

УДК 621.791.75
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).8](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).8)

ARC PROCESS STABILITY AND METAL TRANSFER IN WELDED BULB COATED ELECTRODES

СТАБІЛЬНІСТЬ ДУГОВОГО ПРОЦЕСУ ТА ПЕРЕНОС МЕТАЛУ ПРИ НАПЛАВЛЕННІ ПУЧКОМ ПОКРИТИХ ЕЛЕКТРОДІВ

Stanislav V. Drahan¹

dragan.welding@gmail.com,
ORCID: 0000-0001-86374-782X

Yuriy O. Yaros¹

yaros.amity.mk.ua@gmail.com,
ORCID: 0000-0002-5274-3514

Igor O. Boyko²

igor.boyko@mipolytech.education
ORCID: 0000-0001-7742-4694

С. В. Драган¹,

канд. техн. наук, професор

Ю. О. Ярос¹,

канд. техн. наук

І. О. Бойко²,

канд. техн. наук, доцент

¹ *Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

² *LIMITED LIABILITY COMPANY «TECHNICAL UNIVERSITY «METINVEST POLYTECHNIC»,
Zaporizhzhia*

¹ *Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

² *ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя*

Abstract. The results of the study of the differences in the process of electrode metal transfer during welding with a single electrode and a bundle of electrodes of the T 590 brand are presented. Based on the analysis of the obtained oscillograms of welding current and arc voltage and comparison of the corresponding coefficients of variation of the parameters, it is shown that it is possible to achieve high stability of the arc process and deposition productivity at the level of mechanized methods when using a bundle of electrodes.

The *purpose* is to conduct comparative studies of mass transfer, arc process stability, and deposition performance with a single coated electrode and a beam composed of three electrodes.

The *method* is an experimental and computational study of the electric arc process using the original UPE 500 installation, which provides for automatic registration and digital processing of the obtained data with simultaneous stabilization of the deposition mode parameters.

Results. The obtained oscillograms of the arc process parameters indicate a difference in the type of electrode metal transfer during deposition with a single coated electrode and a bundle of electrodes. Comparison of the coefficients of variation of the electrical parameters of the arc showed the possibility of welding a wear-resistant layer of metal with a high level of stability of the arc process using a beam of electrodes.

Scientific novelty. It has been established that when welding with a bundle of electrodes of the T 590 brand, droplet transfer of electrode metal occurs according to type G (without short circuits) in contrast to transfer according to type D (with short circuits of the arc gap) when welding with a single electrode. The arc welding process with a beam of electrodes is characterized by high stability of electrical parameters, which is confirmed by the calculated coefficients of variation: current $K_v^i = 3,2 \%$; voltage $K_v^u = 15,7 \%$.

Practical significance. It has been shown that the use of a bundle of three electrodes of the T 590 brand allows to increase the welding performance by 1.6 times compared to welding with a single electrode and to bring it closer to the performance of mechanized welding methods.

Key words: arc process; electrode bundle; stability; coefficient of variation; productivity.

Анотація. Наведені результати дослідження відмінностей процесу перенесення електродного металу при наплавленні одиничним електродом та пучком електродів марки Т 590. На підставі аналізу отриманих осцилограм зварювального струму і напруги на дузі та порівняння відповідних коефіцієнтів варіації параметрів показана можливість досягнення при використанні пучка електродів високої стабільності дугового процесу і продуктивності наплавлення на рівні механізованих способів.

Мета – порівняльні дослідження масопереносу, стабільності електродугового процесу та продуктивності наплавлення одиничним покритим електродом та пучком, складеним з трьох електродів.

Методика – експериментально-розрахункове дослідження електродугового процесу за допомогою оригінальної установки УПЕ 500, яка передбачає автоматичну реєстрацію і цифрову обробку отриманих даних з одночасною стабілізацією параметрів режиму наплавлення.

Результати. Отримані осцилограми параметрів дугового процесу свідчать про відмінність типу перенесення електродного металу при наплавленні одиничним покритим електродом та пучком електродів. Порівняння коефіцієнтів варіації електричних параметрів дуги показало можливість наплавлення пучком електродів зносостійкого шару металу з високим рівнем стабільності дугового процесу.

