

# ЗВАРЮВАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕКОНОМНО-ЛЕГОВАНИХ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ДУГОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

С.Ю. Максимов, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов, В.В. Осін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: a\_babinets@ukr.net

Представлено результати порівняльного дослідження зварювально-технологічних властивостей розроблених економнолегованих порошкових дротів (ПД) двох типів: ПД-Нп-50Х2МНСГФ та ПД-Нп-20ХГС. Оцінку виконували за розробленою комплексною методикою, що включає три блоки: візуальну експертизу процесу наплавлення, оцінку характеристик плавлення та визначення стабільності дугового процесу. Для контролю параметрів режиму наплавлення використовували цифровий самописний мультиметр ANENG AN9002. В якості еталону використовували стандартний ПД марки ПП-Нп-25Х5ФМС, розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Експериментальний порівняльний аналіз показав, що наплавлення розробленими ПД характеризується високою стабільністю процесу, гарною якістю формування наплавленого металу, відсутністю макродефектів і задовільним відокремленням шлакової кірки. Мікроструктурний аналіз наплавлених шарів підтвердив відсутність в них мікродефектів (пор, тріщин, несплавлень) і чітку лінію сплавлення основного та наплавленого металу. Отримані результати комплексного порівняльного аналізу розроблених економнолегованих ПД показали, що вони мають подібні або покращені зварювально-технологічні характеристики в порівнянні зі стандартним еталонним дротом, що дає змогу розглядати можливість використання розроблених ПД для електродугового наплавлення. Виходячи з призначення розроблених ПД, вони можуть бути використані з метою підвищення зносостійкості та довговічності деталей спеціальної та промислової техніки, що особливо актуально в умовах післявоєнної відбудови України та підвищення її обороноздатності. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова:* дугове наплавлення, порошковий дріт, наплавлений метал, зварювально-технологічні властивості, ресурсозбереження

**Вступ.** В умовах післявоєнної відбудови України та забезпечення обороноздатності критично важливим є впровадження ефективних та економічно обґрунтованих технологій ремонту та відновлення пошкоджених деталей військової техніки та промислового обладнання. Дугове наплавлення порошковими дротами (ПД) є одним із найперспективніших методів, що дозволяє відновлювати та зміцнювати поверхні різноманітних деталей завдяки широким можливостям щодо забезпечення необхідного складу наплавленого металу при мінімальних витратах матеріалів [1–7].

Дугове наплавлення ПД має низку суттєвих переваг [1–7]. По-перше, цей метод дозволяє формувати зносостійкі покриття з необхідною твердістю, міцністю та корозійною стійкістю, що значно продовжує термін служби деталей. По-друге, технологія забезпечує високу продуктивність, оскільки дозволяє проводити наплавлення великих обсягів металу за короткий час при мінімальних втратах матеріалу. По-третє, ПД дають можливість отримати стабільну якість наплавленого металу завдяки рівномірному розподілу легуючих елементів і можливості регулювання їхнього складу.

Однак наявні ПД часто є імпортними та/або не адаптованими до специфічних умов експлуатації деталей спеціальної та промислової техніки, яка використовується в Україні. Окрім того, при розв'язанні задачі з відновлення конкретної деталі необхідно враховувати умови її експлуатації, хімічний склад матеріалу, необхідні властивості, а, отже, часто необхідно розробляти новий ПД, який забезпечить досягнення поставлених задач.

Використання ПД з оптимізованим складом забезпечує ефективне легування наплавленого металу, дозволяючи знизити вміст дефіцитних легуючих елементів без втрати механічних властивостей [8–12]. Це особливо важливо в умовах необхідності скорочення витрат на сировину. Впровадження економнолегованих ПД сприятиме створенню ресурсозберігаючих технологій, зниженню залежності від імпортних матеріалів і підвищенню технологічної автономності оборонної та ремонтної галузі. Таким чином, розробка економнолегованих ПД для дугового наплавлення є актуальним завданням у зв'язку з необхідністю підвищення ефективності ремонту та відновлення деталей, особливо в умовах післявоєнної відбудови України та забезпечення оборонної промисловості.

