

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

ЗАХАРОВ АНДРІЙ ВАДИМОВИЧ

УДК 621.793:621.791.75:669.017.3:620.193:631.3

ДИСЕРТАЦІЯ

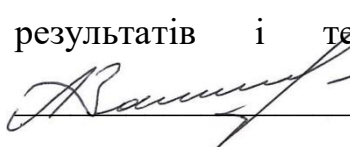
**ЗАСТОСУВАННЯ МОДИФІКУЮЧИХ ПРИСАДОК ТА ЇХ ВВЕДЕННЯ У
ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ
ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ**

Спеціальність: 132 – Матеріалознавство

Галузь знань: 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання чужих ідей, результатів і текстів мають посилання на відповідне джерело

 А.В. Захаров

Науковий керівник: Рибалко Іван Миколайович, доктор технічних наук, доцент

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

***Захаров А.В.* Застосування модифікуючих присадок та їх введення у відновлювальні покриття для підвищення експлуатаційної стійкості – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство» (13 – Механічна інженерія) – Державний біотехнологічний університет, Харків, 2025.

Дисертаційна робота спрямована на пошук шляхів вирішення актуальної проблеми підвищення зносостійкості та експлуатаційного ресурсу деталей, що працюють в умовах значного абразивного зношування. Робота присвячена розробці нової технології зміцнення деталей сільськогосподарської техніки на основі дослідження інноваційних методів застосування модифікуючих присадок та електрошлакового наплавлення.

У ході дослідження було проведено комплексний аналіз сучасних методів відновлення деталей, які використовуються в сільськогосподарській техніці, та визначено недоліки існуючих технологій. На основі отриманих даних розроблено нову технологію наплавлення, що включає використання порошкових дротів із додаванням модифікуючих домішок, таких як карбід хрому, ніобію та оксиду алюмінію. Ці компоненти забезпечують створення дрібнозернистої та рівномірної структури покриттів, що підвищує їх зносостійкість, твердість та опір впливу високих температур.

Дослідження включало вивчення фазового складу, структури та механічних властивостей отриманих покриттів. Особливу увагу приділено впливу гранулометричного складу, температурних режимів, швидкості кристалізації та рівномірності розподілу модифікуючих компонентів на експлуатаційні характеристики покриттів. Експериментально підтверджено, що нова технологія дозволяє досягти підвищення ресурсу деталей до 40% у порівнянні з традиційними методами відновлення.

Польові випробування відновлених деталей, таких як культиваторні лапи та плужні леміші, показали значне зниження абразивного зношування та

напрацювання без втрати механічних властивостей. У результаті відновлені деталі демонструють високу ефективність навіть у складних умовах, таких як важкі та кам'янисті ґрунти. Проведені експерименти підтвердили стабільність отриманих покриттів, їхню стійкість до динамічних навантажень та впливу агресивних середовищ, що робить їх придатними для широкого впровадження в сучасному агропромисловому виробництві.

Результати дослідження також сприяли розробці нових технічних підходів до виготовлення порошкових дротів з покращеними характеристиками. Встановлено раціональні параметри співвідношення компонентів шихти та технологічних режимів наплавлення, включаючи швидкість подачі дроту, температуру шлакової ванни, контроль кристалізації металу та методи охолодження. Це дозволило досягти більшої однорідності покриттів, мінімізувати можливі дефекти та забезпечити тривалу стійкість до зношування.

Практичне значення роботи полягає у створенні універсального підходу до зміцнення та відновлення деталей, який забезпечує зменшення експлуатаційних витрат, скорочення простоїв техніки та підвищення її продуктивності. Застосування запропонованих технологій дозволяє знизити споживання матеріалів, зменшити кількість відходів, сприяє екологічній безпеці виробництва та значно покращує економічні показники агропромислового комплексу.

Дисертаційна робота є важливим внеском у розвиток матеріалознавства та інженерії поверхонь. Отримані результати можуть бути використані не лише в сільському господарстві, а й у машинобудуванні, гірничій промисловості, енергетичному секторі та інших галузях, що потребують високої зносостійкості та довговічності деталей. Впровадження новітніх технологій відкриває можливості для створення адаптованих до конкретних умов експлуатації покриттів, які відповідають сучасним вимогам якості та екологічності.

У ході досліджень виконано комплекс експериментальних, теоретичних та практичних робіт, спрямованих на вдосконалення технології електрошлакового наплавлення (ЕШН) з використанням модифікуючих присадок для підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів сільськогосподарської техніки.

Лабораторні експерименти охоплювали металографічний аналіз структури покриттів, оцінку фазового складу, дослідження твердості, зносостійкості та термічної стабільності отриманих матеріалів. Визначено, що використання таких модифікуючих компонентів, як карбіди хрому, ніобію та оксиди алюмінію, сприяє формуванню дрібнозернистої структури покриттів, що забезпечує високу механічну міцність, стійкість до утворення тріщин і тривалий експлуатаційний ресурс деталей.

На основі теоретичних досліджень, зокрема розробці оптико-математичної моделі деяких структур, яка ґрунтується на поєднанні оптичної візуалізації та подальшій математичній обробці отриманих зображень для кількісної оцінки фазового складу й морфології зерен вдається ідентифікувати розподіл твердорозчинних фаз, виділити зони з модифікованою мікроструктурою й встановити характерні ознаки формування зерен у процесі електрошлакового наплавлення.

Польові випробування проведено на деталях, відновлених за розробленою технологією, зокрема на культиваторних лапах і плужних лемішах. Умови роботи включали інтенсивний вплив абразивного середовища важких і кам'янистих ґрунтів. Результати показали, що запропоновані покриття забезпечують до 40% підвищення експлуатаційного ресурсу деталей порівняно з традиційними методами відновлення. Деталі продемонстрували високу стабільність механічних властивостей навіть після тривалого використання в умовах значних динамічних навантажень.

Економічна оцінка показала, що впровадження запропонованої технології дозволяє зменшити витрати на ремонт і технічне обслуговування сільськогосподарської техніки на майже 40%. Це досягається завдяки подовженню терміну служби робочих органів, мінімізації кількості відходів та зниженню простоїв техніки під час сільськогосподарського сезону. Водночас, екологічна безпека технології забезпечується завдяки використанню оптимізованих складів шихти, що сприяє зменшенню металевих відходів і підвищенню раціонального використання матеріалів.

Отримані результати підтверджують доцільність широкого впровадження розробленої технології в агропромислове виробництво, а також її потенціал для використання в інших галузях промисловості, де потрібні висока зносостійкість і довговічність деталей.

Вперше:

- здійснено теоретичну та практичну оцінку можливості застосування модифікаторів на основі карбідів хрому, ніобію та оксиду алюмінію як присадок до наплавлювального дроту в процесі електрошлакового наплавлення для підвищення експлуатаційних показників відновлювальних покриттів ґрунтообробних деталей;
- встановлено закономірності впливу гранулометричного складу, рівномірного розподілу модифікуючих компонентів і температурних режимів наплавлення на фазовий склад, механічні характеристики та експлуатаційну стійкість покриттів;
- експериментально підтверджено ефективність технології формування дрібнозернистої структури наплавленого шару, що забезпечує підвищення його твердості на 15-20% та зносостійкості на 30-40% у порівнянні з традиційними методами відновлення;
- визначено ефективні технологічні параметри ЕШН, які дозволяють мінімізувати утворення залишкових напружень, пористості та мікротріщин, що значно покращує довговічність покриттів.

Удосконалено:

- методи контролю якості покриттів, що включають комплексний аналіз їхньої мікроструктури, фазового складу та механічних властивостей. запропоновано комбінацію металографічного аналізу, випробувань на твердість, зносостійкість та термостабільність для всебічної оцінки отриманих покриттів.

Отримало подальший розвиток:

підхід до адаптації технології ЕШН для відновлення деталей, що працюють у складних умовах експлуатації, зокрема в умовах високих динамічних навантажень і абразивного зношування. Розроблено рекомендації щодо вибору складу наплавленого металу залежно від конкретних робочих умов.

Ключові слова: зносостійкість, дрібнозерниста структура, фазовий склад, прогнозування структуроутворення, споживчі властивості, динамічні навантаження, модифікуючі присадки, порошкові дроти, електрошлакове наплавлення, ефективні параметри технологічних процесів, ґрунтообробні засоби, польові випробування, механічні характеристики, технологічні параметри, моделювання, мікротвердість, зносостійкі покриття, модифікація поверхні.

ABSTRACT

Zakharov A.V. Application of modifying additives and their introduction into refinishing coatings to increase operational stability — Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 132 «Materials Science» (13 — Mechanical Engineering) — State Biotechnological University, Kharkiv, 2025.

The dissertation is aimed at finding ways to solve the urgent problem of increasing the wear resistance and service life of parts operating under conditions of significant abrasive wear. The work is devoted to the development of a new technology for strengthening agricultural machinery parts based on the study of innovative methods of using modifying additives and electroslag surfacing.

In the course of the study, a comprehensive analysis of modern methods of restoring parts used in agricultural machinery was carried out, and the shortcomings of existing technologies were identified. Based on the data obtained, a new surfacing technology has been developed that includes the use of flux-cored wires with the addition of modifying additives such as carbides of chromium, niobium and aluminium oxide. These components ensure the creation of a fine-grained and uniform structure of coatings, which increases their wear resistance, hardness and resistance to high temperatures.

The research included the study of the phase composition, structure and mechanical properties of the resulting coatings. Particular attention was paid to the effect of particle size distribution, temperature conditions, crystallisation rate and uniformity of distribution of modifying components on the performance characteristics of the coatings. It has been experimentally confirmed that the new technology allows achieving an increase in the service life of parts up to 40% compared to traditional methods of restoration.

Field tests of the remanufactured parts, such as cultivator tines and ploughshares, reduction in abrasive wear without loss of service life or mechanical properties. As a result, the remanufactured parts demonstrate high efficiency even in difficult conditions such as heavy and stony soils. The experiments confirmed the stability of the coatings,

their resistance to dynamic loads and aggressive environments, which makes them suitable for widespread use in modern agricultural production.

The research results also contributed to the development of new technical approaches to the manufacture of cored wires with improved characteristics. Optimal parameters for the ratio of charge components and surfacing processes, including wire feed rate, slag bath temperature, metal crystallisation control and cooling methods, were established. This made it possible to achieve greater uniformity of coatings, minimise possible defects and ensure long-term wear resistance.

The practical significance of the work is to create a universal approach to the strengthening and restoration of parts, which reduces operating costs, reduces downtime and increases productivity. The application of the proposed technologies reduces the consumption of materials, reduces the amount of waste, promotes environmental safety of production and significantly improves the economic performance of the agro-industrial complex.

This thesis is an important contribution to the development of materials science and surface engineering. The results obtained can be used not only in agriculture, but also in mechanical engineering, mining, the energy sector and other industries requiring high wear resistance and durability of parts. The introduction of the latest technologies opens up opportunities to create coatings adapted to specific operating conditions that meet modern quality and environmental requirements.

In the course of the research, a set of experimental, theoretical and practical works was carried out aimed at improving the electrosag surfacing (ESR) technology using modifying additives to increase the wear resistance and durability of agricultural machinery working bodies. Laboratory experiments included metallographic analysis of the structure of coatings, evaluation of the phase composition, study of hardness, wear resistance and thermal stability of the obtained materials. It has been determined that the use of such modifying components as chromium carbides, niobium and aluminium oxides contributes to the formation of a fine-grained coating structure, which ensures high mechanical strength, resistance to cracking and a long service life of the parts.

Based on theoretical studies, including the development of an optical and

mathematical model of some structures based on a combination of optical imaging and subsequent mathematical processing of the obtained images to quantify the phase composition and morphology of grains, it is possible to identify the distribution of solid-soluble phases, identify zones with modified microstructure and establish the characteristic features of grain formation in the process of electroslag surfacing.

Field tests were carried out on parts refurbished using the developed technology, including cultivator tines and ploughshares. The working conditions included intensive exposure to the abrasive environment of heavy and stony soils. The results showed that the proposed coatings provide up to a 40% increase in the service life of the parts compared to traditional restoration methods. The parts demonstrated high stability of mechanical properties even after prolonged use under significant dynamic loads.

The economic assessment showed that the implementation of the proposed technology can reduce the cost of repair and maintenance of agricultural machinery by almost 40%. This is achieved by extending the service life of the working bodies, minimising the amount of waste and reducing equipment downtime during the agricultural season. At the same time, the environmental safety of the technology is ensured through the use of optimised charge compositions, which helps to reduce metal waste and increase the rational use of materials.

The obtained results confirm the feasibility of widespread implementation of the developed technology in agricultural production, as well as its potential for use in other industries requiring high wear resistance and durability of parts.

For the first time:

- theoretical and practical assessment of the possibility of using modifiers based on chromium, niobium and aluminium oxide carbides as additives to the surfacing wire in the process of electroslag surfacing to improve the performance of restoration coatings of tillage parts;
- established the regularities of the effect of particle size distribution, uniform distribution of modifying components and surfacing temperature conditions on the phase composition, mechanical characteristics and service life of coatings;
- experimentally confirmed the effectiveness of the technology for forming a

fine-grained structure of the deposited layer, which increases its hardness by 15-20% and wear resistance by 30-40% compared to traditional restoration methods;

has determined the effective technological parameters of ESR, which minimise the formation of residual stresses, porosity and microcracks, which significantly improves the durability of coatings.

Improved:

– methods for quality control of coatings, including a comprehensive analysis of their microstructure, phase composition and mechanical properties. a combination of metallographic analysis, hardness, wear resistance and thermal stability tests is proposed for a comprehensive assessment of the resulting coatings.

Further development:

– approach to adapting electroslag surfacing technology for the restoration of parts operating in difficult conditions, in particular under high dynamic loads and intense abrasive wear. Recommendations have been developed for selecting the composition of the deposited metal depending on the specific operating conditions of the parts.

Keywords: wear resistance, fine-grained structure, phase composition, prediction of structure formation, consumer properties, dynamic loads, modifying additives, cored wires, electroslag surfacing, effective process parameters, soil treatment agents, field tests, mechanical characteristics, process parameters, modelling, microhardness, wear-resistant coatings, surface modification.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові публікації, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

Наукові праці, опубліковані у фахових наукових виданнях України

1. Захаров А.В., Рибалко І.М. Фізико-хімічні властивості флюсів для електрошлакового наплавлення. *Наукові вісті Дніпровського університету*. 2022. №23. С. 11-15. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2022-23-6>
2. Рибалко І.М., Сайчук О.В., Захаров А.В., Потоскаєв О.М. Електрошлакова наплавка поверхонь виробів композиційним зносостійким сплавом. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. Суми: Видавничий дім «Гельветика», 2022. Випуск 2 (48). С. 61-65. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.9>
3. 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*. 2022. № 4(83). С. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.4>
4. 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. Технічні науки*. Львів: Видавництво Львівського торговельно-економічного університету, 2023. Вип. 33. С. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2023-33-02>
5. 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*. Херсон: Видавничий дім «Гельветика», 2023. № 4(87). С. 129-136. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.15>
6. Рибалко І.М., Захаров А.В., Тіхонов О.В., Князєв С.А., Князєва Г.О.

Дослідження методів оптико-математичного моделювання мікроструктури металів та сплавів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Т. 14, № 2. С. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-6>

7. Рибалко І.М., Тіхонов О.В., Захаров А.В. Вплив модифікуючих домішок на мікроструктуру та властивості наплавлених електрошлаковим наплавленням шарів для відновлення плужних лемішів та культиваторних стрілочастих лап. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 10(41), ч. II. С. 82-94. DOI: [10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).2.82-94](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).2.82-94).

8. Захаров А.В., Рибалко І.М., Тіхонов О.В. Переваги використання технології електрошлакового наплавлення для відновлення деталей ґрунтообробної техніки: лемішів і культиваторних лап. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. Львів : Видавництво Львівського торговельно-економічного університету, 2024. Вип. 40. С. 5-12. DOI: [10.32782/2522-1221-2024-40-01](https://doi.org/10.32782/2522-1221-2024-40-01).

