

ЗВАРЮВАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ, ШИХТА ЯКОГО МІСТИТЬ ЛІГАТУРУ З БОРОМ

І.О. Рябцев, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов

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

З метою підвищення експлуатаційних властивостей металу, наплавленого порошковим дротом ПП-Нп-50Х2МНСГФ, до його шихти вводили борвмісну лігатуру ФХБ-1 з таким розрахунком, щоб отримати вміст бору в наплавленому металі на рівні 0,01 %. Експериментально досліджено вплив введення лігатури ФХБ-1 в шихту порошкового дроту на його зварювально-технологічні властивості. Встановлено, що використання лігатури з бором у шихті порошкового дроту не погіршує його зварювально-технологічні властивості, при цьому мікролегування бором призводить до подрібнення структури наплавленого металу та підвищує його твердість з *HRC* 53...57 до *HRC* 60...62 при однаковому вмісті інших легуючих елементів. Розроблений порошковий дріт ПП-Нп-50Х2МНСГФ пропонується використовувати для наплавлення зносостійких шарів для захисту деталей спеціальних машин та механізмів в гірничодобувній, металургійній та інших галузях промисловості, які працюють в складних умовах абразивного зношування у поєднанні з інтенсивними ударними навантаженнями. Бібліогр. 11, рис. 4, табл. 2.

Ключові слова: дугове наплавлення, порошковий дріт, мікролегування, зварювально-технологічні властивості, наплавлений метал, формування наплавленого металу

Вступ. Аналіз показує, що бор досить часто застосовується в якості мікролегуючого елемента при виплавці різноманітних сталей та сплавів з метою підвищення їх експлуатаційних властивостей [1–6]. Разом з тим застосування бору в якості мікролегуючої або модифікуючої добавки при наплавленні (зварюванні) досить обмежене [7–10], що пов'язане зі складнощами при виборі типу та способу введення борвмісних компонентів в зварювальну ванну, процесах засвоєння бору, визначенням його оптимальних концентрацій та ін., адже бор здатен досить суттєво впливати на властивості сталей та сплавів при його концентраціях у межах сотих і тисячних часток відсотків.

Так, в роботі [11] показано, що мікролегування наплавленого металу 25Х5ФМС бором в межах 0,007...0,010 % призводить до значного подрібнення його мікроструктури та деякого збільшення мікротвердості матриці та, при цьому, не погіршує якість формування наплавленого металу.

Це позитивно впливає на експлуатаційні властивості мікролегованого бором наплавленого металу – його термо- та зносостійкість підвищується в 1,5...2,0 рази. Підвищення концентрації бору в наплавленому металі $\geq 0,02$ % призводить до подальшого підвищення мікротвердості сталі 25Х5ФМС, однак негативно впливає на тріщиностійкість металу – в ньому утворюється значна кількість тріщин, які розповсюджуються через всі шари наплавленого металу.

Мета роботи полягає у визначенні впливу мікролегування бором на зварювально-технологічні властивості наплавлювального порошкового дроту ПП-Нп-50Х2МНСГФ, призначеного для підвищення зносостійкості деталей спеціальних машин та механізмів в гірничодобувній, металургійній та інших галузях промисловості, які працюють в складних умовах абразивного зношування у поєднанні з інтенсивними високодинамічними ударними навантаженнями.

Матеріали та методики досліджень. Для захисту робочих поверхонь вказаних вище деталей, до яких відносяться футерувальні елементи грохотів, бункерів, кузовів кар'єрних самоскидів, лопатей і покривних дисків роторів тягодуттєвих машин та подібні їм деталі, в роботі пропонується наносити зносостійкі шари металу шляхом електродугового наплавлення під флюсом порошковим дротом марки ПП-Нп-50Х2МНСГФ.

