

УДК 621.791:631.3

Захаров А. В.,

zakharovandrey1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9894-7355,
д-р філос., викладач, Харківський державний професійно-педагогічний фаховий коледж
імені В. І. Вернадського, м. Харків

Рибалко І. М.,

irybalko.ua@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3663-019X, Researcher ID I-8014-2016,
д.т.н., доц., доцент кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні
імені О. І. Сідашенка, Державний біотехнологічний університет, м. Харків

Тіхонов О. В.,

texas2002@btu.kharkiv.ua, ORCID ID: 0000-0001-7209-8375,
к.т.н., доц., доцент кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні
імені О. І. Сідашенка, Державний біотехнологічний університет, м. Харків

Сайчук О. В.,

sajchuksacha@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5118-838X, Researcher ID G-2388-2018,
д.т.н., проф., Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава

ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНОЇ ТЕХНІКИ ШЛЯХОМ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Анотація. У статті обґрунтовано підхід до підвищення ресурсу робочих органів ґрунтообробної техніки шляхом раціоналізації складу порошкових (електродних) дротів для електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі при постійному струмі зворотної полярності. Для десяти експериментальних складів дротів виконано комплексну оцінку властивостей покриттів за показниками: твердість (HRC), абразивне зношування (втрата маси Δm , г) та корозійна стійкість (втрата маси Δm , мг після 72 год у 5 % NaCl).

Додатково аналізовано технологічну стабільність наплавлення та схильність шарів до пористості й тріщиноутворення. Запропоновано формалізовану процедуру багатокритеріального вибору на основі інтегрального індексу якості K , який агрегує нормалізовані критерії «твердість–зносомісткість–корозійна стійкість» і враховує технологічні обмеження процесу (стійкість шлакової ванни, керованість тепловкладення, мінімізація дефектів).

За інтегральним ранжуванням найбільш збалансовані експлуатаційні властивості забезпечив дріт № 6, прийнятий як базовий прототип. Показано ефективність карбідно-оксидного модифікування (NbC, ZrO₂, Al₂O₃, графіт) у поєднанні з високохромистим легуванням для формування дисперсно зміцненої та технологічно придатної структури.

Рекомендовано діапазон складу порошкового дроту для зносостійких покриттів: Cr 50–60 %, C 3–4 %, NbC 5–8 %, ZrO₂ 5–10 %, Al₂O₃ 5–7 %, графіт 2–3 %, мікродомішки V і Mo 1–2 %. Польові випробування на лемешах і культиваторних лапах підтвердили зниження зношування приблизно на 40 % порівняно із серійними деталями. Техніко-економічне обґрунтування для 1000 га показало зменшення прямих витрат з 42 800 грн до 29 276,8 грн та економію 13 523,2 грн (31,6 %), що підтверджує доцільність впровадження запропонованих складів дротів у ремонтному виробництві та сервісних підрозділах. Практична цінність – відтворюваність складів на стандартному обладнанні цехів.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення; порошковий дріт; модифікування; карбіди; оксиди; зносостійкість; корозійна стійкість; ґрунтообробна техніка; економічна ефективність.

Zakharov A. V.,

*zakharovandrey1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9894-7355,
doctor of philosophy, lecturer, V. I. Vernadskiy
Kharkiv State Professional and Pedagogical Applied College, Kharkiv*

Rybalko I. M.,

*irybalko.ua@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3663-019X, Researcher ID I-8014-2016,
Doctor of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department
of Service Engineering and Materials Technology in Mechanical Engineering named after O. I. Sidashenko,
State Biotechnological University, Kharkiv*

Tihonov O. V.,

*texas2002@btu.kharkiv.ua, ORCID ID: 0000-0001-7209-8375,
PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Service
Engineering and Materials Technology in Mechanical Engineering named after O. I. Sidashenko,
State Biotechnological University, Kharkiv*

Saychuk O. V.,

*sajchuksacha@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5118-838X, Researcher ID G-2388-2018,
Doctor of Engineering, Professor, Poltava State Agrarian University, Poltava*

INCREASING THE RESOURCE OF WORKING PARTS OF SOIL CULTIVATION EQUIPMENT BY OPTIMIZING THE COMPOSITION OF POWDER WIRES FOR ELECTROSLAG SURFACING

Abstract. *The article substantiates an approach to increasing the service life of working parts of soil cultivation equipment by rationalising the composition of powder (electrode) wires for electroslag surfacing in a current-supplying crystalliser with constant reverse polarity current. For ten experimental wire compositions, a comprehensive assessment of the properties of coatings was carried out according to the following indicators: hardness (HRC), abrasive wear (mass loss Δm , g) and corrosion resistance (mass loss Δm , mg after 72 hours in 5 % NaCl).*

In addition, the technological stability of surfacing and the tendency of layers to porosity and cracking were analysed. A formalised multi-criteria selection procedure was proposed based on the integral quality index K , which aggregates the normalised criteria of 'hardness–wear resistance–corrosion resistance' and takes into account the technological limitations of the process (slag bath stability, heat input control, defect minimisation). According to the integral ranking, the most balanced operational properties were provided by wire No. 6, which was accepted as the basic prototype.

The effectiveness of carbide-oxide modification (NbC, ZrO₂, Al₂O₃, graphite) in combination with high chromium alloying for the formation of a dispersion-strengthened and technologically suitable structure is demonstrated. The recommended composition range for powder wire for wear-resistant coatings is: Cr 50–60 %, C 3–4 %, NbC 5–8 %, ZrO₂ 5–10 %, Al₂O₃ 5–7 %, graphite 2–3 %, microimpurities V and Mo 1–2 %. Field tests on ploughshares and cultivator tines confirmed a reduction in wear of approximately 40 % compared to serial parts.

Technical and economic justification for 1,000 hectares showed a reduction in direct costs from 42,800 UAH to 29,276.8 UAH and savings of 13,523.2 UAH (31.6 %), confirming the feasibility of introducing the proposed wire compositions in repair production and service departments. Practical value – reproducibility of compositions on standard workshop equipment.

Key words: electroslag surfacing; powder wire; modifying additives; carbides; oxides; wear resistance; working parts of soil cultivation equipment; economic efficiency.