Наукова новизна. Встановлено, що при наплавленні пучком електродів марки Т 590 крапельний перенос електродного металу відбувається за типом G (без коротких замикань) на відміну від переносу за типом D (з короткими замиканнями дугового проміжку) при наплавленні одиничним електродом. Дуговий процес наплавлення пучком електродів характеризується високою стабільністю електричних параметрів, що підтверджується визначеними розрахунком коефіцієнтами варіації: струму $K_v^i = 3,2 \%$; напруги $K_v^u = 15,7 \%$.

Практична значимість. Показано, що використання пучка з трьох електродів марки Т 590 дозволяє підвищити продуктивність наплавлення в 1,6 рази у порівнянні з наплавленням одиничним електродом і наблизити до продуктивності механізованих способів наплавлення

Ключові слова: дуговий процес; пучок електродів; стабільність; коефіцієнт варіації; продуктивність.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Важкі умови експлуатації робочих органів машин та механізмів добувної, переробної та інших галузей промисловості, особливо на підприємствах гірничозбагачувальних комплексів, призводять до передчасного абразивного зносу деталей. Тому ремонт, відновлювальне та зміцнювальне наплавлення пошкоджених деталей залишається актуальним завданням зварювального виробництва. При цьому ремонтні роботи проводиться, як правило, не на спеціалізованих підприємствах, а у польових умовах з використанням різних способів ручного або механізованого зварювання [1].

Перевагою механізованого наплавлення передручним покритими електродами є висока продуктивність процесу (при ручному наплавленні 1,5...1,8 кг/год., при механізованому – 2,5...3,0 кг/год.). Натомість механізовані способи вимагають більш складного та дорогого обладнання, кваліфікованого персоналу та спеціальної організації робіт. Крім того, вартість зварювальних матеріалів для механізованого зварювання значно вища за вартість покритих електродів, тому, внаслідок дешевизни, поширеним способом ремонтного наплавлення залишається ручний покритими електродами згідно з ISO 4063-111.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Відносно низька продуктивність наплавлення покритими електродами пояснюється обмеженістю сили зварювального струму, що проходить через електродний стрижень, і перегріває його. Знизити густину струму до безпечного рівня дозволяє розроблений у середині минулого століття інженером В. С. Володіним метод зварювання покритими електродами, зібраними у пучок. У цьому випадку вдається різко збільшити допустиму для пучка силу зварювального струму [2, 3]. Відомості про практику промислового

використання пучка електродів для наплавочних робіт вельми обмежені [4].

Наплавлення пучком електродів, розташованих в лінію впоперек шва, наближає процес до механізованого наплавлення електродною стрічкою і, відповідно, дозволяє у цілому підвищити продуктивність технології наплавлення покритими електродами [5]. Одночасно знижуються питомі витрати електричної енергії у порівнянні з наплавленням одним покритим електродом, який має діаметр, рівний діаметру окремих електродів, зібраних у пучок [6].

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Широкому впровадженню технології наплавлення пучком покритих електродів у теперішній час перешкоджають недостатньо вивчені питання стабільності електродугового процесу та особливості перенесення електродного металу при даному способі обробки металу.

Дослідження вказаних процесів ускладнюється впливом спеціального складу покриття електродів для наплавлення, що містить до 80 % феросплавів. Незважаючи на те, що стандартні типи покриття забезпечують задовільну стабільність електродугового процесу, вона набагато нижча, ніж при використанні загальної вживаних електродів для зварювання.

Мета даної роботи - порівняльні дослідження стабільності електродугового процесу, масопереносу та продуктивності наплавлення одиничним покритим електродом та пучком електродів.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для проведення досліджень були вибрані електроди марки Т 590 (виробник – група компаній «Плазматек»), які широко використовують для відновлюваного наплавлення деталей, що працюють в умовах абразивного зносу. Електроди Т 590 часто

Таблиця 1. Типовий хімічний склад металу, наплавленого електродами Т 590, та відповідні потенціали іонізації елементів

Елемент	C	Mn	Si	Cr	Ni	Fe
Вміст, % мас.	3,5	1,3	2,3	22,5	0,4	основа
Потенціал іонізації, 10^{19} Дж	18,00	11,89	13,04	10,82	12,21	12,59

називають «сорматові», тому що вони відповідають групі E-Fe15, створюють твердий (58-64 HRC) зносостійкий шар та забезпечують структуру наплавленого металу E-N-Fe-PKE (Primary chromium carbides with austenite-carbide eutectic) [7, 8]. Але разом з цим, підвищений в наплавленому металі вміст вуглецю з високим значенням потенціалу іонізації (таблиця) [9], негативно впливає на стабільність дугового розряду і масоперенос електродного металу.