Максимов С.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>, Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>,

Лентюгов І.П. – <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>, Осін В.В. – <https://orcid.org/0009-0001-3257-8515>

© С.Ю. Максимов, А.А. Бабінець, І.П. Лентюгов, В.В. Осін, 2025

Основним завданням при розробці нових ПД є визначення їх зварювально-технологічних властивостей, які безпосередньо впливають на стабільність процесу наплавлення, якість і довговічність відновлених деталей. Визначення оптимальних режимів наплавлення для підвищення стабільності та продуктивності процесу, зниження схильності до утворення дефектів, забезпечення високої якості формування наплавленого металу є критично важливими для забезпечення надійності та ефективності відновлення деталей машин і механізмів.

**Мета** дослідження полягає у визначенні та порівняльному аналізі зварювально-технологічних характеристик розроблених економнолегованих ПД для дугового наплавлення із стандартним ПД-еталоном для оцінки можливості використання розроблених дослідних ПД при зміцненні та відновленні різноманітних деталей для потреб оборонної промисловості та післявоєнної відбудови України.

**Матеріали та методики досліджень.** Параметри, які стосуються зварювально-технологічних властивостей, залежать від об'єкта дослідження, тому методику їх визначення дослідники обирають або розробляють у кожному конкретному випадку, залежно від поставлених задач. Виходячи з цього, оцінку зварювально-технологічних властивостей виконували за розробленою комплексною експериментальною методикою, яка складається з трьох блоків [13].



Рис. 1. Зовнішній вигляд лабораторної установки для наплавлення: 1 – зварювальний автомат А-1406; 2 – пульт керування; 3 – зварювальний стіл із закріпленням дослідним зразком; 4 – вимірювальний шунт; 5 – цифровий самописний мультиметр ANENG AN9002

До першого блоку входить візуальна експертна оцінка процесу дугового наплавлення та отриманого наплавленого металу. Контрольовані параметри, які входять до даного блоку: характер збудження дуги, якість формування наплавленого металу, наявність видимих дефектів та якість відокремлення шлакової кірки (за умови, що використовується спосіб наплавлення під флюсом або самозахисним ПД).

До другого блоку входить оцінка характеристик плавлення (продуктивності) ПД, яка визначається за коефіцієнтами розплавлення, наплавлення та втрат. Чим вище показники розплавлення та наплавлення та чим менше показник втрат, тим продуктивність наплавлення ПД вище.

До третього блоку входить оцінка стабільності перебігу дугового процесу наплавлення, яку виконували за дисперсністю поточних значень величин струму та напруги на дузі при багаторазовій їх фіксації за розрахованими відповідними коефіцієнтами варіації. Застосування коефіцієнта варіації у якості контрольованого параметра дозволяє усунути вплив масштабу різних вибірок отриманих даних.

Для фіксації параметрів режиму протягом процесу наплавлення використовували цифровий самописний мультиметр ANENG AN9002, оснащений високошвидкісним аналого-цифровим перетворювачем (рис. 1).

В якості основного металу використовували пластини зі сталі Ст.3, а також пластини зі спеціальних сталей 13X11H2B2MФ та SWEBOR ARMOR 560 (35Г2ХС), завтовшки 12 мм. У роботі досліджували розроблені дослідні ПД двох типів:

№ 1 – ПД-Нп-50X2МНСГФ мікролегований бором (0,01 %), який забезпечує отримання наплавленого металу з високими зносо- та ударостійкістю і твердістю 55...59 HRC. Призначення – для наплавлення броньових листів деталей, які працюють в умовах механічного зношування та локальних ударних навантажень високої інтенсивності;

№ 2 – ПД-Нп-20ХГС, який забезпечує отримання наплавленого металу типу низьковуглецевої низьколегованої сталі з твердістю 30...35 HRC. Призначення – для наплавлення зношених деталей рушійної системи гусеничної спеціальної та військової техніки.

