

ПРОГНОЗУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЗАПОВНЕННЯ ТА ГУСТИНИ ШИХТИ САМОЗАХИСНОГО ПОРОШКОВОГО ДРОТУ ЗМІННОГО СКЛАДУ

Б. О. ТРЕМБАЧ¹, Д. Б. ГЛУШКОВА², В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ³,
В. А. ВИНАР³, В. І. ЗАКІЄВ^{4,5}, О. В. КАБАЦЬКИЙ⁶,
Д. В. САВЕНКО⁷, О. Ю. ЗАКАВОРОТНИЙ⁸

¹ Новокраматорський машинобудівний завод, Київ;

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет;

³ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

⁴ Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського";

⁵ Національний авіаційний університет, Київ;

⁶ Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ;

⁷ Донбаська національна академія будівництва і архітектури, Краматорськ;

⁸ Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Показано, що використання екзотермічного додатка (ЕД) для шихти в порошковому дроті є перспективним напрямком поліпшення технологічних характеристик зварних швів. Побудовано математичні моделі визначення густини шихти та коефіцієнта заповнення, які залежать від вмісту ЕД, співвідношення графіту до окиснювача ЕД (CuO/C), співвідношення окиснювача до порошку алюмінію в його складі (CuO/Al). Визначено, що на досліджені режими наплавлення найбільше впливають такі значення: ЕД = 26...28 mass%, CuO/C = 4...4,5 і CuO/Al = 4,5...5,25.

Ключові слова: самозахисний порошковий дріт, наплавлення, коефіцієнт заповнення, густина шихти, екзотермічний додаток.

The use of exothermic addition (EA) as a filler core component in a flux-cored wire is a promising way to improve the welding and technological characteristics of welded joints. The mathematical models to determine the core filler density and the filling factor, which depend on the EA content, the ratio of graphite and oxidizer of the EA (CuO/C) and the ratio of the oxidizer to the reducing agent in the composition of the EA (CuO/Al) are built. It is found that the investigated fusion modes depend most of all on such parameters: EA = 26...28 mass%, CuO/C = 4...4.5 and CuO/Al = 4.5...5.25.

Keywords: self-shielded flux cored wire, fusion, fill factor, exothermic addition.

Вступ. На сьогодні використовують широку номенклатуру порошкових дротів для наплавлення, щоб отримати різні за хімічним складом [1–4] та властивостями [5–8] сплави. Порошкові дроти складаються зі зовнішньої металевої оболонки та шихти. Здебільшого необхідний хімічний склад наплавленого металу забезпечують регулюванням композиції шихти.

Сучасні дослідження показали важливість такого параметра, як коефіцієнт заповнення (C_{WF}) [9–14]. Його визначають як відношення масової частки складників шихти до порошкового дроту. Він впливає на наплавлення металу [12], кількість димовиділення [10], схильність до утворення гарячих тріщин [13], ста-

більність горіння зварювальної дуги та втрати на розбризування [10, 11, 14]. Водночас на C_{WF} діють такі чинники: товщина металевої стрічки [10], склад використаних порошків [15] та технологія виготовлення порошкового дроту [14]. Ще одним важливим показником є густина шихти [11, 12]. Від цього показника залежить продуктивність наплавлення, втрати на розбризування, морфологія наплавленого валика та ступінь легування наплавленого металу [11, 12]. Під час наплавлення порошковими дротами зварювальна дуга на електроді розташовується переважно по периметру кінця металевої оболонки. Такий механізм горіння зварювальної дуги впливає на характер перенесення електродного матеріалу, особливо за низьких зварювальних струмів. Раніше встановили [10], що низькі значення зварювального струму погіршують рівномірність плавлення металевої оболонки та шихти, особливо зі збільшенням коефіцієнта заповнення. Під час процесу збільшується виступ шихти, який миттєво плавиться зварювальною дугою. При цьому виділяються гази від розпаду газоутворювальних компонентів шихти [10], що спричиняє порушення газового захисту та збільшує коефіцієнт розбризування [12]. Потрапляння нерозплавленої шихти у зварювальну ванну забруднює наплавлений метал неметалевими включеннями і його хімічна неоднорідність збільшується [16].

