

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЗАСВОЄННЯ ЛЕГУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ САМОЗАХИСНОГО ПОРОШКОВОГО ДРОТУ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ЙОГО ШИХТИ

Б. О. ТРЕМБАЧ^{1,2}, Ю. А. СІЛЬЧЕНКО¹, М. Г. СУКОВ¹,
Н. Б. РАЦЬКА³, З. А. ДУРЯГІНА⁴, І. В. КРАСНОШАПКА⁵,
О. В. КАБАЦЬКИЙ⁶, О. М. РЕБРОВА²

¹Новокраматорський машинобудівний завод, Київ;

²Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут";

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

⁴Національний університет "Львівська політехніка";

⁵Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба;

⁶Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ

Застосування екзотермічних додатків (ЕД) для шихти є одним із дієвих способів підвищення енергоефективності наплавлення порошковими дротами. Розроблено математичну модель залежності загального коефіцієнта засвоєння ($\eta(SS)$) від співвідношень окиснювача до графіту (CuO/C) та окиснювача до порошку алюмінію (CuO/Al) в складі ЕД. Рекомендовано їх використовувати для оцінки переходу легувальних елементів шихти в наплавлений метал і для прогнозування $\eta(SS)$. Встановлено оптимальний вміст компонентів порошкового дроту.

Ключові слова: наплавлення, самозахисний порошковий дріт, загальний коефіцієнт переходу легувальних елементів, екзотермічний додаток, симплекс-центроїдний план експерименту, оптимізація.

Use of exothermic additions (EA) for the charge is one of the effective ways to increase the energy efficiency of the flux-cored arc surfacing process. A mathematical model of the dependence of the overall transition element factor ($\eta(SS)$) on the ratio of exothermic mixture oxidizing agent to graphite content (CuO/C) and the ratio of oxidizing agent to reducing agent of exothermic mixture (CuO/Al) was developed. It is recommended to use these dependences to assess the transition of alloying elements of the charge into the deposited metal and to predict the overall transition element factor $\eta(SS)$. The optimal content of flux-cored wire components was determined.

Keywords: surfacing, FCAW-S, transition element factor, overall transition element factor, exothermic addition, simplex-centroid design, optimization.

Вступ. Технології наплавлення є основними способами поверхневого зміцнення деталей машин у різних галузях промисловості [1–7]. Серед методів зміцнення та відновлення деталей машин широко застосовують наплавлення самозахисними порошковими дротами (СПД) [8–10]. Важливим завданням в умовах економічної кризи є підвищення енергетичної ефективності наплавлення. Для порошкових дротів перспективним є використання екзотермічних додатків (ЕД), які підвищують продуктивність та енергоефективність цього процесу [9–14]. Вплив введення ЕД до шихти порошкового дроту на технологічні параметри наплавлення досліджували багато вчених [9–16]. Одна з головних вимог для процесу – досягнути необхідного ступеня легування наплавленого металу. Використовуючи

СПД, необхідної композиції наплавленого металу досягають, здебільшого, завдяки відповідним порошкоподібним компонентам. Під час плавлення хімічні елементи, які входять до шихти СПД у вигляді порошоків, переносяться в наплавлений метал. Плавлення та подальше затвердіння супроводжуються окисненням та частковою втратою легувальних елементів. Остаточне засвоєння хімічних елементів на різних стадіях плавлення електродного матеріалу, зокрема переносу через стовп дуги та твердіння у зварювальній ванні, характеризує коефіцієнт засвоєння легувальних елементів. Раніше встановили [15] коефіцієнти засвоєння хімічних елементів С, Cr, Ti, Mn, Si, V та відновлення міді, проте практичне значення має загальна оцінка засвоєння легувальних елементів під час наплавлення порошковими дротами.

Нижче за допомогою симплекс-центроїдного плану експерименту оптимізували склад шихти порошкового дроту для прогнозування загального коефіцієнта засвоєння легувальних елементів.