Досліди виконували за допомогою унікальної установки УПЕ 500 (рис. 1), яка забезпечує реалізацію принципу Vi-Auto, тобто дозволяє в автоматичному режимі проводити системою PicoScore 4444 та програмним забезпеченням PicoScore 7 фіксацію, обробку та реєстрацію отриманих даних з одночасною стабілізацією параметрів зварювального процесу [10, 11]. Використання вказаної техніки забезпечує повне виключення впливу людського фактора при



a



б

Рис. 1. Загальний вигляд (а) та робочий зварювальний стенд (б) дослідної установки УПЕ 500

проведенні експериментальних досліджень і значно скорочує витрати часу для аналізу отриманих результатів [11].

Об'єктом досліджень слугував електродуговий процес при наплавленні, предметами були вибрані тип переносу електродного металу, стійкість електродугового процесу та продуктивність наплавлення.

Для визначення типу переносу та оцінки стійкості дугового процесу використовували осцилограми струму і напруги на дузі, продуктивність наплавлення розраховували за результатами контрольного зважування дослідних зразків.

Стабільність електродугового процесу визначали за значенням коефіцієнта варіації (відсоткове відношення RMS ripple до Mean) вибраного параметра (струм, напруга, частота коротких замикань), при цьому критичне значення коефіцієнта для визнання процесу стабільним було прийняте $K_v = 20\%$ [11].

Програмою досліджень було передбачено проведення двох серій експериментів з електродами Т 590 діаметром 4 мм: 1) наплавлення одним електродом і 2) наплавлення трьома електродами, зібраними у лінійний пучок.

Швидкість наплавлення була вибрана однаковою $V_n = 11$ см/хв.

Наплавлення одним електродом, з метою досягнення найбільшої продуктивності технології, виконували на форсованому режимі з параметрами: струм $I_n = 190$ А, напруга на дузі $U_\delta = 27$ В.

Аналіз отриманих осцилограм струму і напруги електродугового процесу (рис. 2) показав наявність коротких замикань дугового проміжку – спостерігаються регулярні піки струму з кратністю більше 1,5 та відповідні «провали» напруги нижче 20 В.

Такі ознаки є характерними для масопереносу типу D [1]. Автоматично побудований системою PicoScore 7 графік частоти зміни струму дозволив визначити частоту переносу крапель електродного металу $F_m = 2,795$ Гц з середньоквадратичним відхиленням показника 0,472 Гц.

Розрахункове значення параметра стабільності дугового процесу (частота коротких замикань) для такого типу масопереносу дорівнює $K_v^{F_m} = 16,9\%$, тобто нижче прийнятої межі $K_v^{F_m} = 20\%$, і тому стабільність електродугового процесу можна вважати достатньо задовільною. Для порівняння відзначимо, що коефіцієнт варіації частоти з таким же типом масопереносу при використанні електродів марки УОНІ-13/55 «Плазма» та подібних, але з більш простим хімічним складом покриття, становить $K_v^{F_m} = 5...6\%$.

Допустима густина струму при наплавленні одним електродом становила $j = 15$ А/мм², продуктивність наплавлення, розрахована за зміною маси дослідного зразка-пластини, – 1,8 кг/год.

Таким чином встановлено, що, незважаючи на достатню стабільність дугового процесу, використання одного електрода практично не підвищує продуктивність наплавлення, навіть на форсованому режимі.

Для досліджень електродугового процесу при наплавленні пучком із трьох електродів параметри режиму вибирали виходячи з умови їх реалізації на стандартних промислових джерелах живлення з номінальним струмом $I_{ном} = 315...350$ А, а саме: $I_n = 310$ А, $U_\delta = 32$ В.

Аналіз осцилограм струму та напруги показав, що у цьому випадку масоперенос відбувається за відсутності коротких замикань дугового проміжку. Спостерігаються (рис. 3) нерегулярні піки струму з кратністю менше 1,2 та зниження напруги на дузі до мінімального значення $U_\delta = 20$ В, яке набагато перевищує напругу короткого замикання.