Рівномірність плавлення електродного дроту можна забезпечити введенням екзотермічного додатка (ЕД). Він забезпечує виділення додаткового тепла на кінці електрода у стовпі дуги, що компенсує недостатню кількість тепла для плавлення шихти [16, 17]. Проте в сучасній літературі недостатньо вивчено його вплив на коефіцієнт заповнення (C_{WF}) та густину шихти (ρ_f).

Мета роботи – дослідити вплив кількості екзотермічного додатка (CuO–Al), співвідношення окиснювача до відновника (CuO/Al), співвідношення графіту до окиснювача (CuO/C) у ньому на коефіцієнт заповнення і густину шихти.

Матеріали та методика експерименту. Обрали такі чинники: x_1 – співвідношення графіту до окиснювача ЕД (CuO/C = 3...6); x_2 – співвідношення окиснювача і відновника в ЕД (CuO/Al = 3...6); x_3 – вміст ЕД = 20...46 (mass%).

$$\text{CuO/C} = 3 + 3 \cdot x_1, \quad (1)$$

$$\text{CuO/Al} = 3 + 3 \cdot x_2, \quad (2)$$

$$\text{ЕД} = 20 + 26 \cdot x_3. \quad (3)$$

Для досліджень, згідно з матрицею експерименту, виготовили 10 самозахисних порошкових дротів (СПД) (табл. 1), а режими їх наплавлення наведені у табл. 2.

Таблиця 1. Склад шихти експериментальних СПД, mass%

Найменування компонента	Експериментальний дріт									
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Плашковий шпат ГОСТ 4421-73	11									
Рутиловий концентрат ГОСТ 22938-78	6									
Карбонат кальцію ГОСТ 8252-79	3									
Феромарганець ФМн-88А ГОСТ 4755-91	7									
Феросиліцій ФС-75 ГОСТ 1415-78	4									

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ферованадій ФВд-50 ГОСТ 27130-94	4									
Хром металевий Х99 ГОСТ 5905-79	14	14	14	14	12	14	12	14	14	11
Титановий порошок ПТМ ТУ 14-22-57-92	3									
Графіт сріблястий	5,6	5,8	3,75	7,6	7,1	4,9	7	5,8	4,3	9,1
Оксид міді порош- коподібний ГОСТ 16539-79	16,7	23,3	17,2	22,8	28,4	21,8	26,1	21,8	17,2	38,6
Алюмінієвий порошок ПА1 ГОСТ 6058-73	2,8	5,8	4,3	4,6	9,5	5,8	7	4,9	3,5	11,4
Залізний порошок ПЖР-1 ГОСТ 9849-86	22,9	13,1	22,7	13	5	15,5	9,9	15,5	23	0

Таблиця 2. Режими зварювання під час наплавлення

Швидкість подачі дроту V_{wf} , m/h	111
Напруга на дузі U_a , А	28
Швидкість наплавлення V_s , m/min	0,3
Виліт електрода СТВД, mm	40

Відповідно до ДСТУ ГОСТ 26271-84, для визначення коефіцієнта заповнення з кожного СПД відрізають по три зразки завдовжки $l = 100...150$ mm. Їх зважують з похибкою трохи більше 0,01 g, після чого ретельно очищають металеву оболонку від шихти. Потім її зважують (m_2) та визначають вагу шихти, віднімаючи масу оболонки. Коефіцієнт

заповнення порошкового дроту визначали за рівнянням [11]

$$C_{WF} = m_1 / (m_1 + m_2), \quad (4)$$

де m_1 – вага порошку; m_2 – вага металевої оболонки.

Густина шихти визначали так:

$$\rho_f = m_1 / V_f, \quad (5)$$

де $V_f = l \cdot \pi \cdot d_v^2 / 4$ – об'єм, зайнятий наповнювачем; d_v – внутрішній діаметр металевої оболонки.