В якості еталона використовували стандартний ПД марки ПП-Нп-25Х5ФМС, виготовле-

**Порівняльна оцінка зварювально-технологічних властивостей ПД**

Номер	Тип наплавленого металу	Характер збудження дуги	Якість формування наплавленого металу	Наявність дефектів	Якість відокремлення шлакової кірки	Сумарна кількість балів	Коефіцієнти, %				
							розплавлення	наплавлення	втрат	варіації за струмом	варіації за напругою
1	50X2МНСГФ	2	1	2	1	6	16,2	15,1	6,8	15,2	7,6
2	20ХГС	2	1	2	2	7	15,3	14,4	5,4	14,7	6,2
3	25Х5ФМС	2	1	2	1	6	16,4	15,2	7,3	17,2	8,5

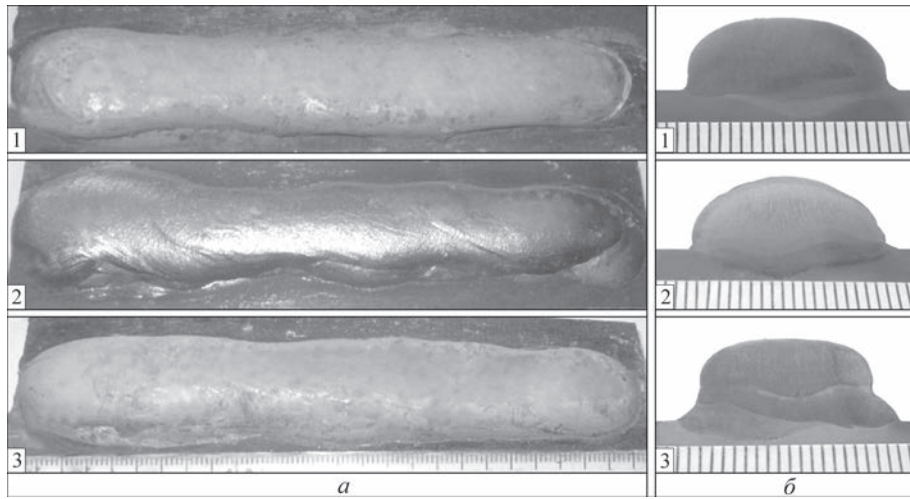


Рис. 2. Зовнішній вигляд (а) і поперечні макрошліфи (б) заготовок, наплавлених ПД №№ 1–3. Позначення дротів наведено в таблиці

ний згідно з технічними умовами, розробленими в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ [14]. Діаметр всіх використаних ПД – 2,4 мм, коефіцієнт заповнення – 25 %. Захисне середовище при напавленні – флюс АН-26П. Режими напавлення обирали, використовуючи рекомендації [4], вони були однаковими для всіх зразків: напруга – 28 В, струм – 300 А, швидкість напавлення – 20 м/год.

**Результати досліджень.** Узагальнену інформацію з оцінки зварювально-технологічних властивостей наведено в таблиці. Зовнішній вигляд заготовок зі Ст.3 після напавлення на них дротами ПД-Нп-50Х2МНСГФ, ПД-Нп-20ХГС та ПП-Нп-25Х5ФМС, а також їх поперечні шліфи наведено на рис. 2.

Якість формування металу, напавленого на пластину зі спеціальних сталей 13Х11Н2В2МФ та SWEBOR ARMOR 560 дротом ПД-Нп-50Х2МНСГФ, наведено на рис. 3. Гістограми розподілу поточних значень величин струму та напруги на дузі, за якими оцінювали стабільність процесу напавлення, – на рис. 4.

Експериментально визначено, що досліджені розроблені дроти забезпечують легке збудження дуги, задовільну якість напавленого металу та відсутність в ньому дефектів (рис. 2), а також задовільну якість відокремлення шлакової кірки.