Матеріали та методика експерименту. Для дослідження впливу композиції наповнювача СПД на коефіцієнт засвоєння легувальних елементів обрали трифакторний симплекс матриці плану експерименту (із зазначенням максимального та мінімального значень): x_1 – співвідношення окиснювача до графіту в ЕД ($\text{CuO/C} = 3 \dots 6$); x_2 – співвідношення окиснювача і відновника в ЕД ($\text{CuO/Al} = 3 \dots 6$); x_3 – вміст ЕД = $20 \dots 46$ (mass%):

$$\frac{\text{CuO}}{\text{C}} = 3 + 3x_1; \quad (1)$$

$$\frac{\text{CuO}}{\text{Al}} = 3 + 3x_2; \quad (2)$$

$$\text{ЕД} = 20 + 26x_3. \quad (3)$$

Для досліджень, згідно з матрицею експерименту, виготовили 10 самозахисних порошкових дротів. Склад шихти експериментальних СПД наведено раніше [16], а режим їх наплавлення такий: швидкість подачі дроту $V_{FS} = 111$ м/х; напруга на дузі $U_a = 28$ А; швидкість наплавлення $V_s = 0,3$ м/х; виліт електрода CTWD = 40 мм.

Загальний коефіцієнт засвоєння легувальних елементів ($\eta(SS)$) визначали так:

$$\eta(SS) = \sum_{i=1}^n [TF(E) \cdot C_i] + \sum_{j=1}^m [RF(O) \cdot C_j], \quad (4)$$

де $TF(E)$ – коефіцієнт засвоєння i -го елемента, %; $RF(O)$ – коефіцієнт відновлення j -го елемента з оксиду, %; C_i, C_j – відповідні частки компонентів у наповнювачі для i, j -компонентів.

Коефіцієнти засвоєння і відновлення елементів розраховували на основі вдосконалених рівнянь з урахуванням втрат електродного металу (втрат загальних та на розбризкування):

$$TF(E) = \frac{Me_d \cdot (100 - \psi)}{C_{WF} \cdot K \cdot K(E) \cdot (100 - \psi_s)}; \quad (5)$$

$$RF(O) = \frac{Me_d \cdot (100 - \psi)}{C_{WF} \cdot K \cdot K(E) \cdot (100 - \psi_s) \cdot KO(E)}, \quad (6)$$

де Me_d – масова частка компонента у наплавленому металі, mass%; C_{WF} – коефіцієнт заповнення СПД; K – частка компонента у шихті СПД, mass%; $K(E)$ – концентрація елемента у компоненті, mass%; ψ – коефіцієнт загальних втрат за наплавленням.

лення, %; ψ_s – коефіцієнт витрат на розбризкування, %; $KO(E)$ – масовий вміст відновленого елемента в оксиді.

Для аналізу результатів та побудови математичної моделі використовували програму Statistica 6.

Результати та їх обговорення. У табл. 1 наведені експериментальні та розрахункові загальні коефіцієнти засвоєння $\eta(SS)$ легувальних елементів.

Таблиця 1. Експериментальні та розрахункові значення $\eta(SS)$

СПД	Експериментальні	Розрахункові	Різниця	Відхилення, %
E1	74,705	74,624	0,0813	0,11
E2	81,582	79,957	1,6251	1,99
E3	76,828	76,744	0,0835	0,11
E4	81,252	81,238	0,0138	0,02
E5	75,435	75,685	0,2496	0,33
E6	75,802	76,020	0,2179	0,29
E7	81,233	80,896	0,3369	0,41
E8	81,228	82,269	1,0409	1,28
E9	80,240	80,083	0,1571	0,20
E10	75,458	75,474	0,0160	0,02

Побудовану математичну модель оцінювали за допомогою дисперсійного аналізу (табл. 2). Математична модель має високу точність за коефіцієнтом кратної детермінації ($R_{sq} = 0,9724$) і за скоригованим коефіцієнтом детермінації ($R_{adj} = 0,9173$). Характеристики моделі свідчать про її адекватність (критерій Фішера $F_{act} = 17,64389 > 3$) і значущість (критерій Стюдента $p = 0,019359 < 0,05$).