Вибирали математичну модель, враховуючи статистичні характеристики, а саме: коефіцієнт Фішера (F_{act}), критерій Стюдента (p), коефіцієнт детермінації (R_2). Що більше значення F , то краща модель. У дослідженні використано методу вибору змінних кінцевої моделі з умовним значенням p , що перевищує 0,15...0,2 [18].

Результати та їх обговорення. У табл. 3 наведені експериментальні та розрахункові коефіцієнти заповнення (C_{WF}) та густини шихти (ρ_f). Для їх визначення побудовані математичні моделі. Статистичні характеристики вибраних моделей наведено в табл. 4. Вони свідчать про їх достовірність та адекватність.

Регресійна модель коефіцієнта заповнення має такий вигляд

$$C_{WF} = 0,36 \cdot x_1 + 0,333 \cdot x_2 + 0,4276 \cdot x_3 - 0,2676 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,696 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,696 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,272 \cdot x_2 \cdot x_2 \cdot (x_2 - x_3). \quad (6)$$

Якісний аналіз отриманої математичної моделі показав, що лінійні показ-

ники рівняння ($x_n \cdot x_m$), а також показники, які враховують парні взаємодії, підвищують швидкість розплавлення, оскільки вони додатні.

Таблиця 3. Експериментальні та розрахункові значення C_{WF} та ρ_f

Порошковий дріт	Експериментальні	Розрахункові	Різниця	Відхилення, %
Коефіцієнт заповнення (C_{WF})				
E1	0,334	0,333	0,0010	0,3
E2	0,341	0,346	0,0046	1,36
E3	0,341	0,351	0,0100	2,94
E4	0,337	0,323	0,0137	4,05
E5	0,341	0,346	0,0047	1,36
E6	0,345	0,345	0,0000	0
E7	0,327	0,346	0,0186	5,69
E8	0,361	0,344	0,0167	4,62
E9	0,34	0,342	0,0020	0,59
E10	0,36	0,365	0,0049	1,37
Густина шихти (ρ_f)				
E1	0,334	0,333	0,0010	0,3
E2	0,341	0,346	0,0046	1,36
E3	0,341	0,351	0,0100	2,94
E4	0,337	0,323	0,0137	4,05
E5	0,341	0,346	0,0047	1,36
E6	0,345	0,345	0,0000	0
E7	0,327	0,346	0,0186	5,69
E8	0,361	0,344	0,0167	4,62
E9	0,34	0,342	0,0020	0,59
E10	0,36	0,365	0,0049	1,37

Таблиця 4. Аналіз відгуків

Критерії	Математична модель	
	C_{WF}	ρ_f
Коефіцієнт детермінації R_2	0,8978	0,986096
Якість моделі	Добра	Дуже добра
Коригований коефіцієнт детермінації R_2adj	0,6935	0,937434
Критерій Фішера F_{act}	5,943743	37,39628
Адекватність моделі	Адекватна	Адекватна
Критерій Стьюдента p	0,09266	0,026044
Статистична значущість моделі	Значуща	Значуща