Достатньо високий коефіцієнт варіації напруги $K_v^u = 15,7\%$ свідчить про періодичне значне зменшення довжини дуги, що пояснюється формуванням крапель великого розміру, які, однак, відриваються від електрода без короткого замикання. Таким чином, розглянутий тип масопереносу можна класифікувати згідно з [1] як G – краплинний.

Розрахункове значення коефіцієнта варіації струму, прийняте для такого типу масопереносу

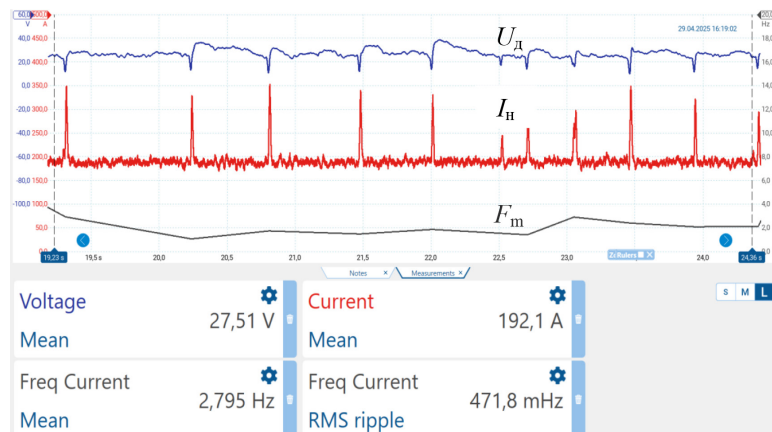


Рис. 2. Осцилограми напруги на дузі (U_δ), зварювального струму (I_n) та графік частоти масопереносу (F_m) при наплавленні одним електродом

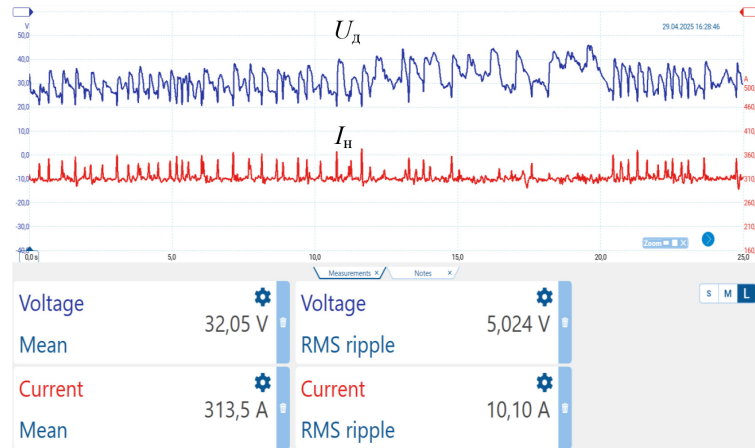


Рис. 3. Осцилограми напруги на дузі (U_d) і зварювального струму (I_n) при наплавленні пучком електродів

[12], $K_v^i = 3,2\%$ істотно нижче допустимої межі 20% і визначає високу стабільність електродугового процесу.

Розрахована продуктивність наплавлення у цьому досліді становила 2,9 кг/год., тобто перевищила продуктивність наплавлення одним електродом більше ніж у 1,6 рази і досягла продуктивності механізованого наплавлення.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Порівняння результатів виконаних досліджень підтверджує безсумнівну перевагу технології наплавлення пучком електродів. Зокрема, суттєве підвищення продуктивності наплавлення зв'язано з можливістю підвищення густини струму, що проходить через кожний електрод пучка, без небезпеки перегріву металевого

стрижня. Зростання густини струму призводить до більш інтенсивного динамічного плавлення кожного електрода і, відповідно, до зміни типу крапельного масопереносу у порівнянні з наплавленням одиничним електродом: з короткими замиканнями дугового проміжку до переносу без коротких замикань.

