

ЗАСТОСУВАННЯ ПОВНОГО ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОЕФІЦІЄНТА ЗАПОВНЕННЯ ТА ГУСТИНИ ШИХТИ САМОЗАХИСНОГО ПОРОШКОВОГО ДРОТУ

I. O. ТРЕМБАЧ¹, Б. О. ТРЕМБАЧ¹, О. Г. ГРИНЬ², Р. Я. ЛУЖЕЦЬКИЙ³,
В. О. БРЕЧКО², О. Ю. ЗАКОВОРОТНИЙ⁴, О. І. БАЛЕНКО⁴,
Г. І. МОЛЧАНОВ⁴, О. М. РЕБРОВА⁴, О. В. КАБАЦЬКИЙ²

¹Новокраматорський машинобудівний завод, Київ;

²Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ;

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

⁴Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Обґрунтовано необхідність дослідження таких характеристик самозахисного порошкового дроту, як коефіцієнт заповнення (C_{WF}) та густина шихти (ρ_{cf}). За допомогою повного факторного експерименту вивчено вплив вмісту графіту, екзотермічного додатка і співвідношення його компонентів на ці характеристики і побудовано математичні моделі. Визначено, що найбільшу дію на C_{WF} має вміст екзотермічного додатка (C_{EA}) та графіту (C_{graphite}) у шихті. Максимальні значення C_{WF} та ρ_{cf} досягаються при $C_{EA} = 20...28 \text{ wt\%}$, $\text{MnO}_2/\text{Al} = 2...2,8$ та $C_{\text{graphite}} = 4...6 \text{ wt\%}$.

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

The necessity to study such characteristics of self-shielded flux-cored wire as the filling rate (C_{WF}) and core filler density (ρ_{cf}) is grounded. The influence of the exothermic addition content, exothermic addition components ratio, graphite content on the filling rate (C_{WF}) and filler density (ρ_{cf}) was studied using Fractional Factorial Design, the mathematical models are built. It is shown that the content of exothermic addition (C_{EA}) and graphite (C_{graphite}) in the charge has the greatest influence on the filling rate (C_{WF}). Maximum values C_{WF} and density ρ_{cf} are obtained with the following characteristics: $C_{EA} = 20...28 \text{ wt\%}$, $\text{MnO}_2/\text{Al} = 2...2.8$ and $C_{\text{graphite}} = 4...6 \text{ wt\%}$.

Keywords: self-shielded flux-cored wire, factorial design, filling rate, core filler density, exothermic addition.

Вступ. Порошкові дроти широко використовують як витратні матеріали для зварювання [1, 2] та наплавлення [3, 4], електродугового [5–7], газополуменевого і мікроплазмового напилення [8, 9] зносо- та корозійнотривких покриттів у багатьох галузях промисловості: будівництві, гірничодобувній промисловості, сільському господарстві, автомобілебудуванні тощо. Застосування методів наплавлення та напилення обумовлює збільшення частки виготовлення порошкових дротів на ринку зварювальних матеріалів [10]. Порошкові дроти складаються зі зовнішньої металевої оболонки та шихти. Плавлення присадних матеріалів здійснюється переважно переміщенням зварювальної дуги по периметру металевої оболонки [11]. Це призводить до збільшення довжини виступу нерозплавленої частки шихти та подальшого миттєвого розплавлення під дією зварювальної дуги [12]. Як наслідок, відбувається вибухове виділення газів до розпаду газотворювальних компонентів шихти [13] і, відповідно, збільшується коефіцієнт розбризуван-