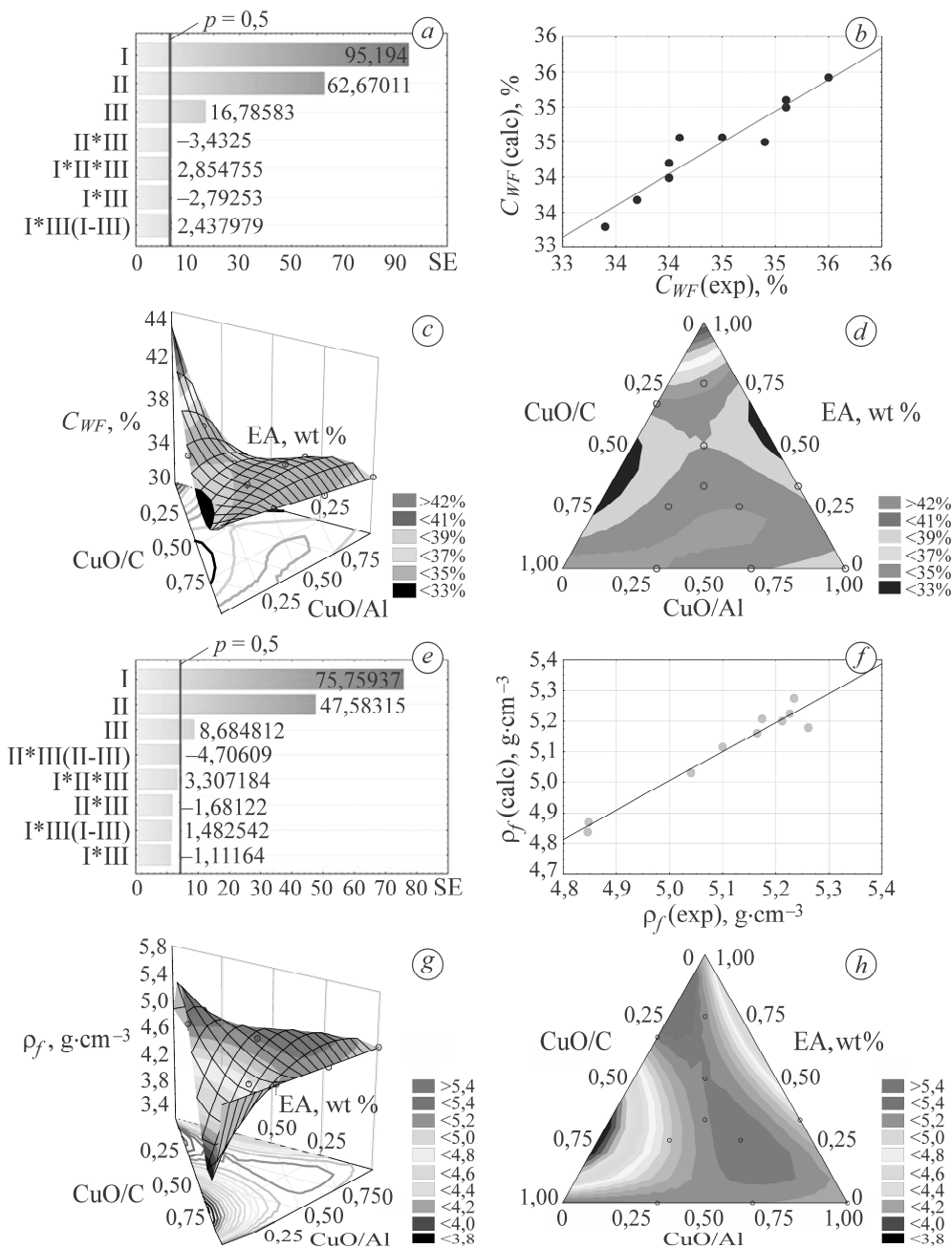


Рис. 1. Діаграма Парето (а, е), передбачувані та спостережувані значення залежної змінної (b, d), поверхня відгуку (c, g) та контурний графік (d, h) для коефіцієнта заповнення (C_{WF}) (a–d), густини шихти (ρ_f) (e–h), де SE – стандартизована оцінка показника (абсолютне значення); $C_{WF}(\text{exp})$, $C_{WF}(\text{calc})$ – експериментальні та розрахункові значення C_{WF} , I – CuO/Al, II – CuO/C, III – ЕД.

Fig. 1. Pareto chart (a, e), plot of observed and predicted values (b, d), response surface (c, g) and contour surface graphs (d, h) for fill factor (C_{WF}) (a–d), charge density (ρ_f) (e–h), where SE – standardized estimate of the index (absolute value); $C_{WF}(\text{exp})$, $C_{WF}(\text{calc})$ – observed and predicted value C_{WF} , I – CuO/Al, II – CuO/C, III – EA.

Порівняння коефіцієнтів заповнення, отриманих теоретичними розрахунками підстановкою змінних параметрів у рівнянні (6), з експериментальними зна-

ченнями, показали їх достатню точність.