Зміну типу масопереносу можна пояснити візуальними спостереженнями міграції анодної плями зварювальної дуги між електродами пучка, подібно до відомого процесу міграції дуги при зварюванні стрічковими електродами [13]. Так, при початковому збудженні дуги анодна пляма знаходиться на торці того електрода, який розташований на мінімальній відстані від поверхні наплавлюваної деталі. В міру розплавлення даного електрода зростає площа поперечного перерізу краплі, що формується і видаляється з торця електрода, довжина дуги при цьому зростає до

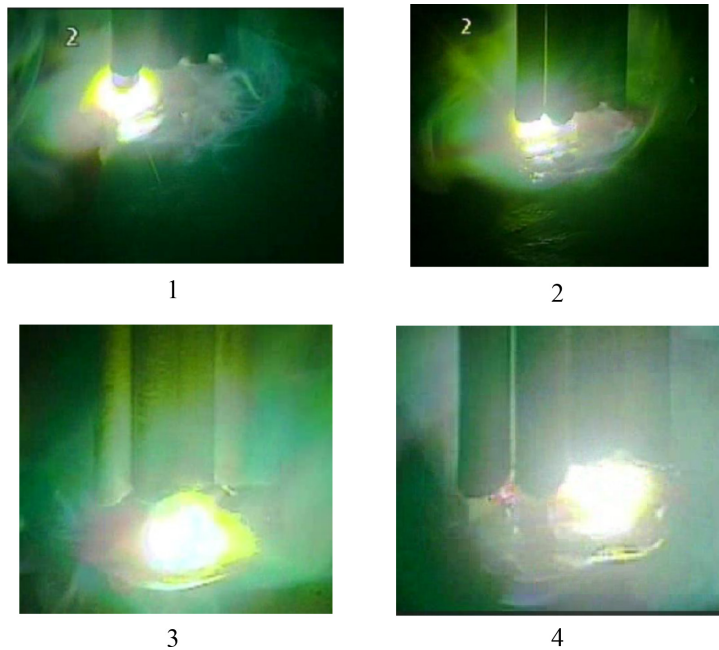


Рис. 4. Міграція зварювальної дуги між електродами пучка

моменту, коли, згідно з принципом термодинамічного мінімуму Штеенбека [14], напруга на подовженій дузі не досягне величини напруги збудження дугового процесу на торці іншого електрода. Дуга миттєво перекидається на торець сусіднього електрода і далі анодна пляма циклічно переміщується між торцями всіх електродів пучка. Подібний процес міграції анодної плями описаний в [13].

Про характер міграції дуги та процес відділення краплі з торця електрода свідчать фотоматеріали, отримані за допомогою спеціально створеної системи відеоспостереження. На рис. 4 чітко видно, що у кожний момент часу дуга існує лише на одному електроді пучка, наслідком чого є зміна типу крапельного переносу металу у порівнянні з процесом наплавлення одиночним електродом. При цьому висока стабільність дугового процесу підтверджується результатами розрахунків коефіцієнтів варіації струму і напруги.

Можливість отримання високої допустимої густини струму дуги при наплавленні пучком електродів

дозволяє довести продуктивність наплавлення до рівня механізованих способів.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що при наплавленні пучком покритих електродів марки Т 590 відбувається краплинний перенос електродного металу без коротких замикань (тип G за ISO 4063:2009) на відміну від наплавлення одиночним електродом, коли має місце масоперенос з короткими замиканнями дугового проміжку (тип D за ISO 4063:2009).

2. Розрахунками коефіцієнтів варіації параметрів, характерних для досліджених типів масопереносу, а також експериментально підтверджена висока стабільність електродугового процесу при наплавленні пучком з трьох електродів порівняно з наплавленням одиночним електродом.

3. Висока середня густина зварювального струму пучка $j = 24,7 \text{ А/мм}^2$, недосяжна для наплавлення одиночним електродом, дозволяє наблизити продуктивність наплавлення до рівня механізованих способів.