9. 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 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Наукове видання*. 2024. № 4 (497). С. 20-27. DOI: [10.15589/znp2024.4\(497\).4](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).4).

10. 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](https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.3).

11. Рибалко І., Тіхонов О., Захаров А. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин електрошлаковим наплавленням у струмопідвідному кристалізаторі. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2024. Випуск 6/2024 (149). С. 166-173. DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.6.20>.

**Наукові праці,
опубліковані за кордоном**

12. Захаров А.В., Рибалко І.М., Сайчук О.В. Фізико-хімічні властивості флюсів та їхні технологічні параметри. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. Gdansk: International Science Group, 2022. Т. 1, № 5. С. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20220105.09>
13. Рибалко І.М., Сайчук О.В., Захаров А.В., Боровик О.Ю. Процес електрошлакового наплавлення з використанням електродних порошкових дротів. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. Gdansk: International Science Group, 2023. Т. 2, № 1. С. 1–9. DOI: [10.46299/j.isjea.20230201.01](https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230201.01)
14. Захаров А.В. Вплив складу флюсу, роду і полярності струму на ефективність електрохімічних процесів в електрошлаковій системі. *Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal*. Ostrava: Tuculart Edition & European Institute for Innovation Development, 2023. № 24. С. 82–89. DOI: [10.47451/inn2023-02-01](https://doi.org/10.47451/inn2023-02-01)

**Наукова монографія
за темою дисертаційного дослідження**

15. Рибалко І.М., Захаров А.В. Вивчення особливостей окисно-відновних реакцій під час електрошлакового наплавлення з використанням модифікуючих домішок різного хімічного складу. *Наука, технології та інновації в сучасному світі: наукова монографія*. Рига, Латвія: Baltija Publishing, 2023. С. 68–85. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-364-4-3>

**Наукові праці, які засвідчують
апробацію матеріалів дисертації**

16. Захаров А.В., Рибалко І.М. Отримання та застосування модифікуючої шихти з алмазною фракцією для підвищення експлуатаційної стійкості виробів. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали V Всеукр. наук.-практ. Інтернет конференції* (Полтава, 21-22 лютого 2023 р.) / ПДАУ: ред. кол., О.І. Біловод, С.В. Попов, Ю.В. Левченко, Р.М. Харак – Полтава: ПДАУ, 2023. С. 69-71.

URL: <https://www.pdau.edu.ua/sites/default/files/node/11413/zbirnyk2022.pdf>

17. Захаров А.В., Рибалко І.М. Електрошлакове наплавлення поверхонь виробів композиційними зносостійкими домішками. *IX Міжнародна науково-технічна онлайн-конференція «Крамаровські читання»*, присвячена 115-й річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906–1987) та 90-річчю кафедри надійності техніки НУБіП України – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2022 – С. 56–59.

URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/zbirnik_tez_kch_2022v3.pdf

18. Рибалко І.М., Захаров А.В., Сайчук О.В. Порівняльна характеристика виробництва та можливі методи відновлення вітчизняних й закордонних культиваторних стрілчастих лап. *Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» (29–30 листопада 2022 р.)*: матеріали – Електронне видання – Дніпро: Журфонд, 2022 – С. 214–218.

URL: https://nmetau.edu.ua/file/---sbornik-osen-2022-v_pechat.pdf

19. Захаров А.В., Рибалко І.М. Отримання та застосування модифікуючої шихти з алмазною фракцією для підвищення експлуатаційної стійкості виробів // *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали V Всеукраїнської інтернет-конференції (21–22 лютого 2023 р.)* – Полтава: ПДАУ, 2023 – С. 69–71.

URL: <https://dspace.pdau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/63a780cc-4b24-4467-9fc4-d1ee3da7ad77/content>

20. Рибалко І.М., Захаров А.В., Сайчук О.В. Дослідження реакції сірки та фосфору під час процесу електрошлакового наплавлення // *Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції «Крамаровські читання»*, присвяченої 116-й річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віцепрезидента УАСГН Крамарова Володимира Савовича (1906–1987) (23–24 лютого 2023 р., Київ) / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2023 – С. 14–16.

URL:https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik_tez_kch2023.pdf

21. Захаров А.В., Рибалко І.М. Аналіз детонаційної шихти з алмазною фракцією для модифікування покриттів наплавленням // *Proceedings of International Multidisciplinary Scientific and Practical Internet Conference for Young Researchers, Applicants for Higher Education and Scientists «Modern Science: Innovations and Perspectives»* (6–7 April 2023, Kyiv, Ukraine) – Kyiv: Kyiv Institute of Railway Transport of the State University of Infrastructure and Technology, 2023 – P. 304–307.

URL:<https://files.duit.edu.ua/uploads/%D0%A1%D0%B0%D0%B9%D1%82/3%D0%9D%D0%90%D0%A3%D0%9A%D0%90/conferences/international-scientific-and-practical-conferences/modern-science-innovations-and-perspectives.pdf>

22. Захаров А.В., Рибалко І.М., Сайчук О.В. Механічна обробка металу наплавлених деталей ЕШН // *Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023: матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції* (27–28 квітня 2023 р., Київ) / заг. ред. Р. В. Лютий – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2023 – С. 141–146.

URL: https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2023/06/conferenziya_2023.pdf

23. Рибалко І.М., Захаров А.В. Дослідження особливостей експлуатаційного зношування робочих органів ґрунтообробних машин // *III Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023»* (01–03 червня 2023 р.) – Вінниця, 2023 – С. 102–104.

URL:https://www.researchgate.net/publication/375910455_Zbirnik_tez_dopovide_j_III-i_Miznarodnoi_naukovo-tehnicnoi_konferencii_Perspektivi_rozvitku_masinobuduvanna_ta_transportu_-2023_Zbirnik_naukovih_prac_Elektronnij_resurs_Vinnica_VNTU_2023_PDF_490s_I_SB

24. Захаров А.В., Рибалко І.М., Сайчук О.В. Дослідження факторів, які впливають на пришвидшене зношування робочих органів ґрунтообробних машин // *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали V Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції* (01–24 листопада 2023 р.) / ТДАТУ – Запоріжжя: 2023 – С. 238–243.

URL: http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/17193/1/materialy-V_mnpk_2023_.pdf

25. Захаров А.В., Рибалко І.М., Кусков Ю.М., Жданов В.А. Електрошлакове наплавлення алмазовмісною шихтою, отриманою з відходів військового виробництва // *Сучасні напрями розвитку адитивних технологій: тези доповідей науково-технічної конференції* / під ред. О.Т. Зельніченка – Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2023 – С. 29.

URL: <https://tzu.com.ua/2023/09/%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BE-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B0-%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F-%D1%81%D1%83%D1%87%D0%B0%D1%81/>

26. Захаров А.В., Рибалко І.М. Електрошлакове наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі з використанням порошкових дрітків для відновлення робочих органів ґрунтообробної техніки // *Science and Global Challenges in the Modern World: Proceedings of the International Scientific Conference* (4 November 2024) – Leicester, UK: Bookmundo, 2024 – С. 161–165.

URL: <https://researcheurope.org/wp-content/uploads/2024/11/re-04.11.24.pdf>

27. Zakharov A.V., Rybalko I.M., Tihonov O.V., Kuskov Y.M. Studying the possibility of increasing the wear resistance of tillage tools using the technology of electroslag surfacing in a current-carrying crystallizer // *VII International Conference «Welding and Related Technologies»*, (7–10 October 2024, Yaremche, Ukraine): Abstracts of Plenary and Poster Papers – Kyiv: International Association «Welding», 2024 – P. 46.

URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/oa-edit/10.1201/9781003518518/welding-related-technologies-igor-krivtsun-fuad-khoshnaw-ganna-polishko-serhiy-schwab-roman-selin>

**Наукові праці, які додатково відображають
наукові матеріали дисертації:**

28. Спосіб підвищення якості та експлуатаційної стійкості відновлюючих покриттів їх модифікуванням маловитратною домішкою: пат. 147660 Україна: МПК С23С 4/131 (2016.01) / Т.С. Скобло, О.В. Нанка, І.М. Рибалко, А.В. Захаров та ін.; №u202008115. заявл. 18.12.2020; опубл. 02.06.2021, Бюл. № 22. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1597033/>
29. Склад детонаційної шихти з алмазами для модифікування: пат. 144463 Україна: МПК С23С 4/131 (2020.01) / Т.С. Скобло, О.І. Сідашенко, Ю.М. Кусков, А.В. Захаров та ін.; №u201905788. заявл. 27.05.2019; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 19. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1458401/>
30. Рибалко І.М., Тіхонов О.В., Марков О.В., Захаров А.В., Рижков Р.С. Вплив модифікуючих домішок при нанесенні відновлювальних покриттів на зносостійкість. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів Technical service of agriculture, forestry and transport*. 2024. № 25. С. 58-67. DOI: [10.37700/ts.2024.25.58-67](https://doi.org/10.37700/ts.2024.25.58-67)
31. Saichuk O., Borovyk O., Priliepo N., Basova Y., Honcharenko O., Zakharov A. Development and improvement of roll casting technologies for universal beam mills. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. Vol. 6, No. 1(80). Pp. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.320381>

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	11
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ТА ПРОЦЕСИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ І МАТЕРІАЛИ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ НА ЗНОШЕНІ ДЕТАЛІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ АГРЕГАТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ.....	29
1.1. Проблеми зносостійкості та ресурсозбереження в агропромисловому комплексі.....	29
1.1.1. Проблеми зносостійкості ріжучих елементів ґрунтообробної техніки.....	29
1.2. Методи зміцнення та відновлення деталей сільськогосподарської техніки.....	32
1.2.1. Сучасні підходи до зміцнення та відновлення деталей нанесенням покриттів.....	32
1.2.2. Переваги технології електрошлакового наплавлення.....	33
1.2.3. Переваги використання порошкових дротів з модифікуючими домішками.....	35
1.2.4. Застосування електрошлакового наплавлення при відновленні деталей сільськогосподарської техніки.....	38
1.2.5. Можливості застосування сучасних способів ЕШН при відновленні деталей, які працюють в умовах пришвидшеного абразивного зношування.....	41
1.3. Матеріали та модифікатори для підвищення зносостійкості.....	48
1.3.1. Застосування модифікуючих домішок для підвищення зносостійкості відновлювальних покриттів.....	48
1.3.2. Стандартні модифікатори для підвищення якості металу та аналіз їх фізико–механічних властивостей.....	50
1.3.3. Використання при напавленні абразивостійких сплавів на основі карбідного, боридного та карбоборидного зміцнення.....	53

1.3.4. Вплив карбідного зміцнення на зносостійкі властивості наплавленого металу.....	57
1.3.5. Вплив боридного та карбоборидного зміцнення на зносостійкі властивості наплавленого металу.....	58
1.3.6. Дослідження способів формування зміцнювальних фаз у наплавленому металі для підвищення зносостійкості.....	60
1.4. Сучасні електродні матеріали для дугового та електрошлакового наплавлення.....	61
1.4.1. Застосування порошкових дротів з модифікуючими домішками для отримання абразивостійкого наплавленого металу.....	67
ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 1.....	69
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	71
2.1 Методологія досліджень.....	71
2.2. Технологічне обладнання та матеріали для виготовлення порошкових дротів.....	72
2.3. Модифікуючі домішки та їх вплив на властивості наплавленого металу.....	76
2.4. Вплив досліджуваних модифікуючих домішок на зносостійкість наплавлених покриттів.....	80
2.5. Методика електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі.....	81
2.6. Металографічні дослідження наплавленого металу.....	85
2.6.1. Функції флюсів у процесі електрошлакового наплавлення.....	90
2.6.2. Вплив температури на кристалізацію.....	92
2.7. Теоретичні основи прогнозування зносостійкості робочих органів ґрунтообробної техніки	94
2.8. Методики рентгеноспектрального аналізу.....	104
2.9. Загальна методика проведення експериментальних досліджень	109
2.10. Оцінка ефективності та перспективи застосування карбіду кремнію як модифікуючої домішки	111

2.11. Оптико-математичне моделювання структур для оцінки зносостійкості наплавлених покриттів	112
---	-----

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 2.....	118
----------------------------	-----

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ, ФАЗОВОГО СКЛАДУ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПЛАВЛЕНИХ ПОКРИТТІВ.....	120
--	------------

3.1. Дослідження закономірностей зміни структури та фазового складу покриттів.....	120
--	-----

3.2. Металографічний аналіз наплавлених покриттів.....	124
--	-----

3.3. Визначення фізико-механічних властивостей наплавлених покриттів.....	138
---	-----

3.4. Оцінка впливу режимів електрошлакового наплавлення на стабільність структури металу.....	142
---	-----

3.5. Вплив модифікуючих домішок на структуру та зносостійкість покриттів.....	148
---	-----

3.6. Закономірності формування структури наплавленого металу.....	154
---	-----

3.6.1. Порівняння зносостійкості відновлених деталей із серійними зразками.....	159
---	-----

3.7. Розробка технології відновлення та зміцнення зношених деталей.....	163
---	-----

3.7.1. Результати досліджень впливу модифікуючих домішок.....	166
---	-----

3.7.2. Ефективні склади порошкових дротів для наплавлених покриттів.....	171
--	-----

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 3.....	176
----------------------------	-----

РОЗДІЛ 4. ПОЛЬОВІ ВИПРОБУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ.....	178
---	------------

4.1. Аналіз вихідних характеристик дослідних зразків із модифікованими	
--	--

	21
домішками.....	178
4.2. Технологія відновлення культиваторних стрілчастих лап та плужних лемішів з використанням технології електрошлакового наплавлення.....	184
4.3. Параметри дослідних зразків до випробувань.....	189
4.4. Методика польових випробувань.....	193
4.4.1. Методики вимірювання зносу та аналізу стану поверхонь.....	195
4.5. Результати польових випробувань.....	197
ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 4.....	200
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ РОЗРОБОК.....	202
ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 5.....	209
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	210
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	214
ДОДАТОК А.....	240
ДОДАТОК Б.....	252
ДОДАТОК В.....	269

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасне сільськогосподарське виробництво характеризується інтенсивним використанням технічних засобів, що призводить до значного зношування робочих органів машин. Однією з найбільш поширених проблем у цій сфері є швидке абразивне зношування деталей, які працюють в агресивних умовах ґрунтового середовища. Це спричиняє необхідність частих ремонтів та заміни деталей, що суттєво підвищує експлуатаційні витрати, знижує продуктивність та економічну ефективність агропромислового комплексу.

Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування сучасних технологій відновлення та зміцнення зношених деталей. Серед таких методів особливу увагу привертає електрошлакове наплавлення, яке забезпечує ефективне відновлення геометричних параметрів деталей та надання їм поліпшених механічних властивостей. Використання модифікуючих присадок у процесі наплавлення відкриває нові можливості для підвищення зносостійкості та довговічності покриттів.

З огляду на високу актуальність проблеми та значний науково-практичний потенціал, вибір теми дослідження обґрунтовується необхідністю розробки ефективних методів підвищення експлуатаційної надійності деталей сільськогосподарської техніки.

Мета: розробка та вдосконалення технології електрошлакового наплавлення із застосуванням модифікуючих присадок для підвищення зносостійкості, довговічності та експлуатаційної надійності робочих органів сільськогосподарської техніки.

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні задачі:

- провести аналіз існуючих технологій відновлення деталей сільськогосподарської техніки та визначити їхні основні недоліки;
- розробити склад модифікуючих присадок для ЕШН, що забезпечують дрібнозернисту структуру покриттів, високу твердість і зносостійкість;
- встановити ефективні технологічні режими електрошлакового наплавлення для отримання покриттів із стабільними властивостями;

- дослідити вплив модифікуючих компонентів на фазовий склад і структуру покриттів, а також на їх механічні властивості;
- розробити оптико-математичну модель структур, яка дасть змогу визначати середній розмір зерен та їхню орієнтацію, що сприятиме оптимізації технологічних параметрів і підвищенню зносостійкості відновленої деталі;
- провести лабораторні й польові випробування робочих органів техніки, відновлених за розробленою технологією, для підтвердження ефективності методів;
- розробити рекомендації щодо промислового впровадження технології ЕШН із використанням модифікуючих присадок, адаптованої до різних умов експлуатації;
- оцінити економічну ефективність запропонованих технологій для сільськогосподарського виробництва та їх екологічну безпеку.

