

І. М. РИБАЛКО

доктор технічних наук, доцент,
доцент кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів
в машинобудуванні імені О. І. Сідашенка
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0000-0002-3663-019X

А. В. ЗАХАРОВ

доктор філософії (PhD) з матеріалознавства
Харківський державний професійно-педагогічний фаховий коледж
імені В. І. Вернадського
ORCID: 0000-0001-9894-7355

О. В. ТІХОНОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів
в машинобудуванні імені О. І. Сідашенка
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0000-0001-7209-8375

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНОЇ ТЕХНІКИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ З КОМПЛЕКСНИМ МОДИФІКУВАННЯМ ПОКРИТТІВ

У статті розглянуто комплексний підхід до підвищення експлуатаційної стійкості робочих органів ґрунтообробної техніки, які працюють в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування. Об'єктом дослідження є леміші плугів і стрілчасті лапи культиваторів, відновлені методом електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі з формуванням товстих наплавлених шарів та застосуванням порошкових дротів, шихта яких містить комплексні модифікуючі присадки на основі карбідів хрому, карбіду ніобію та оксиду алюмінію. Дослідження побудовано у вигляді замкненої схеми «структура – мікротвердість – зносостійкість – ресурс – економічна ефективність», що дозволяє простежити повний ланцюг перетворень від мікрорівня до практичних техніко-економічних результатів. Описано конструкцію та принцип дії струмопідвідного кристалізатора, подано технологічну схему процесу електрошлакового наплавлення робочих органів та обґрунтовано вибір товщини наплавлених шарів з урахуванням умов їх роботи в ґрунті. На основі структурних, електронно-мікроскопічних і оптико-математичних досліджень показано, що використання комплексно модифікованих порошкових дротів забезпечує перехід від крупнозернистої мартенситної матриці з локальними скупченнями грубих карбідів до дрібнозернистої структури з рівномірно розвинутим дисперсним карбідним каркасом. За даними карт розподілу твердості й мікротвердості встановлено, що комплексне модифікування Cr-карбідами, NbC та Al₂O₃ підвищує твердість приповерхневих зон на 15–20 % порівняно з немодифікованими покриттями, при цьому градієнт твердості по товщині шару зменшується, що свідчить про кращу деформаційну сумісність покриття з основним металом. Результати лабораторних випробувань на ковзне абразивне зношування узагальнено у вигляді діаграми «твердість – зносостійкість» яка відображає зростання відносної зносостійкості комплексно модифікованих покриттів у 2,2–3,1 рази порівняно з базовим наплавленим металом. Польові випробування відновлених лемішів і стрілчастих лап культиваторів у важких, кам'янистих ґрунтах показали зростання їх ресурсу в середньому на 35–40 %, а для оптимальних складів порошкових дротів – до 85–100 % відносно нових серійних деталей без відновлення. Техніко-економічна оцінка засвідчила можливість зниження сумарних витрат на ремонт і технічне обслуговування ґрунтообробної техніки майже на 40 % за рахунок скорочення кількості замін робочих органів, зменшення простоїв машин і раціональнішого використання металоресурсу. Показано, що розроблена технологія електрошлакового наплавлення з комплексним модифікуванням має суттєвий ресурсозберігаючий потенціал і може бути адаптована до відновлення інших деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, струмопідвідний кристалізатор, порошкові дроти, модифікуючі присадки, карбіди хрому, карбід ніобію, оксид алюмінію, мікроструктура, мікротвердість, абразивне зношування, робочі органи ґрунтообробних машин, економічна ефективність.

I. M. RYBALKO

Doctor of 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
ORCID: 0000-0002-3663-019X

A. V. ZAKHAROV

Doctor of Philosophy (PhD) in Materials Science
Kharkiv State Professional and Pedagogical College
named after V. I. Vernadsky
ORCID: 0000-0001-9894-7355

O. V. TIHOV

Candidate of 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
ORCID: 0000-0001-7209-8375

INCREASING THE OPERATIONAL STABILITY OF WORKING PARTS OF SOIL CULTIVATION EQUIPMENT BY ELECTROSLACK SURFACE COATING WITH COMPLEX MODIFICATION OF THE COATING COVERINGS

The article discusses a comprehensive approach to improving the operational stability of working parts of soil cultivation equipment operating under conditions of intense abrasive and impact-abrasive wear. The object of study is plough blades and cultivator arrow-shaped tines, restored by electroslag surfacing in a current-fed crystalliser with the formation of thick surfaced layers and the use of powder wires, the mixture of which contains complex modifying additives based on chromium carbides, niobium carbide and aluminium oxide. The study is structured as a closed loop 'structure – microhardness – wear resistance – service life – economics, which allows tracing the entire chain of transformations from the micro level to practical technical and economic results. The design and principle of operation of the current-conducting crystalliser are described, a technological diagram of the electroslag surfacing process of working parts is presented, and the choice of the thickness of the surfaced layers is justified, taking into account the conditions of their operation in the soil.

Based on structural, electron microscopic and optical-mathematical studies, it has been shown that the use of complex-modified powder wires provides a transition from a coarse-grained martensitic matrix with local clusters of coarse carbides to a fine-grained structure with a uniformly developed dispersed carbide framework. According to the hardness and microhardness distribution maps, it has been established that complex modification with Cr carbides, NbC and Al₂O₃ increases the hardness of the surface zones by 15–20 % compared to unmodified coatings, while the hardness gradient across the layer thickness decreases, indicating better deformation compatibility of the coating with the base metal. The results of laboratory tests for sliding abrasive wear are summarised in the form of a 'hardness-wear resistance' diagram, which shows an increase in the relative wear resistance of complex-modified coatings by 2.2–3.1 times compared to the base deposited metal.