JEL Classification: Q16, O33, D24

DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2026-45-02>

Постановка проблеми. Робочі органи ґрунтообробної техніки (плужні леміші, культиваторні лапи, диски тощо) працюють у режимі інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування, що призводить до швидкої втрати геометрії ріжучої кромки, збільшення тягового опору та зростання витрат на паливо і ремонт [2, 3, 10, 22]. В умовах багатокомпонентних ґрунтів (суглинки, чорноземи, супіщані ґрунти) коливання мінералогічного складу та вологості формує широкий спектр механізмів руйнування поверхневих шарів – мікрорізання, мікрОВикришування, пластична деформація, локальні перегріву, що узгоджується з трибологічними моделями абразивного зношування та закономірностями Архарда [6, 7], а також із сучасними оглядами зношування робочих органів ґрунтообробної техніки [2, 10, 15]. Отже, підвищення ресурсу деталей доцільно розглядати як інженерну задачу керування структуроутворенням наплавленого металу й одночасної мінімізації повних витрат життєвого циклу [17] деталі під час обробітку ґрунту.

Електрошлакове наплавлення (ЕШН) у струмопідвідному кристалізаторі є технологією, яка забезпечує високий коефіцієнт наплавлення, рафінування металу шлаком та стабільні умови кристалізації. Ключовою перевагою ЕШН порівняно з дуговими процесами є знижена ймовірність пористості та включень за умови правильно підібраних режимів і флюсу, а також можливість цілеспрямовано формувати карбідно-оксидні зміцнювальні фази. Водночас саме склад порошкового дроту (який є носієм легувальних і модифікуючих компонентів) визначає, які фази сформуються та чи буде структура дрібнозернистою і бездефектною. Таким чином, актуальною є задача раціоналізації складу порошкових дротів для ЕШН з урахуванням комплексу критеріїв: твердості, абразивної зносостійкості, корозійної стійкості та економічної доцільності. Узагальнення переваг та технологічних особливостей ЕШН у струмопідвідному кристалізаторі наведено у дослідженнях [1, 9, 18, 19, 20, 23, 24].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях підвищення ресурсу ґрунтообробних робочих органів часто реалізують через поверхневе зміцнення або відновлення: наплавлення дуговими процесами, індукційне наплавлення, лазерне наплавлення, термічне напилення, механічне зміцнення кромок тощо. Для деталей з високим рівнем абразивного зношування ефект підвищення довговічності

досягається переважно шляхом формування карбідних фаз у матриці та підвищення твердості поверхневих шарів. Разом з тим, встановлено, що підвищення твердості не завжди лінійно корелює із зносостійкістю, оскільки на інтенсивність зношування впливають також морфологія карбідів, рівномірність розподілу зміцнювальних частинок, ступінь дефектності та адгезія шару до підкладки. Це підтверджується експериментами зі зміцнення ґрунтообробних робочих органів і загальними трибологічними закономірностями формування абразивного зносу [2, 3, 5–7, 10, 15, 17].

Електрошлакові процеси (зокрема наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі) розглядаються як перспективні для формування щільних і чистих покриттів з контрольованим тепловиділенням, а дослідження впливу флюсу на гідродинаміку та теплові процеси показують можливість раціоналізації якості шару через керування шлаковою ванною. Проте значна частина робіт орієнтована на режимні параметри (струм, напруга, швидкість подачі) та конструкцію кристалізатора, тоді як питання системної раціоналізації складу порошкових дротів із урахуванням багатокритеріальних показників і економічної ефективності для ґрунтообробної техніки залишається недостатньо формалізованим. Це створює наукову гіпотезу для побудови схеми «склад–структура–властивості–ресурс–економічна доцільність» як єдиної логічної моделі вибору модифікуючого матеріалу.

Постановка завдання. Метою роботи є наукове обґрунтування та розробка підходу до підвищення ресурсу робочих органів ґрунтообробної техніки шляхом раціоналізації складу порошкових дротів для електрошлакового наплавлення, а також оцінка техніко-економічного ефекту від їх застосування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) визначити технологічні обмеження та параметри ЕШН у струмопідвідному кристалізаторі, критичні для стабільності процесу; 2) систематизувати вплив ключових компонентів шихти дроту (Cr, C, NbC, ZrO₂, Al₂O₃, графіт) на фазовий склад і дефектність; 3) експериментально встановити зв'язок між твердістю (HRC), абразивним зношуванням (Δm , г) та корозійною стійкістю (Δm , мг) для серії дротів; 4) сформувати підхід до вибору оптимального складу дротів; 5) провести польові випробування та розрахувати економічний ефект.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Дослідження виконували із застосуванням електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі. Експериментальний кристалізатор складався з мідної водоохолоджуваної секції з графітовою втулкою, що забезпечувала стабільну тепловіддачу та геометричну сталість формуючої порожнини (рис. 1). Електроживлення шлакової ванни реалізовано за двоконтурною схемою на постійному струмі зворотної полярності; діапазони струмів у струмопідвідній секції та графітовому електроді становили 110–130 А і 90–110 А відповідно, а напруга на шлаку – 20–25 В між секцією кристалізатора і графітовою втулкою та 25–30 В між графітовим електродом і втулкою. У статтях систематизовано результати серій наплавлень і випробувань та сформовано узагальнену модель вибору складу дроту; розширені експериментальні відомості наведено у роботах [9, 18, 22–24].

Як флюс застосовано АНФ-29, який характеризується низькою хімічною активністю щодо рідкого металу й сприяє десульфурзації; його хімічний склад наведено у вигляді інтервалів: 60–70 % CaF_2 , 30–40 % Al_2O_3 , не більше 8 % SiO_2 та 0,5 % S. Подачу порошкового дроту здійснювали через порожнину графітового електрода

діаметром 15 мм, додатково використовуючи керамічну трубку для ізоляції дроту від атмосферних газів та стабілізації хімічної чистоти модифікатора. Максимальне відхилення фактичного коефіцієнта заповнення дроту від номінального не перевищувало ~3 %, що відповідає вимогам відтворюваності експериментів.

Базовим матеріалом підкладки для наплавлення обрано сталь 45. Для польових випробувань виготовляли вставки розміром $24 \times 24 \times 10$ мм з товщиною наплавленого шару 5–7 мм, які інтегрували у плужні леміші та культиваторні лапи. Твердість наплавлених покриттів у вихідному стані становила 26–51 HRC, а температура наплавлення оцінювалася в межах 1550–1700 °С. Твердість визначали методом Роквелла за ISO 6508-1 [13], абразивне зношування – за ASTM G65 [12], корозійну стійкість у 5 % розчині NaCl (72 год) – за ISO 9227 [13].