Об’єкт дослідження – процес відновлення та зміцнення робочих органів сільськогосподарської техніки, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування, значних динамічних навантажень та агресивного середовища.

Предмет дослідження – застосування модифікуючих присадок та їх введення у відновлювальні покриття для підвищення експлуатаційної стійкості.

Методи дослідження – для досягнення поставленої мети в роботі використано комплексний підхід, що включає:

Теоретичні методи: аналіз літературних джерел з питань електрошлакового наплавлення, зносостійких покриттів та модифікуючих присадок;

- математичне моделювання теплових процесів та фазових перетворень у металі для визначення раціональних параметрів наплавлення;
- розробка теоретичних моделей формування мікроструктури покриттів із модифікуючими компонентами.

Експериментальні методи: проведення лабораторних випробувань складу та властивостей наплавлених покриттів;

- металографічний аналіз для визначення мікроструктури та фазового складу отриманих покриттів;

- випробування на твердість, зносостійкість та стійкість до динамічних навантажень;

- дослідження впливу гранулометричного складу та рівномірності розподілу модифікуючих компонентів на механічні характеристики покриттів.

Практичні методи: польові випробування відновлених робочих органів сільськогосподарської техніки в реальних умовах експлуатації;

- порівняльний аналіз ефективності відновлених деталей за різними методиками зміцнення;

- оцінка економічної ефективності застосування розробленої технології в аграрному секторі.

Наукова новизна отриманих результатів: У дисертаційній роботі узагальнено результати теоретичних, експериментальних та практичних досліджень щодо збільшення ресурсу ріжучих деталей ґрунтообробних машин за рахунок електрошлакового наплавлення з використанням модифікуючих присадок.

Вперше:

- здійснено теоретичну та практичну оцінку можливості застосування модифікаторів на основі карбідів хрому, ніобію та оксиду алюмінію як присадок до наплавлювального дроту в процесі електрошлакового наплавлення для підвищення експлуатаційних показників відновлювальних покриттів ґрунтообробних деталей;

- встановлено закономірності впливу гранулометричного складу, рівномірного розподілу модифікуючих компонентів і температурних режимів наплавлення на фазовий склад, механічні характеристики та експлуатаційну стійкість покриттів;

- експериментально підтверджено дієвість технології формування дрібнозернистої структури наплавленого шару, що забезпечує підвищення його твердості на 15-20% та зносостійкості на 30-40% у порівнянні з традиційними методами відновлення;

- визначено раціональні технологічні параметри ЕШН, які дозволяють мінімізувати утворення залишкових напружень, пористості та мікротріщин, що значно покращує довговічність покриттів.

Удосконалено:

– методи контролю якості покриттів, що включають комплексний аналіз їхньої мікроструктури, фазового складу та механічних властивостей. запропоновано комбінацію металографічного аналізу, випробувань на твердість, зносостійкість та термостабільність для всебічної оцінки отриманих покриттів.

Отримав подальший розвиток:

– підхід до адаптації технології ЕШН для відновлення деталей, що працюють у складних умовах експлуатації, зокрема в умовах високих динамічних навантажень і абразивного зношування. Розроблено рекомендації щодо вибору складу наплавленого металу залежно від конкретних робочих умов.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені технології впроваджено на підприємствах сільськогосподарського машинобудування, зокрема на базі агротехнічного підприємства «Калинове-7», де здійснено відновлення культиваторних лап та плужних лемішів із використанням запропонованих модифікуючих присадок. За результатами впровадження зафіксовано зниження витрат на ремонт обладнання на 25% та підвищення ефективності експлуатації техніки в умовах інтенсивного абразивного зношування. Крім того, технологія використовується у фермерському господарстві «Калинове-7» Лозівського району Харківської області, де польові випробування підтвердили підвищену довговічність відновлених деталей протягом двох сільськогосподарських сезонів.

Виходячи з результатів теоретичних і практичних досліджень розроблено нову технологію електрошлакового наплавлення з використанням модифікуючих присадок (карбіди хрому, ніобію, оксиду алюмінію), що забезпечують підвищену зносостійкість і твердість покриттів. Оптимізовано параметри процесу, що дозволило отримати рівномірну структуру покриттів, мінімізувати дефекти та збільшити ресурс деталей до 40%. Досліджено вплив присадок на фазовий склад, механічні властивості та термостабільність отриманих покриттів. Польові випробування підтвердили ефективність технології, показавши суттєве зниження абразивного зносу деталей. Впровадження розробленої технології дає змогу

знизити витрати на ремонт сільськогосподарської техніки на 25–40 %, скоротити простої та підвищити продуктивність техніки. Також результати дослідження можуть бути використані в інших галузях, зокрема в машинобудуванні, металургії та гірничодобувній промисловості, де необхідні матеріали з високою зносостійкістю. Це сприяє зменшенню витрат на виготовлення нових деталей і підвищенню екологічної безпеки виробництва.

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно проведено постановку завдання дослідження, визначено наукову проблему та сформульовано основні напрями її рішення. Розроблено детальну методику експериментальних досліджень, що включає матеріали, технологічні параметри електрошлакового наплавлення та методи аналізу вибраних отриманих результатів. Виконано аналіз наявних технологій відновлення, виявлено їхні недоліки та розроблено шляхи вдосконалення. Проведено польові випробування на деталях, відновлених за запропонованою технологією.

Самостійно проведено серію експериментів з використанням різних складів модифікуючих присадок (карбідів хрому, ніобію, оксиду алюмінію) для оцінки їх впливу на мікроструктуру, фазовий склад і механічні властивості наплавлених покриттів. Проведено металографічний аналіз, випробування на твердість, зносостійкість, термостабільність, а також оцінку динамічної міцності матеріалів.

Отримані результати піддано всебічному аналізу з використанням сучасних методів якості, що дозволило контролювати програмування закономірності утворення структурних фаз та раціональних технологічних параметрів процесу ЕШН. Розроблено рекомендації щодо використання модифікуючих присадок у відновлювальних покриттях та їх практичного застосування в промисловості.

Спираючись на отримані дані сформульовано висновки та розроблено рекомендації щодо впровадження технології у виробничі процеси, що сприяє підвищенню ресурсу деталей та зниженню експлуатаційних витрат.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження за темою дисертаційної роботи виконані відповідно до держбюджетних та госпдоговірних тематик ДБТУ та згідно діючих програм:

- «Нові технологічні процеси відновлення деталей наплавленням з використанням модифікування вторинною сировиною» (ДР 0120U002209) у період 2020-2024 р.р.;
- «Розробка та впровадження технологічних процесів виготовлення, відновлення та зміцнення деталей машин з метою підвищення експлуатаційної стійкості, надійності та довговічності технічних об'єктів» (ДР 0122U200394) у період 2022-2023 р.р.;
- «Проведення експериментальних досліджень для промислових випробувань нової технології зміцнення культиваторних стрілчастих лап» (ДР 0121U111046, госпдоговір 4/4-2021) у період 2021-2022 р.р.;
- «Дослідження властивостей матеріалу нових культиваторних лап вітчизняного та закордонного виробництва» (ДР 0121U111165, госпдоговір 7/4-2021) у період 2021-2022 р.р.;
- «Дослідження закономірностей зносу та розробка способів відновлення різців дорожніх фрез та робочих елементів ґрунтообробних знарядь» (ДР 0123U104561, госпдоговір 39-23-24 Д) у період 2023-2024 р.р.

Перераховані господарсько-договірні теми відповідають Закону України № 3534-IX від 21.12.2023 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки».

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались і обговорювались на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях, зокрема: Всеукраїнська науково-практична Інтернет-конференція «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування», Полтава, ПДАУ, 2023; Міжнародна науково-технічна онлайн-конференція «Крамаровські читання», Київ, НУБіП, 2022; Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід», Дніпро, Журфонд, 2022; Всеукраїнська Інтернет-конференція «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування», Полтава, ПДАУ, 2023; Міжнародна науково-технічна конференція «Крамаровські читання», Київ, НУБіП, 2023; International Multidisciplinary Scientific and Practical Internet Conference «Modern Science: Innovations and Perspectives», Київ, Kyiv Institute of

Railway Transport, 2023; Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023», Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023; Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023», Вінниця, ВНТУ, 2023; Міжнародна науково-практична Інтернет-конференція «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі», Запоріжжя, ТДАТУ, 2023; Науково-технічна конференція «Сучасні напрями розвитку адитивних технологій», Київ, Міжнародна Асоціація «Зварювання», 2023; International Scientific Conference «Science and Global Challenges in the Modern World», Лестер, Bookmundo, 2024; International Conference «Welding and Related Technologies», Ярмче, International Association «Welding», 2024. Результати досліджень отримали схвальні відгуки від провідних фахівців в галузі матеріалознавства.

Дисертація апробована та схвалена на фаховому семінарі кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні імені О.І. Сідашенка Державного біотехнологічного університету.

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 31 наукова праця, з них 12 статей у фахових виданнях України, 4 статті у міжнародних журналах, 1 колективна монографія, 2 патенти України на корисну модель, 12 тез доповідей на конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи викладено на 276 сторінках, у тому числі 3 додатки на 37 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 213 сторінок, має 91 рисунок і 40 таблиць. Список використаних джерел нараховує 197 найменувань на 25 сторінках.

Автор висловлює щирю та глибоку вдячність своєму першому науковому керівнику і наставнику — доктору технічних наук, професору, Лауреату Державної премії України Скобло Тамарі Семенівні (світла пам'ять) за наукове бачення, постійну підтримку та мудре наставництво, які стали основою цього дослідження та джерелом натхнення на шляху наукового становлення.

РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ТА ПРОЦЕСИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ І МАТЕРІАЛИ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ НА ЗНОШЕНІ ДЕТАЛІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ АГРЕГАТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

1.1. Проблеми зносостійкості та ресурсозбереження в агропромисловому комплексі

1.1.1. Проблеми зносостійкості ріжучих елементів ґрунтообробної техніки

Зношування ріжучих елементів ґрунтообробних органів є однією з найгостріших проблем агропромислового комплексу, що значно впливає на ефективність та економічну рентабельність виробництва. В умовах інтенсивного використання техніки, ріжучі елементи піддаються впливу абразивних частинок ґрунту, механічному стиранню, а також високим ударним навантаженням, що призводить до швидкого зниження їхніх експлуатаційних характеристик [1-2]. Ця проблема стає особливо актуальною в умовах зростання цін на матеріали та запчастини, що вимагає застосування більш ефективних методів ресурсозбереження.

Однією з ключових проблем є недостатня зносостійкість ріжучих елементів, що призводить до необхідності їх частої заміни і, як наслідок, до збільшення витрат на обслуговування техніки. Знос ріжучих елементів не тільки призводить до підвищених експлуатаційних витрат, а й знижує продуктивність праці, оскільки часті поломки і простої техніки порушують графік виконання сільськогосподарських робіт [3].

Однією з причин недостатньої зносостійкості є використання традиційних матеріалів, які не мають достатньої стійкості до впливу агресивних умов експлуатації. Більшість ріжучих елементів виготовляють зі сталей з обмеженими зносостійкими характеристиками, що потребує розроблення нових матеріалів і технологій їхньої обробки [4-5]. Важливим напрямком підвищення зносостійкості є розробка нових типів металу, легованих елементами, такими як хром, молібден, нікель і ванадій. Ці елементи сприяють утворенню твердих карбідних фаз, які

підвищують твердість і зносостійкість матеріалів [6].

Для розв'язання проблеми зносостійкості ріжучих елементів і підвищення ресурсозбереження в агропромисловому комплексі необхідне впровадження інноваційних технологій відновлення та зміцнення поверхонь деталей. Застосування спеціальних відновлювальних покриттів із використанням модифікуючих домішок є одним із найефективніших методів підвищення зносостійкості [7]. Такі покриття дають змогу значно поліпшити експлуатаційні характеристики ріжучих деталей завдяки збільшенню їхньої твердості, стійкості до абразивного зносу та корозії. Використання модифікуючих домішок, таких як карбіди і нітриди, дають змогу формувати мікроструктуру покриття, що має високу щільність і однорідність, що істотно знижує ймовірність виникнення дефектів у процесі експлуатації [8].

Ще одним перспективним методом підвищення зносостійкості є застосування електрошлакового наплавлення. Ця технологія дає змогу не тільки відновити геометрію зношених деталей, а й надати їм покращені механічні властивості. Електрошлакове наплавлення, завдяки високій температурі процесу, забезпечує глибокий зв'язок між основним матеріалом і шаром, що наплавляється, що значно підвищує міцність і довговічність ріжучих елементів. Крім того, використання електрошлакового наплавлення дає змогу наносити покриття з високим ступенем точності та мінімальною кількістю дефектів, що також сприяє збільшенню терміну служби деталей [9-10].

Ефективне впровадження відновлювальних технологій вимагає не тільки розроблення нових матеріалів, а й оптимізації технологічних процесів нанесення покриттів. Раціональні режими наплавлення, такі як швидкість подачі дроту, температура та умови охолодження, суттєво впливають на властивості покриття [11]. Такі системи дають змогу мінімізувати вплив людського фактора і забезпечити повторюваність характеристик покриттів, що особливо важливо в умовах масового виробництва.

Крім того, важливим аспектом ресурсозбереження є розробка і застосування нових композиційних матеріалів, які мають високу зносостійкість і довговічність

[12]. Використання наноматеріалів і композиційних порошків у складі покриттів, що наплавляються, дає змогу значно поліпшити їхні механічні та трибологічні властивості. Нанокompозитні покриття, що містять керамічні, або карбідні включення, мають високу твердість і низький коефіцієнт тертя, що сприяє зниженню зносу і збільшенню терміну служби ріжучих елементів [13]. Наприклад, додавання наночастинок оксиду алюмінію, або карбіду титану дає змогу значно підвищити твердість покриття і поліпшити його стійкість до механічних пошкоджень [14].

Ще одним важливим фактором, що сприяє підвищенню зносостійкості та ресурсозбереженню, є оптимізація конструктивних рішень ріжучих елементів. Правильний вибір геометрії, форми лез, кута заточування та інших параметрів дає змогу значно знизити навантаження на ріжучі елементи та зменшити їхнє зношування. Впровадження адаптивних конструктивних рішень, що враховують умови експлуатації та тип оброблюваних ґрунтів, дає змогу не тільки підвищити продуктивність роботи, а й збільшити термін служби деталей. Наприклад, використання асиметричних лез, або спеціальних ріжучих кромок може знизити опір ґрунту під час обробітку, що сприяє зниженню зносу [15].

З точки зору ресурсозбереження, велике значення має застосування методів рециклінгу та повторного використання зношених деталей сільськогосподарської техніки. Розроблення технологій, що дають змогу відновлювати зношені елементи та надавати їм нових властивостей, дає змогу знизити потребу у виробництві нових запчастин і, відповідно, зменшити витрати [16]. Впровадження технологій повторного використання та відновлення деталей сприяє також зниженню кількості відходів і зменшенню навантаження на навколишнє середовище, що є важливим аспектом сталого розвитку агропромислового комплексу. Застосування вторинних матеріалів у процесах наплавлення та відновлення дає змогу суттєво знизити витрати на виробництво та скоротити споживання природних ресурсів [17].

Застосування електрошлакового наплавлення, використання модифікуючих домішок і розробка нових легованих сталей дають змогу домогтися значного

підвищення експлуатаційної надійності деталей [18]. Ці заходи сприяють зниженню витрат на обслуговування та підвищують результативність сільськогосподарського виробництва, а також покращують екологічну ситуацію за рахунок зменшення споживання ресурсів і кількості відходів. Комплексний підхід до вирішення цих проблем дає змогу створити умови для довгострокового сталого розвитку агропромислового комплексу.