Таблиця 2. Результати дисперсійного аналізу обраної моделі

Показник	Критерії				
	Сума квадратів відхилень SS	Ступені вільності df	Середній квадрат MS	Критерій Фішера F_{act}	Критерій Стюдента p
Математична модель	75,82453	6	12,63742	17,64389	0,019359
Загальна похибка	2,14875	3	0,71625	–	–
Загальна відповідність	77,97328	9	8,66370	–	–

Регресійна модель загального коефіцієнта засвоєння має такий вигляд:

$$\eta(SS) = 64,8 \cdot x_1 + 74,62 \cdot x_2 + 57,43 \cdot x_3 + 39,35 \cdot x_1 \cdot x_2 + 40,52 \cdot x_1 \cdot x_3 + 55,57 \cdot x_1 \cdot x_3 - 91,28 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot (x_1 - x_3). \quad (7)$$

Аналіз отриманої математичної моделі (7) показав, що лінійні показники рівняння (x_1, x_2, x_3) підвищують загальний коефіцієнт засвоєння, оскільки вони додатні. У табл. 3 наведено результати для $\eta(SS)$ хімічних елементів побудованої моделі.

Таблиця 3. Коефіцієнти рівняння регресії

Хімічні елементи (див. примітку)	Коефіцієнти рівняння	Стандартна похибка	Критерій Фішера F	Критерій Стьюдента p	-95% CI	+95% CI
I	64,8036	3,20613	20,21242	0,000265	54,600	75,0070
II	74,6242	0,81010	92,11753	0,000003	72,046	77,2022
III	57,4319	4,00033	14,35678	0,000732	44,701	70,1628
I-II	39,3475	7,74387	5,08111	0,014727	14,703	63,9920
I-III	40,5193	8,65390	4,68220	0,018409	12,979	68,0599
II-III	55,5742	7,58147	7,33027	0,005245	31,447	79,7018
I-III (I-III)	-91,2755	22,9944	-3,96947	0,028575	-164,454	-18,0972

Примітка: I – CuO/C, II – CuO/Al, III – ЕД, CI – довірчий інтервал.

Якість отриманої моделі для її застосування та прогнозування загального коефіцієнта засвоєння легувальних елементів підтверджується графіками (рис. 1). Діаграму Парето побудували для кращого виявлення впливу кожної змінної в отриманій математичній моделі. Слід також зазначити, що внесок кожної змінної можна оцінити за значенням біля кожного стовпця на рис. 1а. Крім того, для виявлення несуттєвих ефектів рівняння розробленої математичної моделі на діаграмах Парето додатково побудована вертикальна лінія, що відповідає рівню значущості $p = 0,05$. Якщо ефект перевищує це порогове значення, то ця змінна стає важливою під час оптимізації. Аналіз діаграми Парето (рис. 1а) показав, що найбільший вплив на загальний коефіцієнт перехідного елемента матиме лінійний ефект співвідношення окиснювача до відновника (CuO/Al), а найменший – взаємодія CuO/C та вміст ЕД (CuO + Al). Додатні значення коефіцієнтів кожного члена рівняння біля стовпців на діаграмі Парето (рис. 1а) вказують на пряму залежність. Таким чином, збільшення цих значень підвищить загальний коефіцієнт засвоєння легувальних елементів.

Для перевірки нормального розподілу дисперсії можна використовувати гістограму залишку. Проаналізувавши результати на рис. 1b, бачимо, що побудований графік має відносну симетрію біля нуля, а форма кривої дзвіноподібна. Цей вид гістограми залишків вказує на те, що припущення про достовірність моделі, ймовірно, правильне. На рис. 1с показано, що отриманий графік залежності між експериментальними і розрахунковими величинами $\eta(SS)$ є приблизно лінійним.

Графіки нормального розподілу залишків використовують для перевірки здатності моделі відповідати експериментальним результатам. Точки відгуку розробленої моделі повинні бути розташовані якнайближче до прямої лінії. Для розробленої моделі цей графік показано на рис. 1d. Усі точки вказують на те, що залишки розташовуються близько до прямої лінії, що відповідає нормальному розподілу помилок.

На рис. 2 показані 3D-зображення поверхні відгуку (рис. 2a) та 2D контурний графік (рис. 2b) отриманої математичної моделі, які свідчать про складну взаємодію компонентів шихти порошкового дроту.