Порошкові дроти формувалися як носій багатоконпонентної шихти, в якій ферохром і вуглець забезпечують карбідоутворення (CrC та Cr_{23}C_6), карбід ніобію стабілізує структуру за рахунок високої термостійкості, а оксиди (Al_2O_3 , ZrO_2) виконують роль дисперсних модифікаторів зерна та бар'єрів для розвитку тріщин. Графіт використовується як антифрикційний компонент і як



Рис. 1 – Етапи роботи експериментального струмопідвідного кристалізатора: а – підготовчий стан перед встановленням; б – ініціація процесу наплавлення; в – формування модифікованого наплавленого шару; г – завершення наплавлення та стадія охолодження

регулятор термічного розширення та напружень у поверхневому шарі наплавленої деталі [7, 8].

Для серії експериментальних дротів варіювали структуру шихти, формуючи десять типів дротів із різним поєднанням високохромистого чавуну, карбідів та оксидів (зокрема ZrO_2), а також дисперсних добавок на основі кремнію, титану та графіту. Коефіцієнт заповнення для окремих дротів перебував у межах 32–40 % (для дротів зі шихтою на основі високохромистого чавуну та дисперсних модифікаторів), що дозволяло поєднати достатній масовий вміст легувальних компонентів із стабільністю подачі дроту [9, 18, 19, 23, 24].

Гранулометричний склад компонентів шихти підбирався з урахуванням запобігання конгломерації модифікуючих домішок та забезпечення рівномірного розподілу дисперсних частинок у металевій ванні. Для ферохрому застосовували гранули розміром 50–300 мкм, для переносника нікелю – частинки до 50 мкм, а вміст модифікатора, введеного в нікелевий переносник, становив 5–7 мас. %.

Комплексну оцінку покриттів виконували за трьома групами показників: (I) твердість (HRC), (II) абразивна зносостійкість (втрата маси Δm після абразивного випробування) та (III) корозійна стійкість (втрата маси після експозиції у 5 %-му розчині NaCl протягом 72 год). Саме

така тріада є репрезентативною для робочих органів ґрунтообробної техніки, оскільки абразивний знос є домінуючим механізмом руйнування, а корозійні процеси в умовах вологи та агресивних компонентів ґрунту прискорюють деградацію поверхневих шарів [6, 7, 13, 15–17].

Для формалізованого вибору раціонального складу застосовано нормування показників та побудову інтегральний показник якості K , який максимізується. Нормування показників здійснювали для приведення їх до безрозмірної шкали від 0 до 1 з метою коректного багатокритеріального порівняння складів порошкових дротів. Твердість нормували за прямою залежністю від мінімального та максимального значень у вибірці, тоді як втрати маси при абразивному зношуванні та корозії – за зворотною схемою, оскільки менші втрати відповідають кращим експлуатаційним властивостям [9, 22].

Нормовані параметри узагальнювали інтегральним показником як зважену суму твердості, зносостійкості та корозійної стійкості за умови, що сума ваг дорівнює одиниці. Для ґрунтообробних робочих органів вагові коефіцієнти приймали: 0,50 – зносостійкість, 0,30 – твердість, 0,20 – корозійна стійкість, що відображає визначальну роль абразивного зношування у польових умовах експлуатації. Результати інтегрального ранжування для 10 типів дротів наведено на рис. 2.

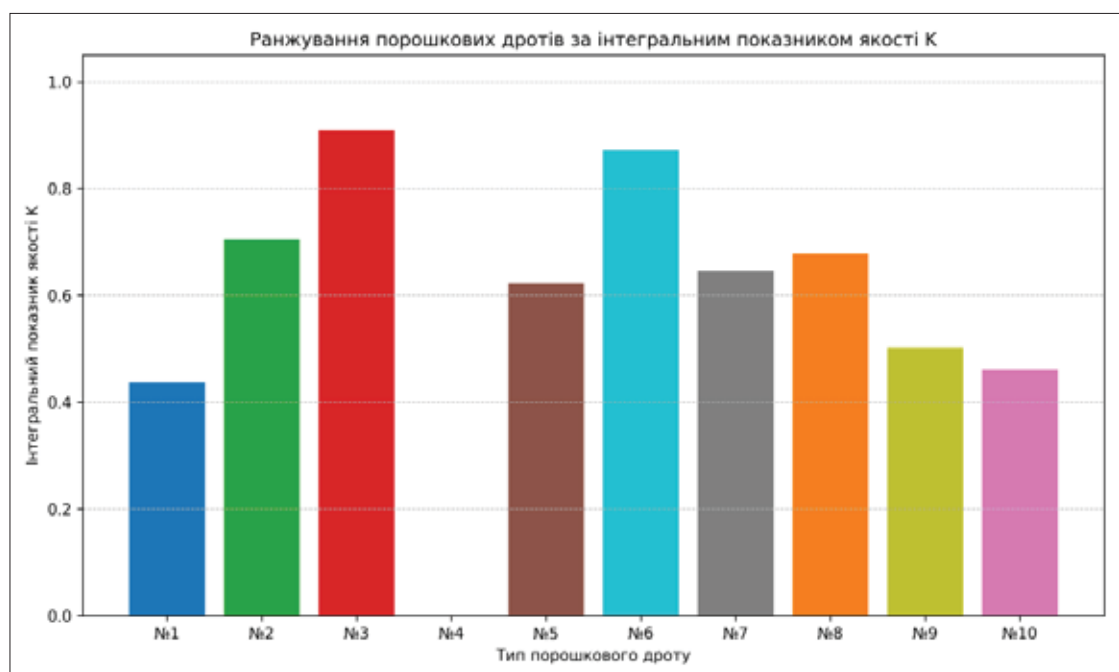


Рис. 2. Інтегральний показник якості K (норм.) для 10 типів порошкових експериментальних дротів за результатами нормування критеріїв «твердість–зносостійкість–корозійна стійкість»

Нормовані значення твердості, показника абразивного зношування та корозійної стійкості, а також розрахований на їх основі інтегральний показник якості K і відповідне ранжування складів порошкових дротів наведено в табл. 1. Саме ці узагальнені дані використано для побудови графічної залежності на рис. 2, яка відображає порівняльну придатність досліджуваних складів для зміцнення робочих органів ґрунтообробної техніки.

Результати експериментальних визначень твердості, втрат маси при абразивному зношуванні та корозії були приведені до нормованого вигляду та узагальнені інтегральним показником якості K з урахуванням прийнятих вагових коефіцієнтів. Це забезпечило можливість об'єктивного порівняння всіх досліджуваних складів порошкових дротів за сукупністю критеріїв та встановлення їх відносної придатності для зміцнення робочих органів ґрунтообробної техніки. Узагальнені результати нормування та розрахунку інтегрального показника наведено в табл. 1.

