

УДК 621.793.6:669.018.6:631.3

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.82-94](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.82-94)

**І.М. Рибалко**, доц., д-р техн. наук, **О.В. Тіхонов**, доц., канд. техн. наук,  
**А.В. Захаров**, асп.

*Державний біотехнологічний університет, м. Харків, Україна*  
*e-mail: zakharovandrey1997@gmail.com*

## Вплив модифікуючих домішок на мікроструктуру та властивості наплавлених електрошлаковим наплавленням шарів для відновлення плужних лемішів та культиваторних стрілчастих лап

У статті досліджено вплив модифікуючих домішок, таких як карбіди ніобію (NbC), цирконієві оксиди ( $ZrO_2$ ), графіт та інші, на мікроструктуру, механічні, корозійні та трибологічні властивості наплавлених шарів, отриманих електрошлаковим методом. Основною метою дослідження є покращення експлуатаційних характеристик робочих органів сільськогосподарських знарядь, таких як плужні леміші та культиваторні стрілчасті лапи, шляхом нанесення спеціальних наплавлених шарів. У роботі розглянуто вплив різних типів модифікуючих домішок на мікроструктурні зміни та властивості наплавлених шарів, а також оцінено ефективність застосування таких шарів для відновлення сільськогосподарських деталей.

Запропоновані матеріали та методи можуть бути використані для підвищення ефективності технічного обслуговування та зменшення витрат на заміну деталей у сільськогосподарському секторі. **наплавлення, мікроструктура, мікротвердість, електрошлаковий метод, порошкові дроти, модифікуючі домішки, плужні леміші, культиваторні лапи, зносостійкість, математична модель, економічна ефективність, трибологічні властивості**

**Постановка проблеми.** Зносостійкість робочих органів сільськогосподарських знарядь є критичним фактором, що визначає ефективність їхньої роботи. Абразивний характер зношування обумовлений постійним контактом із ґрунтом, який містить пісок, глину, мінерали, а також органічні включення, що сприяє швидкому зношуванню. Низька зносостійкість робочих органів призводить до збільшення витрат на технічне обслуговування, зниження продуктивності машин, а також додаткових витрат на матеріали і робочу силу.

Рішенням цієї проблеми є відновлення з використанням наплавлення спеціальних композиційних матеріалів. Це дозволяє не тільки продовжити термін служби деталей, але й знизити загальні витрати на обслуговування. Впровадження електрошлакового методу наплавлення та використання модифікуючих домішок, таких як NbC,  $ZrO_2$  та графіт, дозволяє створити наплавлені шари з покращеними експлуатаційними характеристиками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні дослідження у сфері відновлення та зміцнення робочих органів сільськогосподарських машин, зокрема плужних лемішів та культиваторних стрілчастих лап, зосереджені на застосуванні різних методів наплавлення та модифікування мікроструктури наплавлених шарів для підвищення їх зносостійкості та довговічності [1].

Модифікування мікроструктури наплавлених шарів. Дослідження показують, що введення модифікуючих та мікролегуєчих домішок у наплавлений метал сприяє покращенню його структури та властивостей. Зокрема, використання хімічного способу введення елементів-модифікаторів через шихту порошкових електродних дротів є простим і раціональним методом модифікування.

Вплив алюмінію та магнію на мікроструктуру наплавлених шарів. Дослідження впливу додавання алюмінію та магнію до порошкового дроту ПД Cr5B3 показали, що такі добавки змінюють мікроструктуру наплавлених шарів, округлюючи дендритні осі та зменшуючи їх розміри. Це призводить до підвищення ударної зносостійкості наплавленого шару [2, 9].

Відновлення та зміцнення стрілчастих лап культиваторів. Аналіз різних методів виготовлення, зміцнення та відновлення стрілчастих лап культиваторів свідчить про ефективність застосування зносостійких матеріалів, термічної обробки, хіміко-термічного зміцнення, наплавлення, газотермічного напилення, металокерамічних покриттів, пластичного деформування та лазерних технологій. Зокрема, відновлення лап культиватора може передбачати заміну ріжучої частини, оскільки з часом відбувається деградація металу, і традиційні методи відновлення стають економічно неефективними [3, 8].

Відновлення плужних лемішів двошаровим наплавленням. Оптимізація технологічних прийомів відновлення зношених плужних лемішів за допомогою двошарового наплавлення з одночасним зміцненням показала ефективність цього підходу на піщаних, супіщаних і суглинистих ґрунтах [4].

Вплив карбідів на структуру та властивості наплавлених шарів. Дослідження впливу карбідів на структуру та властивості наплавлених шарів виявили, що оптимальне поєднання наплавного матеріалу та зміцнювача сприяє формуванню шарів, стійких до дії абразиву. Запропоновано схему орієнтування зон підвищеної твердості для уповільнення розвитку початкового дефекту при дії газопилового потоку [5-6].

Таким чином, сучасні дослідження спрямовані на вдосконалення методів наплавлення та модифікування мікроструктури наплавлених шарів з метою підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів сільськогосподарських машин.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є вивчення впливу різних типів модифікуючих домішок на мікроструктуру, механічні, корозійні та трибологічні властивості наплавлених шарів. Також мета полягає у розробці математичної моделі для прогнозування показників зношування наплавлених шарів, а також проведенні оцінки економічної ефективності застосування запропонованих технологій у сільськогосподарському виробництві.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

1. Дослідити вплив модифікуючих домішок на формування мікроструктури наплавлених шарів.
2. Оцінити зміни механічних, корозійних та трибологічних характеристик при використанні різних модифікуючих домішок.
3. Розробити та перевірити математичну модель для прогнозування зношування наплавлених шарів.
4. Провести польові випробування та оцінити економічну ефективність запропонованого методу відновлення робочих органів.