Загальна товщина наплавленого зносостійкого металу залежить від умов експлуатації конкретної деталі і може складати 3...10 мм. Враховуючи високий коефіцієнт розбавлення наплавленого металу основним (до 50 %) при дуговому наплавленні порошковими дротами, для досягнення заданого хімічного складу наплавленого металу зазвичай необхідно наплавляти 3...4 шари. Виходячи з необхідності в деяких випадках забезпечити заданий хімічний склад та властивості вже в 1...2 шарі наплавленого металу, уточнювали шихтовий склад порошкового дроту ПП-Нп-50Х2МНСГФ, а також

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>

© І.О. Рябцев, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов, 2023

в шихту додатково вводили лігатуру ФХБ-1, яка містить 12 % бору.

Кількість лігатури ФХБ-1, яку у вигляді порошку додавали безпосередньо у шихту дослідного порошкового дроту при його виготовленні, розраховували таким чином, щоб з урахуванням коефіцієнтів заповнення дроту та переходу легуючих елементів в наплавлений метал отримати вміст бору у наплавленому металі на рівні 0,01 %. Така концентрація бору в наплавленому металі була обрана з метою запобігання утворенню тріщин [11]. Конструкція порошкового дроту – трубчаста з напуском крайок, діаметр – 1,8 мм, коефіцієнт заповнення – 24 %.

Наплавлення дослідних зразків виконували одиночними валиками під флюсом АН-26П на установці У-653 із джерелом живлення ВДУ-506 з використанням наступних режимів: напруга 24 В, струм 220 А, швидкість наплавлення 20 м/год, крок наплавлення 4 мм, струм постійний, полярність зворотна. В якості основного металу використовували пластини зі сталі 40Х.

Було виготовлено дві серії дослідних зразків. Першу серію наплавляли дротами стандартного та дослідного складу у чотири шари, після чого виконували візуальний огляд наплавленої поверхні до і після її механічного зачищення. Другу серію зразків наплавляли ступінчато у один, два та три шари, після чого за допомогою рентгеноспектрального метода визначали хімічний склад наплавленого металу у верхньому шарі.

Зварювально-технологічні властивості дослідного дроту ПП-Нп-50Х2МНСГФ, мікролегованого бором, у порівнянні з дротом цієї ж марки стандартного складу, оцінювали за такими параметрами:

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

Для розрахунку коефіцієнтів розплавлення (α_p), наплавлення (α_n) та втрат (ψ) визначали масу пластин та дротів перед наплавленням та після нього, а також фіксували час наплавлення. Відпо-

відні коефіцієнти визначали, використовуючи широківідомі вирази:

$$\alpha_p = G_p / (I \cdot t), \quad (1)$$

$$\alpha_n = G_n / (I \cdot t), \quad (2)$$

$$\psi = ((\alpha_p - \alpha_n) / \alpha_p) \cdot 100 \% \quad (3)$$

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

Результати експериментів та їх обговорення.

Зовнішній вигляд першої серії зразків одразу після наплавлення та після механічного зачищення наплавленої поверхні наведений на рис. 1. Зі зразків другої серії були вирізані темплети (рис. 2), підготовлені мікрошліфи та проведені дослідження структури зразків при збільшеннях $\times 240$ (рис. 3, 4). Хімічний склад та твердість металу, наплавленого стандартним та дослідним порошковими дротами ПП-Нп-50Х2МНСГФ, а також

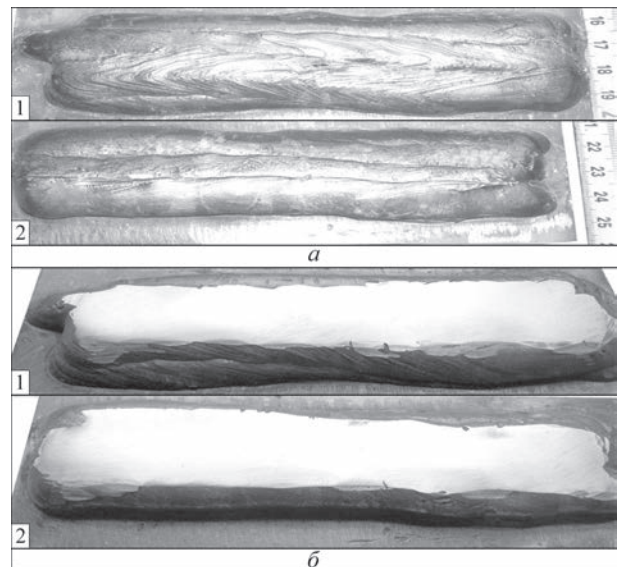


Рис. 1. Зовнішній вигляд валиків, наплавлених дротами ПП-Нп-50Х2МНСГФ стандартного (1) та дослідного (2) складів одразу після наплавлення (а) та після механічного зачищення поверхні (б)