Експериментальна оцінка можливості застосування дроту № 1 (ПД-Нп-50Х2МНСГФ) як матеріалу для напавлення зносостійких шарів на спеціальні сталі вітчизняного (13Х11Н2В2МФ) та імпортного (SWEBOR ARMOR 560) виробництва показала перспективність його використання. За результатами напавлення розробленим ПД на пластину із вищезазначених сталей зазначено гарну якість формування багатошарового металу та відсутність в ньому дефектів у вигляді тріщин, пор, несплавень тощо (рис. 3).

Аналізуючи отримані дані (див. таблицю, рис. 4) встановлено, що дослідні ПД №№ 1 і 2 мають подібні або кращі зварювально-технологічні характеристики порівняно з еталонним ПД № 3. Дріт № 1 демонструє коефіцієнти розплавлення та напавлення, подібні до показників дроту-еталона, та перевищує аналогічні характеристики дроту № 2. Коефіцієнт втрат є найнижчим для дроту № 2, що вказує на його більшу економічність при використанні. Дріт № 1 має менший коефіцієнт втрат, ніж еталонний дріт, що також свідчить про його ефективність. Найкращу стабільність напавлення демонструє дріт № 2, який має найнижчі коефіцієнти варіації за струмом та напругою (14,7 і 6,2 % відповідно), тоді як для дроту № 1 вони становлять 15,2 і 7,6 %, що також є кращим порівняно з еталоном (17,2 8,5 % відповідно).

Аналіз мікроструктури зразків, напавлених ПД №№ 1 і 2, показав (рис. 5), що в зразках, напавлених дротами обох типів, лінія сплавлення напавленого (вгорі) та основного (внизу) металу достатньо чітка, внутрішні мікродфекти у вигляді пор, тріщин, несплавень, неметалевих включень та інші – відсутні.

Таким чином, розроблені дослідні ПД № 1 (ПД-Нп-50Х2МНСГФ) та № 2 (ПД-Нп-20ХГС)

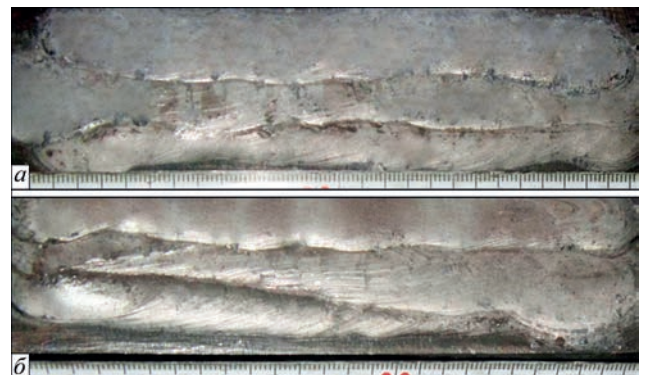


Рис. 3. Якість формування металу, напавленого дротом ПД-Нп-50Х2МНСГФ на заготовки зі сталі 13Х11Н2В2МФ (а) та SWEBOR ARMOR 560 (б)