Field tests of refurbished ploughshares and cultivator tines in heavy, stony soils showed an average increase in their service life of 35–40%, and for optimal powder wire compositions – up to 85–100% compared to new serial parts without restoration. A technical and economic assessment showed that it is possible to reduce the total costs of repair and maintenance of soil cultivation equipment by almost 40% by reducing the number of replacements of working parts, reducing machine downtime and making more rational use of metal resources. It has been shown that the developed technology of electroslag surfacing with complex modification has significant resource-saving potential and can be adapted to the restoration of other parts that operate under conditions of intense abrasive and impact-abrasive wear.

Key words: *electroslag surfacing, current-carrying crystalliser, powder wires, modifying additives, chromium carbides, niobium carbide, aluminium oxide, microstructure, microhardness, abrasive wear, working parts of soil cultivation machines, economic efficiency.*

Постановка проблеми

Сучасні тенденції розвитку сільськогосподарського виробництва пов'язані з необхідністю виконання значних обсягів ґрунтообробних робіт у стислі агротехнічні строки, часто за несприятливих погодних і ґрунтових умов [1]. У таких ситуаціях відмови ґрунтообробних агрегатів, пов'язані зі зношуванням робочих органів, призводять не тільки до прямих фінансових втрат, але й до недобору врожаю через зрив оптимальних термінів виконання

операцій [2]. Лемеші плугів та стрілочасті лапи культиваторів працюють у середовищі, де поєднуються висока абразивність ґрунту, наявність твердих мінеральних включень і каміння, значні нормальні та дотичні навантаження, локальні ударні імпульси, вібрації, коливання вологості та температури [3]. За таких умов навіть при початково високій твердості матеріалу відбувається інтенсивне сточування металу з ріжучих кромки, зміна профілю робочої поверхні та зменшення товщини в критичних перерізах. Зношені лемеші і лапи вже не забезпечують необхідну якість обробки ґрунту, збільшується тяговий опір агрегату, зростає витрата пального, а ризик аварійних відмов у період пікових навантажень суттєво зростає [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Традиційні підходи до вирішення цієї проблеми базуються на двох основних стратегіях: використанні більш дорогих зносостійких матеріалів для виготовлення нових деталей та впровадженні різних методів поверхневого зміцнення. У першому випадку підвищення ресурсу досягається за рахунок застосування високолегованих сталей і чавунів із карбідним, боридним або комплексним зміцненням, однак такі деталі мають високу собівартість і потребують значних капіталовкладень при оновленні парку робочих органів [5]. У другому випадку використовуються термічна й хіміко-термічна обробка, газотермічне напилення, плазмове напилення, дугове наплавлення, які дозволяють формувати зміцнювані поверхневі шари деталей. Газотермічні й плазмові методи забезпечують високу твердість тонких покриттів, але товщина таких шарів часто є недостатньою для тривалої роботи в умовах абразивного ґрунту [6].

Дугове наплавлення дозволяє отримувати товстіші шари, проте супроводжується значними термічними деформаціями, високим рівнем залишкових напружень, ризиком появи тріщин, пор і інших дефектів, особливо при відновленні масивних і відповідальних деталей [7]. Усі ці обставини стимулюють пошук таких технологій відновлення, які б одночасно забезпечували формування товстих покриттів з керованою структурою, дозволяли б гнучко змінювати хімічний склад наплавленого металу, мали б високий ступінь повторюваності результатів і були б економічно доцільними для впровадження у практику технічного сервісу аграрних підприємств [8].

Електрошлакове наплавлення (ЕШН) у струмопідвідному кристалізаторі відповідає зазначеним вимогам, оскільки поєднує в собі переваги об'ємного електрошлакового процесу (глибоке рафінування металу, стабільний тепловий режим, екранування шлаком, зниження залишкових напружень) із можливістю відновлення деталей складної форми [9]. Струмопідвідний кристалізатор виконує одночасно функцію формуючої оснастки, елемента електричного кола та системи тепловідведення, що дозволяє локалізувати процес у зоні наплавлення й зменшити термічний вплив на решту деталі. Додаткові можливості відкриває використання порошкових дротів зі спеціально підбраною шихтою, яка може включати комплексні модифікуючі присадки. Введення таких присадок безпосередньо в металеву ванну ЕШН дає змогу цілеспрямовано впливати на процеси кристалізації, формування фазового складу, морфологію й розподіл зміцнюючих фаз, а отже – керувати структуроутворенням наплавленого металу.

Проведене узагальнення наукових публікацій [10-14] показує, що у багатьох роботах зосереджено увагу або на конструкції й режимах роботи електрошлакових установок, або на описі структури й властивостей окремих типів покриттів, отриманих різними методами. Значно менше досліджень присвячено комплексному полікомпонентному модифікуванню наплавленого металу з використанням композиційних порошкових дротів, у яких одночасно присутні кілька типів тугоплавких фаз, здатних синергетично впливати на процеси структуроутворення. Також у наявних публікаціях украй рідко послідовно й кількісно простежується весь ланцюг «модифікатор – структура – мікротвердість – зносостійкість – ресурс – економіка» для деталей ґрунтообробної техніки, що працюють у важких ґрунтово-кліматичних умовах і зазнають комбінованого абразивного та ударно-абразивного зношування.

Таким чином, актуальною науково-прикладною задачею є побудова такого підходу, який би дозволив не просто показати окремі позитивні ефекти від введення модифікуючих присадок, а й системно обґрунтувати їх вплив на всі рівні – від мікроструктури до техніко-економічних показників роботи сільськогосподарських агрегатів [15].