1.2. Методи зміцнення та відновлення деталей сільськогосподарської техніки

1.2.1. Сучасні підходи до зміцнення та відновлення деталей нанесенням покриттів

Сучасні підходи до зміцнення і відновлення поверхонь деталей спрямовані на збільшення терміну служби деталей, зниження експлуатаційних витрат і підвищення загальної продуктивності сільськогосподарської техніки [19-24]. Останніми роками розроблено багато методів, які дають змогу істотно поліпшити експлуатаційні характеристики покриттів завдяки використанню інноваційних матеріалів і технологій [25]. Основні сучасні підходи охоплюють застосування різних видів наплавлення, термічної та хіміко-термічної обробки, а також використання модифікуючих домішок і наноматеріалів [26].

Одним із найпоширеніших і найефективніших методів відновлення та зміцнення поверхні деталей – є наплавлення. Зокрема, електрошлакове, лазерне і плазмове наплавлення дають змогу створювати покриття з поліпшеними властивостями, такими як висока твердість, зносостійкість і корозійна стійкість. Електрошлакове наплавлення, як було згадано раніше, забезпечує високу продуктивність і міцне з'єднання між матеріалом, що наплавляється, і основною деталлю, що робить його особливо привабливим для відновлення ріжучих елементів сільськогосподарської техніки.

Електрошлакове наплавлення використовує тепло, що утворюється під час проходження електричного струму через шлакову ванну, для плавлення присадного матеріалу та створення покриття на деталі [27]. Завдяки відносно

високій температурі процесу забезпечується надійний металургійний зв'язок між основним матеріалом і наплавленим шаром, що підвищує міцність та адгезію покриття. Це критично для деталей, які зазнають значних динамічних і ударних навантажень [28].

Особливістю технології є температура шлакової ванни в межах 1600–1750°C, що створює раціональні умови для стабільного процесу та високої якості покриття. Водночас, відносно невисока температура порівняно з іншими методами дозволяє варіювати в широкому діапазоні хімічний склад модифікуючих домішок. Наприклад, це дозволяє створювати покриття з підвищеною зносостійкістю чи стійкістю до корозії, залежно від умов експлуатації.

Така технологія дає змогу уникати розтріскування й відшаровування покриття, забезпечуючи його довговічність та продуктивність роботи навіть у складних умовах. Завдяки цьому електрошлакове наплавлення є універсальним і економічно вигідним рішенням для відновлення та зміцнення деталей сільськогосподарської техніки [29].

1.2.2. Переваги технології електрошлакового наплавлення

Електрошлакове наплавлення дозволяє створювати покриття з заданими властивостями, зокрема підвищеною зносостійкістю, адаптуючи їх до специфічних умов експлуатації [30-31]. Використання легувальних елементів та спеціальних домішок сприяє утворенню покриттів із покращеною структурою, яка забезпечує довговічність і продуктивність роботи деталей у складних середовищах [32].

Особливо цінною є здатність технології оптимізувати витрати ресурсів завдяки використанню вторинних матеріалів і автоматизації процесу. Це робить електрошлакове наплавлення економічно вигідним, знижуючи витрати на ремонт і заміну деталей.

Важливим аспектом є також висока якість отриманого покриття, яке відрізняється щільністю і рівномірністю. Контроль параметрів процесу, таких як швидкість подачі матеріалу та температурний режим, дозволяє уникнути дефектів, зокрема тріщин чи пористості. Усе це сприяє ефективності технології в ремонті та

зміцненні деталей сільськогосподарської техніки, забезпечуючи їхню надійну роботу навіть за інтенсивної експлуатації [33-34].

Технологія дозволяє створювати покриття із заданими характеристиками через регулювання хімічного складу в процесі наплавлення. Висока адгезія та формування міцного металоматричного з'єднання забезпечують стійкість покриття до механічних навантажень і тривалий термін служби деталей [35].

Рівномірність і однорідність структури покриття знижують ризик утворення дефектів і локальних зон напруження, сприяючи рівномірному зносу та довговічності.

Автоматизація процесу забезпечує стабільність параметрів, таких як температура шлакової ванни і швидкість подачі дроту, що дозволяє отримувати високоякісні покриття з мінімальною кількістю дефектів. Екологічна безпека технології підсилюється завдяки використанню вторинних матеріалів і зниженню викидів забруднюючих речовин [36].

Технологія забезпечує багат шарове наплавлення з градієнтними властивостями, яке дозволяє поєднувати м'які й тверді шари для підвищення загальної міцності деталей. Крім того, рівномірний розподіл температури та повільне охолодження мінімізують термічні деформації, що є важливим для збереження точних розмірів і геометрії деталі [37].

Електрошлакове наплавлення має низку унікальних переваг, що робить його одним із найперспективніших методів відновлення і зміцнення ріжучих елементів сільськогосподарської техніки. Одна з основних переваг – це висока продуктивність і економічна ефективність процесу (табл. 1.1.). Електрошлакове наплавлення забезпечує високу швидкість наплавлення, що дає змогу швидко відновлювати зношені деталі, скорочуючи час простою техніки та підвищуючи її коефіцієнт використання [24].

Економічна ефективність досягається завдяки використанню доступних матеріалів, вторинного металу та автоматизації процесу, що знижує витрати на сировину, енергоресурси й обслуговування. Контроль параметрів наплавлення, таких як температура шлакової ванни та режим охолодження, дозволяє уникати

тріщин і покращує якість покриття [25].

Таблиця 1.1 – Економічні переваги від використання електрошлакового наплавлення

Перевага	Опис
зниження витрат на заміну	відновлення зношених деталей замість їх повної заміни
скорочення часу простою машини	швидке відновлення деталей та повернення обладнання в роботу
покращена довговічність покриття	довший термін служби деталей завдяки покращеним характеристикам покриття
оптимізація капітальних витрат	можливість повторного відновлення деталей без погіршення їх експлуатаційних характеристик
зменшена частота технічного обслуговування	покращена продуктивність зменшує потребу в частому технічному обслуговуванні

Одним з ефективних методів підвищення зносостійкості ріжучих елементів сільськогосподарської техніки, таких як леміші плугів і лапи культиваторів, є застосування електрошлакового наплавлення з використанням порошкових дротів особливого хімічного складу. Порошкові дроти, що містять легувальні елементи та спеціальні добавки, дають змогу створити покриття з раціональними властивостями для роботи в умовах інтенсивного абразивного зносу [38].

1.2.3. Переваги використання порошкових дротів з модифікуючими домішками

Порошкові дроти дають змогу вводити до складу покриття такі елементи, як хром, ванадій і молібден, які утворюють карбідні фази, які значно підвищують твердість матеріалу. Це особливо важливо для ріжучих елементів котрі піддаються постійним механічним навантаженням і абразивному впливу ґрунту [39].

Залежно від умов експлуатації можлива зміна складу порошкового дроту, що дає змогу адаптувати властивості покриття. Наприклад, додавання карбиду вольфраму сприяє значному підвищенню зносостійкості, тоді як легування нікелем

покращує корозійну стійкість. Широкий спектр хімічного складу порошкових дротів дає можливість варіювати легувальні елементи і модифікуючі добавки для отримання покриття з необхідними властивостями. Модифікуючі домішки, що вводяться в рідкий метал, зберігаються в ньому, що дає змогу домогтися високої стабільності та ефективності отриманого покриття [40].

Використання стандартних модифікаторів, таких як титан, бор і ніобій, вже довело свою корисність у підвищенні міцності та стійкості до утворення тріщин. Останнім часом тривають активні дослідження щодо впровадження нових модифікаторів, таких як бентонітова глина, ферохром, високохромистий чавун і карбід ніобію. Ці добавки дають змогу поліпшити мікроструктуру покриття, підвищити його твердість і значно збільшити опір абразивному зносу (див. додаток А, таблиця А.1). Зокрема, додавання бентонітової глини сприяє поліпшенню рівномірності структури покриття, а ферохром і високохромистий чавун підвищують його стійкість до корозії та механічних навантажень [41].

На особливу увагу заслуговує використання карбіду кремнію як перспективної тугоплавкої сполуки. Карбід кремнію має високу твердість і стійкість до зношування, що робить його ідеальним кандидатом для подальших широких досліджень у сфері поліпшення властивостей покриттів. Введення карбіду кремнію до складу порошкових дротів дає змогу домогтися підвищення термостійкості покриття і його стійкості до екстремальних умов експлуатації. Це відкриває нові перспективи для створення покриттів, здатних витримувати інтенсивні механічні навантаження. Карбід кремнію також вирізняється високою хімічною інертністю, що робить його стійким до агресивних середовищ, включно з впливом кислот і лугів, що особливо корисно для деталей, які працюють у складних агротехнічних умовах [42].

Електрошлакове наплавлення забезпечує міцне з'єднання наплавлюваного матеріалу з основним металом за рахунок тривалого перебування в розплавленому стані. Це сприяє глибокій дифузії елементів і формуванню міцного металургійного зв'язку, що запобігає розтріскуванню і відшаруванню покриття за високих механічних навантажень. Додаткове легування в процесі наплавлення також сприяє

поліпшенню характеристик з'єднання, забезпечуючи його стійкість за тривалих експлуатаційних навантажень [12].

Технологія дає змогу рівномірно нагрівати і повільно охолоджувати деталь, що знижує внутрішню напругу і ризик утворення тріщин. Це особливо важливо для великогабаритних деталей, таких як плуги та культиватори, де важливо зберігати геометричну точність і міцність. Застосування спеціальних режимів охолодження та використання додаткових флюсів дає змогу зменшити ризик виникнення термічних дефектів і підвищити стабільність покриття.

Використання порошкових дротів дає змогу домогтися високої швидкості наплавлення, що робить процес економічно вигідним для масового відновлення і зміцнення деталей. Застосування доступних матеріалів і флюсів також сприяє зниженню витрат. Економічні аспекти використання електрошлакового наплавлення включають зниження витрат на заміну зношених деталей, зменшення часу простою техніки завдяки швидкому відновленню і підвищенню довговічності оброблених деталей [43].

Використання нових модифікаторів, таких як ферохром і карбід ніобію, також допомагає оптимізувати витрати за рахунок поліпшення експлуатаційних характеристик покриття, що знижує частоту технічного обслуговування і замін деталей [44-45].

Використання сучасних модифікаторів, таких як бентонітова глина, підвищує екологічну безпеку процесу, оскільки ці матеріали є природними і менш токсичними. Завдяки цьому електрошлакове наплавлення стає привабливим вибором для підприємств, які прагнуть поєднати надійність обладнання з екологічною відповідальністю [46].

Додатковою перевагою є можливість повторного відновлення деталей без значної втрати їхніх механічних властивостей. Це зменшує капітальні витрати на технічне обслуговування та підвищує стійкість експлуатації обладнання, забезпечуючи довготривалу роботу техніки навіть за інтенсивного використання [47-50].

Використання нових модифікаторів, таких як карбід кремнію і ферохром,

відкриває нові горизонти для підвищення ефективності та довговічності покриттів, що робить електрошлакове наплавлення перспективною технологією у галузі сільськогосподарського виробництва [51-52].

1.2.4. Застосування електрошлакового наплавлення при відновленні деталей сільськогосподарської техніки

Якими б високими не були властивості одержуваного покриття, на його працездатність головним чином буде впливати міцність зчеплення з основою [53-54]. Цей основоположний параметр залежить від матеріалу деталі, внутрішньої напруги, складу модифікатора і режиму електролізу. Підготовка поверхні перед проведенням електрошлакового наплавлення не потребує застосування спеціальних технологічних операцій; достатньо виконати очищення поверхні від іржі та здійснити її знежирення.

Ванна рідкого шлаку, маючи меншу, ніж у розплавленого металу, густину, постійно перебуває над поверхнею металевого розплаву, захищаючи його від впливу повітря. Краплі присадного металу, проходячи через шлак, піддаються металургійній обробці і очищаються від шкідливих та неметалевих домішок. Напрямок конвекції шлаку залежить від діаметра електроду при наплавленні тонким електродом переважає вимушена електромагнітна конвекція, шлак опускається біля електрода і піднімається по краях шлакової ванни, тоді як при використанні товстого електрода переважає вільна теплова конвекція, шлак опускається по краях шлакової ванни і піднімається поблизу електрода [55-56].

Електроди можуть бути нерухомими, і їх розплавлення буде здійснюватися внаслідок постійного підняття шлакової і металеві ванн. Якщо ж електроди рухомі, то їх по мірі розплавлення безперервно подають у шлакову ванну.

Способи здійснення електрошлакового наплавлення можна класифікувати за різними ознаками, з яких основними є технологічні [57]. У процесі ЕШН розрізняють два головні способи формування наплавленого металу. Один з них передбачає вільне формування розплаву рідкої ванни на плоскій горизонтальній поверхні, а другий полягає у використанні спеціальних формувальних пристроїв –

кристалізаторів різної геометричної форми (круглі, квадратні тощо), виготовлених переважно з міді. У них розплавлений метал кристалізується в замкнутій порожнині. Для запобігання перегріванню кристалізатор потрібно охолоджувати проточною водою, а його поверхні, які контактують з розплавами шлаку і металу, покривають графітом та іншими матеріалами, оберігаючи їх від руйнівної дії електрохімічної ерозії.

За початковою стадією електрошлакового процесу розрізняють «твердий» старт (наведення шлакової ванни відбувається безпосередньо в зоні наплавлення) і «рідкий» старт (у порожнину кристалізатора заливають заздалегідь приготований шлак).

Сутність ЕШН з примусовим формуванням шару наплавлення полягає в наступному. У шлакову ванну, розташовану в порожнині, утвореною поверхнею наплавлення і водоохолоджуванім кристалізатором, подається електродний присадний матеріал. Струм, проходячи між електродом і наплавленим металом через рідкий шлак, розігріває його до високої температури, достатньої для розплавлення присадного матеріалу (від 1650°C до понад 2000 °C) і оплавлення поверхні виробу. Розплавлений метал опускається на дно шлакової ванни і після процесу кристалізації утворює наплавлений шар [58].

У випадку застосування примусового формування наплавленого шару використовують як стаціонарні, так і рухомі формувальні прилади – повзуни і кристалізатори. Повзуни мають просту геометричну форму, в переважній більшості у вигляді прямокутних пластин, що охолоджуються водою. До кристалізаторів належать формувальні прилади розвиненої форми, переважно, замкнутого перерізу. Кристалізатори можуть бути електрично нейтральними, або струмопровідними.

В якості присадного матеріалу використовуються один, або декілька електродів з суцільних, або порошкових дротів, стрічки, пластинчасті електроди великого перерізу, плавкі мундштуки і композиційні дроти. При використанні неплавких (графітових) електродів можливе застосування електронейтральних некомпактних присадних матеріалів, дробу, або рідкого металу [59].

При ЕШН композитних покриттів в шлакову ванну засипають зверху гранульований твердий сплав, температура плавлення якого вища за температуру плавлення металу–зв'язки, необхідність застосування якого обумовлена неприпустимістю вторинного розплавлення деяких твердих сплавів, через, що наплавлення монопокриттів з таких матеріалів неможлива. Твердість і зносостійкість забезпечується частинками твердого сплаву, а метал–зв'язка утримує їх на поверхні деталі.

Основні переваги використання ЕШН для відновлення деталей сільськогосподарської техніки:

- міцність зчеплення наплавленого шару з матеріалом основи;
- стійкість процесу наплавлення у широких межах густини струму (від 0,2 до 300 А/мм²);
- висока продуктивність (до 150 кг наплавленого металу в годину);
- економічність процесу (для наплавлення рівної кількості електродного металу електроенергії витрачається на 15...20% менше, ніж при дуговому наплавленні);
- забезпечується можливість якісного наплавлення сплавів, що характеризуються підвищеною схильністю до утворення тріщин;
- можливість наплавлення за один прохід шарів великої товщини (від декількох міліметрів до десятків сантиметрів);
- рафінування (очищення) металу від шкідливих домішок і високий захист ванни рідкого металу від впливу повітря;
- можливість надавати наплавленому металу необхідної форми та поєднувати з електрошлаковим зварюванням.