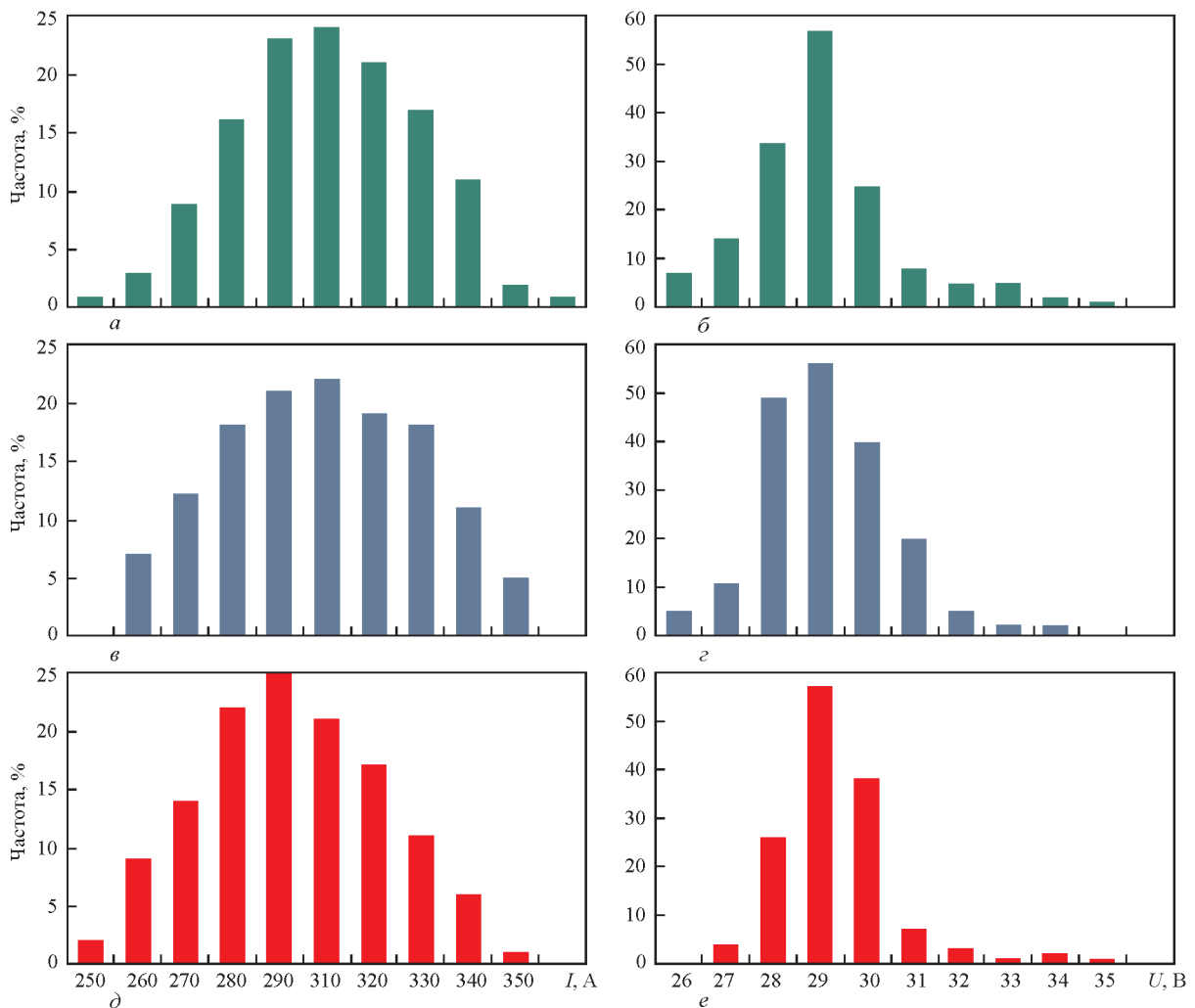


Рис. 4. Гістограми розподілу струму (а, в, д) та напруги (б, г, е) при наплавленні ПД: № 1 (а, б), № 2 (в, г), № 3 (д, е). Позначення дротів наведено в таблиці

