності процесу дугового наплавлення, якості формування наплавленого металу та зниження в ньому вмісту шкідливих домішок сірки та фосфору.

2. Експериментально визначено, що тип вихідних шихтових компонентів та їх гранулометричний склад мають значний вплив на стабільність

перебігу процесу дугового наплавлення, а отже, можуть позначитись на структурі й експлуатаційних властивостях наплавленого металу.

Список літератури/References

1. Bely, A.I., Zhudra, A.P., Dzykovich V.I. (2002) Effect of alloying elements on structure of composite alloy based on tungsten carbides. *The Paton Welding J.*, **11**, 17–19.
2. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kyiv, Ekotekhnologiya. ISBN 978-966-8409-31-8 [in Russian].
3. Ryabtsev, I., Fomichov, S., Kuznetsov, V. et al. (2023) *Surfacing and additive technologies in welded fabrication*. Switzerland, Springer Nature AG. ISBN 978-3-031-34390-2.
4. Guk, V.A. (2000) Materials and technology for surfacing of machine parts operating under conditions of impact-abrasive wear. *The Paton Welding J.*, **8**, 11–13.
5. Skulsky, V.Yu. (2006) Effect of the degree of alloying of heat-resistant chromium steels on hardness of metal within the welded joint zone. *The Paton Welding J.*, **9**, 17–20.
6. Czupryński, A. (2020) Comparison of properties of hardfaced layers made by a metal-core-covered tubular electrode with a special chemical composition. *Materials*, **13**(23):5445. <https://doi.org/10.3390/ma13235445>.
7. Niagaj, J. (2011) Effect of niobium on properties of hardfaced layers surface welded by Fe–Cr–C open arc flux-cored wire electrodes. *Przegląd Spawalnictwa*, **10**, 67–72.
8. Gasik, M., Dashevskii, V., Bizhanov, A. (2020) *Ferroalloys: Theory and Practice*. Switzerland, Springer Nature. ISBN 978-3-030-57501-4.
9. Kucher, I.G., Ol'shanskiy, V.I., Filippov, I.I., Kucher, I.I. (2020) *Ferroalloy Manufacturer's Handbook*. Lviv, Novyy Svit. ISBN 978-966-418-261-1. [in Russian].
10. Popov, V.S., Bilonik, I.M., Berezhny, S.P. (2003) Application of charge materials obtained by electroslag smelting to improve the quality of weld metal. In: *Abstr. of Papers on Modern Problems of Welding and Structural Life*. Kyiv, PWI, 60–61 [in Russian].
11. Pokhodnya, I.K., Suptel, A.M., Shlepakov, V.N. (1972) *Welding with flux-cored wire*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
12. Shlepakov, V.N., Naumejko, S.M. (2009) Peculiarities of desulphurisation of weld metal in flux-cored wire welding. *The Paton Welding J.*, **2**, 16–18.
13. Lentyugov, I.P., Ryabtsev, I.A. (2015) Structure and properties of metal deposited by flux-cored wire with charge of used metal-abrasive wastes. *The Paton Welding J.*, **6**, 87–89. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.06.19>.
14. Kondratyev, I.A. (2015) Flux-cored wire filled with granular alloy. Surfacing. Technologies, materials, equipment: *Coll. of articles*. Kyiv, PWI, 53–54 [in Russian].
15. Zhudra, A.P., Krivchikov, S.Yu., Dzykovich, V.I. (2014) Application of complex-alloyed powders produced by thermocentrifugal sputtering in flux-cored wires. *The Paton Welding J.*, **12**, 36–40. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.12.08>.

16. Górká, J., Czupryński, A., Żuk, M. et al. (2018) Properties and structure of deposited nanocrystalline coatings in relation to selected construction materials resistant to abrasive wear. *Materials*, **11**(7):1184. <https://doi.org/10.3390/ma11071184>.

17. Pokhodnya, I.K., Gorpenyuk, V.N., Milichenko, S.S. et al. (1990) *Metallurgy of arc welding: Processes in the arc and melting of electrodes*. Ed. by I.K. Pokhodnya. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

WELDING AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF FLUX-CORED WIRE WITH THE CHARGE IN THE FORM OF GRANULAR POWDER

I.O. Riabtsev¹, A.A. Babinets¹, I.P. Lentiugov¹, J. Niagaj², A. Czuprynski³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: a_babinets@ukr.net

²Niagaj J., Upper Silesian Institute of Technology, E-mail: Jerzy.Niagaj@git.lukasiewicz.gov.pl.

³Czuprynski A., Silesian Polytechnic Institute, E-mail: artur.czuprynski@polsl.pl

Comparative experimental studies on the influence of the type and particle size distribution of powders of the original metal granular materials, used as a flux-cored wire charge, on its welding and technological properties during submerged arc surfacing were carried out. High-speed steel powder PG-R6M5 with the granulation of 50...300 μm and 200...250 μm, obtained by spraying a melt metal, was used as a charge for the experimental wires. As the reference, flux-cored wire was used, the charge of which consists of ferroalloys with a granulation of 50...300 μm, calculated to ensure a similar chemical composition of the deposited metal and manufactured using standard technology. It was experimentally determined that the welding and technological properties of three types of wires are at a high level, while the surfacing process with flux-cored wires, the charge of which contains granulated powder PG-R6M5, is characterized by greater stability, which affects an increase in melting and surfacing coefficients, and a decrease in the loss coefficient compared to the analogue wire with a charge of ferroalloy powders. It was also determined that the content of harmful impurities in the specimen deposited by experimental wires with a charge of granular powders is lower than in the reference specimen. The patterns noted above indicate that the use of granulated powder in the charge of flux-cored wires is not only technically possible, but also leads to an increase in the uniformity of a flux-cored wire, which has a positive effect on its welding and technological properties. 18 Ref., 3 Tabl., 2 Fig.

Keywords: arc surfacing, flux-cored wire, flux-cored wire charge, particle size distribution of powders, ferroalloys, welding and technological properties, deposited metal, stability of surfacing, metallurgical heredity

Отримано 16.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 23.05.2024

Прийнято 08.07.2024

ПЕРЕДПЛАТА 2025

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	–	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.
** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр», «Мер-курій» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.
Можлива також передплата на електронні версії журналів.

3

АВТОМАТИЧНЕ
ЗВАРЮВАННЯ

ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА
ТА
НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

The Paton

WELDING JOURNAL

Е

СУЧАСНА

ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ

Адреса видавництва

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com