Недоліки:

- велика погонна енергія процесу викликає перегрівання основного металу і зони термічного впливу;
- велика тривалість підготовчих операцій.

1.2.5. Можливості застосування сучасних способів ЕШН при відновленні деталей, які працюють в умовах пришвидшеного абразивного зношування

Тепло для розплавлення основного та присадного металу генерується в шлаковій ванні, що надає електрошлаковому наплавленню унікальні переваги перед іншими методами. [60-61]. Насамперед, це висока продуктивність в умовах великосерійного відновлення, яка супроводжується мінімальною глибиною проплавлення виробу та можливістю здійснення якісної металургійної і механічної обробки наплавленого металу, а також отримання високоякісних зносостійких шарів будь-якого хімічного складу.

Існує два основних фактори, що визначають якість наплавленого металу електрошлаковою технологією, по-перше це орієнтована кристалізація, а по-друге можливість рафінування металу при взаємодії його з перегрітим шлаком [62]. Також при здійсненні процесу ЕШН спостерігається зразкова рівність теплоти, що підводиться і відводиться з одиниці поверхні фронту кристалізації в одиницю часу. Такий показник зумовлює сталість форми та швидкості переміщення фронту кристалізації і дозволяє отримати спрямоване, послідовне розташування кристалів, що сприяє підвищенню зносостійкості наплавленого металу.

Вибір способу наплавлення визначається розмірами, формою виробу який відновлюють, типом і структурою наплавленого металу, а також економічними показниками технологічного процесу наплавлення. Залежно від застосовуваних матеріалів, просторового розташування поверхні, що наплавляється, і прийомів наплавлення розрізняють велику кількість способів ЕШН як з вільним так і примусовим формуванням наплавленого металу, широко освітлених у науково-технічних літературних джерелах [63–64].

Відомий спосіб здійснення процесу ЕШН в горизонтальному положенні [65], що полягає у формуванні наплавленого шару металу в спеціальному пристрої (струмопідвідному кристалізаторі), який містить водоохолоджуваний кокіль-кристалізатор, в замкненому обсязі якого проводиться плавлення флюсу та електродних і модифікуючих матеріалів (рис. 1.1). До стінки кокіля-кристалізатора з боку порожнини для виходу наплавленого металу примикає

водоохолоджуваний валок–кристалізатор, який покращує умови кристалізації та забезпечує отримання шару наплавленого металу відповідно заданої товщини.

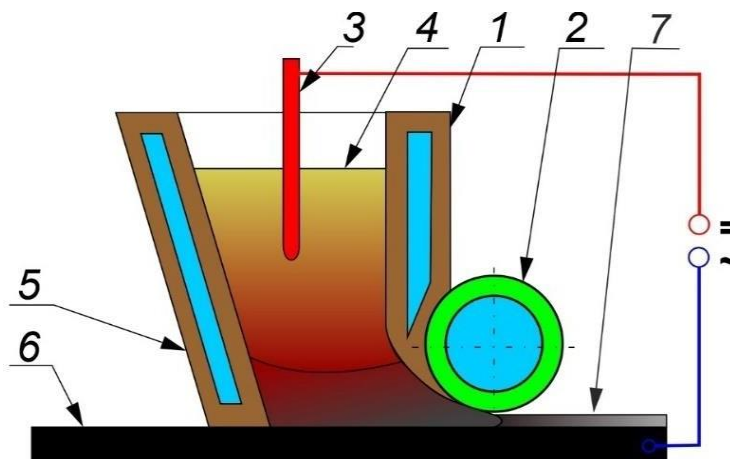


Рисунок 1.1 – Схема здійснення процесу горизонтальної електрошлакового наплавлення плоскої поверхні [66]: 1 – кокіль–кристалізатор; 2 – валок–кристалізатор; 3 – наплавочний дріт; 4 – шлакова ванна; 5 – металева ванна; 6 – наплавлений метал

Наведена конструкція пристрою, покликана вирішити зазначену проблему, яка застосовується у здійсненні способу ЕШН тонких шарів металу на горизонтальні поверхні, призначеному для отримання багатошарових виробів та відновлення зношених поверхонь.

У даному способі шлакову ванну наводять в заданому об'ємі, обмеженому поверхнею, що наплавляється, і водоохолоджуваним кристалізатором, подають в шлак електродний матеріал (модифікуючі домішки), а потім переміщують кристалізатор щодо поверхні яка наплавляється (рис. 1.2). Рідку ванну розплавленого металу, що утворилася при плавленні в шлаку присадного матеріалу, додатково підігрівають вихровими струмами за допомогою індуктора. За рахунок такого теплового впливу час знаходження розплавленого металу в перегрітому стані збільшується, що обумовлює збереження достатньої рідини плинності металу до його надходження в зазор між поверхнею, що наплавляється, і охолоджувачем. В цій області починається кристалізація металу з формуванням шару металу із необхідними товщиною та глибиною проплавлення основного металу.

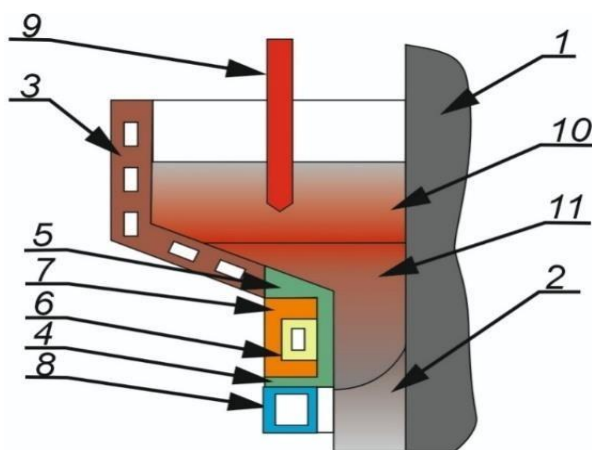


Рисунок 1.2 – Схема здійснення процесу електрошлакового наплавлення: 1 – виріб; 2 – наплавлений метал; 3 – кристалізатор; 4 – електроізоляційна оболонка; 5 – теплоізоляційна оболонка; 6 – провід, що індукує; 7 – магнітопровід; 8 – охолоджувач; 9 – електрод; 10 – шлакова ванна; 11 – металева ванна

За необхідності збільшення ширини шару металу, що наплавляється, слід збільшувати обсяг шлакової ванни до відповідних меж. Для підтримки шлакової ванни в розплавленому і перегрітому стані при такому способі, теплової потужності, що вводиться в шлак, від електродного дроту буде недостатньо. Через локальне перегрівання при електродного об'єму шлаку, температура у шлаковій ванні буде розподілена нерівномірно, що призведе до різної величини проплавлення основного металу. Для підтримки в перегрітому стані збільшеного обсягу ванни розплавленого металу, необхідно значно збільшити потужність індуктора, що підвищує енерговитратність такого процесу.

Для наплавлення в горизонтальному положенні виробів з плоскою поверхнею також відомий спосіб ЕШН в рухомому панельному трисекційному кристалізаторі з розширеною струмопідвідною верхньою секцією [67]. Така конструкція кристалізатора (рис. 1.3) обладнана двома струмопідводами до верхньої секції, що забезпечує більш рівномірний розподіл температурного поля у шлаковій ванні.

Початок процесу наплавлення проводиться з заливкою попередньо розплавленого в графітовому тиглі шлаку в зазор, обмежений площиною заготовки та внутрішніми стінками кристалізатора, в нижній частині якого розташована

стартова пластина. Присадний матеріал, подається в шлакову ванну з дозатора, і розплавляючись, утворює шар наплавленого металу в нижній формуючій секції кристалізатора.

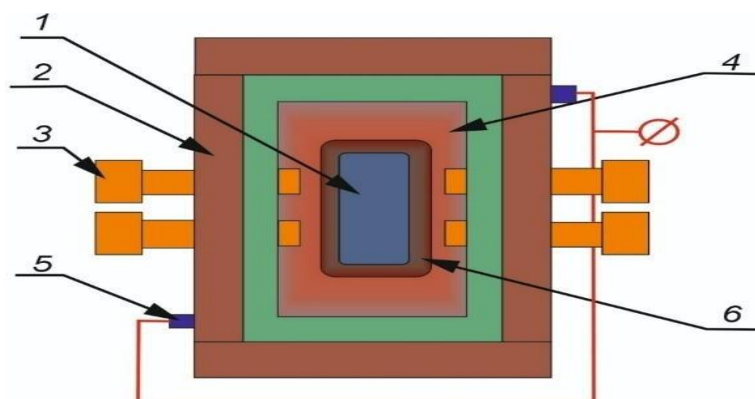


Рисунок 1.3 – Схема процесу електрошлакового наплавлення плоских заготовок у струмопідвідному кристалізаторі з квадратною формуючою секцією [68]: 1 – заготовка, що наплавляється; 2 – панель струмопідвідної секції кристалізатора; 3 – дозатор; 4 – шлакова ванна; 5 – струмопідведення; 6 – наплавлений метал

Головним недоліком такого способу наплавлення є нерівномірне проплавлення виробу, яке в залежності від режимів наплавлення може змінюватися від 0 до 10 мм, при цьому найбільше проплавлення спостерігається на кутах виробу і в зоні струмопідведення. Це зумовлено нерівномірним, обертанням шлакової ванни в горизонтальній площині по периметру заготовки, яка наплавляється, що не дозволяє забезпечити однорідний розподіл тепла. Основна причина у тому, що у кутах струмопідвідного кристалізатора з квадратною формуючою секцією створюється значний опір руху шлаку, причому умови теплопередачі у цих зонах відрізняються від умов теплопередачі на площині заготовки.

Для отримання зносостійких та твердих наплавлених шарів застосовують процес ЕШН з використанням пластинчастого електрода [69]. Принципова схема наплавлення представлена на рис. 1.4 а. В даному способі наплавлення здійснюють розплавлення пластинчастих електродів різних конструкцій (рис. 1.4 б) у шлаковій ванні, обмеженій вертикально розташованим виробом, що наплавляється, і стінкою водоохолоджуваного кристалізатора.

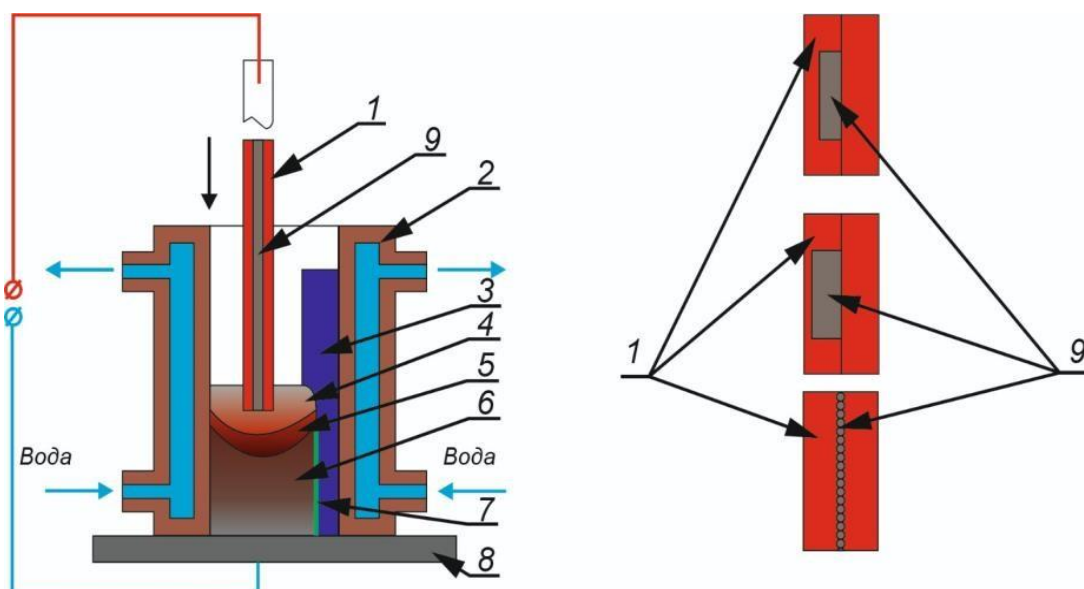


Рисунок 1.4 – Схема процесу електрошлакового наплавлення пластинчастими електродами [70]: 1 – складовий пластинчастий електрод; 2 – водоохолоджуваний кристалізатор; 3 – виріб, що відновлюється; 4, 5 – шлакова та металева ванни; 6 – наплавлений метал; 7 – лінія сплавлення; 8 – піддон; 9 – шихтовий матеріал

Відомий спосіб введення шихти з модифікуючими домішками в шлакову ванну через порожнину пластинчастого електрода, що складається з двох половин, одна з яких має паз, геометричні розміри якого визначаються фізичними характеристиками шихти, що вводиться. Для отримання зносостійкого наплавленого металу в шихту вводять модифікуючі домішки особливого хімічного складу. Замість безпосереднього введення модифікуючої шихти через порожнину електрода у процесі наплавлення можливе використання складових електродів, у внутрішній порожнині яких міститься необхідна кількість ущільненої модифікуючої шихти.

Відомо багато різних способів ЕШН рідким присадним металом [71-72], при яких у шлакову ванну, що підігрівається електродами які не плавляться, або струмопідвідною секцією кристалізатора, дозовано, або постійно подають рідкий присадний метал (рис. 1.5). Технологія ЕШН рідким присадним матеріалом дозволяє формувати наплавлені шари завтовшки від 10 мм і більше.

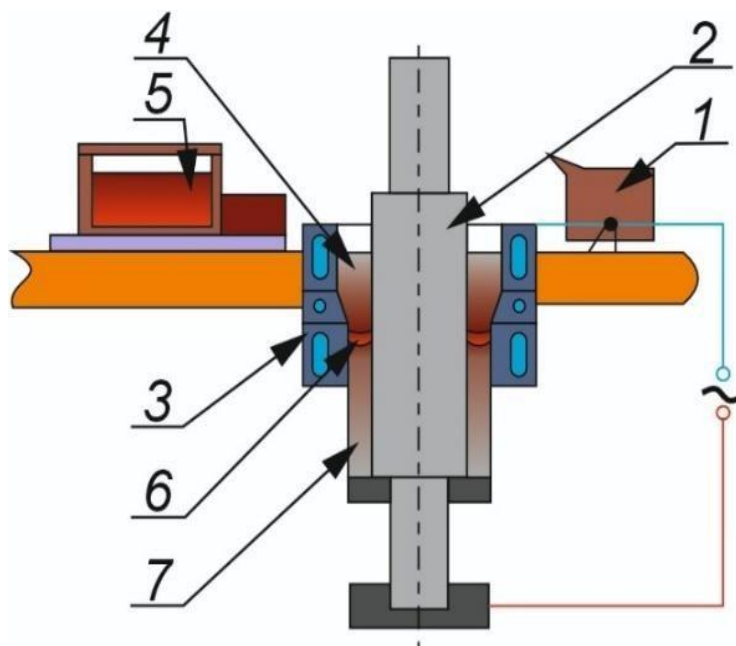


Рисунок 1.5 – Схема процесу електрошлакового наплавлення рідким присадним металом у струмопідвідному кристалізаторі [73]: 1 – ківш для шлаку; 2 – виріб, що наплавляється; 3 – кристалізатор; 4 – шлакова ванна; 5 – дозатор рідкого металу; 6 – металева ванна; 7 – наплавлений метал

Важливими недоліками такого способу є доволі велика товщина наплавленого шару, а також складність армування наплавленого металу модифікуючими компонентами через їхнє значне розчинення в перегрітому металевому розплаві, температура якого може сягати приблизно 1700 °С.

Застосування процесів ЕШН без допомоги спеціальних приладів, які формують наплавлений метал, здійснюється з використанням електродних стрічок. Ці процеси наплавлення доволі змістовно вивчені як вітчизняними [74-77], так і закордонними дослідниками [75-78].