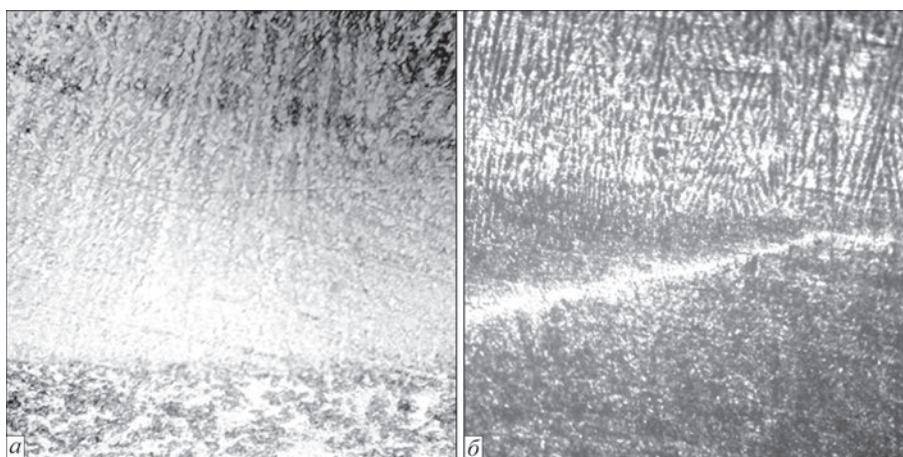


Рис. 5. Мікроструктура металу поблизу лінії сплавлення в зразках, наплавлених дротом ПД-Нп-50X2МНСГФ (а) та ПД-Нп-20XГС (б),  $\times 240$

мають переваги над еталонним дротом або не поступають йому за основними зварювально-технологічними характеристиками, що підтверджує можливість їх використання для електродугового наплавлення. Розроблені економнолеговані ПД двох типів, відповідно до їх призначення, вказано вище, можуть бути використані при виготовлен-

ні або відновленні деталей спеціальної та промислової техніки з метою підвищення її довговічності.

### Висновки

1. За розробленою комплексною методикою проведено порівняльний аналіз зварювально-технологічних характеристик розро-

блених економнолегованих порошкових дротів ПД-Нп-50Х2МНСГФ та ПД-Нп-20ХГС для визначення можливості їх широкого практичного застосування при електродуговому наплавленні деталей різного призначення.

2. У результаті виконаних порівняльних досліджень встановлено, що розроблені економнолеговані дослідні порошкові дроти за основними зварювально-технологічними показниками (легкість збудження дуги, якість наплавленого металу, коефіцієнти розплавлення, наплавлення, втрат і варіації струму/напруги) не поступаються, а в окремих аспектах перевищують характеристики стандартного дроту-еталона.

3. Отримані результати підтверджують доцільність подальшої розробки та впровадження дослідних ПД у ремонтних і виробничих процесах для потреб оборонної промисловості та післявоєнного відновлення інфраструктури в Україні.