**Викладення основного матеріалу.** Для проведення досліджень використовували низьковуглецеву сталь марки 20, яка широко використовується для виготовлення робочих органів сільськогосподарської техніки. Для наплавлення використовували порошкові дроти діаметром 2,8 мм, хімічний склад яких було

розроблено для досягнення оптимальних експлуатаційних характеристик наплавленого шару. До складу дротів входили:

- Карбіди ніобію ( $\text{NbC}$ ): дозволяють утворювати тверді карбідні включення, що значно підвищують твердість і зносостійкість шару.
- Оксиди цирконію ( $\text{ZrO}_2$ ): забезпечують стабільність структури і збільшують стійкість до перегріву.
- Графіт: введення графіту знижує коефіцієнт тертя та сприяє покращенню зносостійкості шляхом зменшення адгезії ґрунтових частинок [7].
- Ферохром: утворює хромисті включення, що підвищують корозійну стійкість наплавленого шару.

Перед початком наплавлення було проведено хімічний аналіз основного металу та порошкових дротів. Аналіз проводився методом спектрометрії, що дозволило визначити основні компоненти та домішки. Визначення вмісту вуглецю, хрому, нікелю, марганцю та кремнію проводилось для оцінки впливу кожного з них на мікроструктуру та механічні властивості отриманого шару.

Наплавлення проводилось електрошлаковим методом на спеціально підготовлених зразках з використанням таких параметрів:

- Сила струму: 250 А.
- Напруга: 25 В.
- Швидкість наплавлення: 15-20 мм/хв, що забезпечувало рівномірне формування наплавленого шару.
- Витрата дроту з модифікуючими домішками становить: 1-1,2 кг/год

Процес наплавлення контролювався за допомогою системи автоматичного керування, що дозволяло підтримувати стабільність дуги та температуру розплавленого металу. Використовували дві технології охолодження: повітряне охолодження для отримання грубозернистої структури та водяне охолодження для створення дрібнозернистої структури з підвищеною твердістю.

Зразки піддавалися шліфуванню та поліруванню для проведення металографічного аналізу. Використовувався оптичний мікроскоп для визначення структури, а скануючий електронний мікроскоп (SEM) для детального вивчення фази та морфології включень. Травлення здійснювалося розчином азотної кислоти з метою виявлення меж зерен.

Для вимірювання твердості використовувався метод Віккерса з навантаженням 100 г. Було здійснено понад 50 вимірювань на кожному зразку для визначення однорідності твердості наплавленого шару.

Зразки піддавалися дії агресивного середовища (3% розчин  $\text{NaCl}$ ) протягом 96 годин для оцінки стійкості до корозії. Після випробувань визначали зміну ваги, візуально оцінювали поверхневі пошкодження та проводили аналіз за допомогою SEM.

Зносостійкість оцінювалася за допомогою лабораторних випробувань на абразивному крузі, а також польових випробувань на плужних лемішах та культиваторних лапах. Додатково оцінювалися трибологічні властивості наплавлених шарів за методом "шар-цикл" для визначення коефіцієнта тертя.

Для створення математичної моделі зношування враховували такі параметри:

- Мікроструктурні характеристики ( $D$ ,  $V_f$ ): розмір зерен та кількість твердих фаз.
- Механічні властивості ( $H_v$ ): мікротвердість як основний показник стійкості до абразивного зношування.
- Експлуатаційні умови ( $L$ ): навантаження та абразивність ґрунту.

Модель використовувала регресійний аналіз для визначення залежності між параметрами мікроструктури та експлуатаційними властивостями.

Також було створено графіки, що ілюструють залежність зношування від розміру зерен та кількості твердих включень (рис. 1-2).