ня [14] та знижується продуктивність наплавлення [10]. Для прискорення розплавлення шихти в її склад додають екзотермічний додаток (ЕД). Це дає змогу підвищити енергоефективність процесу, продуктивність наплавлення та якість наплавленого металу [10]. На практиці застосовують такі системи ЕД: Fe₂O₃-Al, CuO-Al та інші [10]. Проте їх застосування може бути обмежене через неможливість досягнення необхідного рівня легування наплавленого металу, оскільки їх позитивний вплив спостерігаємо за вмісту ЕД у шихті на рівні 30...35 wt% [10]. Високий рівень легування наплавленого металу є важливою вимогою щодо зміцнення [15-17]. Тому застосування вказаних систем ЕД для самозахисних порошкових дротів (СПД) обмежене. Особливо це стосується зварювальних матеріалів, які використовують для зміцнювального наплавлення високоманганових сталей, коли необхідно забезпечити в наплавленому металі високий вміст вуглецю та мангану. Для вирішення цієї проблеми запропоновано використовувати екзотермічний додаток системи MnO₂-Al. Тому потрібно вивчити вплив цього додатка на коефіцієнт заповнення (C_{WF}) та густину шихти (ρ_{cf}). Коефіцієнт заповнення суттєво впливає на кількість димовиділення (КДВ) [3], стабільність горіння зварювальної дуги та втрати на розбризування [18], тоді як густина шихти – на продуктивність наплавлення, втрати на розбризування, геометрію наплавленого валика та ступінь легування наплавленого металу [14].

Мета роботи – побудувати математичні залежності коефіцієнта заповнення (C_{WF}) та густини шихти (ρ_{cf}) від кількості екзотермічного додатка MnO₂-Al, відношення окиснювача до відновника (MnO₂/Al) та кількості графіту в шихті СПД, а також пошук їх оптимальних значень.

Матеріали та методика експерименту. Змінні складу шихти (вміст екзотермічного додатка (x_1), співвідношення окисника до відновника (x_2) і вміст графіту у шихті (x_3)) оптимізовані за допомогою експериментального плану Вох-Бехнкен і програмного забезпечення STATISTICA (Statsoft Inc., 2006). План експерименту містив три змінні процесу, кожна на трьох рівновіддалених рівнях (-1; 0; 1), згідно з попередніми експериментами. Перелік вхідних змінних та їх кодовані значення наведено в табл. 1, а матриця плану експерименту – в табл. 2. Зв'язки між відповіддю (Y) та експериментальними змінними (x_1, x_2, x_3), модель регресії для дробового факторного аналізу описуємо так:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} \cdot x_i^2, \quad (1)$$

де β_0 , β_i та β_{ii} – сталий, лінійний та квадратичний коефіцієнти для основних чинників, відповідно.

Таблиця 1. Вибрані вхідні змінні та їх рівні

Кодовані значення	Вхідні змінні	Позначення	Рівень		
			(-1)	(0)	(1)
A	Вміст ЕД у шихті, wt%	EM	20	30	40
B	Відношення окиснювача до відновника в складі ЕД	MnO ₂ /Al	2	2,4	2,8
C	Вміст графіту у шихті, wt%	C_{graphite}	4	6	8

Для досліджень, згідно з матрицею експерименту, виготовили 9 СПД. Вони містили такі постійні компоненти у шихті (wt%), як плавиковий шпат – 11; рутиловий концентрат – 6; карбонат кальцію – 3; діоксид цирконію – 2; фероманган – 15,8; феросиліцій – 1; хром металевий – 6,5; порошок карбіду бору – 3,2, а також

змінні компоненти, відповідно до плану матриці (табл. 3). Решта – це залізний порошок. Наплавлений метал близький за складом до високоманганової сталі системи Fe-xC-yMn-2Cr-B, де $x = 0,6 \dots 1,2$ wt%, $y = 7 \dots 11$ wt%.

Таблиця 2. План-матриця повного факторного експерименту з використанням методу ортогонального масиву

СПД	Кодовані значення				Фактичні значення		
	A	B	C	D	EM, wt%	MnO ₂ /Al	C _{graphite} , wt%
E1	-1	-1	-1	-1	20	2	4
E2	-1	0	1	-1	20	2,4	8
E3	-1	1	0	-1	20	2,8	6
E4	0	-1	1	0	30	2	8
E5	0	0	0	0	30	2,4	6
E6	0	1	-1	0	30	2,8	4
E7	1	-1	0	1	40	2	6
E8	1	0	-1	1	40	2,4	4
E9	1	1	1	1	40	2,8	8