Формулювання мети дослідження

Метою проведеного дослідження було наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження можливості підвищення експлуатаційної стійкості робочих органів ґрунтообробної техніки шляхом застосування електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі з використанням порошкових дротів, шихта яких містить комплексні модифікуючі присадки на основі карбідів хрому, карбіду ніобію та оксиду алюмінію, та на основі цього розробити інженерно орієнтовану методику вибору складів покриттів, яка враховує зв'язок між структурою, мікротвердістю, зносостійкістю, ресурсом і економічною ефективністю.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктами дослідження були лемеші плугів зі сталі 65Г та стрілочасті лапи культиваторів зі сталі 45, які вже відпрацювали ресурс в умовах реальної експлуатації. Перед відновленням деталі піддавали стандартному комплексу підготовчих операцій: очищенню, дефектуванню, видаленню сильно зношених і пошкоджених ділянок, механічному підрівнюванню поверхні. У зоні наплавлення формували підкладку товщиною орієнтовно

35 мм, що забезпечувало поєднання достатньої міцності основи та раціональної витрати наплавлюваного металу. Електрошлакове наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі задовольняє зазначені вимоги [16]. Наявність шлакової ванни забезпечує рафінування металу, стабілізацію теплового режиму й захист від атмосферного впливу, а струмопідвідний кристалізатор виконує роль одночасно формуючої оснастки та елемента електричного кола. На рис. 1, де показано розташування деталі, шлакової й металеві ванн, електрода, зон підведення струму та каналів охолодження. На основі цієї схеми було реалізовано відновлення лемешів і лап зі сталі 65Г та 45 відповідно.

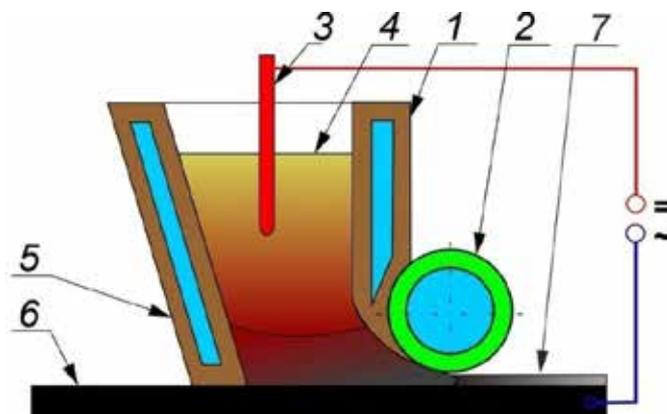


Рис. 1. Технологічна схема електрошлакового наплавлення робочих органів ґрунтообробної техніки у струмопідвідному кристалізаторі: 1 – кокіль–кристалізатор; 2 – валок кристалізатор; 3 – наплавочний дріт; 4 – шлакова ванна; 5 – металева ванна; 6 – наплавлений метал

Перед наплавленням деталі проходили очищення, дефектування та механічну підготовку зони відновлення із формуванням підкладки товщиною близько 35 мм, що забезпечувало достатню міцність основи й раціональну витрату наплавлюваного металу. У процесі ЕШН формували наплавлені шари товщиною 20–25 мм, у результаті чого сумарна товщина відновленої ділянки досягала 55–60 мм. Такий вибір є компромісом між необхідністю забезпечити тривалий ресурс у важких ґрунтових умовах і недопустимістю перевитрати наплавлюваного металу та зростання маси робочого органу.

Ключовим елементом дослідження були порошкові дроти, шихта яких відрізнялася за складом і вмістом модифікуючих компонентів.

Базовий варіант формував наплавлений метал без спеціальних тугоплавких модифікаторів і служив для порівняння.

У другому варіанті вводили карбіди хрому, які забезпечували формування хромвмісних карбідних фаз.

Третій варіант поєднував Cr-карбіди з карбідом ніобію, що збільшувало кількість гетерогенних центрів кристалізації та сприяло подрібненню зерна.

Четвертий, комплексно модифікований варіант, окрім Cr-карбідів і NbC, містив оксид алюмінію, який впливав як на властивості шлакової фази (в'язкість, електропровідність, рафінувальні властивості), так і на механізм зародження й росту кристалів у металевій ванні.

На основі результатів спектрального аналізу напавленого металу для кожного з розроблених варіантів дротів визначено усереднений (орієнтовний) хімічний склад напавлених покриттів; відповідні дані узагальнено в табл. 1.

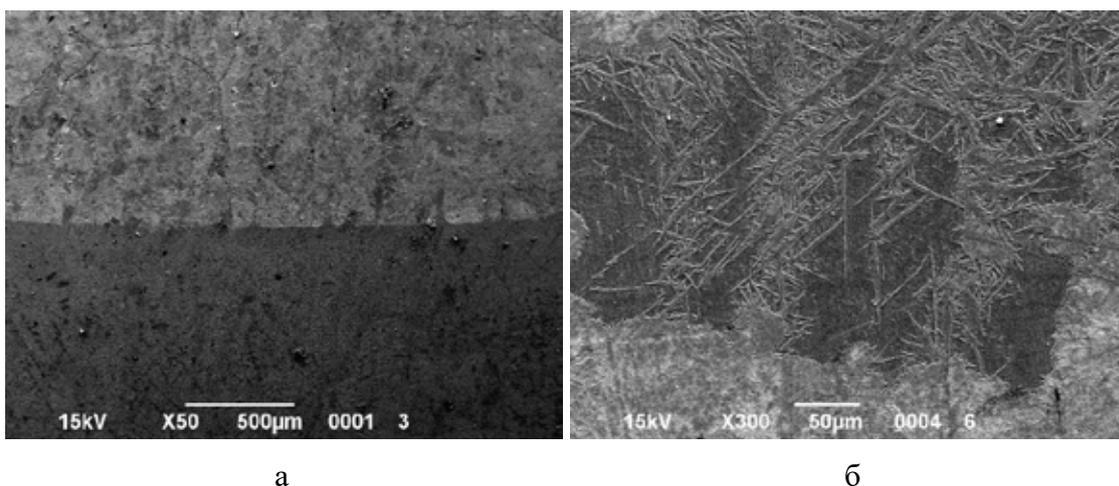
Таблиця 1

Орієнтовний хімічний склад напавлених покриттів, отриманих при застосуванні різних типів порошкових дротів (за даними спектрального аналізу)

Компонент	Вміст, %
Хром	30
Нікель	10
Карбідкремнію	5
Основа(залізо)	55

За результатами спектрального аналізу було встановлено, що введення модифікуючих присадок змінює не лише концентрацію відповідних елементів (Cr, Nb, Al), а й впливає на взаємодію основних легувальних компонентів у металевій ванні, що відіграє ключову роль у подальшому формуванні структури.