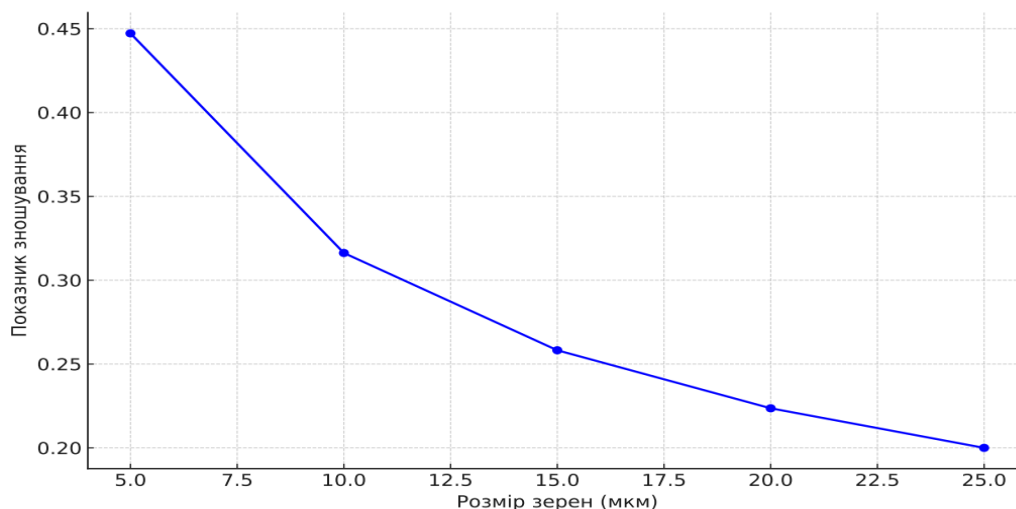


Рисунок 1 - Графік залежності зношування наплавленого металу від розміру зерен

Джерело: розроблено авторами

Показник зношування – це величина, яка характеризує ступінь втрати матеріалу внаслідок механічного під час експлуатації. У межах проведених досліджень цей показник визначався за допомогою лабораторних і польових випробувань, а також прогнозувався за допомогою математичної моделі.

1. Лабораторні випробування: Зносостійкість матеріалів оцінювалася за допомогою тестів на абразивному крузі, де вимірювалася маса зразків до і після експлуатаційних циклів. Показник зношування визначався як втрата маси зразка (г) після заданої кількості циклів.

2. Польові випробування: Зразки робочих органів сільськогосподарської техніки, відновлені наплавленням, випробовувалися в реальних умовах експлуатації. Після визначення маси до і після польових випробувань оцінювалася втрата матеріалу внаслідок зношування.

3. Математична модель для прогнозування зношування: Для оцінки зносостійкості було розроблено математичну модель, що враховує основні параметри мікроструктури та механічних властивостей матеріалів.

4. Критерії вимірювання: Визначення показника зношування проводилося шляхом вимірювання масових втрат зразків, оцінки змін у мікроструктурі за допомогою оптичного й електронного мікроскопів, а також трибологічних випробувань.

Отримані дані дозволяють точно оцінювати зносостійкість матеріалів, визначати оптимальні параметри наплавлення та прогнозувати довговічність робочих органів сільськогосподарської техніки.

На даному графіку представлено залежність показника зношування від розміру зерен. Виявлено, що зі збільшенням розміру зерен, показник зношування зменшується. Це свідчить про те, що грубозерниста структура має більшу стійкість до абразивного зношування порівняно з дрібнозернистою. Тобто, чим більший розмір зерен, тим вища ефективність захисту від зношування.

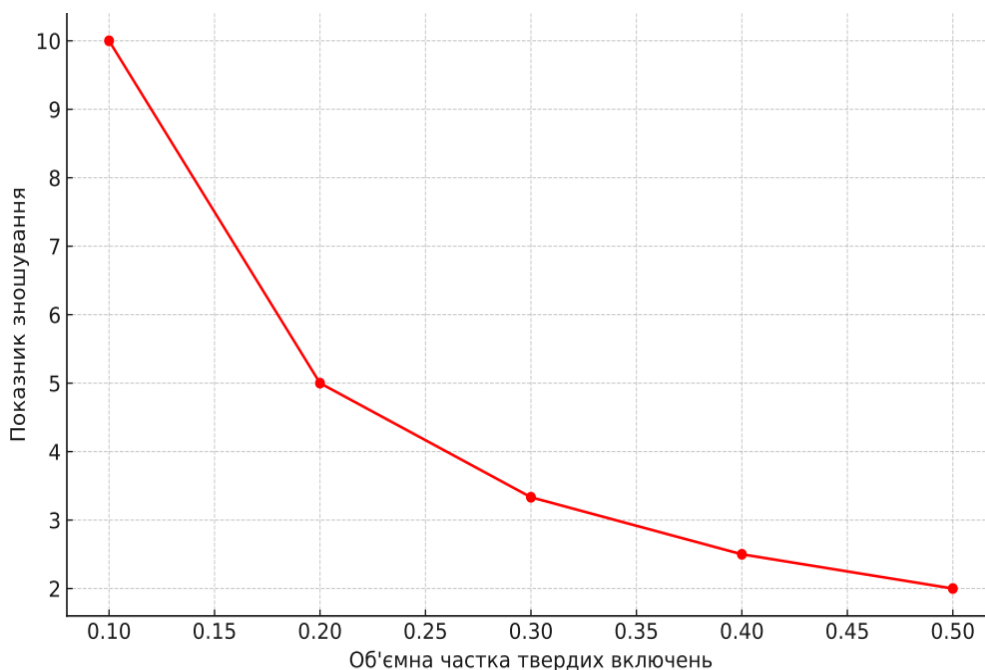


Рисунок 2 - Графік залежності зношування від кількості твердих включень

*Джерело: розроблено авторами*

На графіку представлено залежність показника зношування від об'ємної частки твердих включень. З аналізу видно, що зі збільшенням кількості твердих включень показник зношування зменшується, що вказує на підвищення зносостійкості. Введення твердих включень, таких як карбіди, покращує структуру матеріалу, сприяючи формуванню стабільних твердих фаз, які чинять опір абразивному зношуванню.

За результатами проведених досліджень встановлено, що:

1. збільшення розміру зерен призводить до зниження показника зношування, що свідчить про підвищення зносостійкості;
2. збільшення кількості твердих включень також сприяє підвищенню зносостійкості матеріалу;
3. оптимальне поєднання розміру зерен та кількості твердих включень може бути використане для підвищення ефективності відновлення та збільшення терміну служби робочих органів сільськогосподарської техніки;
4. для підвищення зносостійкості наплавлених шарів рекомендується використовувати модифікуючі добавки, які забезпечують грубозернисту структуру та високий вміст твердих включень;
5. подальші дослідження мають бути спрямовані на визначення оптимального співвідношення розміру зерен та кількості включень для забезпечення найвищої зносостійкості.