### Список літератури/References

1. Pokhodnya, I.K., Shlepakov, V.N., Maksimov, S.Yu., Ryabtsev, I.A. (2010) Research and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute in the field of electric arc welding and surfacing using flux-cored wire (Review). *The Paton Welding J.*, **12**, 26–33.
2. Kuskov, Yu.M. (2019) Application of flux-cored wires at surfacing, remelting and in metallurgy. *The Paton Welding J.*, **3**, 27–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.03.05>
3. Poznyakov, V.D., Gajvoronsky, A.A., Klapatyuk, A.V. et al. (2019) Flux-cored wire for restoration surfacing of worn surfaces of railway wheels. *The Paton Welding J.*, **7**, 36–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2019.07.08>
4. Babinets, A.A. (2023) Control of formation of metal produced by arc methods of layer-by-layer deposition of material with flux-cored wires. *The Paton Welding J.*, **11**, 35–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.11.04>
5. Kuskov, Yu.M., Zhdanov, V.A., Ryabtsev, I.O. et al. (2020) Methods for increasing the corrosion resistance of coatings deposited under a flux layer from high-chromium powder wires. *Mater Sci.*, **55**, 710–715. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00362-9>
6. Szymura, M., Czupryński, A., Ochodek, V. (2024) Development of a mathematical model of the self-shielded flux-cored arc surfacing process for the determination of deposition rate. *Materials*, **17**(22), 5616. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17225616>
7. Shlepakov, V.N. (2014) Physical-metallurgical and welding-technological properties of gas-shielded flux-cored wires for welding of structural steels. *The Paton Welding J.*, **6-7**, 53–56. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.10>
8. Golovko, V., Kotelchuk, O., Naumeiko, S., Golyakevich, A.A. (2022) Development of self-shielded flux-cored wires for arc welding of low-alloy steels. *Defect and Diffusion Forum*, Trans. Tech. Publications, Ltd, **416**, 103–114. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-58v9g5>
9. Trembach, B.O., Silchenko, Yu.A., Sukov, M.G. et al. (2024) Development of a model of transition element factor of alloying elements of self-shielding flux-cored powder wire and optimization of its core filler composition. *Mater Sci.*, **59**, 733–740. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00834-2>
10. Stupnyts'kyi, T.R., Student, M.M., Pokhmurs'ka, H.V., Hvozdet's'kyi, V.M. (2016) 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. *Mater Sci.*, **52**, 165–172. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9939-8>
11. Zhang, T., Yang, K., Zhu, Z. et al. (2024) Effect of Cr and W on microstructure and wear resistance of arc additive manufactured flux-cored wire for railway wheels. *J. of Materials Research and Technology*, **30**, 3438–3447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.088>
12. Malinov, V.L. (2006) Sparsely alloyed consumables providing in the deposited metal deformation hardening in operation. *The Paton Welding J.*, **8**, 25–28.
13. Бабінець А.А., Рябцев І.О., Лєнтугов І.П. (2025) Методика оцінки зварювально-технологічних властивостей порошкових дротів для дугового наплавлення. *Автоматичне зварювання*, **2**, 38–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.02.05>
14. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.O., Lentyugov, I.P. (2025) Methodology for evaluating the welding and technological properties of flux-cored wires for arc surfacing. *Автоматичне зварювання*, **2**, 38–44 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.02.05>
14. ТУУ 28.7.05416923.066–2002. *Проволоки порошкові наплавочные*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона. ТУУ 28.7.05416923.066–2002. *Flux-cored wires for surfacing*. Kyiv, PWI [in Russian].

## WELDING AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF ECONOMICALLY ALLOYED FLUX-CORED WIRES FOR STRENGTHENING AND REPAIR OF PARTS BY ARC SURFACING

S.Yu. Maksymov, A.A. Babinets, I.P. Lentyugov, V.V. Osin

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

E-mail: a\_babinets@ukr.net

The results of a comparative study of the welding-technological properties of the developed economically alloyed flux-cored wires (FCWs) of two types: PD-Np-50Kh2MNSGF and PD-Np-20KhGS are presented. The evaluation was performed using a comprehensive methodology that includes three components: visual inspection of the surfacing process, assessment of melting characteristics, and evaluation of arc stability. A digital recording multimeter ANENG AN9002 was used to monitor the surfacing parameters. As a reference, the standard FCW of PP-Np-25Kh5FMS grade, developed at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, was used. The experimental comparative analysis demonstrated that surfacing with the developed FCWs is characterized by high process stability, good quality of the deposited metal formation, absence of macroscopic defects, and satisfactory slag crust separation. Microstructural analysis of the deposited layers confirmed the absence of microdefects (pores, cracks, lacks of fusion) and revealed a distinct fusion line between the base metal and the deposited metal. The results of the comprehensive comparative analysis of the developed economically alloyed FCWs demonstrated that they possess similar or improved welding and technological characteristics compared to the standard reference wire. This indicates the feasibility of using the developed FCWs for arc surfacing applications. Considering the purpose of the developed FCWs, they can be effectively used to enhance the wear resistance and service life of components in special-purpose and industrial equipment, which is particularly relevant in the context of Ukraine's post-war reconstruction and the strengthening of its defense capabilities. 14 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

*Keywords:* arc surfacing, flux-cored wire, deposited metal, welding and technological properties, resource-saving

Отримано 13.02.2025

Отримано у переглянутому вигляді 24.04.2025

Прийнято 11.06.2025