Якість отриманої моделі для її застосування та прогнозування коефіцієнта заповнення підтверджується графіками (рис. 1). Діаграму Парето побудували (рис. 1а) для кращого виявлення впливу кожної змінної в цій математичній моделі. Її аналіз показав, що найбільше на коефіцієнт заповнення діють два лінійні показники, а саме: співвідношення окиснювача до відновника (CuO/Al) та графіту до окиснювача (CuO/C) у шихті. Вміст ЕД в електроді з порошковим дротом мав менший вплив на C_{WF} , а парні показники впливали на нього несуттєво. Обрана модель густини шихти (ρ_f) має дуже високі статистичні характеристики (табл. 4). Математична модель така:

$$\rho_f = 3,2 \cdot x_1 + 2,95 \cdot x_2 + 3,8354 \cdot x_3 - 7,321 \cdot x_1 \cdot x_3 - 5,1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 30,105 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 6,705 \cdot x_2 \cdot x_2 \cdot (x_2 - x_3). \quad (7)$$

Аналіз отриманої математичної моделі показав, що лінійні показники рівняння зі знаком плюс забезпечують зростання швидкості розплавлення за їх збільшення. Від'ємні ж значення коефіцієнтів рівняння свідчать про локальні обмеження, мінімальні або максимальні значення коефіцієнтів.

Проаналізувавши діаграму Парето (рис. 1е), бачимо, що співвідношення в композиції екзотермічного додатка окиснювача до відновника (CuO/Al) і графіту до окиснювача (CuO/C) мали найбільший вплив на густину шихти. Водночас відсоток ЕД та інші парні показники майже не впливають на ρ_f .

Для аналізу дії чинників на критерії оптимізації зручно використовувати графіки профілів бажаності, які дають змогу визначити графічно раціональні значення кожного з них із оцінкою реальних значень. Як бачимо (рис. 2), оптимальні значення C_{WF} досягають за $x_1 = 0,33 \dots 0,5$ (CuO/C = 4...4,5); $x_2 = 0,41 \dots 0,75$ (CuO/Al = 4,23...5,25); $x_3 = 0,1 \dots 0,3$ (ЕД = 23...28 wt%). Водночас для густини шихти (ρ_f) найвищі значення будуть досягнуті за $x_1 = 0,17 \dots 0,34$ (CuO/C = 3,51...4); $x_2 = 0,5 \dots 0,75$ (CuO/Al = 4,5...5,25); $x_3 = 0,2 \dots 0,3$ (ЕД = 26...28 wt%).

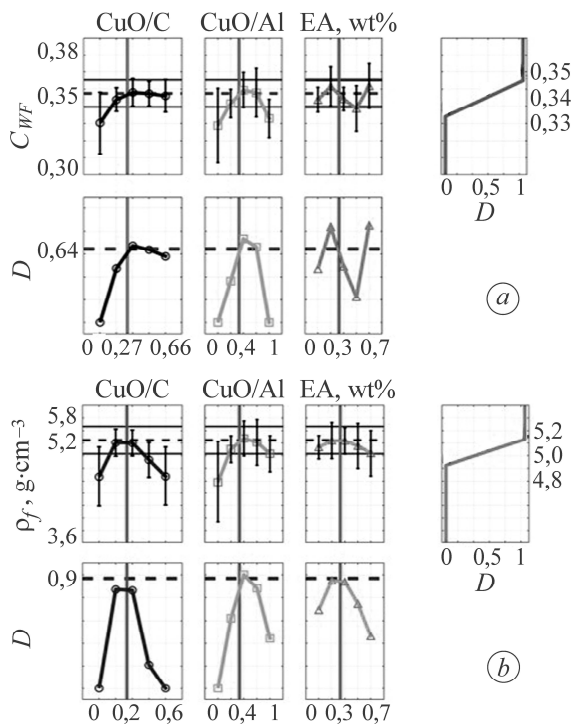


Рис. 2. Графік профілів для прогнозованих значень усіх змінних для коефіцієнта заповнення C_{WF} (а) та густини шихти ρ_f (б) з довірчими інтервалами та функцією бажаності D .