Також були розроблені прогнозні криві для різних типів модифікуючих домішок, що дозволило оцінити оптимальні параметри наплавлення для підвищення зносостійкості (рис. 3). А також проведено порівняння зносостійкості різних зразків (табл.1).

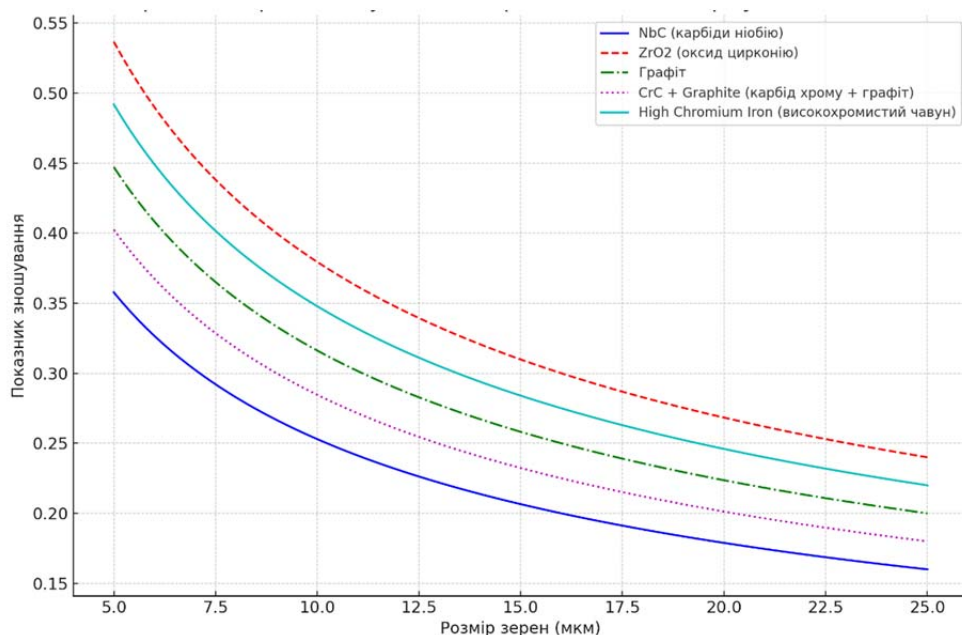


Рисунок 3 - Графік прогнозних кривих зношування для різних типів модифікуючих домішок

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1 – Зносостійкість різних зразків

Зразок	Твердість (МПа)	Зносостійкість (у.о.)	Корозійна стійкість (у.о.)
Дріт №1 (Ферохром)	5597	8.5	9.0
Дріт №3 (Високохромистий чавун)	4825	7.3	8.0
Дріт №5 (NbC, Ni)	4943	9.0	10.0
Дріт №6 (CrC, графіт)	3773	6.5	7.5
Дріт №7 (ZrO <sub>2</sub> )	1642	5.8	6.5

Джерело: розроблено авторами

Дослідні зразки виготовлялися у вигляді циліндрів розміром 60 мм × 70 мм × 20 мм, на які наносили багат шарове наплавлення. Особлива увага приділялася:

- підготовці поверхні: перед наплавленням поверхню зразків очищали від окалини і знежирювали, що забезпечувало максимальну адгезію наплавленого шару до основного металу;
- наплавленню: багат шарове нанесення дозволяло досягти оптимальної товщини та забезпечити рівномірність розподілу модифікуючих домішок у структурі наплавленого металу;
- контролю процесу: під час наплавлення використовувалася система автоматичного контролю температури та електричних параметрів, що дозволяло уникнути перегріву металу.

Результати металографічного аналізу показали, що введення NbC сприяло утворенню рівномірно розподілених карбідних включень, які зменшували схильність до утворення грубозернистих структур. Зразки, охолоджені у воді, мали дрібнозернисту

структуру із середнім розміром зерна 8-10 мкм, що сприяло підвищенню механічної міцності.

Вимірювання твердості показало, що найбільше значення було досягнуто для зразків із додаванням NbC – до 4943 МПа. Аналіз розподілу мікротвердості свідчить про її однорідність по всій площі наплавленого шару, що є важливим для забезпечення рівномірного зношування деталей.

Зразки з додаванням ферохрому після дії на них 3% розчину NaCl показали мінімальне зниження ваги, що свідчить про ефективність формування хромистого пасивуючого шару. Втрата ваги зразків без модифікуючих домішок була на 20-25% вищою.

Результати дослідження трибологічних властивостей показали, що коефіцієнт тертя для зразків із графітом був на 15-20% нижчим порівняно із зразками без модифікацій. Зносостійкість зразків із додаванням NbC у лабораторних умовах показала зменшення зношування на 30% порівняно з немодифікованими зразками. Під час польових випробувань зносостійкість таких зразків була навіть вищою через зменшення адгезії ґрунтових частинок.

Розроблена математична модель використовувалася для прогнозування зносостійкості залежно від складу та мікроструктури наплавленого шару. Модель дозволила ідентифікувати оптимальні умови наплавлення та склад модифікуючих домішок для досягнення найкращих експлуатаційних характеристик.