Таблиця 3. Склад шихти експериментальних СПД, wt%

Найменування компонента	Експериментальний дріт								
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Графіт сріблястий	4	8	6	8	6	4	6	4	8
Оксид мангану (ГОСТ 4470-79)	13,3	14,1	14,7	20	21,2	22,1	26,7	28,3	29,5
Алюмінієвий порошок ПА1 (ГОСТ 6058-73)	6,7	5,9	5,3	10	8,8	7,9	13,3	11,7	10,5
Залізний порошок ПЖР-1 (ГОСТ 9849-86)	27,5	23,5	25,5	13,5	15,5	17,5	5,5	7,5	3,5

Для визначення коефіцієнта заповнення СПД від кожного складу відрізали по три зразки завдовжки $l = 200$ mm, які зважували з похибкою 0,01 g, після чого ретельно очищали металеву оболонку від шихти. Визначали масу шихти, віднімаючи масу металевої оболонки від маси зразка. Коефіцієнт заповнення СПД обчислювали за рівнянням [12]

$$C_{WF} = m_1 / (m_1 + m_2), \quad (2)$$

де m_1 – маса шихти, m_2 – маса металевої оболонки.

Густина шихти визначали так [12]:

$$\rho_{cf} = m_1 / V_{cf}, \quad (3)$$

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

Результати та їх обговорення. Експериментальні значення коефіцієнта заповнення (C_{WF}) та густини шихти (ρ_{cf}) наведені у табл. 4, а статистичні характеристики для побудованих математичних моделей – в табл. 5. Якість побудованих

моделей оцінювали за показником коефіцієнта детермінації (R_2). Що більший R_2 , то якісніша модель. Статистичні параметри отриманих математичних моделей свідчать про їх прийнятну якість.

Таблиця 4. Експериментальні та розрахункові значення коефіцієнта заповнення C_{WF} та густини шихти ρ_{cf} ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

СПД	C_{WF} / ρ_{cf}		Різниця	Відхилення, %
	Експериментальні	Розрахункові		
E1	0,286 / 2,430	0,29 / 2,51	0,00 / 0,08	1,03/3,45
E2	0,269 / 2,231	0,28 / 2,44	0,01 / 0,21	4,08/9,48
E3	0,292 / 2,502	0,26 / 2,29	0,03 / 0,21	9,79/8,45
E4	0,270 / 2,244	0,26 / 2,14	0,01 / 0,10	5,32/4,51
E5	0,260 / 2,132	0,27 / 2,30	0,01 / 0,16	4,66/7,67
E6	0,271 / 2,257	0,28 / 2,45	0,01 / 0,19	3,68/8,42
E7	0,261 / 2,141	0,25 / 1,90	0,02 / 0,24	5,90/11,12
E8	0,280 / 2,359	0,26 / 2,06	0,02 / 0,30	6,45/12,88
E9	0,260 / 2,132	0,23 / 1,75	0,03 / 0,38	10,49/17,87

Таблиця 5. Аналіз відгуків побудованих математичних моделей

Критерії	Математична модель	
	C_{WF}	ρ_{cf}
Коефіцієнт детермінації R_2	0,68091	0,66171
Якість моделі	Добра	Добра

Регресійна модель коефіцієнта заповнення має такий вигляд

$$C_{WF} = 0,272 - 0,0535 \cdot x_1 - 0,00757 \cdot x_1^2 - 0,00371 \cdot x_2^2 - 0,01276 \cdot x_2. \quad (4)$$

Якісний аналіз отриманої математичної моделі (4) показав, що лінійні показники (x_i), а також квадратичні зменшують коефіцієнт заповнення, оскільки у рівнянні вони від'ємні. На рис. 1 показані діаграма Парето і графіки передбачуваних та спостережуваних значень побудованої моделі.