Структуру наплавлених покриттів досліджували за допомогою оптичної й електронної мікроскопії [17]. Для базового наплавленого металу характерною була порівняно крупнозерниста мартенситна матриця з поодинокими крупними карбідами, які розташовувалися нерівномірно й утворювали окремі зони з високою концентрацією зміцнюючих фаз на тлі м'якшої основи. Така структура, з одного боку, забезпечувала певне підвищення твердості, а з іншого – формувала небажані концентратори напружень, що могло сприяти зародженню й росту тріщин під дією змінних навантажень. Структурні дослідження проводили за допомогою оптичної й електронної мікроскопії. Для базового наплавленого металу спостерігали відносно крупнозернисту мартенситну матрицю з поодинокими грубими карбідами, які розташовувалися нерівномірно, утворюючи зони підвищеної концентрації зміцнюючих фаз і водночас – потенційні концентратори напружень [18]. При переході до комплексно модифікованого складу структура зазнавала принципової зміни: матриця ставала дрібнозернистою, а карбідні включення формували розгалужений дисперсний каркас, рівномірно розподілений у всьому об'ємі наплавленого металу. Ці відмінності доведено електронно-мікроскопічними зображеннями (рис. 2).



а

б

Рис. 2. Мікроструктура наплавленого металу робочих органів ґрунтообробної техніки: а – покриття, сформоване базовим порошковим дротом; б – покриття, сформоване дротом з комплексним модифікуванням (Cr-карбіди, NbC, Al₂O₃)

Для кількісної оцінки структурних параметрів застосовано оптико-математичний аналіз цифрових мікрозображень. За допомогою відповідного програмного забезпечення автоматично визначали межі зерен, вимірювали їх площу, обчислювали середній розмір зерна, оцінювали площинну частку зміцнюючих фаз і ступінь кластеризації карбідних включень (див.табл. 2).

Таблиця 2

Вплив вмісту карбідів на твердість, зносостійкість та розмір зерна наплавлених покриттів

Вміст карбідів(%)	Твердість (HRC)	Втрати маси(г)	Розмір зерна (мкм)
0	42	0.0028	15
5	48	0.0023	10
10	52	0.0019	8
15	50	0.0021	9

З таблиці 2 видно, що для базового покриття середній розмір зерна є найбільшим, площинна частка дрібнодисперсних фаз – найменшою, а показники кластеризації свідчать про виражену схильність до утворення великих скупчень карбідів. Для комплексно модифікованих покриттів ситуація протилежна: середній розмір зерна істотно зменшується, площинна частка зміцнюючих фаз зростає, а кластеризація знижується, що означає більш рівномірний розподіл карбідних включень у матриці. Така структура, з точки зору трибології, є більш сприятливою, оскільки дрібнозерниста матриця ефективніше протидіє зародженню й росту мікротріщин, а рівномірний карбідний каркас дозволяє розподіляти навантаження від зерен абразиву без утворення локальних концентраторів напружень [19].

Оцінка механічних властивостей покриттів проводилася на основі вимірювань твердості й мікротвердості. Для візуалізації розподілу твердості по перерізу наплавлених шарів було побудовано карти твердості, які відображають зміну цього параметра в площині зразка. Типові карти твердості, отримані методом індентування, наведено на рисунку 3.

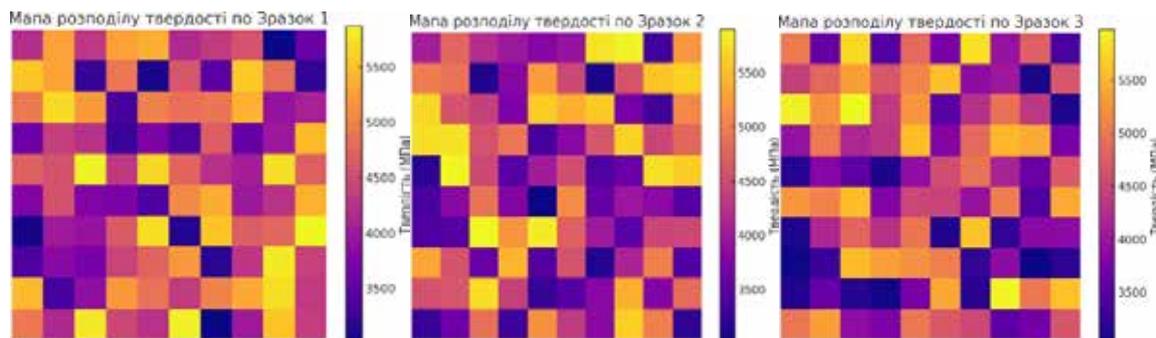


Рис. 3. Розподіл твердості наплавлених шарів за результатами інденування (карти твердості дослідних зразків)

За картами твердості (рис. 3) добре видно, що базові покриття характеризуються більш різкою зміною твердості від поверхні до зони з’єднання з основним металом, тоді як у комплексно модифікованих покриттях колірною палітра більш рівномірна, що відображає зменшення градієнта твердості по товщині [20]. При цьому максимальні значення твердості в приповерхневій зоні для модифікованих покриттів на 15–20 % вищі, ніж у базового варіанту. Таким чином, модифікуючі присадки забезпечують не лише підвищення рівня твердості, а й більш «пологий» розподіл цього параметра в об’ємі шару, що є важливим для забезпечення деформаційної сумісності покриття та основи.