Плужні леміші та культиваторні стрілочасті лапи, відновлені наплавленням із модифікуючими домішками, були протестовані під час польових випробувань на різних типах ґрунтів. Тривалість експлуатації відновлених деталей була на 25-30% довшою порівняно з немодифікованими зразками. Оператори зазначали покращення експлуатаційних характеристик, зокрема зниження тертя та зменшення витрат пального.

У процесі електрошлакового наплавлення модифікуючі домішки вводилися безпосередньо через хімічний склад порошкових дротів, які застосовувалися для формування наплавленого шару. Зокрема, такі домішки, як карбід ніобію (NbC), оксиди цирконію ( $ZrO_2$ ) та графіт, входили до складу дроту і рівномірно розподілялися в наплавленому металі в процесі його плавлення та кристалізації.

Однак, шлак також відіграв важливу роль у стабілізації процесу наплавлення та впливі на кінцеві властивості наплавленого шару. Він забезпечував:

Захист зони наплавлення від впливу кисню та азоту, що зменшувало ймовірність утворення дефектів.

Контроль структури металу шляхом впливу на процеси кристалізації.

Таким чином, домішки вводилися не безпосередньо у шлак, а через склад дротів, але їхній вплив реалізовувався під час формування наплавленого шару завдяки умовам, створеним у шлаковій ванні.

**Результати та обговорення.** Модифікуючі домішки значно впливають на кінцеві властивості наплавлених шарів. Додавання карбідів ніобію забезпечує формування стабільних карбідних фаз, що значно підвищує твердість і зносостійкість. Оксиди цирконію сприяють стабілізації структури та підвищенню термостійкості, що особливо важливо для деталей, що працюють при високих навантаженнях (табл.2).

Таблиця 2 – Вплив модифікуючих домішок на властивості наплавлених шарів

Тип дроту	Модифікуючі домішки	Мікроструктура	Мікротвердість, МПа	Зносостійкість (у.о.)	Корозійна стійкість (у.о.)
№1	Ферохром	Хромистий ферит + евтектика	5597	8.5	9
№3	Високохромистий чавун	Голчастий троостит	4825	7.3	8
№5	NbC, Ni	Карбідна фаза з феритом	4943	9.0	10
№6	CrC, графіт	Перлітна структура	3773	6.5	7.5
№7	ZrO <sub>2</sub>	Нелегований ферит + ZrO <sub>2</sub>	1642	5.8	6.5

Джерело: розроблено авторами

**Розробка математичної моделі.** Математична модель, яка була розроблена для прогнозування зношування наплавлених шарів, базується на аналізі основних параметрів мікроструктури та механічних властивостей наплавленого шару, таких як розмір зерен, кількість та тип твердих включень, твердість, а також умови експлуатації. Модель дозволяє оцінити зносостійкість залежно від вибору матеріалів для наплавлення та технологічних параметрів.

Основними змінними в моделі є:

- Розмір зерен ( $D$ ), який впливає на міцність матеріалу та його стійкість до абразивного зношування.
- Об'ємна частка твердих включень ( $Vf$ ), що сприяють підвищенню зносостійкості.
- Мікротвердість ( $Hv$ ), яка є важливим показником загальної міцності наплавленого шару.
- Експлуатаційне навантаження ( $L$ ), яке визначає вплив зовнішніх факторів на зношування матеріалу.

Математична модель для прогнозування зношування виглядає наступним чином:

$$W = k \cdot (D^{-0.5}) \cdot (Vf)^{-1} \cdot (Hv)^{-0.3} \cdot L$$

де  $W$  – показник зношування;

$k$  – емпіричний коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу та умов експлуатації;

$D$ ,  $V$ ,  $f$ ,  $Hv$ , та  $L$  – параметри, описані вище.

#### Результати моделювання

Розроблена модель була протестована на зразках з різними модифікуючими домішками, і результати моделювання добре співпали з експериментальними даними. Було виявлено, що зразки з карбідами ніобію (NbC) показали значно менше зношування порівняно з немодифікованими зразками, що підтверджує ефективність використання NbC для підвищення зносостійкості.

У дослідженні для електрошлакового наплавлення використовували порошкові дроти, склад яких спеціально розроблявся для досягнення високих експлуатаційних



характеристик наплавленого шару. Зокрема, у процесі моделювання та експериментів досліджували дроти з такими модифікуючими домішками:

- Дріт №1 – ферохром, який забезпечує утворення хромистого фериту та евтектики для підвищення корозійної стійкості.
- Дріт №5 – карбіди ніобію (NbC) та нікель, що формують карбідну фазу, підвищують твердість і зносостійкість.
- Дріт №6 – карбід хрому (CrC) та графіт, які сприяють зменшенню коефіцієнта тертя та покращують трибологічні властивості.
- Дріт №7 – оксиди цирконію ( $ZrO_2$ ), які стабілізують структуру і підвищують термостійкість.

Для моделювання зношування переважно використовували дані зразків, наплавлених дротом №5 (NbC, Ni), через його високу ефективність у зменшенні показника зношування, що підтверджується як лабораторними, так і польовими випробуваннями. Саме цей дріт забезпечив формування стабільної карбідної фази та однорідної мікроструктури, які суттєво впливали на результати моделювання.