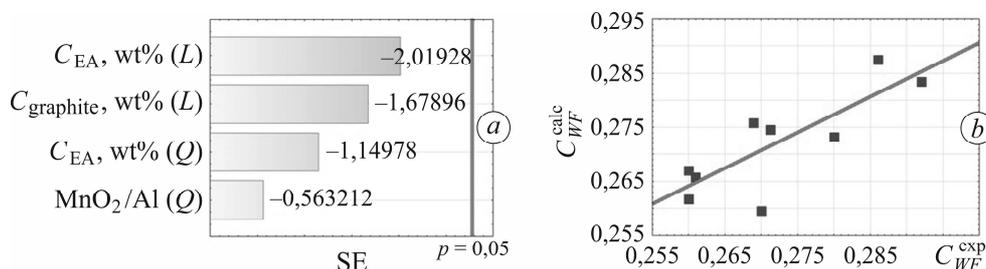


Рис. 1. Діаграма Парето (а), передбачувані (лінія) та спостережувані (символи) (б) значення залежної змінної для коефіцієнта заповнення (C_{WF}): SE – стандартна оцінка показника (абсолютне значення); L – лінійний показник рівняння; Q – квадратичний.

Fig. 1. Pareto chart (a), plot of observed (line) and predicted (symbol) (b) values of the dependent variable for the filling factor (C_{WF}): SE – standard evaluation of the indicator (absolute value); L – the linear index of the equation; Q – quadratic.

Діаграма Парето (рис. 1а) показує вплив кожної змінної в отриманій математичній моделі на досліджуваний параметр. Внесок кожної змінної зменшується зверху вниз. Найбільше впливають на C_{WF} вміст екзотермічного додатка та кількість графіту у шихті. Співвідношення MnO_2/Al має низький вплив.

Аналіз залежності між передбачуваними та спостережуваними змінними коефіцієнта заповнення вказує на прийнятний збіг між ними (рис. 1b).

Побудовані також 3D зображення поверхні відгуку та контурні графіки (рис. 2).

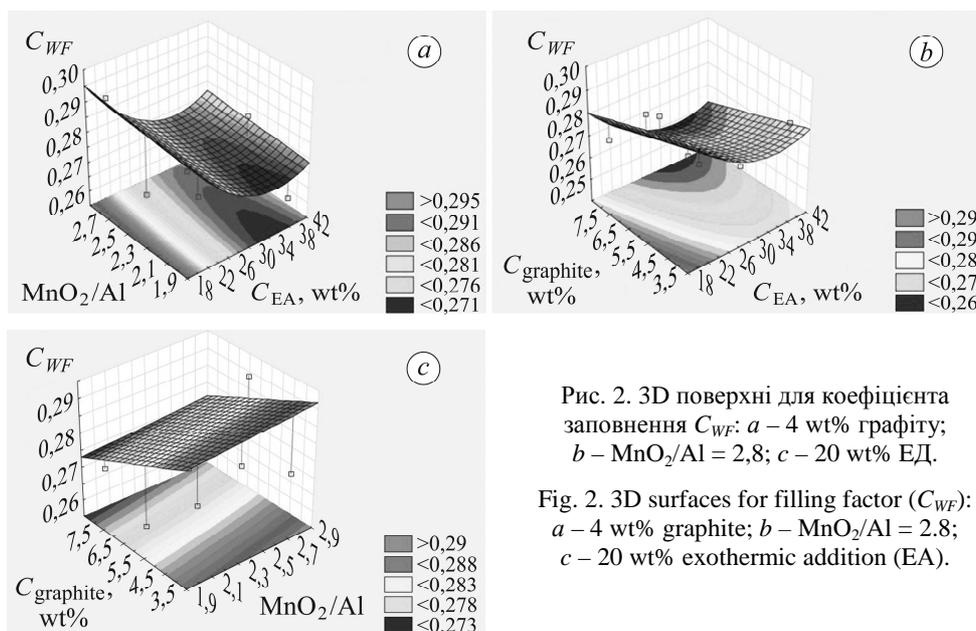


Рис. 2. 3D поверхні для коефіцієнта заповнення C_{WF} : а – 4 wt% графіту; б – $MnO_2/Al = 2,8$; с – 20 wt% ЕД.

Fig. 2. 3D surfaces for filling factor (C_{WF}): а – 4 wt% graphite; б – $MnO_2/Al = 2.8$; с – 20 wt% exothermic addition (EA).