Лабораторні випробування на абразивне зношування проводили для всіх варіантів покриттів. Зразки працювали в абразивному середовищі при фіксованому навантаженні й довжині шляху тертя; після випробувань визначали втрату маси й розраховували відносну зносостійкість щодо базового варіанту [21]. У таблиці 3 наведено результати таких випробувань, зокрема вплив вмісту модифікуючої добавки (графіту як прикладу одного з компонентів шихти) на адгезійну міцність, твердість та інтенсивність зношування.

Таблиця 3

Вплив вмісту модифікуючої добавки (графіту) на адгезійну міцність, твердість та знос при ковзному абразивному навантаженні.

Вміст графіту(%)	Адгезійна міцність(МПа)	Втрати маси при зносі (г)	Твердість(HRC)
0	60	0.0025	46
1	65	0.0022	48
2	70	0.0019	50
3	68	0.0020	49

Дані таблиці 3 доводять, що зміна вмісту добавок дозволяє регулювати не лише твердість, а й адгезійну міцність і знос, причому раціональні значення досягаються не при максимальній твердості, а в деякому її діапазоні, де забезпечується найкраще поєднання властивостей [22]. Для узагальнення результатів випробувань на знос та зіставлення їх із даними щодо мікротвердості наплавлених покриттів було побудовано діаграму «твердість – зносостійкість», яка наведена як рисунку 4.

Ця залежність демонструє, що зі зростанням середньої мікротвердості відносна зносостійкість покриттів зростає, але характер зростання є нелінійним: на початковій ділянці крива крута, далі виходить на більш пологий режим. Комплексно модифіковані покриття знаходяться в області, де досягається найбільш вигідне співвідношення між твердістю й зносостійкістю – при відносній зносостійкості 2,2–3,1 рази відносно немодифікованого шару. Це підтверджує, що обраний рівень твердості й структура покриттів є близькими до оптимальних в умовах ковзного абразивного навантаження.

Результати лабораторних досліджень були перевірені в реальних умовах експлуатації [23]. Польові випробування проводили на серійних плугах і культиваторах, оснащених трьома варіантами робочих органів: новими серійними лемешами плугів зі сталі 65Г та стрілчастими лапами культиваторів зі сталі 45; тими самими деталями, відновленими електрошлаковим наплавленням базового (немодифікованого) покриття; а також деталями з покриттями, сформованими четвертим, комплексно модифікованим варіантом порошкового дроту з введенням карбідів хрому, карбіду ніобію та оксиду алюмінію. Агрегати працювали по важких, кам’янистих ґрунтах; у процесі експлуатації фіксували площу обробітку, контролювали стан робочих кромки, визначали втрату маси та геометричну зміну профілю. У такому форматі отримували узагальнені результати польових випробувань: площу обробітку до досягнення граничного стану, втрату маси та відносний ресурс.

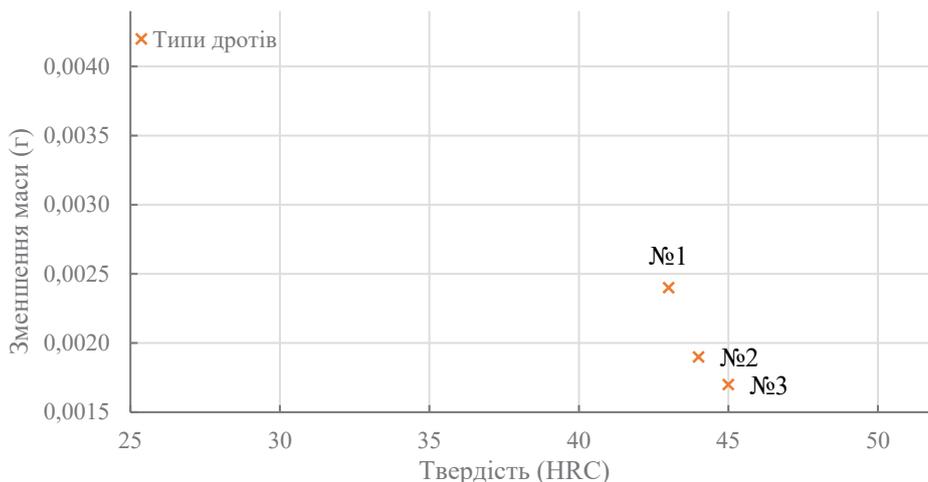


Рис. 4. Узагальнений взаємозв’язок між твердістю та зносостійкістю наплавлених покриттів

Агрегати працювали по важких, кам’янистих ґрунтах; у процесі експлуатації фіксували площу обробітку, контролювали стан робочих кромek, визначали втрату маси й геометричну зміну профілю. У таблиці 4 узагальнено результати польових випробувань: площу обробітку до досягнення граничного стану, втрату маси та відносний ресурс.

Таблиця 4

Порівняльні показники твердості та зносостійкості серійних і відновлених робочих органів за результатами польових випробувань

Характеристика	Серійні деталі	Відновлені деталі
твердість, HRC	40-42	56-62
зносостійкість, %	100	140

Для візуалізації даних використано графік залежності втрати маси робочих органів від площі обробітку, який подано на рисунку 5.