Здійснення процесу ЕШН електродною стрічкою (рис. 1.6) характеризується доволі великим обсягом шлакової ванни, яка рухається попереду електродної стрічки, плавить основний метал та метал стрічки. Реакційна зона наплавлення обмежена з одного боку шаром флюсу, що попередньо подається перед стрічкою на метал, з іншого боку атмосферою, металевою ванною, наплавленим металом і шлаковою кіркою [79]. Метал наплавочної ванни при кристалізації утворює тонкий шар наплавленого металу з невеликою часткою участі металу виробу.

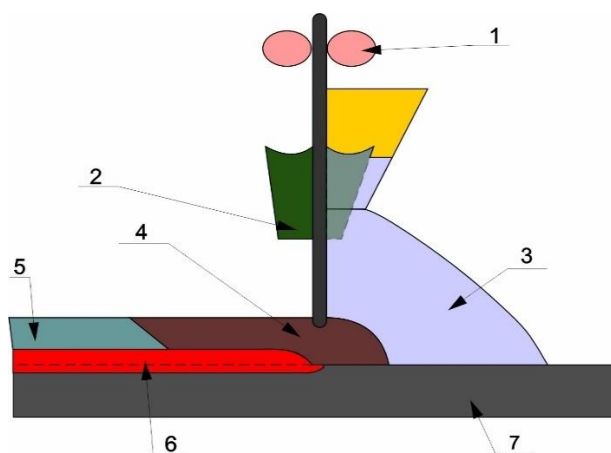


Рисунок 1.6 – Схема процесу електрошлакового наплавлення однією електродною стрічкою: 1 – стрічкоподавальний механізм; 2 – водоохолоджуваний механізм з тугоплавкими губками; 3 – флюс; 4 – рідкий шлак; 5 – затверділий шлак; 6 – наплавлений метал; 7 – основний метал

Можливість забезпечити більшу продуктивність наплавлення і зменшити частку участі основного металу в наплавленому, дозволяє спосіб ЕШН двома близькими стрічками. При такій схемі наплавлення стрічки розташовуються із зазором 15...20 мм, які під дією пінч-ефекту піднімають рідкий шлак.

Нагрів та плавлення стрічки відбувається виключно за рахунок теплопередачі від гарячого шлаку, температура якого становить близько 2000°C в центрі і до 1650°C біля країв стрічок. Великий вплив на характер процесу ЕШН надає величина зазору, яка залежить від ширини стрічок. При замалому зазорі шлакова ванна між стрічками перегрівається і починає кипіти, з'являється дуговий процес. Тоді як при надмірному збільшенні зазору збільшується площа поверхні шлакової ванни та знижується її температура, відповідно зростає його опір шлаку і також можливе виникнення дугового процесу.

Головною перевагою проаналізованих процесів ЕШН з використанням електродних стрічок є можливість наплавлення тонких шарів металу за невеликої глибини проплавлення виробу. Однак при наплавленні шарів великої ширини виникають труднощі пов'язані з негативним впливом магнітних полів на гідравлічні течії розплаву у наплавочній ванні, що призводить до необхідності магнітного управління формуванням металу та ускладнення наплавного

обладнання [80].

Однією з основних причин, що стримує поширення ЕШН електродними стрічками, є обмеження за типом металу, що наплавляється, яке пов'язане з неможливістю наплавлення складнолегованих сплавів. Відомі дослідження [81-84], покликані вирішити цю проблему шляхом введення у наплавочну ванну додаткових наплавних матеріалів (модифікаторів) у вигляді порошкоподібної шихти, або порошкових дротів, що містять у своєму складі порошки модифікуючих домішок особливого хімічного складу. Досліджували різні способи застосування цих матеріалів: введення модифікуючої шихти в шлакову ванну з електродною стрічкою, за електронейтральною присадною стрічкою; подачу порошкового дроту у шлак позаду електродної стрічки; спільне використання електродної стрічки, модифікуючої шихти та порошкового дроту.

Найкращі результати, з погляду рівномірності розподілу модифікуючих частинок, твердості та зносостійкості наплавленого металу, отримані при спільному введенні в шлакову ванну шихтового матеріалу та порошкового дроту.

1.3. Матеріали та модифікатори для підвищення зносостійкості

1.3.1. Застосування модифікуючих домішок для підвищення зносостійкості відновлювальних покриттів

Однією з найважливіших переваг використання модифікуючих домішок є можливість цілеспрямованої зміни мікроструктури покриття. Додавання домішок, таких як хром, молібден, нікель, ванадій і бор, дає змогу формувати спеціальні фази в структурі покриття, які підвищують його твердість і стійкість до абразивного зносу. Наприклад, додавання хрому сприяє утворенню карбідних фаз, що підвищує зносостійкість покриття в умовах інтенсивного тертя. Ванадій і бор, зі свого боку, сприяють формуванню дрібнозернистої структури, що покращує характеристики міцності покриття і підвищують його стійкість до ударних навантажень [85].

Модифікатори також дають змогу регулювати параметри теплофізичної обробки покриття, такі як температура плавлення і теплопровідність. Це особливо важливо при наплавленні покриттів на деталі складної форми, або зі змінною

товщиною, де необхідно забезпечити рівномірний розподіл тепла і мінімізувати ризик утворення внутрішніх напружень і тріщин. Наприклад, нікель може використовуватися для поліпшення пластичності покриття і зниження ризику утворення тріщин під час термічного впливу, що особливо актуально для деталей, які працюють в умовах циклічних теплових навантажень [86].

Ще одним важливим аспектом застосування модифікуючих домішок є підвищення корозійної стійкості покриттів. Легувальні елементи, такі як нікель, алюміній і мідь, дають змогу значно поліпшити стійкість покриття до впливу агресивних середовищ, таких як вода, хімікати та добрива, які часто трапляються в сільськогосподарському виробництві. Нікель утворює на поверхні покриття пасивуючу плівку, яка захищає метал від корозії і тим самим збільшує термін служби деталей [87].

Використання модифікуючих домішок також сприяє поліпшенню адгезійних властивостей покриття. Додавання елементів, таких як титан і цирконій, сприяє поліпшенню зчеплення покриття з основним металом завдяки формуванню перехідних шарів, що мають високу хімічну активність [88]. Це забезпечує надійну адгезію покриття до основи, що знижує ризик його відшаровування і збільшує довговічність деталі в умовах впливу вібраційних і динамічних навантажень.

Крім того, модифікуючі домішки можуть бути використані для створення багатошарових покриттів з градієнтними властивостями. Такий підхід дає змогу комбінувати шари з різними характеристиками, створюючи покриття, які мають одночасно високу твердість, зносостійкість і пластичність. Наприклад, внутрішній шар покриття може містити модифікатори, що підвищують пластичність і стійкість до ударних навантажень, тоді як зовнішній шар може бути збагачений карбідами для підвищення зносостійкості. Це особливо ефективно для ріжучих елементів, які піддаються як абразивному зносу, так і ударним впливам [89].

Застосування наноматеріалів як модифікаторів відкриває нові можливості для підвищення стійкості відновлювальних покриттів. Наночастинки, такі як нанокераміка, нанокарбіди і нанонітриди, здатні значно поліпшити механічні властивості покриття за рахунок формування ультрадисперсної структури з

високою щільністю. Наприклад, додавання карбіду кремнію дає змогу підвищити зносостійкість покриття в декілька разів, що особливо важливо для ріжучих елементів, які працюють в умовах інтенсивного абразивного зносу [90]. Наночастинки також сприяють зниженню коефіцієнта тертя, що зменшує енергоємність процесу різання та знижує зношування ріжучих елементів.

Ще одним важливим аспектом застосування модифікаторів є можливість поліпшення технологічності процесу нанесення покриттів. Це знижуватиме в'язкість розплаву і покращуватиме його плинність, що сприяє більш рівномірному розподілу матеріалу поверхню деталі і зменшуватиме ризик утворення дефектів, таких як пористість і тріщини [91].

Важливим напрямком застосування модифікуючих домішок є також поліпшення зносостійкості покриттів за граничного тертя. Додавання дисульфиду молібдену та інших твердих мастил до складу покриттів дає змогу значно знизити коефіцієнт тертя, що зменшує зношування та підвищує коефіцієнт дії роботи вузлів тертя [92].

Також використання модифікуючих домішок дає змогу поліпшити ударну в'язкість покриття, що особливо важливо для ріжучих елементів, які працюють в умовах динамічних і ударних навантажень. Введення елементів, таких як ванадій і ніобій, сприяє формуванню дрібнозернистої та однорідної структури, яка має високу здатність до поглинання енергії удару [93]. Це забезпечує підвищення опірності покриття до розтріскування і відшаровування, що особливо важливо для інструментів і деталей, які працюють у важких умовах експлуатації.

Модифікуючі домішки дають змогу оптимізувати технологію нанесення покриттів, знижуючи енерговитрати і збільшуючи продуктивність процесу.

1.3.2. Стандартні модифікатори для підвищення якості металу та аналіз їх фізико–механічних властивостей

В сучасному виробництві [93] існує багато металургійних способів модифікування рідкого металу для підвищення його експлуатаційної стійкості. Ці способи засновані, по-перше, на більш повному видаленні з наплавленого металу

газів і шкідливих неметалевих включень, і, по-друге на зміну хімічного складу металу за рахунок введення в нього спеціальних легуючих елементів, що покращують його показники зносостійкості та твердості.

У наплавленому металі завжди присутні гази та неметалеві включення, які можуть суттєво впливати на його механічні та експлуатаційні властивості навіть у мінімальних кількостях. Основними методами зниження їхнього вмісту є електрошлаковий переплав, вакуумна дегазація, рафінування синтетичними шлаками та використання розкислювачів. Ці заходи забезпечують поліпшення якості металу та його довговічності [94].

При електрошлаковому наплавленні, з металу, який підлягає обробці, спочатку виготовляють наплавочні дроти заповнені модифікуючою шихтою особливого хімічного складу, які потім опускають в шар робочого флюсу, котрий володіє високим опором. При проходженні електричного струму робочий флюс починає плавитися і утворює шлак, який виділяє тепло. Проходячи через рідкий шлак, краплі металу очищаються від шкідливих домішок і утворюють високоякісний металевий злиток [95].

Рафінування рідким синтетичним шлаком покращує макроструктуру сталі та видаляє до 60% сірки. Цей спосіб знайшов широке застосування при обробці конвертерної та мартенівської сталі, а також електрометалу [96].

Вакуумна дегазація – один з найбільш поширених способів підвищення якості наплавленого металу полягає у видаленні зі сплаву водню, кисню та азоту. Під час процесу вакуумування досягається суттєве підвищення механічних властивостей наплавленого металу. Встановлено, що при вакуумуванні струменя вміст водню в металі знижується на 50–60%, а вміст азоту до 40%. В результаті взаємодії з вуглецем метал очищається від кисневих оксидних включень [97]

Також одним з найбільш поширених способів вакуумування є вакуумно–дуговий переплав в печах з витратним електродом. При цьому виплавлений метал переплавляють повторно у вакуумному просторі за допомогою електричної дуги. В результаті оплавлення металу у вакуумі відбувається дегазація і він набуває нові, більш високі механічні властивості [98].

Сутність вакуумування в електронно–променевих печах полягає в тому, що на переплавляємий метал, який знаходиться у вакуумній камері, направляють електронні промені з катодів. У процесі впливу високої температури метал розплавляється та рафінується у вакуумі [98].

Істотний вплив на властивості металів здійснює процес легування. Це призводить до зміни не тільки механічних, хімічних і технологічних, а й спеціальних властивостей металів. В якості основних легуючих елементів в більшості випадків можуть бути: кремній, марганець, нікель, хром, вольфрам, алюміній, молібден, ванадій, титан, кобальт, мідь та інші метали [99].

Різні легуючі елементи, що вводяться в наплавлений метал, неоднозначно впливають на його властивості. Наприклад, кремній є ефективним розкислювачем котрий застосовується при отриманні «спокійного» металу, в якості легуючого елементу вводиться в рідку ванну для підвищення міцності, стійкості до корозії і жаростійкості наплавленого металу. Марганець – найважливіший компонент металу, застосування його як легуючого елемента сприяє підвищенню прокалювання та характеризує глибину загартованої зони при подальшій термічній обробці. При введенні в сталь 10–12% марганцю вона розмагнічується. Нікель в якості модифікуючої домішки підвищує міцність та ударну в'язкість металу, збільшує його прокалювання і опір виникненню корозійних процесів. Хром підвищує показники твердості та міцності, зберігає ударну в'язкість металів та сплавів, сприяє опору на стирання, значно збільшує корозійну стійкість. При введенні в сталь більше 10% хрому вона стає нержавіючою. Вольфрам підвищує твердість легованих сталей і покращує зносостійкість металу який працює в умовах пришвидшеного абразивного зношування, а також забезпечує кращі ріжучі властивості інструментальної сталі. Алюміній підвищує жаростійкість і корозійну стійкість металу, а молібден покращує показники міцності, пружності, зносостійкості і ряду спеціальних властивостей металу. Ванадій в якості модифікатора підвищує твердість, міцність і щільність сталей та чавунів [99].

Особливим чином на властивості сталі впливає вуглець, що входить до її складу. Зі збільшенням вмісту вуглецю до 1,2% показники твердості і міцності

будуть підвищуватися, але знижуватиметься пластичність і ударна в'язкість, при цьому погіршаться такі технологічні властивості сталей як: гнучкість, зварюваність, обробка різанням, проте одночасно поліпшуються ливарні властивості сталей.

Перелік наплавних сплавів, що застосовуються в різних галузях промисловості в даний час, дуже широкий [100].

Основна складність розробки наплавочних матеріалів полягає у науковому обґрунтуванні хімічного складу сплаву на основі вивчення умов роботи, зміни властивостей та кінетики руйнування металу поверхневих шарів виробів, що зношуються. Металознавчі проблеми створення наплавочних сплавів зводяться до вивчення наступних аспектів: умов утворення різних типів сполук (металів та металоїдів); утворення металевих розчинів (рідких та твердих); взаємодії між металоїдами та утворення твердих розчинів, а також потрібних та більше сполук металів; природи хімічних зв'язків в розчинах та з'єднаннях металів [101].

Зміцнювальний наплавлений метал та зносостійкі сполуки можна поділити на чотири основні групи: нітриди: TiN , ZrN , BN , AlN та ін.; бориди: HfB , ZrB_2 , NbB_2 , TaB_2 , CrB_2 та ін.; карбіди: ZrC , HfC , TaC , NbC , TiC , Cr_{23}C_6 та ін.; силіциди: WSi_2 , MoSi_2 , NbSi_2 , TiSi_2 тощо.

В наплавленому металі можуть бути присутні складні карбіди і бориди декількох металів, а також комплексні хімічні сполуки: карбобориди, карбонітриди та ін. Наплавлений метал, призначений для роботи в умовах значного абразивного зношування, в переважній більшості легують карбідо- та боридоутворюючими елементами, які утворюють з'єднання, що надають найбільш сильний вплив на його зносостійкість [102].

1.3.3. Використання при наплавленні абразивостійких сплавів на основі карбідного, боридного та карбоборидного зміцнення

Використовувані в даний час вітчизняні та закордонні наплавні матеріали, призначені для отримання зносостійкого металу, переважно формують гетерогенні сплави [103]. При цьому стійкість наплавленого металу проти абразивного

зношування визначається твердістю, структурним станом і ступенем легування основи, а також складом, кількістю та твердістю зміцнюючої, або легуючої фази. При цьому зміна кількості зміцнюючої фази більш істотно впливає на зносостійкість, ніж агрегатна твердість, отримана тільки шляхом збільшення твердості матриці [104].

Структурний стан наплавленого металу визначається не тільки його хімічним складом, а й залежить від способу наплавлення, типу наплавочного матеріалу, режиму наплавлення, умов кристалізації рідкої ванни та режимів термічної обробки. Структури металу можуть сильно відрізнятися як за типами твердого розчину, так і за складом, розміром, формою та розташуванням зміцнювальних фаз у структурі.