Результати аналізу та нормування показників (табл. 1) показують, що максимальний інтегральний показник якості K відповідає дроту № 6 (ранг 1), далі – № 3 (ранг 2) та № 2 (ранг 3). Така ієрархія відображає збалансоване поєднання високої твердості, мінімальних втрат маси при абразивному зношуванні та низької масової втрати у корозійному тесті. Експериментальні значення показників наведено у роботах [9, 18, 22–24].

Результати ранжування за показником якості K підтверджують доцільність використання

дроту № 6 як базового прототипу для формування узагальнених рекомендацій щодо складу шихти та технологічних параметрів ЕШН. Його перевага зумовлена одночасним досягненням високої твердості, підвищеної абразивної стійкості та кращої корозійної стабільності у порівнянні з більшістю альтернативних варіантів, що є критично важливим для умов контактної взаємодії «ґрунт–метал» із домішками мінеральних абразивів та вологих корозійно-активних середовищ.

За результатами серії наплавлень із варіюванням вмісту ферохрому встановлено, що раціональний інтервал Cr перебуває у межах 55–65 мас.%. У цьому діапазоні формується стабільний карбідний каркас без надмірного огрубіння карбідної евтектики та без зростання дефектності (пористість/тріщини), що узгоджується з даними щодо високохромистих зносостійких наплавок [14, 16, 19].

Пікові значення твердості та зносостійкості для високохромистих наплавок, як правило, реалізуються в околі раціонального співвідношення $Cr-C$, коли формується достатня кількість карбідних фаз без надмірного огрубіння карбідної евтектики та без зростання крихкості кромки. У межах прийнятих технологічних обмежень ЕШН це відповідає концентраціям Cr близько 60 мас.% у шихті, що узгоджується з узагальненнями зварювальної металургії та трибології наплавок [8, 14, 16, 19].

Карбід ніобію (NbC) виступає термостабілізатором і, за рахунок високої твердості та низької розчинності, підвищує стабільність структури при теплових циклах та корозійних впливах.

Таблиця 1

Нормовані значення твердості, зносостійкості, корозійної стійкості та інтегральний показник якості K для 10 типів порошкових дротів

№ дроту	Нормована твердість H_n	Нормований показник зносостійкості W_n	Нормований показник корозійної стійкості C_n	Інтегральний показник K	Ранг
№ 1	0.308	0.480	0.529	0.439	9
№ 2	0.538	0.880	0.706	0.708	3
№ 3	0.923	1.000	0.824	0.916	2
№ 4	0.000	0.000	0.000	0.000	10
№ 5	0.769	0.160	0.941	0.623	6
№ 6	1.000	0.960	1.000	0.987	1
№ 7	0.615	0.560	0.765	0.647	5
№ 8	0.692	0.640	0.706	0.679	4
№ 9	0.462	0.400	0.647	0.503	7
№ 10	0.385	0.240	0.765	0.463	8

Оксид цирконію ZrO_2 формує дисперсні вclusions у матриці, які пригнічують ріст зерна й знижують схильність до тріщиноутворення, а оксид алюмінію Al_2O_3 сприяє формуванню дрібнозернистої структури та підвищує термічну стійкість шару. Графіт у кількості близько 2 % підвищує антифрикційні властивості та адгезійну міцність покриття, зменшуючи ризик відшаровування у зоні кромки. Пояснення ролі NbC-вмісних фаз та модифікуючих домішок узгоджується з довідниковими даними щодо наплавлених зносостійких шарів [8, 14, 19], а також із результатами досліджень Fe–Cr–C(+Nb) покриттів, де NbC підвищує абразивну стійкість за умови раціонального тепловкладення [16].

На основі комплексного аналізу структури та властивостей наплавлених покриттів сформульовано рекомендації щодо складу порошкових дротів, спрямовані на баланс між твердістю, зносостійкістю та стабільністю структури під час експлуатації. Узагальнений рекомендований склад наведено в таблиці 2.

Запропонований склад є «компромісною траєкторією» у просторі компонентів: ферохром і вуглець формують карбідну підсистему (CrC, $Cr_{23}C_6$), NbC забезпечує дисперсне зміцнення та термостійкість, а ZrO_2 та Al_2O_3 –модифікуючий ефект і рафінування зерна. Саме поєднання карбідного та оксидного модифікування дозволяє мінімізувати дефектність структури, зберігаючи високі показники твердості та зносостійкості. Комбінування карбідного та оксидного модифікування відповідає сучасним підходам до конструювання наплавлених зносостійких шарів [8, 14, 16, 19].

З технологічної точки зору стабільність ЕШН при використанні порошкових дротів забезпечують: (I) підтримання струму у струмопідвідній секції на рівні 110–130 А та у графітовому електроді 90–110 А; (II) робота у діапазоні 20–30 В

(залежно від електродного контуру) для запобігання «розриву» шлакової ванни; (III) застосування флюсу АНФ-29 з високою часткою CaF_2 та Al_2O_3 для рафінування металу; (IV) екранування дроту керамічною трубкою для зменшення газонасичення модифікатора.

Важливо відзначити, що введення оксидів і карбідів у складі дроту потребує контролю гранулометрії та коефіцієнта заповнення: надлишок дрібнодисперсної фракції підвищує ризик конгломерації та нерівномірного розподілу у шлаковій ванні, тоді як недостатній вміст дисперсних частинок знижує ефект рафінування зерна. Тому рекомендовані інтервали компонентів (табл. 2) слід розглядати як технологічно досяжні при коефіцієнті заповнення близько 0,32–0,40 для експериментальних дротів і контролі відхилень $\leq 3\%$.

Експлуатаційну ефективність запропонованого складу порошкового дроту перевіряли в реальних польових умовах на культиваторних стрілчастих лапах та плужних лемешах. Вставки з наплавленим шаром інтегрували у робочі органи, після чого виконували обробіток ґрунту на різних типах ґрунтів із різною глибиною обробки. Загальна площа випробувань становила 35 га для культиваторних лап (глибина 5–7 см) і 74 га для плужних лемешів (глибина 15–25 см), включаючи важкі чорноземи та суглинки.

Візуальний контроль після проміжних етапів (20, 40, 60 і 74 га) засвідчив, що леміші з наплавленим покриттям мають мінімальний знос навіть на важких ґрунтах, зберігаючи геометрію ріжучої кромки. Аналогічно, культиваторні лапи з модифікованими поверхнями зберігали форму протягом усього періоду випробувань до 35 га.