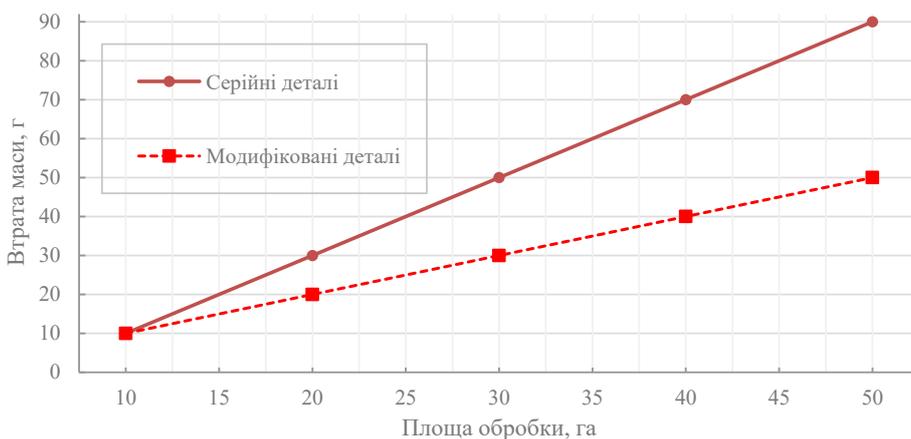


Рис. 5. Залежність втрати маси серійних і модифікованих робочих органів від площі обробітку ґрунту за результатами польових випробувань

Крива для нових серійних деталей має найбільший нахил, що відповідає найвищій швидкості зношування. Для деталей, відновлених немодифікованими покриттями, нахил менший, але ефект обмежений. Найбільш пологою кривою має варіант із комплексно модифікованими покриттями: інтенсивність втрати маси мінімальна, а площа обробітку до досягнення граничного стану максимальна. За даними табл. 4 і рис. 5, середнє збільшення ресурсу робочих органів із комплексно модифікованими покриттями становить 35–40 %, а за оптимальних складів порошкових дротів – до 85–100 % порівняно з новими серійними деталями без відновлення.

Отриманий приріст ресурсу використовувався для розрахунку економічних показників. Для цього порівнювали два сценарії: традиційний – із використанням лише нових серійних деталей, та запропонований – із впровадженням технології електрошлакового наплавлення з комплексним модифікуванням і повторним використанням відновлених робочих органів. У розрахунки включали витрати на закупівлю нових деталей, вартість матеріалів і енергії для наплавлення, оплату праці персоналу, а також втрати від простоїв техніки під час заміни деталей та відмов у період польових робіт. Узагальнені результати наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Порівняння економічної ефективності застосування оптимізованого та традиційного складів порошкових дротів.

Показник	Оптимізований склад	Традиційний склад
вартість 1кг.дроту (грн)	700	920
термін служби покриття (год)	5000	3500
частота ремонту (разів/рік)	2	4

Аналіз таблиці 5 свідчить, що впровадження технології електрошлакового наплавлення з комплексним модифікуванням покриттів дозволяє знизити сумарні витрати на ремонт і технічне обслуговування ґрунтообробної техніки майже на 40 %. Такий ефект досягається за рахунок зменшення кількості закупівель нових деталей, скорочення простоїв під час заміни, можливості більш рівномірно планувати ремонтні роботи в міжсезоння та раціональніше використовувати існуючий парк робочих органів.

Висновки

Узагальнюючи результати, можна сформулювати такі висновки:

– Електрошлакове наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі з використанням порошкових дротів, шихта яких містить комплексні модифікуючі присадки на основі карбідів хрому, карбіду ніобію та оксиду алюмінію, забезпечує формування дрібнозернистої мартенситної матриці з рівномірно розвинутим дисперсним карбідним каркасом. Саме така структура є сприятливою з погляду опору абразивному та ударно-абразивному зношуванню.

– Введення комплексних модифікуючих присадок забезпечує формування дрібнозернистої мартенситної матриці з рівномірно розвинутим дисперсним карбідним каркасом, підвищення твердості при зменшенні її градієнта по товщині, зростання відносної зносостійкості в 2,2–3,1 рази та збільшення ресурсу лемешів і лап у реальних умовах експлуатації в середньому на 35–40 %, а в окремих випадках – до 85–100 % порівняно з новими серійними деталями. Отримано й проаналізовано кількісні залежності між параметрами мікроструктури, мікротвердістю та абразивною зносостійкістю покриттів. Показано, що зміна складу модифікуючих присадок і пов'язана з цим еволюція структури безпосередньо відображаються на трибологічних характеристиках наплавлених шарів

– Техніко-економічна оцінка підтверджує, що впровадження розробленої технології електрошлакового наплавлення з комплексним модифікуванням може забезпечити зниження сумарних витрат на ремонт і технічне обслуговування ґрунтообробної техніки майже на 40 %, що є вагомим аргументом на користь її широкого практичного застосування. Одержані результати створюють підґрунтя для подальшого розширення номенклатури модифікуючих систем, удосконалення моделей структуроутворення в умовах електрошлакових процесів та адаптації технології до відновлення інших деталей машин, що працюють в умовах інтенсивного абразивного й ударно-абразивного зношування.

Список використаної літератури

1. Черновол М. І., Лопата Т. В. Умови експлуатації та основні причини виходу з ладу ріжучих елементів робочих органів сільськогосподарських машин [Електронний ресурс]. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. Вип. 24, ч. II. С. 17–22. Режим доступу: [https://dspace.kntu.kr.ua/...](https://dspace.kntu.kr.ua/)

2. Мікосянчик О. О., Шамрай В. Б., Лопата Л. А., Голембієвський Г. Г., Горб Є. С. Композиційні матеріали для зносостійких покриттів деталей сільськогосподарських машин. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 1(98). С. 4–10. DOI: 10.18372/0370-2197.1(98).17356.