Основою структури зносостійких сплавів є матриця, в якій знаходяться зміцнювальні фази. Матриця сплаву виконує дві функції: по-перше, вона сама служить елементом структури, від якого залежить зносостійкість наплавленого металу, а по-друге, вона повинна сприяти надійному закріпленню зміцнювальних фаз, протистояти їх викришуванню під дією абразиву та ударних навантажень.

Від типу матриці наплавленого металу, її стану, швидкості утворення та об'єднання тріщин у металі під дією різних факторів та середовища, багато в чому залежить швидкість зношування всього нанесеного металу [104-105]. Про зносостійкість наплавленого металу з матрицями різного хімічного складу можна будувати висновки по діаграмі наведеної на рис. 1.7. [105].

На діаграмі зносостійкість еталонного зразка металу з феритною структурою прийнята за одиницю, оскільки такий тип структури не вважається зносостійким і застосовується лише для наплавлення. Мартенситна матриця має знижену стійкість до ударів внаслідок недостатньої пластичності, що легко прорізується абразивними частинками, при цьому у ній значною мірою створюються сприятливі умови для викришування карбідів.

Аустенітна матриця при абразивному зношуванні малоефективна, оскільки погано чинить опір зносу при високих тисках абразиву, при цьому вона добре закріплює карбіди, запобігаючи їх викришуванню [106]. У ледебуритних

високолегованих сплавах часто утворюється сітка евтектичних карбідів скелетоподібної форми. Зносостійкість сплавів з такою структурою вище, ніж при дрібних рівномірно розподілених карбідах, або при їх рядковому розташуванні.

У заевтектоїдному наплавленому металі карбіди часто утворюють сітку по межах зерен. За наявності аустенітно–мартенситних зерен, оточених карбідною сіткою, сплави можуть мати досить високу зносостійкість [107].

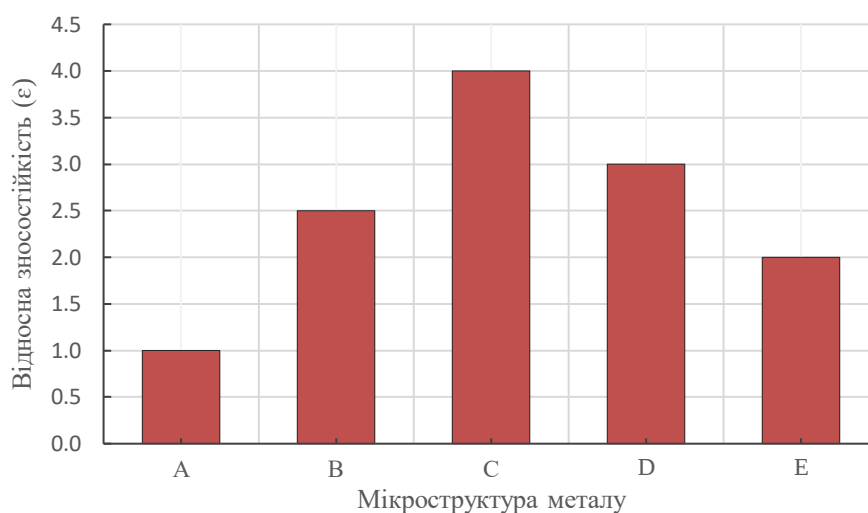


Рисунок 1.7 – Діаграма відносної зносостійкості (ε) наплавленого металу при зношуванні закріпленим абразивом: А – ферит; В – перліт з карбідами; С – мартенсит з карбідами; D – аустеніт з карбідами; Е – нестабільний аустеніт з карбідами

Дуже ефективні за умов пришвидшеного абразивного зношування, типи наплавленого металу з матрицею із нестабільного аустеніту. Перетворення нестабільного аустеніту в процесі деформації абразивом в мартенсит, супроводжується збільшенням обсягу, появою стискаючих напружень у металі, що підвищує його твердість та втомну міцність. Мартенсит у сплавах цього типу низьковуглецевий і тому досить пластичний.

Рациональне поєднання кількості аустеніту та мартенситу, що визначає отримання заданих властивостей наплавленого металу, залежить від складу фаз, легуваності твердого розчину та особливостей побудови структури доевтектичного сплаву, що залежить від способу та технології наплавлення. У легуваних зносостійких сплавах з мартенситною основою, збільшення кількості аустеніту

підвищує зносостійкість за рахунок кращого закріплення зміцнювальних фаз і сприяє кращій ударостійкості через суттєве збільшення пластичності [108].

Тверді фази, як правило, мають високу твердість і температуру плавлення, при цьому бориди за твердістю та зносостійкістю дещо перевершують карбіди, а карбіди перевершують нітриди. Деякі неметалеві сполуки, які відіграють роль зміцнюючої фази у різних сплавах та його властивості наведені у додатку А таблиця А.2. [109].

Кількість зміцнювальних фаз у сплаві, призначеному для роботи в умовах ударно-абразивного зношування має становити приблизно 20–30%, при об'ємній частці аустеніту близько 20–40%. За відсутності значних ударів кількість зміцнюючої фази в деяких випадках може перевищувати 50% [110]. При цьому збільшення її кількості доцільно лише в певних межах: надмірна кількість твердої фази змінює механізм зношування наплавленого металу, так як у певних випадках частинки боридів, карбідів, карбоборидів починають викришуватися, а не стиратися, що призводить до значного зниження зносостійкості.

У зносостійкому наплавленому металі найбільш поширеною фазою, що чинить опір дії абразивних частинок, є карбіди. Зносостійкість сплавів з карбідним зміцненням залежить від хімічного складу карбідів, їх кристалографічної будови, властивостей, форми, кількості та характеру розподілу по всій структурі (див. додаток А, табл. А.3). Найбільш стійкі карбіди в сплавах наплавлення: Fe_3C , Cr_7C_3 , Me_{23}C_6 , Me_6C , W_2C , WC , та інші.

Стійкість карбідів визначається міцністю металевого зв'язку, що кількісно оцінюється температурою плавлення (див. додаток А, таблиця А.2), вона також залежить і від розчинності в карбіді інших елементів. Розчинені метали, які мають більшу спорідненість до вуглецю, ніж базовий елемент у складі карбіду, сприяють підвищенню його стійкості. І навпаки, якщо в карбіді розчинений елемент з меншою спорідненістю до вуглецю, в такому разі стійкість карбіду зменшується. В обмеженій кількості розчиняються в карбідних фазах майже всі метали, у тому числі некарбідоутворюючі, а також неметали – азот, кисень, бор. Причому останній подрібнює карбіди і дещо збільшує їх стійкість, утворюючи карбобориди, що

мають високі фізико–механічні властивості [109-111].

Наприклад, легування бором досить широко використовується для підвищення зносостійкості наплавленого металу [107]. Введення бору в порівняно невеликих кількостях (до 1%) різко підвищує твердість і зносостійкість сплавів, особливо при абразивному зношуванні. Однак введення бору в сплави на залізній основі поряд з підвищенням твердості та опору матеріалів абразивному зношуванню, різко знижує стійкість цих сплавів проти ударних навантажень [111]. За таких умов вміст бору в наплавленому металі може досягати ~ 4–5 %.

Відомо про позитивний вплив азоту на механічні властивості зносостійких наплавочних сплавів [112-113]. Сучасні наплавні матеріали дозволяють легувати наплавлений метал із газової фази азотом до 0,3 %. Легування сплавів азотом у такій кількості спільно з комплексом інших легуючих елементів, насамперед сильних нітридоутворювачів, таких як Zr, V, Ti, Hf, дозволяє створювати зносостійкі наплавні сплави шляхом нітридного та карбонітридного зміцнення.

Механізм зміцнення наплавочних сплавів нітридами пов'язаний з утворенням дрібнодисперсної нітридної фази, що сприяє формуванню карбідної фази, яка розташовується рівномірно по всьому об'єму матриці сплаву та підвищує її твердість і пластичність. Нітридне та інтерметалідне зміцнення найбільш переважне для зміцнення сплавів схильних до термосилового зносу, так як розмір нітридів, карбонітридів, інтерметалідів являється дрібнодисперсним. За умов пришвидшеного абразивного зношування, яке може супроводжуватися ударними навантаженнями доцільно вибирати комплексне зміцнення карбідами, боридами і карбоборидами, так як розміри цих фаз співставні з розмірами абразивних частинок.

1.3.4. Вплив карбідного зміцнення на зносостійкі властивості наплавленого металу

Підвищена стійкість наплавленого матеріалу до дії абразивних частинок досягається введенням великої кількості карбідоутворюючих елементів при досить високому вмісті вуглецю. При цьому вміст легуючих елементів впливає на

структуру та опір руйнуванню матриці, міцність зв'язку карбідів з матрицею, структуру, розподіл та морфологію фаз, що зміцнюють. Одночасне легування активними карбідоутворюючими та некарбідоутворюючими елементами супроводжується ефективним підвищенням властивостей міцності наплавленого металу [114-116].

Великий вплив на властивості металів надає розподіл карбідів у структурі. Внаслідок особливостей кристалізації наплавленого металу (висока температура нагріву, нерівномірне охолодження наплавлених шарів і т. д.) первинні та вторинні карбіди можуть нерівномірно розташовуватися в структурі і мати неоднакові розміри та форму, при цьому спостерігається висока карбідна неоднорідність. Наприклад, розташування карбідів по межах зерен значно знижує ударну в'язкість наплавленого металу.

У додатку А, таблиці А.3 наведені деякі зносостійкі сплави та групи сплавів у певних діапазонах легування, що застосовуються в умовах абразивного зношування та реалізують концепцію карбідного зміцнення [117-122].

Найбільш високі показники зносостійкості має наплавлений метал з аустенітно–мартенситною структурою який поєднує твердість і пластичність, що дозволяє їй надійно утримувати зміцнювальну карбідну фазу і забезпечувати досить високий опір впровадженню і руху абразивних частинок.

1.3.5. Вплив боридного та карбоборидного зміцнення на зносостійкі властивості наплавленого металу

Вплив бору на властивості наплавленого металу істотно залежить від вмісту в останньому інших легуючих елементів, таких як вуглець, хром та інші. Бор вступає в різні з'єднання з цими елементами, утворюючи бориди, а також карбобориди – карбіди, у яких частина атомів вуглецю заміщена атомами бору, що змінює їх властивості, зокрема, підвищує термічну стійкість та твердість. Тип з'єднання, що утворюється, визначається не тільки кількістю бору, але в першу чергу вмістом вуглецю (див. додаток А, таблиця А.2).

При розгляді особливостей утворення боридів у сплавах системи легування

Fe–Cr–Ni–B було встановлено [123-124], що в сплавах з вмістом 1,1... 1,3 % вуглецю утворюються в першу чергу карбобориди типу $M_{23}(C, B)_6$. Вони з'являються вже при вмісті 0,3 % бору. Зі збільшенням кількості бору до 1,2% поряд з карбоборидами типу $M_{23}(B, C)_6$ присутні карбобориди $Cr_2(B, C)$, або $Fe_2(B, C)$ залежно від кількості хрому в наплавленому металі. Зі збільшенням вмісту вуглецю в сплаві карбобориди $M_{23}(C, B)_6$ зникають і з'являється, або борид хрому типу $Cr_2(B, C)$, або карбоборид заліза типу $Fe_2(B, C)$ залежно від кількості хрому у сплаві. У сплавах з 2% вуглецю і більше сполуки $M_{23}(C, B)_6$ відсутні, а є лише бориди $Cr_2(B, C)$, які утворюються вже за введення бору в кількості 0,2%.

У додатку А, таблиці А.4 наведені деякі промислові та експериментальні наплавні матеріали, що дозволяють отримувати зносостійкий метал, основними зміцнюючими фазами в якому є бориди і карбобориди [125-132].

Одними з перших розроблених наплавних матеріалів, що містять тугоплавкі сполуки у своєму складі, є суміші наплавлення на основі боридів CrB і карбідів хрому Cr_3C_2 [133-137]. Наплавлення сумішей ведеться графітовим електродом з отриманням шару наплавленого металу завтовшки 3–4 мм, що володіє твердістю до 70 HRC і відносною зносостійкістю понад 3 одиниці. Структура металу, наплавленого сумішшю борид–хрому, складається з евтектики із кристалами CrB.

Найбільш широке застосування в промисловості знайшли покриті електроди системи легування Fe–C–Cr–B, що забезпечують одержання в структурі наплавленого металу значну кількість зміцнюючої фази у вигляді карбоборидів і боридів [138], наприклад, електроди Т–620 та Т–590. Структура металу наплавленого електродами Т–590, складається з ледебуриту та залишкового аустеніту, первинних карбідів Me_7C_3 і боридів $Cr_2(B, C)$.

Для формування наплавних сплавів системи Fe–C–Cr–B–Mn використовують композицію шихти, що складається з порошків хрому, карбіду бору, феромарганцю та графіту [139]. Зносостійкість такого типу наплавленого металу залежить від кількості хрому та бору у сплаві та від їх сумарної кількості. Підвищення їх сумарної кількості є доцільним лише до 35 %, після чого зносостійкість наплавленого металу знижується.

1.3.6. Дослідження способів формування зміцнювальних фаз у наплавленому металі для підвищення зносостійкості

Найбільш поширене роздільне введення легуючих компонентів у наплавлені матеріали з подальшим їх розплавленням, взаємодією та утворенням хімічних сполук, але цей спосіб має ряд істотних недоліків які детально висвітлено у працях [140-141].

Використання хімічно активних карбідоутворюючих елементів призводить до їх неприпустимих втрат внаслідок інтенсивного окислення, або переходу в шлак [179]. Наприклад, коефіцієнт переходу хрому в наплавлений метал при дуговому наплавленні становить 0,1 – 0,2, а при електрошлаковому наплавленні – близько 0,3-0,4 [142].

Легування металу бором ефективно підвищує його стійкість в умовах абразивного зношування [143, 173-174], але не дозволяє сформувати значну кількість зміцнюючої боридної, фази без істотного зниження її ударостійкості.

Більш високі експлуатаційні властивості мають комплексно–леговані сплави, які можливо одержати шляхом введення у рідку ванну гранул і мікропорошків тугоплавких сполук [144, 163, 171-172]. Такий спосіб легування дозволяє регулювати формування структури матриці сплаву і значно збільшити кількість зміцнюючої фази в наплавленому металі.

Введення до складу наплавних матеріалів армуючих частинок призводить до виникнення проблеми їх надійного закріплення і утримання сплавом – зв'язкою. Поверхні деталей, армовані частинками карбідів вольфраму, нерідко інтенсивно зношуються внаслідок викришування твердих включень і подальшого швидкого руйнування матриці.

Надійне закріплення армуючих включень в матриці наплавного сплаву відбувається тільки в тому випадку, коли температура матричного сплаву в момент змочування не нижче критичної температури, значення якої визначається температурою плавлення твердих частинок, що вводяться: $T_{кр} = 0,7 T_{пл}$ [145]. Саме цим пояснюються труднощі із закріпленням армуючих фаз, що виникають при введенні тугоплавких сполук до складу наплавних матеріалів. Певні складнощі при

використанні досить крупнозернистих порошків деяких тугоплавких сполук пов'язані з їх малою щільністю, що призводить до їх фракціонування в механічних сумішах з металевими порошками, випливання та видалення в шлак при наплавленні [146].

Щільність розплаву шлаку лежить в межах $2,5 - 2,7 \text{ г/см}^3$, щільність твердих частинок композиційних матеріалів на основі карбідів хрому складає $5,5 - 6,5 \text{ г/см}^3$, насипна щільність реліту становить $8,5 - 9,2 \text{ г/см}^3$. Оскільки щільність металу-зв'язки коливається від $7,2$ до $8,5 \text{ г/см}^3$ рівнодіюча сила Архімеда та ваги твердої частинки в металевому розплаві буде спрямована вгору для частинок на основі карбіду хрому [147].