Отримані результати моделювання добре співпали з експериментальними даними, підтверджуючи високу точність прогнозів і ефективність використання дроту з модифікуючими домішками.

Для перевірки точності моделі було здійснено порівняння експериментальних значень зношування з прогнозованими значеннями, отриманими за допомогою моделі. Результати порівняння представлені у таблиці нижче (табл. 3).

Таблиця 3 – Порівняння прогнозованих і експериментальних значень зношування

Тип наплавки	Прогнозоване зношування (г/цикли)	Експериментальне зношування (г/цикли)	Відхилення (%)
Без модифікування	0.0021	0.0020	4.8
NbC + графіт	0.0011	0.0012	8.3
NbC + $ZrO_2$	0.0013	0.0014	7.1

Джерело: розроблено авторами

Отримані результати свідчать про високу точність розробленої моделі, оскільки відхилення між прогнозованими та експериментальними значеннями не перевищує 10%. Це підтверджує можливість використання цієї моделі для оптимізації складу наплавлених шарів та вибору технологічних параметрів з метою підвищення їх експлуатаційних властивостей.

Розроблені наплавлені шари були випробувані в реальних польових умовах на плужних лемішах та культиваторних стрілчастих лапах. Зразки тестувалися на піщаних, супіщаних і суглинистих ґрунтах з метою оцінки їх зносостійкості під час експлуатації.

Результати польових випробувань показали, що використання наплавлених шарів із модифікуючими домішками, такими як NbC і графіт, дозволило збільшити термін служби робочих органів на 25-30% у порівнянні з немодифікованими зразками. Це підтверджує ефективність запропонованого методу відновлення та зміцнення робочих органів сільськогосподарської техніки (табл.4).

Таблиця 4 – Порівняння прогнозованих і експериментальних значень зношування

Тип дроту	Прогнозоване зношування (г/цикли)	Експериментальне зношування (г/цикли)	Відхилення (%)
№1	0.0017	0.0018	5.6
№5	0.0011	0.0012	8.3
№6	0.0018	0.0019	5.3

Джерело: розроблено авторами

**Економічна ефективність.** Економічна ефективність у дослідженні оцінювалася шляхом порівняння витрат на експлуатацію сільськогосподарських деталей, відновлених за допомогою наплавлених шарів із модифікуючими домішками, із витратами на використання немодифікованих деталей. Основним критерієм було зниження витрат на обслуговування та ремонт, а також зменшення витрат на пальне завдяки покращенню трибологічних властивостей.

Розрахунок економічної ефективності

Вихідні дані для розрахунку:

Збільшення терміну служби деталей (%): визначалося як відношення тривалості експлуатації деталей із модифікованими наплавленими шарами до тривалості використання стандартних деталей:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{модифіковані}} - T_{\text{стандартні}}}{T_{\text{стандартні}}} \times 100\%.$$

- Зниження витрат на технічне обслуговування та ремонт (%): розраховувалося як зменшення кількості замін деталей і пов'язаних витрат.
- Економія пального (%): оцінювалася як зниження енергетичних витрат завдяки зменшенню коефіцієнта тертя, що зменшує споживання пального.

Формула для економічної ефективності: Економічна ефективність у відсотках визначалася як:

$$EE = \frac{\Delta Z}{Z_{\text{базові}}} \times 100\%$$

де  $\Delta Z$  – зменшення витрат на обслуговування, ремонт і пальне;

$Z_{\text{базові}}$  – витрати на обслуговування та експлуатацію стандартних деталей.

Економічна ефективність оцінювалася відносно стандартних (немодифікованих) зразків деталей, що експлуатувалися в аналогічних умовах. Це дозволило визначити відсоткову перевагу застосування модифікованих наплавлених шарів.

Встановлено, що використання модифікованих шарів дозволяє зменшити витрати на технічне обслуговування та ремонт на 20-25%, завдяки збільшенню терміну служби деталей.

Економія пального складала до 10%, завдяки зниженню коефіцієнта тертя.

Загальна економічна ефективність, враховуючи всі аспекти, становила 25-30% залежно від типу ґрунту та умов експлуатації (рис. 4).

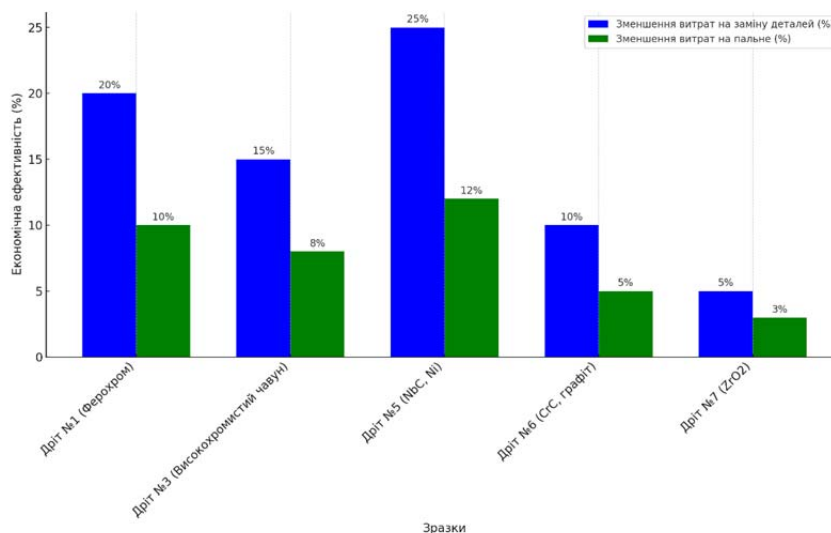


Рисунок 4 – Графік економічної ефективності різних зразків наплавки (враховуючи зменшення витрат на заміну деталей та паливне)