На основі моделі (4) виявлено, що необхідно обмежувати вміст графіту у шихті, приймаючи його значення на низькому або середньому рівні (рис. 2b, c). Встановлено, що для досягнення високих значень C_{WF} необхідно обмежувати вміст екзотермічного додатка у шихті на рівні $C_{EA} < 28$ wt% (рис. 2a, b).

Математична модель для густини шихти така:

$$\rho_{cf} = 2,295 - 0,27 \cdot x_1 - 0,122 \cdot x_1^2 + 0,0813 \cdot x_2 - 0,1523 \cdot x_3. \quad (5)$$

Її аналіз показав, що лінійні показники рівняння зі знаком плюс забезпечують зростання швидкості розплавлення зі збільшенням їх значення. Від'ємні ж значення свідчать про локальні обмеження, мінімальні або максимальні значення коефіцієнтів.

Подано графік Парето (рис. 3а), передбачувані та спостережувані значення залежної змінної (рис. 3b), поверхні відгуків та контурні графіки (рис. 4) для ρ_{cf} .

Проаналізувавши діаграму Парето (рис. 3а), бачимо, що найбільший вплив на густину шихти має вміст екзотермічного додатка, суттєво менший – лінійний (вміст графіту в шихті) та квадратичний (вміст ЕД) показники. Співвідношення MnO_2/Al впливає несуттєво.

Аналіз залежності між передбачуваними та спостережуваними значеннями густини шихти, як і для коефіцієнта заповнення, показав прийнятний їх збіг (рис. 3b). На рис. 4 наведені 3D поверхні розроблених моделей.

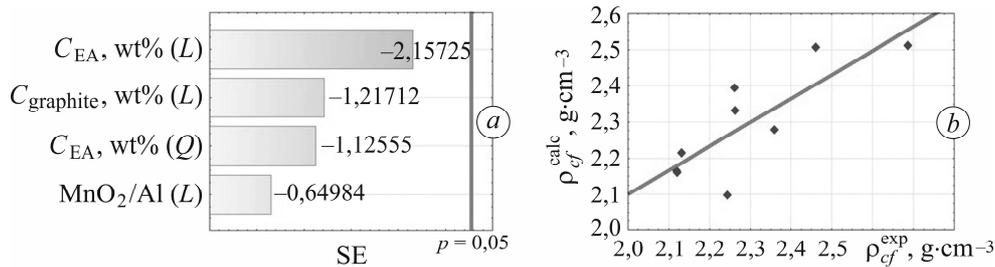


Рис. 3. Діаграма Парето (а), передбачувані (лінія) та спостережувані (символи) (b) значення залежної змінної для густини шихти (ρ_{cf}): SE – стандартна оцінка показника (абсолютне значення); L – лінійний показник рівняння; Q – квадратичний.

Fig. 3. Pareto chart (a), plot of observed (line) and predicted values (symbol) (b) of dependent variable for filler density (ρ_{cf}): SE – standard evaluation of the indicator (absolute value); L – the linear index of the equation; Q – quadratic.

Аналіз отриманих графіків засвідчив, що найбільші значення ρ_{cf} спостерігаємо за низького вмісту графіту (рис. 4b, c) та кількості екзотермічного додатка у шихті на рівні $C_{EA} < 28 \text{ wt}\%$. (рис. 4a, b). Відношення MnO_2/Al мало впливає на ρ_{cf} (рис. 4a, c).