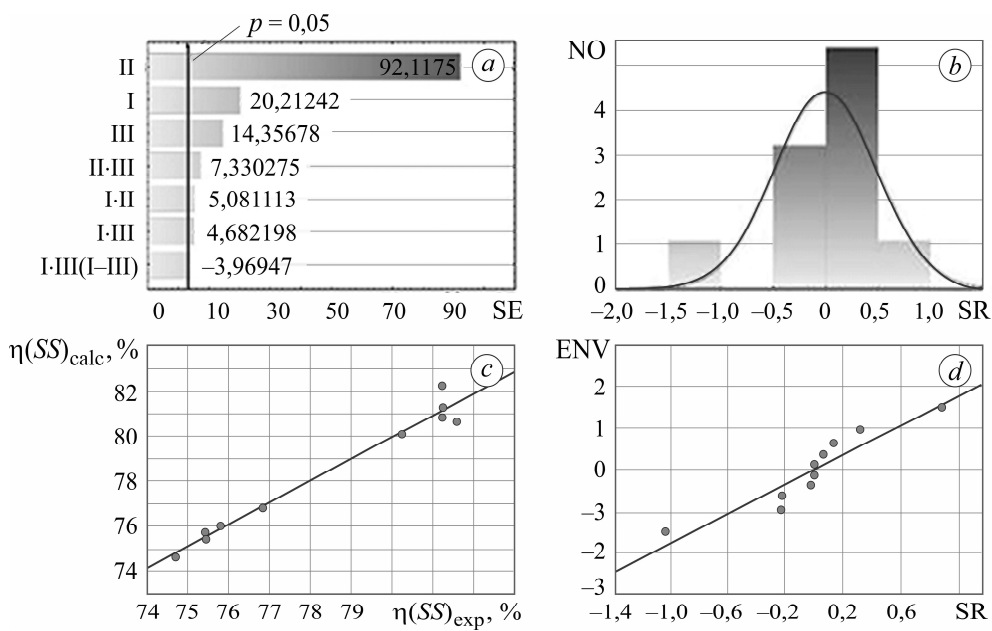


Рис. 1. Діаграма Парето (а), гістограма розподілу залишків моделі (b), експериментальні ($\eta(SS)_{exp}$) та розраховані ($\eta(SS)_{calc}$) значення залежної змінної $\eta(SS)$ (c), графік нормального розподілу залишків для $\eta(SS)$ (d): SE – стандартна оцінка показника (абсолютне значення); NO – кількість спостережень; ENV – передбачувані значення (нормальні квантили даних); SR – студентизовані залишки; I – CuO/C, II – CuO/Al, III – ЕД.

Fig. 1. Pareto chart (a), histogram of distribution of the model residuals (b), experimental ($\eta(SS)_{exp}$) and calculated ($\eta(SS)_{calc}$) values of dependent variable $\eta(SS)$ (c), normal probability plot for $\eta(SS)$ (d): SE – standard evaluation of the indicator (absolute value); NO – a number of observations; ENV – expected normal value (normal data quantiles); SR – studentized residuals; I – CuO/C, II – CuO/Al, III – exothermic addition.

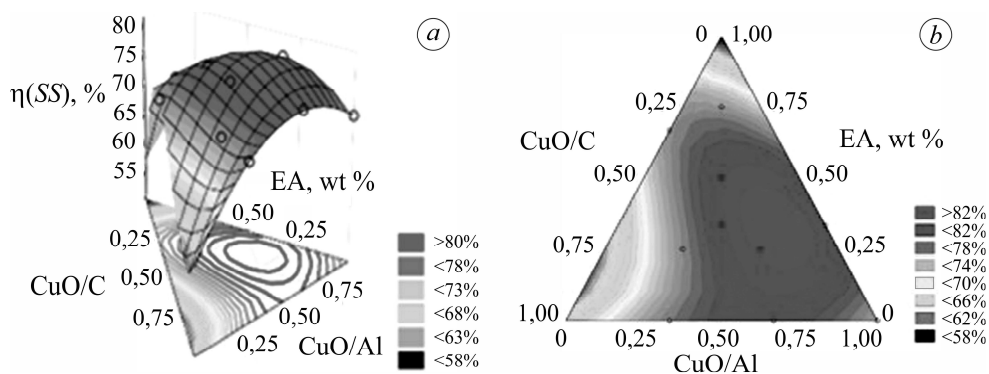


Рис. 2. Поверхня відгуку (а) та контурний графік (b) різного рівня для загального коефіцієнта засвоєння ($\eta(SS)$) легувальних елементів.

Fig. 2. Response surface (a) and contour surface graph (b) of different level for overall transition element factor $\eta(SS)$ of alloying elements.