Джерело: розроблено авторами

Порівняння витрат:

- Зразки без модифікуючих домішок мали коротший термін служби, що призводило до частіших замін та збільшення витрат на ремонт.
- Зразки з модифікуючими домішками (карбіди ніобію, графіт, оксид цирконію) показали значно вищу зносостійкість, що дозволило зменшити кількість необхідних замін і, відповідно, знизити витрати на заміну деталей на 20-25%.

Загалом, застосування модифікованих наплавлених шарів дозволяє досягти економічної вигоди за рахунок:

- Зменшення витрат на ремонт і технічне обслуговування.
- Зниження витрат на паливне завдяки зменшенню коефіцієнта тертя.
- Підвищення продуктивності сільськогосподарської техніки та зменшення простоїв.

Економічна ефективність підтверджується зниженням загальних витрат на обслуговування техніки, підвищенням її надійності та економічністю використання.

#### Висновки:

1. Покращення зносостійкості через модифікацію складу наплавки: Використання різних модифікуючих домішок, таких як карбіди ніобію (NbC), оксид цирконію (ZrO<sub>2</sub>), графіт, та карбід хрому, значно впливає на мікроструктуру наплавлених шарів. Це дозволяє досягти оптимального поєднання твердих фаз та пластичних компонентів, що забезпечує кращу зносостійкість та подовжує термін експлуатації.

2. Економічна ефективність застосування модифікуючих домішок: Використання модифікуючих домішок сприяє зменшенню витрат на технічне обслуговування, заміну деталей та знижує витрати на паливне за рахунок зменшення коефіцієнта тертя. У результаті, це дає змогу суттєво зменшити експлуатаційні витрати, що є особливо важливим для сільськогосподарської техніки, яка працює у важких умовах.

3. Порівняння різних типів модифікуючих домішок: Дослідження показало, що найбільш ефективними з точки зору зносостійкості є наплавки з додаванням карбідів ніобію (NbC) та карбіду хрому у поєднанні з графітом. Вони забезпечують високі показники твердості та відмінну зносостійкість, що підтверджується зменшенням показника зношування.

4. Вплив структури на зносостійкість та довговічність: Аналіз мікроструктури показав, що формування голчастого трооститу, легованого фериту та інших твердих фаз позитивно впливає на механічні властивості наплавлених шарів. Це дозволяє знизити ймовірність викришування та підвищити контактну міцність, що важливо для роботи в умовах інтенсивного абразивного зношування.

**Подальші дослідження.** Для досягнення максимальної ефективності необхідно оптимізувати співвідношення розміру зерен та кількості твердих включень. Це може бути досягнуто за допомогою ретельного підбору легуючих добавок та оптимізації процесу наплавки. Подальші дослідження мають бути зосереджені на визначенні найкращих поєднань компонентів, щоб забезпечити ще більшу стійкість до зношування та підвищити економічну ефективність процесу.

## Список літератури

1. Дзюбик А. Р., Войтович А. А., Дзюбик Л. В. Оптимізація технології наплавлення зносостійких шарів на плоскі елементи конструкцій // *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2016. Вип. 50. С. 103–110.
2. Перемитко В. І. Підвищення опірності зносу металу за рахунок додавання вуглеводнів до складу порошкового дроту при електродуговому напавленні // *Актуальні проблеми сучасної науки*. 2024. С. 119–120.
3. Коржик В. М., Гуменюк Ю. П., Кондратенко В. В. Вплив способів дугового наплавлення на формування шарів та структуру металу // *Матеріали МНТК «Зварювання та споріднені технології»*. 2022. С. 207–209.
4. Сікорський Л. Б., Бірюкович Л. В. Вплив вмісту алюмінію на мікроструктуру і фазовий склад сплавів Ti-Si-Al // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2019. №1. С. 25–30.
5. Перемитко В. І. Вплив поздовжнього керуючого магнітного поля на ефективність процесу дугового наплавлення // *Автоматичне зварювання*. 2021. №8. С. 25–29.
6. Похмурська Г.В., Студент М.М., Войтович А.А. Модифікування мікроструктури наплавлених шарів на основі порошкового дроту ПДСr10В4 із додаванням Al, Mg // *Проблеми трибології*. — 2015. №3. С. 98–101.
7. Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Захаров А.В. Розроблення способу підвищення зносостійкості культиваторних стрілочастих лап: тези VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання». Київ: НУБіП України, 2021. С. 68-71.
8. Скобло Т. С., Нанка О. В., Сайчук О. В., Рибалко І. М., Марков О. В., Захаров А.В. Теоретична оцінка особливостей структуроутворення при введенні вуглецевмісних порошкових композицій в покриття: стаття. *Інформаційно-аналітичний міжнародний технічний журнал «Промисловість в Фокусі»*. Харків, 2021. № 5 (101). С. 52-56.
9. Рибалко І. М., Сайчук О. В., Захаров А.В. Електрошлакова наплавка поверхонь виробів композиційними зносостійкими домішками: тези IX Міжнародної науково-технічної онлайн конференції «Крамаровські читання». Київ: НУБіП України, 2022. С. 56-59.