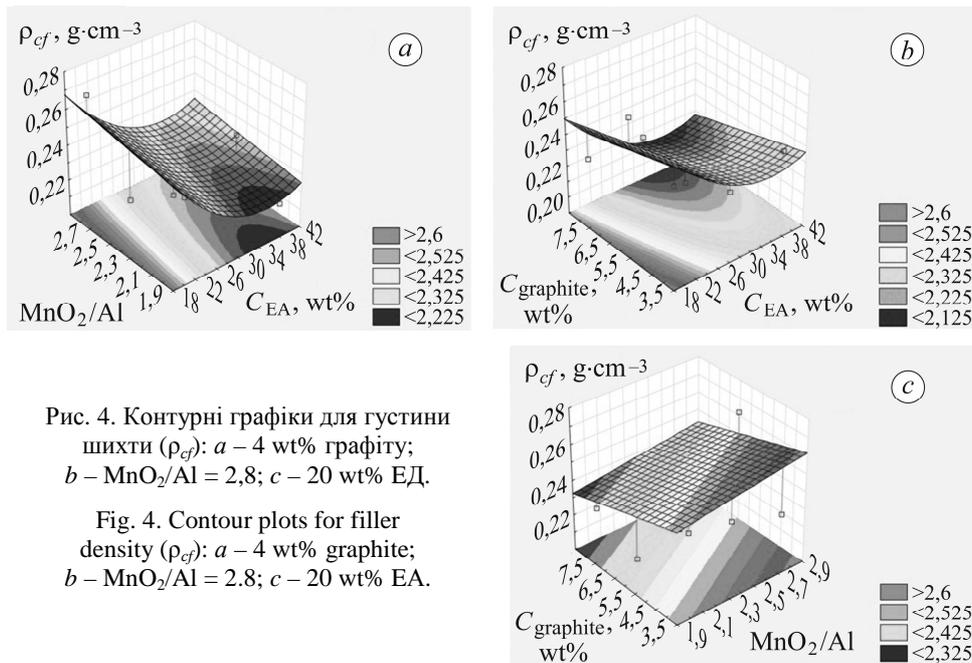


Рис. 4. Контурні графіки для густини шихти (ρ_{cf}): a – 4 wt% графіту; b – $\text{MnO}_2/\text{Al} = 2,8$; c – 20 wt% ЕД.

Fig. 4. Contour plots for filler density (ρ_{cf}): a – 4 wt% graphite; b – $\text{MnO}_2/\text{Al} = 2,8$; c – 20 wt% EA.

Встановили (див. рис. 1a та рис. 3a), що найбільше діє на коефіцієнт заповнення та густину шихти екзотермічний додаток, менше – графіт. Компоненти шихти впливають через внесок їх власної насипної густини та здатності ущільнюватися під час виготовлення СПД (протягування) [12]. Як відомо, міцніші та менш пластичні частинки нещільно заповнюють простір у шихті за умови багаторазового протягування, і навпаки [12]. Густина порошку оксиду мангану становить $\rho_{\text{MnO}_2} = 5,03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, тоді як алюмінієвого порошку $\rho_{\text{Al}} = 0,96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (ГОСТ 6058-73), а порошку графіту вона є меншою і дорівнює $0,55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Таким чином, негативний вплив графіту та алюмінію можна пояснити низькою насипною густиною. Проте частинки алюмінієвого порошку міцніші та пластичніші, на відмі-

ну від частинок графіту [12], тоді як частинки оксиду мангану (MnO_2) мають найвищі механічні властивості, тому менше ущільнюватимуться під час виготовлення СПД.

Дослідження дали змогу встановити оптимальний вміст екзотермічного додатка (20...28 wt%) та графіту (4,5...6 wt%). Вплив співвідношення компонентів екзотермічного додатка незначний.

ВИСНОВКИ

Побудовано математичні моделі, поверхні відгуку для коефіцієнта заповнення та густини шихти порошкового дроту залежно від вмісту екзотермічного додатка та графіту в шихті, а також співвідношення окиснювача і відновника (MnO_2/Al) ЕД. Використання розробленої моделі разом з раніше визначеними коефіцієнтами засвоєння легувальних елементів дає змогу з високою точністю досягати необхідного хімічного складу наплавленого металу у заново розроблених високоманганових сплавах системи $Fe-xC-yMn-2Cr$ (де $x = 0,6...1,2$ wt%, $y = 7...11$ wt%). Визначено, що коефіцієнт заповнення СПД з екзотермічним додатком системи MnO_2-Al здебільшого залежить від вмісту ЕД та графіту у шихті. Найбільші значення коефіцієнта заповнення та густини шихти забезпечують вмістом екзотермічного додатка $C_{EA} = 20...28$ wt%, співвідношенням окиснювача до алюмінієвого порошку в межах $MnO_2/Al = 2...2,8$ та кількістю графіту $C_{graphite} = 4...6$ wt%.