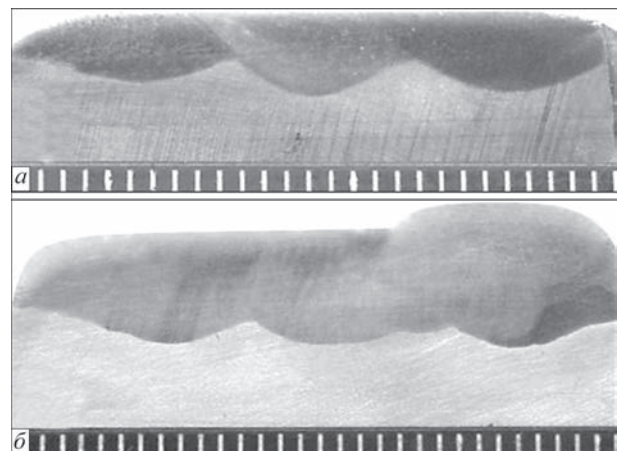


Рис. 2. Макрошліфи металу, наплавленого дротом ПП-Нп-50Х2МНСГФ дослідного складу в один (а), два та три шари (б)

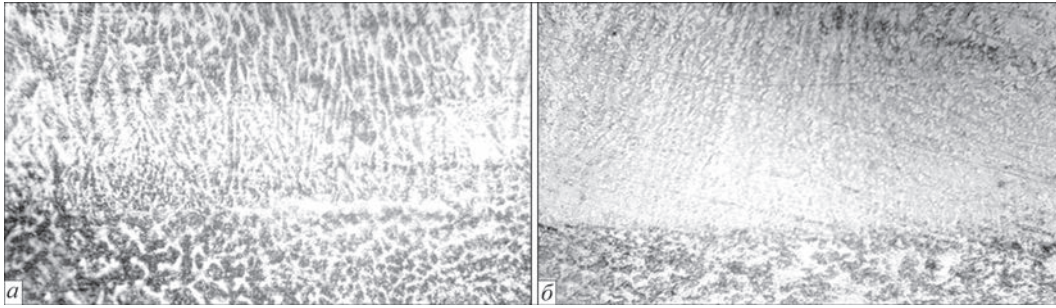


Рис. 3. Мікроструктура ($\times 240$) металу біля лінії сплавлення в зразках, наплавлених дротом ПП-Нп-50X2МНСГФ стандартного (а) та дослідного (б) складу

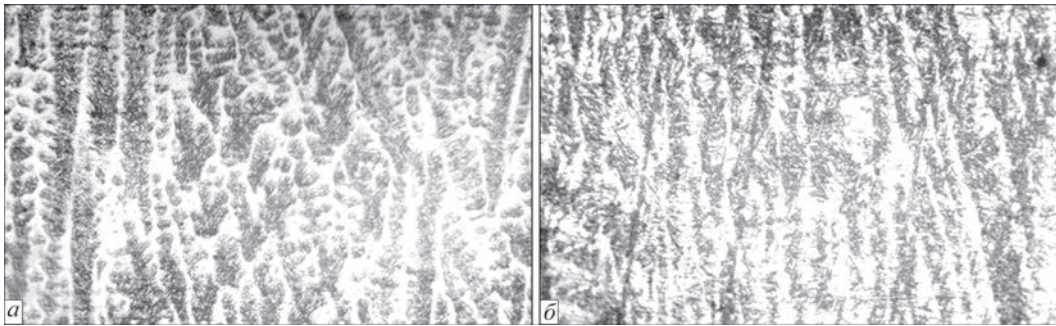


Рис. 4. Мікроструктура ($\times 240$) центральної частини металу в зразках, наплавлених дротом ПП-Нп-50X2МНСГФ стандартного (а) та дослідного (б) складу

склад наплавленого металу 50X2МНСГФ по ТУ наведено у табл. 1.