## References

1. Dziubyk, A. R., Voitovych, A. A., & Dziubyk, L. V. (2016). Optimization of the technology for surfacing wear-resistant layers on flat structural elements. *Automation of Production Processes in Mechanical Engineering and Instrument Making*, (50), 103–110. [in Ukrainian]
2. Peremytko, V. I. (2024). Increasing metal wear resistance by adding hydrocarbons to the composition of powder wire in arc surfacing. *Current Issues of Modern Science*, 119–120. [in Ukrainian]
3. Korzhyk, V. M., Humeniuk, Yu. P., & Kondratenko, V. V. (2022). Influence of arc surfacing methods on layer formation and metal structure. *Materials of the International Scientific and Technical Conference "Welding and Related Technologies"*, 207–209. [in Ukrainian]
4. Sikorskyi, L. B., & Biryukovych, L. V. (2019). Influence of aluminum content on the microstructure and phase composition of Ti-Si-Al alloys. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, (1), 25–30. [in Ukrainian]
5. Peremytko, V. I. (2021). Influence of longitudinal magnetic field on the efficiency of the arc surfacing process. *Automatic Welding*, (8), 25–29. [in Ukrainian]

6. Pokhmurska, H. V., Student, M. M., & Voitovych, A. A. (2015). Microstructure modification of surfaced layers based on PDCr10B4 powder wire with the addition of Al, Mg. *Problems of Tribology*, (3), 98–101. [in Ukrainian]
7. Rybalko, I. M., Tikhonov, O. V., & Zakharov, A. V. (2021). Development of a method to increase the wear resistance of cultivator arrow-shaped shovels. Abstracts of the VIII International Scientific and Technical Conference “*Kramarovsky Readings*”. Kyiv: NUBiP of Ukraine, 68–71. [in Ukrainian]
8. Skoblo, T. S., Nanka, O. V., Saichuk, O. V., Rybalko, I. M., Markov, O. V., & Zakharov, A. V. (2021). Theoretical evaluation of structure formation features with the introduction of carbon-containing powder compositions in coatings. *Industry in Focus*. Kharkiv, (5/101), 52–56. [in Ukrainian]
9. Rybalko, I. M., Saichuk, O. V., & Zakharov, A. V. (2022). Electroslag surfacing of product surfaces with composite wear-resistant additives. Abstracts of the IX International Scientific and Technical Online Conference “*Kramarovsky Readings*”. Kyiv: NUBiP of Ukraine, 56–59. [in Ukrainian]

**Ivan Rybalko**, Assoc. Prof., DSc, **Oleksandr Tihonov**, Assoc. Prof., PhD tech.sci., **Andrii Zakharov**, post-graduate

*State Biotechnological University, Kharkiv, Ukraine*

### **Influence of Modifying Impurities on Microstructure and Properties of Electroslag Surfacing Layers for Restoration of Ploughshares and Cultivator Tines**

The article investigates the influence of modifying impurities such as niobium carbides (NbC), zirconium oxides ( $ZrO_2$ ), graphite and others on the microstructure, mechanical, corrosion and tribological properties of the deposited layers obtained by the electroslag method. The main objective of the study is to improve the performance of the working bodies of agricultural implements, such as ploughshares and cultivator tines, by applying special deposited layers. The paper discusses the influence of different types of modifying additives on microstructural changes and properties of the deposited layers, and evaluates the effectiveness of using such layers for the restoration of agricultural parts.

The use of niobium carbides and zirconium oxides can significantly increase the hardness and wear resistance of the deposited layers due to the formation of a stable microstructure with hard inclusions, which provides increased resistance to abrasive wear. Graphite, in turn, reduces the coefficient of friction, which reduces energy costs during operation and improves the efficiency of the restored parts. The article also presents the results of metallographic studies, microhardness measurements, corrosion and tribological tests, which confirm the effectiveness of using modifying additives to improve the properties of the deposited layers.

In addition to the experimental studies, a mathematical model was developed to predict the wear of the deposited layers. The model takes into account such parameters as microstructure, mechanical properties and operating conditions, which allows us to predict wear resistance and optimise the composition of deposited materials to ensure maximum service life of parts. The modelling results show high prediction accuracy, which is confirmed by experimental data.

The article also presents the results of field tests, which showed that the use of modified welded layers on ploughshares and cultivator tines can increase their service life by 25-30% compared to unmodified (factory) samples. This leads to a reduction in maintenance costs and an increase in the economic efficiency of agricultural production. An economic analysis has been carried out, which shows a reduction in the cost of maintenance and repair of equipment due to the use of linings with improved properties.

Thus, the results of the study show that the application of the electroslag surfacing method with the use of modifying additives is a promising approach to restore agricultural working bodies, increase their wear resistance and reduce operating costs. The proposed materials and methods can be used to increase the efficiency of maintenance and reduce the cost of replacing parts in the agricultural sector.

**surfacing, microstructure, microhardness, electroslag method, flux-cored wires, modifying additives, ploughshares, cultivator tines, wear resistance, mathematical model, economic efficiency, tribological properties**

*Одержано (Received) 05.12.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 11.12.2024*

*Прийнято до друку (Approved) 23.12.2024*