1. *Prediction of phase composition and mechanical properties Fe–Cr–C–B–Ti–Cu hardfacing alloys: Modeling and experimental Validations* / V. Lozynskyi, B. Trembach, M. M. Hos-sain, Y. Silchenko, M. Krbata, K. Sadovyi, O. Kolomiitse, and L. Ropyak // *Heliyon*. – 2024. – **10**, № 3. – Article number e25199.
2. *3D modeling of the structure of deposited materials based on Fe–Ti–Mo–B–C system* / O. O. Ivanov, P. M. Prysiashniuk, L. G. Bodrova, G. M. Kramar, S. Yu. Marynenko, I. V. Koval, and O. Ya. Guryk // *Materials Science*. – 2023. – **59**, № 2. – P. 163–169.
3. *Mechanical characteristics and wear resistance of the cladding layers obtained by melting of cored wires with simultaneous vibration of substrate* / M. Student, A. Vojtovych, H. Pokhmurska, O. Student, and P. Maruschak // *Strojnický Casopis*. – 2019. – **69**, № 1. – P. 109–122.
4. *Influence of pulse arc surfacing modes on geometric dimensions of welded beads and structure of deposited metal of Fe–C–Cr–Ti–Mn–Si alloying system* / I. O. Ryabtsev, A. A. Babynets, I. P. Lentuyuhov, I. L. Bohaychuk, and A. V. Yevdokimov // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. – 2021. – **43**, № 12. – P. 1667–1681.
5. *Abrasive wear resistance and tribological characteristics of electrometallized composite coatings* / M. M. Student, S. I. Markovych, V. M. Hvozdet'skyi, O. S. Kalakhan, and V. M. Yuskiv // *Materials Science*. – 2022. – **58**, № 1. – P. 96–104.
6. *Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions* / M. Student, V. Hvozdet'skyi, T. Stupnytskyi, O. Student, P. Maruschak, O. Prentkovskis, and P. Skačkauskas // *Coatings*. – 2022. – **12**, № 7. – Article number 925.
7. *Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings* / T. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, and V. M. Hvozdet'skyi // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 2. – P. 165–172.
8. *Plasma arc coatings produced from powder-cored wires with steel sheaths* / G. M. Grigorenko, L. I. Adeeva, A. Y. Tunik, V. N. Korzhik, and M. V. Karpets // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2020. – **59**, № 5–6. – P. 318–329.
9. *Corrosion resistance of VC–FeCr and VC–FeCrCo coatings obtained by supersonic gas-flame spraying* / M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, K. R. Zadorozhna, H. H. Veselivska, V. M. Hvozdet'skyi, and Y. Y. Sirak // *Materials Science*. – 2019. – **54**, № 4. – P. 535–541.
10. *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.

11. *Effect of exothermic additions in core filler on arc stability and microstructure during self-shielded, flux-cored arc welding* / V. Lozynskyi, B. Trembach, E. Katinas, K. Sadovyi, M. Krbata, O. Balenko, I. Krasnoshapka, O. Rebrova, S. Knyazev, O. Kabatskyi, H. Kniazieva, and L. Ropyak // *Crystal*. – 2024. – **14**. – Article number 335.
12. *Prediction of filling factor and charge density of self-shielding flux-cored wire with variable composition* / B. O. Trembach, D. B. Hlushkova, V. M. Hvozdettskyi, V. A. Vynar, V. I. Zakiiev, O. V. Kabatskyi, D. B. Savenok, and O. Yu. Zakavorotnyi // *Materials Science*. – 2023. – **59**, № 1. – P. 22–29.
13. *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*. – 2013. – **54**. – P. 154–159.
14. *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. – Article number 1069.
15. *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.
16. *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. – Article number 6312.
17. *Fractal modeling the mechanical properties of the metal surface after ion-plasma chrome plating* / D. B. Hlushkova, V. M. Volchuk, P. M. Polyansky, V. A. Saenko, and A. A. Efimenko // *Functional Materials*. – 2023. – **30**, № 2. – P. 275–281.
18. *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. – Article number 1061.

Одержано 20.03.2024