Для аналізу дії чинників на критерії оптимізації зручно використовувати графіки профілів бажаності, які дозволяють визначити графічно раціональні значення кожного з них із оцінкою реальних значень. Графіки профілів бажаності для загального коефіцієнта засвоєння легувальних елементів ($\eta(SS)$) наведено на

рис. 3. Вертикальні лінії на них відповідають оптимальним значенням досліджуваних параметрів і розташовані в центральних точках. Наявність близьких горизонтальних ділянок на графіках бажаності (D) може вказувати на інтервал оптимальних значень.

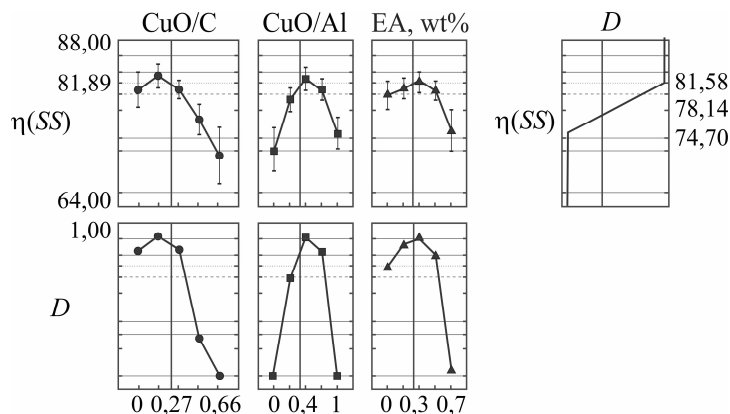


Рис. 3. Графік профілів для прогнозованих значень усіх змінних для загального коефіцієнта засвоєння ($\eta(SS)$) легувальних елементів з довірчими інтервалами та функцією бажаності (D).

Fig. 3. Plot of profiles for predicted values of overall transition element factor ($\eta(SS)$) of alloying elements with confidence intervals and desirability function (D).

Аналіз графіків бажаності (D) (рис. 3) для кожної змінної показав, що оптимальних значень $\eta(SS)$ досягають при $x_1 = 0 \dots 0,33$ ($\text{CuO/C} = 3 \dots 4$); $x_2 = 0,3 \dots 0,75$ ($\text{CuO/Al} = 4 \dots 5,25$); $x_3 < 0,56$ ($\text{ЕД} < 35 \text{ mass\%}$), що також підтверджується 3D-зображенням поверхні відгуку (рис. 2a) та 2D контурним графіком (рис. 2b).

Суттєвий вплив співвідношення окиснювача і відновника (CuO/Al) на загальний коефіцієнт засвоєння легувальних елементів можна пояснити тим, що алюміній є активним розкиснювачем [15]. Внаслідок чого, зменшується вірогідність вигорання інших елементів. Проте надмірне збільшення його вмісту у шихті СПД (при $\text{CuO/Al} < 0,33$) сприяє зниженню загального коефіцієнта засвоєння легувальних елементів.

Зі зменшенням співвідношення окиснювача до графіту (CuO/C) (відповідно збільшення вмісту вуглецю в наповнювачі) загальний коефіцієнт засвоєння легувальних елементів зростає. Це пов'язано з тим, що вуглець є найактивнішим розкиснювачем на всіх етапах перенесення електродного розплавленого металу. Проте він активно зв'язується у тиглоплавці карбіди, які не плавляться під час дугового розряду, що сприяє зменшенню частки вуглецю у розкисненні наплавленого металу. Отримані результати свідчать про необхідність збільшення кількості графіту (вуглецевого матеріалу) у шихті, що відповідає меншим значенням співвідношення $\text{CuO/C} = 3 \dots 4$. Виявили, що підвищення кількості ЕД вище 35% призводить до інтенсивного вигорання компонентів наповнювача на кінцівці електрода через протікання екзотермічної реакції.

ВИСНОВКИ

Запропоновано використовувати загальний коефіцієнт засвоєння легувальних елементів $\eta(SS)$ для оцінювання впливу компонентів екзотермічного додатка та графіту (вуглець) під час наплавлення самозахисними порошковими дрютами. Визначено, що на $\eta(SS)$ під час наплавлення СПД з екзотермічним додатком системи CuO-Al у шихті найбільше впливає співвідношення окиснювача і відновника (CuO/Al). Одночасна оптимізація змінних відгуку показала, що ідеальна ком-

позиція повинна містити екзотермічного додатка $\sim 35 \text{ mass\%}$ у шихті та мати співвідношення окиснювача до графіту і алюмінієвого порошку в межах: $\text{CuO/C} = 3\dots 4$; $\text{CuO/Al} = 4\dots 5,25$.