REFERENCES

- [1] ISO 4063:2009 Welding and allied processes - Nomenclature of processes and reference numbers.
- [2] Technology of electric welding of metals and alloys by melting. (1974). Edited by academician B. E. Paton. – Moscow : Mechanical Engineering. – 768 p.
- [3] Volodin, V. S. (1947). Method of manual arc electric welding with a bundle of electrodes – Moscow: Mashvidat. – 24 p.
- [4] Nemtseva, E. P. (1955) Experience of using the electrode beam welding method at the Paris Commune Ship Repair Plant / E. P. Nemtseva. – M. : Morskyi transport. – 28 p.
- [5] Kurdyumov, V. Ya., Ryazanov, V. P. (1973). Repair of construction machines by welding and surfacing methods. M. : Budvydat., 232 p.
- [6] Internet resource. Access mode: <https://msd.com.ua/svarka-irezka-metallov/svarka-neskolkimi-elektrodami>.
- [7] Chemist's Handbook in 7 volumes / Edited by B. P. Nikolsky and others. Volume 2. (1971). M. : Chemistry. – 1168 p.
- [8] EN 14700 Welding consumables - Welding consumables for hard-facing.
- [9] ISO/TR 13393:2009 Welding consumables – Hard-facing classification – Microstructures.
- [10] Kostin, O. M., Yaros, O. O., Yaros, Yu. O., Savenko, O. V. (2021). UPE-500 complex for determining welding and technological characteristics of coated electrodes. *Automatic welding*. No. 8. P. 47–52. Retrieved from: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001273673>
- [11] Kostin, O., Yaros, O., Yaros, Y., Savenko, A., Martynenko, V., Boyko, I. (2022). Method for Evaluating the Stability of Arc Burning of Electrodes with Rutile-Cellulosic Covering. *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005682
- [12] Moreno-Urbe, A. M., Vaccari, L., Bracarense, A. Q. et al. (2024). Operational performance and metal droplet formation in pulsed-shielded metal arc underwater welding. *Archiv.Civ.Mech.Eng* 24, 94 <https://doi.org/10.1007/s43452-024-00916-7>
- [13] Nosovsky, B. I., & Lavrova, O. V. (2009). Requirements for welding power sources for surfacing with a strip electrode. *Bulletin of the Azov State University. Mariupol*, No. 19. P. 192–195.
- [14] Welding Processes Handbook. K Weman. 2nd Edition – November 8, 2011. ISBN: 9780857095183

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ISO 4063:2009 Welding and allied processes – Nomenclature of processes and reference numbers.
- [2] Технологія електричного зварювання металів і сплавів плавленням. (1974) / Під ред. акад. Б. Є. Патона. М. : Машинобудування. 768 с.
- [3] Володін В. С. (1947). Метод ручного дугового електрозварювання пучком електродів. М. : Машвидат. 24 с.
- [4] Немцева Е. П. (1955) Досвід застосування метода зварювання пучком електродів на судноремонтному заводі імені Паризької Комуні / Е. П. Немцева. М. : Морський транспорт. 28 с.
- [5] Курдюмов В. Я., Рязанов В. П. (1973). Ремонт будівельних машин методами зварювання і наплавлення. М. : Будвидат. 232 с.
- [6] Інтернет ресурс. URL: <https://msd.com.ua/svarka-irezka-metallov/svarka-neskolkimi-elektrodami>.

- [7] Довідник хіміка у 7 томах / Під ред. Б. П. Никольського та ін. Том 2. (1971). М. : Хімія. 1168 с.
- [8] EN 14700 Welding consumables - Welding consumables for hard-facing.
- [9] ISO/TR 13393:2009 Welding consumables – Hard-facing classification – Microstructures.
- [10] Костін, О. М., Ярос, О. О., Ярос, Ю.О., Савенко, О. В. (2021). Комплекс УПЕ-500 для визначення зварювально-технологічних характеристик покритих електродів. *Автоматичне зварювання*. № 8. С. 47–52. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001273673>
- [11] Kostin, O., Yaros, O., Yaros, Y., Savenko, A., Martynenko, V., Boyko, I. (2022). Method for Evaluating the Stability of Arc Burning of Electrodes with Rutile-Cellulosic Covering. *IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. DOI: 10.1109/MEES58014.2022.10005682
- [12] Moreno-Urbe, A. M., Vaccari, L., Bracarense, A. Q. et al. (2024). Operational performance and metal droplet formation in pulsed-shielded metal arc underwater welding. *Archiv. Civ. Mech.Eng* 24, 94 <https://doi.org/10.1007/s43452-024-00916-7>
- [13] Носовський, Б. І., Лаврова, О. В. (2009). Вимоги до зварювальних джерел живлення при наплавленні стрічковим електродом. *Вісник Приазовського державного університету*. Маріуполь, № 19 С. 192–195.
- [14] Welding Processes Handbook. K Weman. 2nd Edition – November 8, 2011. ISBN: 9780857095183.

© Драган С. В., Ярослав Ю. О., Бойко І. О.

Дата надходження статті до редакції: 17.08.2025

Дата затвердження статті до друку: 26.08.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0