Кількісна оцінка показала, що наплавлені зразки забезпечують приблизно 40 % зниження зношування порівняно із серійними деталями. Універсальний висновок полягає в тому, що

Таблиця 2

Запропонований склад порошкового дроту для електрошлакового наплавлення зносостійких покриттів

Компонент	Вміст, %	Функціональне призначення
Ферохром (Cr)	50–60	Формування карбідних фаз, підвищення твердості
Вуглець (C)	3–4	Утворення CrC та $Cr_{23}C_6$
Карбід ніобію (NbC)	5–8	Підвищення термічної стабільності, зносостійкості
Оксид цирконію (ZrO_2)	5–10	Стабілізація структури при високих температурах
Графіт	2–3	Зниження термічного розширення, антифрикційний ефект
Оксид алюмінію (Al_2O_3)	5–7	Формування дрібнозернистої структури
Мікродомішки (V, Mo)	1–2	Покращення міцності та корозійної стійкості

комбіноване карбідно-оксидне модифікування дозволяє не лише підвищити твердість, а й зменшити інтенсивність викришування кромки, що є критичним для стабільної агротехнічної якості обробітку.

Таким чином, польові випробування підтверджують, що склад порошкового дроту – це не лише лабораторний інструмент керування властивостями покриття, а й практичний механізм підвищення ресурсу деталей у реальних умовах експлуатації. Отриманий ефект має прямий економічний вимір через зменшення частоти заміни та простоїв техніки.

Економічний ефект від зміцнення робочих органів наплавленням доцільно оцінювати методом техніко-економічного обґрунтування [17] через зменшення витрат на заміну деталей та підвищення ресурсу, віднесені до обсягу виконаних ґрунтообробних робіт. У роботі використано варіантний підхід: базові питомі витрати (грн/га) визначаються за даними [22–24], після чого результати масштабуються на фактичний обсяг робіт (табл. 3). Візуальне порівняння структури витрат для варіантних сценаріїв наведено на рис. 3.

Економічну доцільність застосування зміцнених лемішів оцінювали через порівняння вартості забезпечення необхідного ресурсу на задану площу обробітку ґрунту. Розрахунок додаткового економічного ефекту здійснювали за формулою [22]:

$$E_3 = \left(\frac{Ц_n - C_{остн}}{R_n} \cdot \frac{Ц_3 - C_{остз}}{R_3} \right) \cdot N_r, \quad (1)$$

де $Ц_n$ – ціна нового (серійного) леміша;

$Ц_3$ – ціна зміцненого леміша;

$C_{остн}$ та $C_{остз}$ – їх залишкова вартість;

R_n і R_3 – ресурс у гектарах відповідно для серійного та зміцненого лемішів;

N_r – запланована площа обробітку.

Таким чином, порівнюється вартість одного гектара ресурсу для кожного варіанта, після чого різниця масштабується на фактичний обсяг робіт. Отриманий результат безпосередньо відображає економічний ефект від підвищення ресурсу. Узагальнені результати розрахунку витрат і економічного ефекту наведено в табл. 3. За проведеними розрахунками зменшення сукупних витрат становить близько 31,6 %, що підтверджує доцільність застосування електрошлакового наплавлення для зміцнення робочих органів ґрунтообробної техніки.

Розрахунок складових витрат на наплавлення (табл. 3) показує, що технологія є економічно доцільною вже на рівні одиничної деталі. Зокрема, собівартість наплавлення 1 см зносостійкого шару становить 47,72 грн, а повна вартість зміцненого леміша (з урахуванням матеріалів, оплати праці та енергетичних витрат) – 1194,4 грн, тоді як вартість серійного леміша становить близько 1070 грн.

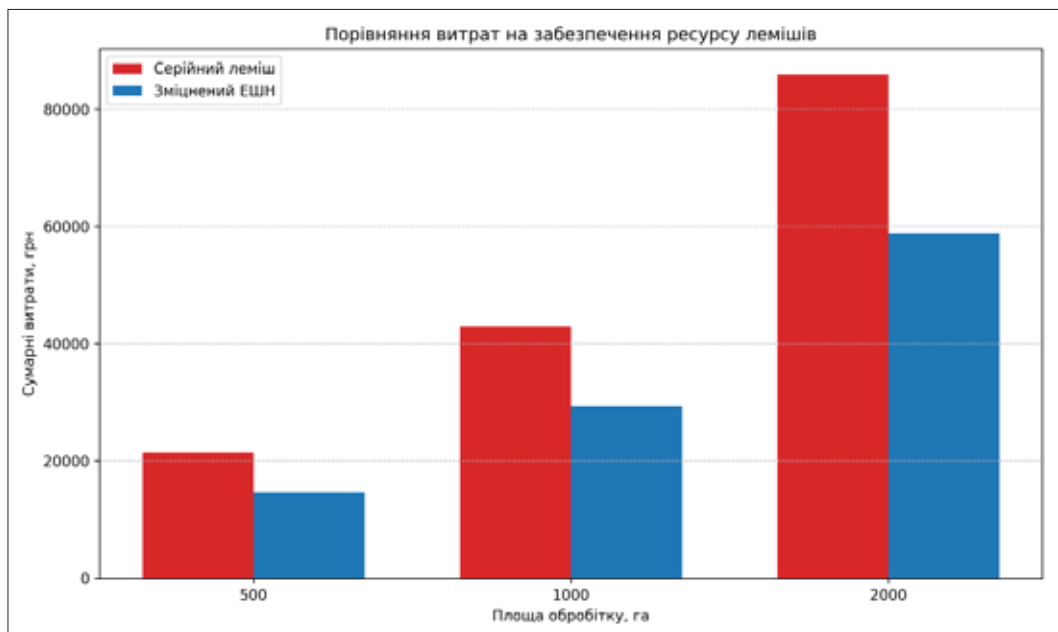


Рис. 3. Порівняння витрат на забезпечення робочого ресурсу лемішів при застосуванні серійних та зміцнених методом електрошлакового наплавлення деталей

Таблиця 3
Розрахунок витрат на забезпечення ресурсу та економічного ефекту для серійних і зміцнених лемішів

Площа, га	Серійний леміш, грн	Зміцнений ЕШН, грн	Економія, грн (%)
500	21 400,0	14 638,4	6761,6 (31,6 %)
1000	42 800,0	29 276,8	13 523,2 (31,6 %)
2000	85 600,0	58 553,6	27 046,4 (31,6 %)

Отже, раціоналізація складу порошкового дроту, орієнтована на збільшення ресурсу в реальних умовах, має двоканальний економічний ефект: пряме зменшення витрат на заміну деталей і непряме зниження простоїв техніки та втрат продуктивності. При переході до масштабного впровадження (парк машин, сезонні обсяги робіт) очікуваний економічний ефект зростає пропорційно обсягу обробітку ґрунту та кількості деталей, що зміцнюються.