Як видно з рис. 1, мікролегування бором при його концентрації в наплавленому металі 50X2МНСГФ 0,01 % не погіршує якість його формування. Віддільність шлакової кірки в усіх зразках залишається на однаковому, задовільному рівні, шпінелі на поверхні зразків відсутні. Пори, тріщини та інші дефекти на поверхні наплавленого металу також відсутні.

Таблиця 1. Хімічний склад та твердість металу, наплавленого порошковими дротами ПП-Нп-50X2МНСГФ стандартного та дослідного складів

Тип наплавленого металу	Кількість наплавлених шарів	Масова доля елементів, %								Твердість HRC
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	B	
50X2МНСГФ, (по ТУ)	3...5	0,3...0,5	0,4...1,0	0,4...1,0	1,5...2,5	0,8...1,6	0,3...0,6	0,3...0,6	–	55...60
50X2МНСГФ (стандартний)	4	0,42	0,89	0,75	1,88	1,52	0,48	0,37	–	53...57
50X2МНСГФ (дослідний)	1	0,39	0,75	0,65	1,41	1,24	0,37	0,28	0,004	55...57
	2	0,43	0,83	0,72	1,86	1,47	0,43	0,35	0,005	57...60
	3	0,46	0,97	0,83	1,94	1,54	0,54	0,43	0,006	60...62

Таблиця 2. Зварювально-технологічні властивості порошкових дротів ПП-Нп-50X2МНСГФ стандартного та дослідного складів

Параметр	Тип дроту	
	Стандартний	Дослідний
Характер збудження дуги	легкий	легкий
Коефіцієнтами:		
– розплавлення – α_p , г/А·год	17,56	17,52
– наплавлення – α_n , г/А·год	17,04	16,98
– втрат – ψ , %	2,96	3,08
Стабільність горіння дуги	Стабільне	Стабільне
Якість формування наплавленого валика	Якісне	Якісне
Наявність дефектів в наплавленому металі	Відсутні	Відсутні
Якість відділення шлакової кірки	Задовільне	Задовільне
Відповідність хімічного складу та твердості наплавленого металу технічним вимогам	Відповідає (еталон)	Відповідає

несплавлень – відсутні. Структура металу достатньо однорідна, при цьому вона більш дрібнозерниста у випадку мікролегуювання бором (рис. 4, б). Узагальнені дані по порівняльній оцінці зварювально-технологічних властивостей розробленого порошкового дроту ПП-Нп-50Х2МНСГФ стандартного та дослідного складів наведено в табл. 2.

З даних, приведених в табл. 2, витікає, що зварювально-технологічні властивості дослідного порошкового дроту ПП-Нп-50Х2МНСГФ із мікролегуючими добавками бору, за всіма параметрами знаходяться на високому рівні та відповідають характеристикам дроту тієї ж марки стандартного складу.

Висновки

Встановлено, що використання лігатури ФХБ-1 з бором у шихті порошкового дроту ПП-Нп-50Х2МНСГФ не погіршує його зварювально-технологічні властивості. При цьому мікролегуювання бором у кількості 0,006...0,012 % призводить до подрібнення структури наплавленого металу та дозволяє підвищити його твердість з *HRC* 53...57 до *HRC* 60...62 при однаковому вмісті інших легуючих елементів.

Список літератури/References

1. Baker, T.N. (2016) Microalloyed steels. *Ironmaking & Steelmaking*, 43(4), 264–307. <https://doi.org/10.1179/1743281215Y.0000000063>
2. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. (1986) *Борсодержащие стали и сплавы*. Lyakishev, N.P., Pliner, U.L., Lappo, S.I. (1986) *Boron-containing steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Маняк Н.А., Маняк Л.К. (2002) Влияние бора на структуру и вязкость низколегированной стали. *Металл и литье Украины*, 5-6, 23–25.