3. Ставинський А., Вахоніна Л., Мартиненко В., Мардзявко В., Руденко А. Використання поверхневого зміцнення для підвищення зносостійкості робочих органів сільськогосподарських машин. *Біосистеми і аграрні технології*. 2024. Т. 28, № 2. С. 21–32. DOI: 10.56407/bs.agrarian/2.2024.21.

4. Czupryński A. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Metal Matrix Composite Coatings Deposited on Steel Grade AISI 4715 by Powder Plasma Transferred Arc Welding. Part 1. Mechanical and Structural Properties of a Cobalt-Based Alloy Surface Layer Reinforced with Particles of Titanium Carbide and Synthetic Metal–Diamond Composite. *Materials*. 2021. Vol. 14, № 9. P. 2382.

5. Падалка В. В., Каркач О. С. Аналіз технологій поверхневого зміцнення робочих органів сільсько-господарських машин. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2012. № 2/1(4). С. 28–30. DOI: 10.15587/2312-8372.2012.4881.
6. Савченко В. М., Борак К. В., Голощук В. О., Гордієнко В. С. Зносостійкі покриття для машин, що працюють в абразивному середовищі. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2020. № 3. С. 45–50.
7. Кусков Ю. М., Рябцев І. О. *Електрошлакове наплавлення. Матеріали, технології, обладнання*. Київ: Інтерсервіс, 2022. 284 с.
8. Скворцов О. В. Дослідження структури та трибологічних властивостей композиційного покриття на основі нанокристалічного хрому. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 2. С. 45–50.
9. Aramide B., Pityana S., Sadiku R., Jamiru T., Popoola P. Improving the durability of tillage tools through surface modification – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 116(1). P. 83–98. DOI: 10.1007/s00170-021-07487-4.
10. Aswad M. F., Mohammed A. J., Faraj S. R. Induction surface hardening: A review. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1973. Article No. 012087. DOI: 10.1088/1742-6596/1973/1/012087.
11. Сайчук О. В., Рибалко І. М., Захаров А. В. Електрошлакове наплавлення на постійному струмі в струмопідвідному кристалізаторі електродом великого перерізу. *Науковий збірник «InterConf»*. 2022. № 127. С. 229–237.
12. Kuskov Yu. M., Gordan G. N., Bogajchuk I. L. [et al.] Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding Journal*. 2015. № 5–6. P. 30–33. DOI: 10.15407/tpwj2015.06.06.
13. Гориславець Ю. М., Бондар О. І., Проскудін В. М., Кусков Ю. М., Римар С. В., Нетяга А. В. Моделювання електромагнітних процесів в секційному кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 4. С. 64. DOI: 10.15407/techned2022.04.064.
14. Кусков Ю. М., Проскудін В. М., Нетяга А. В. Модернізація печей ЕШП в установках для ЕШН прокатних валків у струмопідвідному кристалізаторі. *Сучасна електрометалургія*. 2021. № 3. С. 4–9. DOI: 10.37434/sem2021.03.02.
15. Скобло Т. С., Рибалко І. М., Захаров А. В. Аналіз електрошлакового наплавлення металу з малою товщиною відновлювально-зміцнювального робочого шару деталі. *Промисловість у фокусі*. 2021. № 10. С. 54–56.
16. Рибалко І. М., Захаров А. В., Сайчук О. В., Коротій В. О. Дослідження причин проплавлення основного металу при електрошлаковому напавленні і методи його регулювання. *Вісник ХНТУ*. 2023. № 4(87). DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2023.4.15.
17. Dilthey U., Woeste K., Aretov I. Modification of the electroslag remelting process to weld surfacing. *Welding and Cutting*. 2006. № 4. P. 215–220.
18. Galazzi G., Rigdal S., Kubenka M. Practical application of ESAB strip cladding technology. *Svetsaren*. 2007. № 1. P. 17–22.
19. Захаров А.В., Рибалко І.М., Тіхонов О.В. Переваги використання технології електрошлакового наплавлення для відновлення деталей ґрунтообробної техніки: лемешів і культиваторних лап. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2024. Вип. 40. С. 5–12. DOI: 10.32782/2522-1221-2024-40-01.
20. Захаров А.В., Рибалко І.М., Тіхонов О.В. Зносостійкість та ресурс відновлених і зміцнених електрошлаковим наплавленням лемешів і культиваторних стрілочастих лап. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2024. № 4(497). С. 20–27. DOI: 10.15589/znpp2024.4(497).4.
21. Захаров А.В. Прогнозування зносостійкості робочих органів ґрунтообробної техніки під час їх відновлення методом електрошлакового наплавлення. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 4(91). С. 24–32. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2024.4.3.
22. Захаров А. В. Застосування модифікуючих присадок та їх введення у відновлювальні покриття для підвищення експлуатаційної стійкості : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії : 132 «Матеріалознавство» / Захаров Андрій Вадимович. – Харків : Державний біотехнологічний університет, 2025. – 276 с.
23. Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Захаров А. В., Гончаренко О. О. Модифікування реноваційних покриттів для підвищення зносостійкості культиваторних лап. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Інженерні науки*. 2022. № 4(83). С. 37–42.