Наведені результати розглядаються як підтверджена експериментальна база та методологічний каркас для подальшого розвитку тематики керованого проектування порошкових дротів для електрошлакового наплавлення (ЕШН) з урахуванням умов експлуатації робочих органів ґрунтообробної техніки, домінуючих механізмів зношування та економічної доцільності застосування покриттів.

Практична значущість полягає у можливості переходу від емпіричного підбору модифікаторів до керованого проектування дроту під заданий профіль навантажень (абразивне/ударно-абразивне зношування), що створює основу для масштабування технології на парк ґрунтообробної техніки та подальшої розробки технічних умов на нові дроти.

Отримані результати дозволяють сформуванню інженерно обґрунтовану логіку вибору складу порошкового дроту для ЕШН. По-перше, аналіз серії експериментів свідчить про наявність раціонального діапазону 55–65 % Cr, у межах якого формується стабільний карбідний каркас без надмірного огрубіння карбідів і зниження тріщиностійкості покриття. По-друге, введення NbC та оксидів (ZrO₂, Al₂O₃) підвищує термостійкість і корозійну стійкість структури, що особливо важливо для деталей, які контактують з вологими ґрунтами та солями.

Практично важливо, що багатокритеріальне ранжування складів за інтегральним показником

придатності K не зводиться до простого вибору максимального значення HRC. Наприклад, дріт № 5 має нижчу втрату маси у корозійному тесті (0,40 мг), проте характеризується вищою втратою маси при абразивному зносі (0,0028 г), що робить його менш придатним для ґрунтового абразиву. Натомість дріт № 6 забезпечує збалансованість критеріїв і може слугувати базою для промислового дроту з інтервалами компонентів, наведеними у табл. 2.

З позицій технологічного впровадження можна рекомендувати: 1) забезпечувати контроль granulometriї та запобігати підвищенню частки надтонких фракцій, які можуть інтенсифікувати газонасичення і конгломерацію; 2) підтримувати стабільність шлакової ванни у рекомендованих діапазонах струмів і напруг; 3) застосовувати флюс АНФ-29 як низькоактивний, що забезпечує рафінування; 4) виконувати контроль якості дроту за коефіцієнтом заповнення та геометрією оболонки.

Достовірність економічного ефекту до цін на матеріали та енергію може бути оцінена через формулу (1): збільшення вартості зміцненого леміша (C_y) зменшує E_z , однак при одночасному зростанні ресурсу R_z (за рахунок раціоналізації складу дроту) економічний ефект компенсується. Це означає, що ключовим показником економіки є саме ресурс наплавленої деталі, а не абсолютна ціна матеріалів. Відповідно, композиційна раціоналізація дроту має пріоритет над «дешевими» рішеннями, які не забезпечують стабільного ресурсу в реальних ґрунтах.

Висновки та перспективи подальших досліджень у даному напрямі.

1. Склад порошкового дроту та коефіцієнт його заповнення є первинними керованими параметрами формування структури й властивостей покриття при електрошлаковому наплавленні у струмопідвідному кристалізаторі, а раціоналізація складу має виконуватися з урахуванням технологічних обмежень процесу.

2. За результатами комплексної оцінки 10 типів дротів встановлено, що найкращі поєднання показників твердості, зносостійкості та корозійної стійкості забезпечують дроти № 6 та № 3, причому дріт № 6 є раціональним за інтегральним показником придатності K.

3. Встановлено, вміст ферохрому близько 60 %, при якому досягається максимальна твердість (≈ 50 HRC) за мінімальної дефектності структури (≈ 5 %); інтервал вмісту Cr становить 55–65 %. Запропоновано склад порошкового

дроту для зносостійких покриттів: Cr 50–60 %, C 3–4 %, NbC 5–8 %, ZrO₂ 5–10 %, Al₂O₃ 5–7 %, графіт 2–3 %, мікродомішки V, Mo 1–2 %, який забезпечує баланс карбідного зміцнення, рафінування зерна та стабілізації структури.

4. Польові випробування підтвердили практичну ефективність підходу: знос робочих органів із наплавленими вставками був приблизно на 40 % меншим порівняно з серійними деталями при обробці 35 га (культиваторні лапи) та 74 га (лемеші).

5. Техніко-економічна оцінка показала економію 13 523,2 грн (31,6 %) на 1000 га при використанні зміцнених лемешів замість серійних; відновлення деталей наплавленням дає ще вищий відносний ефект (~ 40 %).

Подальший розвиток роботи доцільно спрямувати на:

1) розширення простору варіювання складу порошкового дроту та побудову моделей типу «склад–структура–властивості» на основі планування експерименту (DoE) з регресійною або ML-ідентифікацією поверхонь відгуку для HRC, Δm, K_{IC} і показників контактної втоми;

2) верифікацію механізмів зношування для різних типів ґрунтів (піщані, суглинки, чорноземи) через встановлення взаємозв'язку «тип ґрунту – абразивність – вологість – домінуючий механізм руйнування»;

3) дослідження стабільності карбідно-оксидної підсистеми при теплових циклах ЕШН з уточненням раціональних співвідношень легувальних і модифікуючих компонентів;

4) удосконалення моделі повних витрат життєвого циклу [17] із врахуванням ресурсу, простоїв та зміни тягового опору;

5) промислово-експлуатаційну апробацію на основі багатосезонних польових випробувань і стандартизованих методик контролю (ISO 6508-1, ASTM G65-16, ISO 9227).

Узагальнення зазначених напрямів систематизовано у табл. 4, що формує дорожню карту подальших досліджень з проектування порошкових дротів для електрошлакового наплавлення.

Наведені дані формують практично орієнтований план подальшого розвитку тематики керованого проектування порошкових дротів для ЕШН і підтверджують, що підвищення ресурсу робочих органів повинно обґрунтовуватись одночасно через властивості покриття, технологічну стабільність процесу та економічну доцільність. Сукупність отриманих результатів і рекомендацій може бути використана виробниками та ремонтними підприємствами для вибору складів присадних матеріалів і параметрів зміцнення з урахуванням реальних умов експлуатації ґрунтообробної техніки.