Fig. 2. Plot of profiles for predicted values of all response variables for factor C_{WF} (a) and charge density ρ_f (b) with confidence intervals and desirability function D .

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільший вплив на коефіцієнт заповнення та густину шихти має співвідношення окиснювача та відновника у складі екзотермічного додатка (CuO/Al), що відповідає вмісту алюмінієвого порошку. Меншу дію має співвідношення графіту до окиснювача додатка (CuO/C), який визначає вміст графіту в шихті. Щодо менші ці співвідношення, то більша кількість алюмінієвого порошку і відповідно графіту. Тому вплив вмісту екзотермічного додатка (CuO+Al) несуттєвий. Це можна пояснити зміною густини шихти через додавання графіту та різними механічними властивостями його частинок (пластичністю й міцністю). Як відомо, міцніші та менш пластичні частинки щільно заповнюють простір у шихті за багаторазового витягування (під час виробництва), і навпаки. Це явище особливо важливе для екзотермічних компонентів шихти. Густина порошку оксиду міді становить $\rho_{\text{CuO}} = 6,31 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, тоді як алюмінієвого порошку $\rho_{\text{Al}} = 0,96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (ГОСТ 605873), а порошку графіту – найменша $\rho_{\text{C}}=0,55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Слід врахувати, що алюмінієвий та графітовий порошки є м'якими матеріалами. Обмеження кількості ЕД системи CuO–Al можна пояснити еквівалентним збільшенням вмісту компонентів з меншою густиною алюмінієвого порошку.

Побудовані математичні моделі можна використати для визначення коефіцієнта заповнення та густини шихти самозахисного порошкового дроту з екзотермічним додатком CuO–Al.

ВИСНОВКИ

Досліджено теоретичними розрахунками та експериментами вплив екзотермічного додатка, вмісту графіту на густину шихти та коефіцієнт заповнення порошкового дроту. Побудовано математичні моделі, а також поверхні відгуків C_{WF} та ρ_f залежно від вмісту ЕД у шихті, співвідношення окиснювача до відновника (CuO/Al) екзотермічного додатка та співвідношення графіту до окиснювача (CuO/C). Визначено, що коефіцієнт заповнення СПД з екзотермічним додатком в шихті здебільшого залежить від співвідношення окиснювача і відновника (CuO/Al) та CuO/C. Оптимальні значення коефіцієнта заповнення та густини шихти забезпечують загальним вмістом екзотермічного додатка у діапазоні ЕД = 23...28 mass% та співвідношенням окиснювача до графіту і алюмінієвого порошку в межах: CuO/C = 4...4,5, CuO/Al = 4,23...5,25.

1. Student M. M., Pokhmurs'ka H. V., Zadorozhna K. R. Structure and wear resistance of VC–FeCr and VC–FeCrCo coatings obtained by supersonic flame spraying // *Materials Science*. – 2018. – **54**, № 1. – P. 22–29.
2. Development of surface properties with in situ TiB₂ intermetallic-assisted coating by Fe_(18-x)Ti₂B_x (x = 3; 4; 5)-based electrodes / E. Kocaman, B. Kılınc, Ş. Şen, and U. Şen // *Arabian J. for Sci. and Eng.* – 2022. – **47**, № 7. – Article number: 84858501.
3. Corrosion resistance of plasma-electrolytic layers on alloys and coatings of the Al–Cu–Mg system for various modes of heat treatment / M. M. Student, V. M. Posuvailo, H. H. Veseliv-s'ka, Ya. Ya. Sirak, and R. A. Yatsyuk // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 6. – P. 789–795.
4. Effect of incomplete replacement of Cr for Cu in the deposited alloy of Fe–C–Cr–B–Ti alloying system with a medium boron content (0.5 wt%) on its corrosion resistance / B. O. Trembach, M. G. Sukov, V. A. Vynar, I. O. Trembach, V. V. Subbotina, O. Yu. Rebrov, O. M. Rebrova, V. I. Zakiev // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2022. – **44**, № 4. – P. 493–513.
5. Sukhova O. V. The effect of carbon content and cooling rate on the structure of boron-rich Fe–B–C alloys // *Physics and Chemistry of Solid State*. – 2020. – **21**, № 2. – P. 355–360.
6. Investigation and modelling of the weight wear of friction pads of a railway disc brake / W. Sawczuk, A. Merkisz-Guranowska, D. Ulbrich, J. Kowalczyk, and A.-M. Rilo Canas // *Materials*. – 2022. – **15**, № 18. – 6312 p.
7. Tribocorrosion and abrasive wear test of 22MnCrB5 hot-formed steel / D. Ulbrich, A. Stachowiak, J. Kowalczyk, D. Wiczorek, and W. Matysiak // *Materials*. – 2022. – **15**, № 11. – 3892 p.