1. *Study of wear of the building-up zone of martensite-austenitic and secondary hardening steels of the Cr–Mn–Ti system* / D. B. Hlushkova, V. A. Bagrov, V. A. Saenko, D. B. Hlushkova, V. A. Bagrov, V. A. Saenko, V. M. Volchuk, and A. V. Kalinin // *Probl. At. Sci. Technol.* – 2023. – **2**, № 144. – P. 105–109.
2. *Tribocorrosion and abrasive wear test of 22MnCrB5 hot-formed steel* / D. Ulbrich, A. Stachowiak, J. Kowalczyk, D. Wieczorek, and W. Matysiak // *Materials.* – 2022. – **15**, № 11. – Article number 3892.
3. *Experimental study of abrasive, mechanical and corrosion effects in ring-on-ring sliding contact* / J. Selech, D. Ulbrich, D. Romek, J. Kowalczyk, K. Włodarczyk, and K. Nadolny // *Materials.* – 2020. – **13**, № 21. – Article number 4950.
4. *Luzan S. O., Bantkovskiy V. A., Luzan A. S. Tribological properties of composite coating Ni–Cr–B–Si–Boron-containing dispersed phases obtained by arc surfacing, at abrasive action and sliding friction* // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* – 2022. – **44**, № 4. – P. 531–547.
5. *Sukhova O. V. Structure and properties of Fe–B–C powders alloyed with Cr, V, Mo or Nb for plasma-sprayed coatings* // *Probl. At. Sci. Technol.* – 2020. – № 4. – P. 77–83.
6. *Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys* / D. B. Hlushkova, V. A. Bagrov, V. M. Volchuk, and U. A. Murzakhmetova // *Functional Materials.* – 2023. – **30**, № 1. – P. 74–78.
7. *Sukhova O. V. Solubility of Cu, Ni, Mn in boron-rich FeBC alloys* // *Phys. Solid State.* – 2021. – **22**, №1. – P. 110–116.
8. *Júnior J. G. F., Cardoso A. H. C., and Bracarense A. Q. Effects of TiC formation in situ by applying titanium chips and other ingredients as a flux of tubular wire* // *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* – 2020. – **42**, № 7. – Article number 375.
9. *Microstructure and wear characterization of the FeMoBC-based hardfacing alloys deposited by flux-cored arc welding* / M. Bembenek, P. Prysyazhnyuk, T. Shihab, R. Machnik, O. Ivanov, and L. Ropyak // *Materials.* – 2022. – **15**, № 14. – Article number 5074.
10. *Effect of incomplete replacement of Cr for Cu in the deposited alloy of Fe–C–Cr–B–Ti alloying system with amedium 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, and V. I. Zakiev // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* – 2022. – **44**, № 4. – P. 493–513.
11. *Malene S. H., Park Y. D., and Olson D. L. Response of exothermic additions to the flux cored arc welding electrode-Part 1* // *Weld. J.* – 2007. – **86**, № 10. – P. 293–302.
12. *Allen J. W. Olson D. L., and Frost R. H. Exothermically assisted shielded metal arc welding* // *Weld. J.* – 1998. – **77**. – P. 277–285.
13. *Efficiency of protection methods against corrosion-fatigue damage of D16T aluminum alloy* / V. I. Pokhmurs'kyi, M. S. Khoma, V. A. Vynar, S. A. Kornii, O. V. Dykha, and N. B. Rats'ka // *Strength of Materials.* – 2021. – **53**, № 6. – P. 889–895.
14. *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.
15. *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 Mater. Res. and Technol.* – 2020. – **9**, № 5. – P. 10520–10528.
16. *Prediction of filling factor and charge density of self-shielding flux-cored wire with variable composition* / B. O. Trembach, D. B. Hlushkova, V. M. Hvozdet'skyi, V. A. Vynar, V. I. Zakiev, O. V. Kabatskyi, D. B. Savenok, and O. Yu. Zakavorotnyi // *Materials Science.* – 2023. – **59**, № 1. – P. 22–29.

Одержано 28.04.2023