Таблиця 4

Головні напрями подальших досліджень з оптимізації складу порошкових дротів для електрошлакового наплавлення робочих органів ґрунтообробної техніки

Напрямок	Фактори/керовані змінні	Метрики	Очікуваний результат
Композиційна раціоналізація	Cr, C, NbC, ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , графіт; коеф. заповнення	HRC; Δm; K _{IC} ; дефектність	Раціональні співвідношення для класів ґрунтів
Процесна стабільність ЕШН	I/U контури; флюс; тепловклад; подача дроту	пори/тріщини; розбавлення; стабільність ванни	Технічна карта + «вікно» режимів бездефектності
Механізми зношування	тип ґрунту; абразивність; вологість; швидкість	морфологія зносу; інтенсивність; збереження кромки	Карта механізмів і критерії добору дроту
Економіка ТЕО	ціна матеріалів; ресурс; простої; паливо	грн/га; ROI; чутливість	Модель прийняття рішень для господарств/сервісу
Апробація	3 сезони; 3 органи; реплікації	стат. значущість; довірчі інтервали	Доказова база для впровадження і ТУ

ЛІТЕРАТУРА

1. Saichuk O., Borovyk O., Borovyk V., Zakharov A., Kapustianskyi M. Formation and properties of NbC-reinforced layers obtained by electroslag surfacing in a small-diameter current-fed crystallizer. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. Vol. 5, No. 1 (85). P. 30–35. DOI: 10.15587/2706-5448.2025.341827.
2. Tekeste M. Z., Balvanz L. R., Al-Aani F. et al. Hardened edges effects on wear characteristics of cultivator sweeps using circular soil bin test. *Journal of Tribology*. 2022. Vol. 144, No. 2. 024501. DOI: 10.1115/1.4050805.
3. Tulaganova L., Yunushuzhaev S., Juraeva G. Improving the wear resistance and durability of cultivator tools. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2373. 022026. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/2/022026.
4. Rogovskii I. L., Titova L. L., Voinash S. A., Troyanovskaya I. P. Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 60, No. 1. P. 45–52. DOI: 10.35633/INMATEH-60-05.
5. Białobrzeska B., Jasiński R., Konat Ł., Szczepański Ł. Analysis of the properties of hardox extreme and hardox 500 steels in hardness tests. *Metals*. 2021. Vol. 11. Art. 162. DOI: 10.3390/met11010162.
6. Archard J. F. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*. 1953. Vol. 24, No. 8. P. 981–988. DOI: 10.1063/1.1721448.
7. Hutchings I. M., Shipway P. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 412 p.
8. Kou S. *Welding metallurgy*. 2nd ed. Hoboken, NJ : Wiley-Interscience, 2003. 461 p.
9. Захаров А. В., Рибалко І. М., Сайчук О. В., Боровик О. Ю. Процес електрошлакового наплавлення з використанням електродних порошкових дротів. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2023. Vol. 2, No. 1. P. 1–9. DOI: 10.46299/j.isjea.20230201.01.
10. Захаров А. В., Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Сайчук О. В. Дослідження зношуючої здатності ґрунтів та її вплив на довговічність робочих органів ґрунтообробних машин. *Науковий вісник ТДАТУ*. 2023. Вип. 13, т. 1. С. 106–117. DOI: 10.31388/sbtsatu.v13i1.359.
11. ISO 6508-1:2016. *Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 1: Test method*. Geneva : International Organization for Standardization, 2016.
12. ASTM G65-16 (2021). *Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus*. West Conshohocken, PA : ASTM International, 2021.
13. ISO 9227:2022. *Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests*. Geneva : International Organization for Standardization, 2022.
14. Захаров А. В., Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Гончаренко О. Модифікування реноваційних покриттів для підвищення зносостійкості культиваторних лап. *Вісник ХНТУ*. 2022. Вип. 4 (83). С. 37–42.
15. Schramm F., Kalácska Á., Pfeiffer V., Sukumaran J., De Baets P., Frerichs L. Modelling of abrasive material loss at soil tillage via scratch test with the discrete element method. *Journal of Terramechanics*. 2020. Vol. 91. P. 275–283. DOI: 10.1016/j.jterra.2020.08.002.
16. de Sousa J. M. S., Gil G. S., Barbosa M. dos S., Garcia D. N., Lobato M. Q., Machado P. C. Tribological performance under abrasive wear of Fe–Cr–C+Nb coating deposited by FCAW process. *Wear*. 2023. Vol. 523. 204824. DOI: 10.1016/j.wear.2023.204824.
17. Holmberg K., Kivikytö-Reponen P., Härki-saari P., Valtonen K., Erdemir A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*. 2017. Vol. 115. P. 116–139. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.010.
18. Захаров А. В., Рибалко І. М., Сайчук О. В. Металургійні процеси плавлення і перенесення електродного та присадного матеріалів у шлаковій ванні при електрошлаковому наплавленні. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету*. 2023. Вип. 33. С. 12–18. DOI: 10.36477/2522-1221-2023-33-02.
19. Kuskov Yu. M. Application of flux-cored wires at surfacing, remelting and in metallurgy. *The Paton Welding Journal*. 2019. No. 3. P. 27–33.
20. Paton V. E., Yushchenko K. A., Kozulin V. P., Lychko I. I. Electroslag welding process analysis. *The Paton Welding Journal*. 2019. No. 10. P. 33–40.
21. Нетяга А. В., Кусков Ю. М., Проскудін В. М. та ін. Підвищення зносостійкості великомодульних прямозубих зубчастих коліс шляхом наплавлення. *Сучасна електromеталургія*. 2021. № 4. С. 9–15. DOI: 10.37434/sem2021.04.02.
22. Захаров А. В., Рибалко І. М., Тіхонов О. В. Зносостійкість та ресурс відновлених і зміцнених електрошлаковим наплавленням лемішів і культиваторних стрілочастих лап. *Збірник наукових праць НУК*. 2024. № 4 (497). С. 20–27. DOI: 10.15589/znp2024.4 (497).4.
23. Рибалко І. М., Захаров А. В., Сайчук О. В., Коротій В. О. Дослідження причин проплавлення основного металу при електрошлаковому наплавленні і методи його регулювання. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 4 (87). С. 129–136. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2023.4.15.
24. Захаров А. В., Рибалко І. М., Сайчук О. В. Фізико-хімічні властивості флюсів та їхні технологічні параметри. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2022. Vol. 1, No. 5. P. 70–76. DOI: 10.46299/j.isjea.20220105.09.