References

1. Chernovol, M. I., & Lopata, T. V. (2011). *Umovy ekspluatatsii ta osnovni prychny vykhodu z ladu rizhuchykh elementiv robochykh orhaniv silskohospodarskykh mashyn* [Operating conditions and main failure causes of cutting elements of agricultural machinery]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, 24(II), 17–22. <https://dspace.kntu.kr.ua/>
2. Mikosianchuk, O. O., Shamrai, V. B., Lopata, L. A., Golembievskiy, H. H., & Horb, Ye. S. (2023). Kompozytsiini materialy dlia znosostiikykh pokryttiv detalei silskohospodarskykh mashyn. *Problemy tertia ta znoshuvannia*, 1(98), 4–10. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(98\).17356](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17356)

3. Stavyinskyi, A., Vakhonina, L., Martynenko, V., Mardziavko, V., & Rudenko, A. (2024). Vykorystannia poverkhnivoho zmitsnennia dlia pidvyshchennia znosostiikosti robochykh orhaniv silskohospodarskykh mashyn. *Biosystemy i ahraryni tekhnologii*, 28(2), 21–32. <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/2.2024.21>
4. Czupryński, A. (2021). Microstructure and abrasive wear resistance of metal matrix composite coatings deposited on steel grade AISI 4715 by powder plasma transferred arc welding: Part 1. *Materials*, 14(9), Article 2382. <https://doi.org/10.3390/ma14092382>
5. Padalka, V. V., & Karkach, O. S. (2012). Analiz tekhnologii poverkhnivoho zmitsnennia robochykh orhaniv silskohospodarskykh mashyn. *Tekhnolohichniy audit ta rezervy vyrobnytstva*, 2/1(4), 28–30. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4881>
6. Savchenko, V. M., Borak, K. V., Holoshchuk, V. O., & Hordiienko, V. S. (2020). Znosostiiki pokryttia dlia mashyn, shcho pratsiuiut v abrazivnomu seredovyschi. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, 3, 45–50.
7. Kuskov, Yu. M., & Riabtsev, I. O. (2022). *Elektroshlakove naplavlennia. Materialy, tekhnologii, obladnannia*. Interservis.
8. Skvortsov, O. V. (2023). Doslidzhennia struktury ta trybolohichnykh vlastyvostei kompozytsiinoho pokryttia na osnovi nanokrystalichnoho khromu. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, 2, 45–50.
9. Aramide, B., Pityana, S., Sadiku, R., Jamiru, T., & Popoola, P. (2021). Improving the durability of tillage tools through surface modification: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(1), 83–98. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07487-4>
10. Aswad, M. F., Mohammed, A. J., & Faraj, S. R. (2021). Induction surface hardening: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973, Article 012087. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012087>
11. Saichuk, O. V., Rybalko, I. M., & Zakharov, A. V. (2022). Elektroshlakove naplavlennia na postiinomu strumi v strumopidvidnomu krystalizatori elektrodom velykoho pererizu. *InterConf*, 127, 229–237.
12. Kuskov, Yu. M., Gordan, G. N., Bogajchuk, I. L., et al. (2015). Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding Journal*, 5–6, 30–33. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.06.06>
13. Horyslavets, Yu. M., Bondar, O. I., Proskudin, V. M., Kuskov, Yu. M., Rymar, S. V., & Netiaha, A. V. (2022). Modeliuvannia elektromahnitnykh protsesiv v sektsiinomu krystalizatori dlia elektroshlakovoho naplavlennia metalu. *Tekhnichna elektrodynamika*, 4, 64. <https://doi.org/10.15407/techned2022.04.064>
14. Kuskov, Yu. M., Proskudin, V. M., & Netiaha, A. V. (2021). Modernizatsiia pechei EShP v ustanovky dlia EShN prokatnykh valkiv u strumopidvidnomu krystalizatori. *Suchasna elektrometalurhiia*, 3, 4–9. <https://doi.org/10.37434/sem2021.03.02>
15. Skoblo, T. S., Rybalko, I. M., & Zakharov, A. V. (2021). Analiz elektroshlakovoho naplavlennia metalu z maloju tovshchynoiu vidnovliuvalno-zmitsniuvalnoho sharu detali. *Promyslovist u fokusi*, 10, 54–56.
16. Rybalko, I. M., Zakharov, A. V., Saichuk, O. V., & Korotii, V. O. (2023). Doslidzhennia prychnyn proplavlennia osnovnoho metalu pry elektroshlakovomu naplavlenni ta metody yoho rehuliuвання. *Visnyk KHNTU*, 4(87). <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.15>
17. Dilthey, U., Woeste, K., & Aretov, I. (2006). Modification of the electroslag remelting process to weld surfacing. *Welding and Cutting*, 4, 215–220.
18. Galazzi, G., Rigdal, S., & Kubenka, M. (2007). Practical application of ESAB strip cladding technology. *Svetsaren*, 1, 17–22.
19. Zakharov, A. V., Rybalko, I. M., & Tihonov, O. V. (2024). Perevahy vykorystannia tekhnologii elektroshlakovoho naplavlennia dlia vidnovlennia detalei gruntookhrobnoi tekhniki. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 40, 5–12. <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2024-40-01>
20. Zakharov, A. V., Rybalko, I. M., & Tihonov, O. V. (2024). Znosostiikist ta resurs vidnovlennykh i zmitsnennykh elektroshlakovym naplavlenniam lemishiv i kul'tivatornykh lap. *Zbirnyk naukovykh prats NUK im. Makarova*, 4(497), 20–27. [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).4](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).4)
21. Zakharov, A. V. (2024). Prohnozuvannia znosostiikosti robochykh orhaniv gruntookhrobnoi tekhniki pry yikh vidnovlenni metodom elektroshlakovoho naplavlennia. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 4(91), 24–32. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.3>
22. Zakharov, A. V. (2025). *Zastosuvannia modyfikuiuchykh prysadok ta yikh vvedennia u vidnovliuvalni pokryttia dlia pidvyshchennia ekspluatatsiinoi stiikosti* (Doctoral dissertation). Derzhavnyi biotekhnolohichniy universytet.
23. Rybalko, I. M., Tihonov, O. V., Zakharov, A. V., & Honcharenko, O. O. (2022). Modyfikuvannia renovatsiinykh pokryttiv dlia pidvyshchennia znosostiikosti kultivatornykh lap. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Inzhenerni nauky*, 4(83), 37–42.

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025