8. *Güney B. and Dilay Y.* Determination of abrasion resistance of Fe28Cr5C1Mn coating applied to 30MnB5 boron alloy cultivator blades via electric arc spray // Proc. of the Institution of Mech. Eng., Part C: J. of Mech. Eng. Sci. – 2022. – **236**, № 17. – Article number: 96879699.
9. *Ushio M., Raja A., and Matsuda F.* Melting characteristics of fluxcored wire (welding physics, process & amp; instrument) // Transactions of JWRI. – 1984. – **13**, № 1. – P. 1–6.
10. *Effect of flux ratio in flux-cored wire on wire melting behaviour and fume emission rate / E. Yamamoto, K. Yamazaki, K. Suzuki, and F. Koshiishi // Welding in the World. – 2010. **54**. – P. 154–159.*
11. *Effect of filling rate on underwater wet welding process and weld appearance / X. Zhang, N. Guo, C. Xu, H. Kan, Y. Tan, and H. Chen // Materials. – 2020. – **13**, № 5. – 1061 p.*
12. *Effect of flux ratio on droplet transfer behavior in metal-cored arc welding / N. Q. Trinh, S. Tashiro, T. Suga, T. Kakizaki, K. Yamazaki, T. Morimoto, H. Shimizu, A. Lersvanichkool, H. V. Bui, and M. Tanaka // Metals. – 2022. – **12**, № 7. – 1069 p.*
13. *Burger S., Zinke M., and Jüttner S.* Hot cracking tendency of flux-cored arc welding with flux-cored wires of types Ni 6625 // Welding in the World. – 2021. – **65**, № 3. – P. 381–392.
14. *Peculiarities of technology of manufacture and application of flux-cored strips for surfacing / A. P. Voronchuk, A. P. Zhudra, V. O. Kochura, and A. V. Petrov // The Paton Weld. J. – 2015. № 5–6. – P. 107–111.*
15. *Chao L., Jianxun G., and Hongjiang H.* Effects of K₂CO₃ flux on the microstructure and abrasion resistance of high-chromium hardfacing alloys // Transact. of the Indian Institute of Metals Volume. – 2022. – **75**. – P. 3139–3148.
16. *Influence of the core filler composition on the recovery of alloying elements during the self-shielded flux-cored arc welding / B. Trembach, A. Grin, N. Makarenko, S. Zharikov, I. Trembach, and O. Markov // J. of Mat. Res. and Techn. – 2020. – **9**. № 5. – P. 10520–10528.*
17. *Prediction the melting characteristics of self-shielded flux cored arc welding (FCAW–S) with exothermic addition (CuO–Al) / B. Trembach, O. Balenko, V. Davydov, V. Brechko, I. Trembach, and O. Kabatskyi // IEEE 4th Int. Conf. on Modern Electrical and Energy System (MEES). – Kremenchuk, 2022. – P. 01–06.*
18. *Hosmer D. W., Lemeshow S., and Sturdivant R. X.* Introduction to the logistic regression model // Appl. Logistic Regression. – Wiley, 2000. – **2**. – P. 130.

Одержано 17.08.2022