REFERENCES

1. Saichuk, O., Borovyk, O., Borovyk, V., Zakharov, A., & Kapustianskyi, M. (2025) Formation and properties of NbC-reinforced layers obtained by electroslag surfacing in a small-diameter current-fed crystallizer. *Technology Audit and Production Reserves*, 5 (1(85)), 30–35. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.341827>
2. Tekeste, M. Z., Balvanz, L. R., Al-Aani, F., et al. (2022) Hardened edges effects on wear characteristics of cultivator sweeps using circular soil bin test. *Journal of Tribology*, 144 (2), 024501. <https://doi.org/10.1115/1.4050805>
3. Tulaganova, L., Yunushuzhaev, S., & Juraeva, G. (2022) Improving the wear resistance and durability of cultivator tools. *Journal of Physics: Conference Series*, 2373, 022026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/2/022026>
4. Rogovskii, I. L., Titova, L. L., Voinash, S. A., & Troyanovskaya, I. P. (2020) Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 60 (1), 45–52. <https://doi.org/10.35633/INMATEH-60-05>
5. Białoברzeska, B., Jasiński, R., Konat, Ł., & Szczepański, Ł. (2021) Analysis of the properties of Hardox Extreme and Hardox 500 steels in hardness tests. *Metals*, 11, 162. <https://doi.org/10.3390/met11010162>
6. Archard, J. F. (1953) Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24 (8), 981–988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
7. Hutchings, I. M., & Shipway, P. (2017) *Tribology: friction and wear of engineering materials*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.
8. Kou, S. (2003) *Welding metallurgy*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
9. Zakharov, A. V., Rybalko, I. M., Saichuk, O. V., & Borovyk, O. Yu. (2023) Electroslag surfacing process using electrode flux-cored wires [Protsey elektroshlakovoho naplavlennia z vykorystanniam elektrodnykh poroshkovykh drotiv]. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2 (1), 1–9. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230201.01> [in Ukrainian].
10. Zakharov, A. V., Rybalko, I. M., Tikhonov, O. V., & Saichuk, O. V. (2023) Study of soil abrasive capacity and its influence on durability of working bodies of tillage machines [Doslidzhennia znoshuiuchoi zdatnosti gruntiv ta yii vplyv na dohovichnist robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn]. *Naukovyi visnyk TDATU*, 13 (1), 106–117. <https://doi.org/10.31388/sbtsatu.v13i1.359> [in Ukrainian].
11. International Organization for Standardization (2016) ISO 6508-1:2016 Metallic materials – Rockwell hardness test – Part 1: Test method. Geneva: ISO.
12. ASTM International (2021) ASTM G65-16 (2021) Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International.
13. International Organization for Standardization (2022) ISO 9227:2022 Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests. Geneva: ISO.
14. Zakharov, A. V., Rybalko, I. M., Tikhonov, O. V., & Honcharenko, O. O. (2022) Modification of renovation coatings to increase wear resistance of cultivator sweeps [Modyfikuvannia renovatsiinykh pokryttiv dlia pidvyshchennia znosostiikosti kultyvatornykh lap]. *Visnyk KhNTU*, 4 (83), 37–42. [in Ukrainian].
15. Schramm, F., Kalácska, Á., Pfeiffer, V., Sukumaran, J., De Baets, P., & Frerichs, L. (2020) Modelling of abrasive material loss at soil tillage via scratch test with the discrete element method. *Journal of Terramechanics*, 91, 275–283. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.08.002>
16. de Sousa, J. M. S., Gil, G. S., Barbosa, M. dos S., Garcia, D. N., Lobato, M. Q., & Machado, P. C. (2023) Tribological performance under abrasive wear of Fe–Cr–C+Nb coating deposited by FCAW process. *Wear*, 523, 204824. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204824>
17. Holmberg, K., Kivikytö-Reponen, P., Härkisaari, P., Valtonen, K., & Erdemir, A. (2017) Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, 115, 116–139. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.010>
18. Zakharov, A. V., Rybalko, I. M., & Saichuk, O. V. (2023) Metallurgical processes of melting and transfer of electrode and filler materials in slag bath during electroslag surfacing [Metalurhiini protsesy plavlennia i perenesennia elektrodnoho ta prysadyho materialiv u shlakovii vanni pry elektroshlakovomu naplavlenni]. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu*, 33, 12–18. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2023-33-02> [in Ukrainian].
19. Kuskov, Yu. M. (2019) Application of flux-cored wires at surfacing, remelting and in metallurgy. *The Paton Welding Journal*, (3), 27–33.
20. Paton, B. E., Yushchenko, K. A., Kozulin, V. P., & Lychko, I. I. (2019) Electroslag welding process analysis. *The Paton Welding Journal*, (10), 33–40.
21. Netiaha, A. V., Kuskov, Yu. M., Proskudin, V. M., et al. (2021) Increasing wear resistance of large-module spur gears by surfacing [Pidvyshchennia znosostiikosti velykomodulnykh priamozubykh zubchastykh kolis shliakhom naplavlennia]. *Suchasna elektrometalurhiia*, (4), 9–15. <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.02> [in Ukrainian].
22. Zakharov, A. V., Rybalko, I. M., & Tikhonov, O. V. (2024) Wear resistance and service life of ploughshares and cultivator sweeps restored and strengthened by electroslag surfacing [Znosostiikist ta resurs vidnovlenykh i zmitsnenykh elektroshlakovym

naplavlenniam lemeshiv i kultyvatornykh strilchastykh lap]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, 4 (497), 20–27. <https://doi.org/10.15589/znp2024.4> (497).4 [in Ukrainian].

23. Rybalko, I. M., Zakharov, A. V., Saichuk, O. V., & Korotii, V. O. (2023) Study of causes of base metal penetration during electroslag surfacing and methods of its regulation [Doslidzhennia prychyn proplavlennia osnovnoho metalu pry elektroshlakovomu naplavlenni i metody yoho rehuliuвання]. *Visnyk Khersonskoho*

natsionalnoho tekhnichnoho universytetu, 4 (87), 129–136. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.15> [in Ukrainian].

24. Zakharov, A. V., Rybalko, I. M., & Saichuk, O. V. (2022) Physicochemical properties of fluxes and their technological parameters [Fizyko-khimichni vlastyvyosti flusiv ta yikhni tekhnolohichni parametry]. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 1 (5), 70–76. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220105.09> [in Ukrainian].

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)



Дата першого надходження статті до видання: 24.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.05.2026