- Manyak, N.A., Manyak, L.K. (2002) Influence of boron on structure and toughness of low-alloyed steel. *Metall i Lityo Ukrainy*, 5-6, 23–25 [in Russian].
4. Проїдак Ю.С., Манидин В.С., Ісаєва Л.Є. та ін. (2020) Мікролегуювання низьковуглецевої сталі бором та спосіб визначення ефективної концентрації розчиненого бору. *Теорія і практика металургії*, 1, 18–23. <http://dx.doi.org/10.34185/tpm.1.2020.02>
- Proidak, Yu.S., Manydyn, V.S., Isaieva, L.E. et al. (2020) Microalloying of low-carbon steel with boron and method of determination of dissolved boron effective concentration. *Teoriya i Praktyka Metalurgii*, 1, 18–23 [in Ukrainian]. <http://dx.doi.org/10.34185/tpm.1.2020.02>
5. Mujagic, D., Imamovic, A., Hadzalic, M. (2021) The influence of microalloying with boron on properties of austenite stainless steel X8CrNiS18-9. *Int. J. of Adv. Res.*, 9, 695–700. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/13596>
6. Xiao, L.-J., Qiu, S.-T., Liu, J.-Q., Gan, Y. (2008) Research and application status of boron microalloying in high quality steel plate. *Journal of Iron and Steel Research*, 20(5), 1-4.
7. Zhudra, A.P., Krivchikov, S.Yu., Petrov, V.V. (2004) Selection of boron-containing charge materials for the core of flux-cored wire. *The Paton Welding J.*, 4, 51–52.
8. Krivchikov, S.Yu. (2012) Modification by boron of deposited metal of white cast iron type. *The Paton Welding J.*, 6, 19–21.
9. Maksimov, S.Yu., Machulyak, V.V., Sheremeta, A.V., Goncharenko, E.I. (2014) Investigation of influence of microalloying with titanium and boron of weld metal on its mechanical properties in underwater welding. *The Paton Welding J.*, 6-7, 76–79. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.15>
10. Бабінець А.А., Рябцев І.О. (2021) Вплив модифікування та мікролегуювання на структуру та властивості наплавленого металу (Огляд). *Автоматичне зварювання*, 10, 3–11. <https://doi.org/10.37434/as2021.10.01>
- Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O. (2021) Influence of modification and microalloying on deposited metal structure and properties (Review). *The Paton Welding J.*, <https://doi.org/10.37434/as2021.10.01>
11. Рябцев І.О., Бабінець А.А., Лентюгов І.П., Богайчук І.П. (2022) Вплив мікролегуювання бором на структуру та властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25Х5ФМС. *Автоматичне зварювання*, 6, 3–11. <https://doi.org/10.37434/as2022.06.01>
- Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O., Lentuyugov, I.P., Bogaichuk, I.L. (2022) Influence of microalloying with boron on the structure and properties of deposited metal of the type of tool steel 25Kh5FMS. *The Paton Welding J.*, 6, 3–10. <https://doi.org/10.37434/as2022.06.01>

WELDING-TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF FLUX-CORED WIRE WITH BORON-CONTAINING BINDER IN THE CHARGE

I.O. Ryabtsev, A.A. Babinets, I.P. Lentuyugov

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

E-mail: office@paton.kiev.ua.

In order to improve the performance of metal deposited with PP-Np-50Kh2MNSGF flux-cored wire, boron-containing FKbB-1 binder was added to the wire charge in such a way as to obtain boron content on the level of 0.01 % in the deposited metal. The effect of adding FKbB-1 binder to the flux-cored wire charge on its welding-technological properties was studied experimentally. It was found that application of boron-containing binder in the flux-cored wire charge does not impair its welding-technological properties, boron microalloying leading to refinement of the deposited metal structure and increases its hardness from *HRC* 53...57 to *HRC* 60...62 at the same content of other alloying elements. Developed PP-Np-50Kh2MNSGF flux-cored wire is proposed for deposition of wear-resistant layers for protection of parts of special machines and mechanisms in mining, metallurgical and other industries, operating under the difficult conditions of abrasive wear in combination with intense shock loads. 11 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: arc surfacing, flux-cored wire, microalloying, welding-technological properties, deposited metal, deposited metal formation

Надійшла до редакції 30.06.2023