Використання порошків сполук дрібнішої фракції визначає переважаючу роль гідродинамічних течій в металевому розплаві, що сприяють більш рівномірному їх розподілу в наплавленому металі. Однак чим більше дрібнодисперсний порошок застосовується в складі наплавочних матеріалів, тим інтенсивніше його розплавлення при дугових процесах наплавлення і розчинення при електрошлакових процесах.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування композиційних порошків, що складаються з гранул, покритих захисною оболонкою (Fe, Ni, Co, Mo_2C); які знижують перегрів частинок і запобігають їхній взаємодії з розплавом рідкої ванни [148-153], що при цьому підвищує вартість використовуваних порошків.

1.4. Сучасні електродні матеріали для дугового та електрошлакового наплавлення

На даному етапі ремонтного виробництва для механізованого дугового наплавлення під шаром флюсу, у захисних газах та електрошлакових технологічних процесах використовують гарячекатані та холоднокатані дроти, які виготовляють з металевих стрічок різного хімічного складу. Через значно вищу ціну порівняно з порошковими дротами зі спеціальним хімічним складом модифікуючих домішок, номенклатура та обсяги виробництва металевих дротів

залишаються відносно невеликими.

Найбільш широкую номенклатуру порошкових дротів, призначених для наплавлення під шаром флюсу та в захисних газах, наведено в таблиці (див. додаток А, таблиця А.6). Високі зварювально–технологічні властивості та можливість отримання якісного, добре обробленого наплавленого металу будь–якого заданого хімічного складу без застосування гарячого волочіння, що використовується для виготовлення металевих дротів із важкодеформованих сплавів, зробили порошкові дроти найефективнішим наплавним матеріалом [154-157].

Для розширення діапазону модифікування наплавленого металу, а також поліпшення його якісних характеристик потрібне створення сучасних ефективних наплавочних матеріалів, таких як порошкові дроти, електроди та стрічки, композиційні дроти, що являють собою композит з металевих і мінеральних складових особливого хімічного складу з заданими експлуатаційними показниками (рис. 1.8). [158]

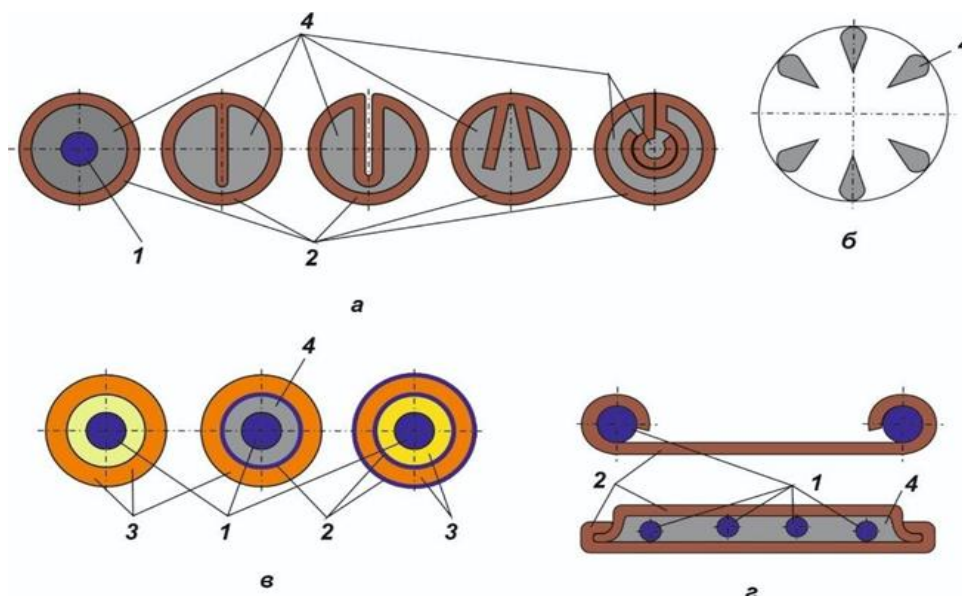


Рисунок 1.8 – Конструкції перерізів композиційних наплавочних матеріалів: а – порошкових дротів, б – металевого дроту; в – покритих електродів; г – сталевих та порошкових стрічок; 1 – металеві стрижні; 2 – металева оболонка; 3 – опресоване покриття; 4 – порошкоподібна шихта

Така композиційна будова матеріалу дає можливість проводити більш якісну металургійну обробку наплавленого металу, дозволяє підвищити їхню

технологічну надійність, поліпшити стабільність дугового та електрошлакового процесів при наплавленні, а також знизити гідратацію та підвищити якість упаковки шихти.

Найважливішою характеристикою порошкових дротів є їхня технологічна надійність, від якої залежить якість наплавленого металу. На неї впливають конструкція, спосіб виготовлення дроту та матеріали [159]. Характеризують технологічну надійність дроту сукупністю показників: сталістю коефіцієнта заповнення за її довжиною, надійною ізоляцією шихти від повітря і вологи [160] і якістю оболонки, що формується з металевої стрічки. Конструкція дроту є одним із параметрів, що істотно впливають на зварювально–технологічні властивості, механічні характеристики та технологію виготовлення.

Невисоку надійність мають дроти з оболонками з матеріалів, що зміцнюються при деформації: нікелю, кобальту та їх сплавів, а також з корозійностійких сталей. Ці порошкові дроти, виготовлені за традиційною технологією яка включає: формування оболонки та дозування шихти; зварювання стику кромek оболонки; відпал зварного шва; послідовне багаторазове волочіння, що чергується з термообробкою. Такі порошкові дроти мають велику собівартість і недостатньо якісні внаслідок окислення шихти при нагріванні.

Більш технологічні порошкові дроти мають високу герметичність і рівномірний розподіл шихти (рис. 1.8), виготовлені з широкої стрічки, сформованої в дві оболонки [161]. Але оболонку таких дротів можна виготовляти лише з тонких стрічок (до 0,2–0,3 мм). При використанні більш прийнятних, відносно товстих стрічок (0,4...0,7 мм), особливо з металів і сплавів, що зміцнюються при деформації, оболонка погано формується, що впливає на гідратацію шихти, а дріт при волочінні часто може обриватися.

Відомі конструкції композиційних дротів, у яких міститься дві оболонки, сформованих з різних стрічок. При виготовленні таких дротів їх внутрішню оболонку заповнюють шихтою і розміщують у попередньо сформованій зовнішній оболонці, стик кромek якої для герметизації шихти заварюють. Але при подальшій прокатці можливі розшарування, або навіть обриви дроту через низьку

пластичність зварного шва. Для запобігання таким дефектам потрібно робити відпал шва, що не є технологічно виправданим методом.

Відомий порошковий дріт, що складається з нікелевої оболонки з шихтою, через яку пропущений нікелевий стрижень, що не контактує з оболонкою, а флюсовий наповнювач містить металеві порошки в кількості, необхідній для зниження його електроопору настільки, що між стрижнем і оболонкою утворюється дуговий процес [162]. Така конструкція дозволяє забезпечити більш рівномірне плавлення шихти та оболонки дроту. Основним недоліком розглянутої конструкції порошкового дроту є можливість розкриття стику оболонки через високий рівень напруження при деформуванні оболонки з нікелю, що зміцнюється, що веде до мимовільного висипання шихти і внаслідок цього, до неоднорідності наплавленого металу. Також широко відомий спосіб виготовлення композиційного дроту, який має більше двох оболонок [163]. Головним його недоліком є складність та трудомісткість процесу виготовлення.

Згідно з іншим способом виготовлення, композиційний дріт, містить, принаймні, дві оболонки з технологічними стиками, розташованими діаметрально протилежно один щодо іншого, а наповнювач дроту знаходиться у внутрішній оболонці [164]. Однак при виготовленні такого композиційного дроту необхідно дотримуватися співвідношення товщин шарів оболонки 0,10...0,25. У разі недотримання цих умов виникають локальні розриви внутрішнього шару оболонки при його малій товщині, а при збільшенні товщини підвищується частка участі заліза в наплавленому металі на основі Ni, або C, що призводить до зниження його зварювально-технологічних властивостей.

Впровадження у широке виробництво багат шарових композиційних дротів дозволяє скоротити випуск дорогих холодно- та гарячекатаних металевих дротів із високоміцних матеріалів.

Однією з проблем наплавлення якісних сплавів на основі нікель-алюмінієвої сполуки (Ni_3Al), що містять велику кількість туго- та легкоплавких легуючих компонентів, полягає в труднощі отримання фізично і хімічно однорідного наплавленого металу через сепарацію легких і важких фракцій у шихті порошкових

дротів та електродів [165].

Наплавочні порошкові дроти і електроди великого (3...5 мм) діаметра характеризуються високою продуктивністю і суттєвою здатністю до проплавлення основного металу, але не забезпечують досить однорідний наплавлений метал через різну швидкість розплавлення металеві оболонки і низькоелектропровідної шихти [166].

Поліпшити процес розплавлення наповнювача та підвищити продуктивність наплавлення порошковими дротами можна введенням у порожнину їх оболонок, що контактують з ними металевих сердечників [167], по яких протікає частина зварювального струму. Але відомі конструкції електродних матеріалів з металевими сердечниками знайшли, завдяки максимальній здатності, що проплавляє, більше застосування в зварюванні, ніж у наплавленні [168].

Зменшити проплавлення металу виробу і одержати при високій продуктивності однорідний і якісний наплавлений метал можна використанням композиційного порошкового наплавного електроду конструкції [169], показаної на рис. 1.9.

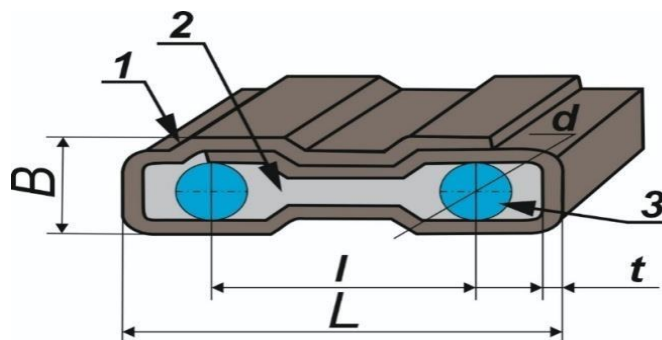


Рисунок 1.9 – Переріз композиційного порошкового електроду: 1 – металева оболонка; 2 – шихта; 3 – металеві стрижні; $L = 1 + 2(d+t)$ – ширина електроду; $B = d + 3t$ – товщина електроду; I – відстань між центрами стрижнів; d – діаметр стрижнів; t – товщина оболонки

Електрод містить металеву оболонку, всередині якої в контакт з нею встановлені дротяні сердечники діаметром (d) 1 ... 4 мм і розміщена шихта.

Оболонка виконана у формі плоскої порожнини з перекриттям кромки у верхній її частині, що дозволяє виключити гідратацію шихти. Два осердя розміщені

в оболонці на відстані між їх центрами $2d \dots 4d$, що викликає ефект переміщення дуги з одного сердечника на інший при блукаючій катодній плямі у зварювальній ванні. Це сприяє поперемінному, або сумісному плавленню обох стрижнів, оболонки та шихти, а також впливає на перерозподіл теплової потужності в зоні плавлення, що у свою чергу, призводить до зменшення проплавлення основного металу та забезпечує високу якість наплавленого.

Наприклад при $1 < 2d$ створюються умови для існування загальної потужної дуги, що підвищує проплавлення виробу, а збільшення $1 \geq 4d$ – дестабілізує дуговий процес і позначається на рівномірності розплавлення компонентів електрода. Зменшувати діаметри сердечників менше ніж 2 мм недоцільно через сильне зниження коефіцієнта заповнення електрода (рис. 1.10) та ускладнення технології його виготовлення.

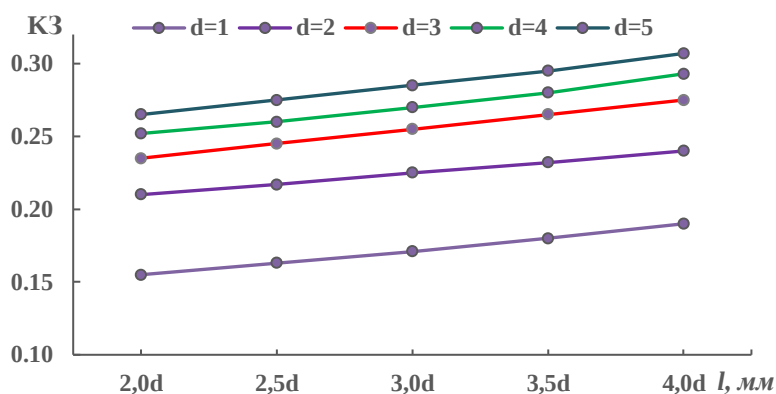


Рисунок 1.10 – Залежність коефіцієнта заповнення порошкового композиційного дроту від діаметра дроту d і відстані між його центрами L

Дана конструкція композиційного дроту забезпечує рівномірне плавлення дротяних сердечників, шихти та оболонки, але з великою шириною наплавлення (рівною ширині електрода L), при якій потрібні потужні джерела живлення. Суттєвим недоліком цього композиційного дроту є також складність і трудомісткість його виготовлення, де крім обтискання оболонки потрібно попереднє приварювання до неї дротяних електродів.

Більш технологічним і економічним може стати виготовлення композиційного дроту за умов якщо він виготовляється з широкої стрічки в одну, або дві оболонки з шихтою, що знаходиться у внутрішній оболонці [170-171], в якій

присутні дротяні компоненти.

1.4.1. Застосування порошкових дротів з модифікуючими домішками для отримання абразивостійкого наплавленого металу

Сполуки боридів і карбідів широко використовують як зміцнювальні компоненти у складі наплавних матеріалів: порошкових наплавних сумішей (ФХВ–10, БХ, КБХ тощо), покриттів електродів (ЮК–12, ХР–19, БХ–2 та ін.), флюсів і шихти порошкових дротів. Найбільш поширений спосіб введення модифікуючої домішки у вигляді порошкових наплавних сумішей [172]. Особливо актуальним стає використання з цією метою порошкових дротів, що дозволяють у широких межах варіювати хімічним складом наплавленого металу, автоматизувати процес наплавлення та знизити його собівартість за допомогою використання технології електрошлакового наплавлення, температура рідкої ванни якої складає 1400–1700°C, що приблизно удвічі менше за температуру рідкої ванни під час процесу дугового наплавлення. Саме порівняно невисока температура рідкої ванни під час електрошлакового наплавлення дозволяє досягти умов збереження більшості компонентів модифікуючої домішки і забезпечити якісні та експлуатаційні показники наплавленого металу. Ці показники дають можливість, навіть за умов лабораторних досліджень, досить чітко прогнозувати характеристики отриманого металу (див. додаток А, таблиця А.5).

У той же час, проведений літературний огляд і патентний пошук виявили вкрай малу кількість складів порошкового дроту, що містять порошки модифікуючих домішок, це мабуть, пов'язано з певними труднощами, що виникають при реалізації даного способу введення армуючих частинок в наплавлений метал, наприклад, поро– і тріщиноутворення в ньому [173].

Для роботи в умовах пришвидшеного абразивного зношування запропоновано використовувати порошкові дроти особливого хімічного складу, що включають оболонку з маловуглецевої сталі і модифікуючі домішки у вигляді порошку.

Для роботи в умовах прискореного абразивного зношування рекомендовано

використовувати порошкові дроти із спеціально підібраним хімічним складом. Наприклад, за даними металографічного аналізу, дроти типу ПП-Нп-А1 та ПП-Нп-А2, що містять ферохром (28,7 мас. %) і додаткові компоненти, забезпечують формування твердих карбідних структур типу $(Cr, Fe)_{23}C_6$, які значно підвищують зносостійкість. При наплавленні цими дротами утворюється евтектична структура, що включає дендритоподібні ділянки легованого фериту та карбідної евтектики. Мікротвердість цих структур, як показують отримані результати, становить 5597–6053 МПа, що є оптимальним для зменшення зношування.

Крім того, введення легуючих елементів, таких як нікель і кобальт, у шихту сприяє підвищенню пластичності наплавленого шару та запобігає викришуванню твердих частинок. Дослідження дроту ПП-Нп-А2 показали, що використання додаткового флюсу типу АНФ-29 усуває корозійно-активні включення, що позитивно позначається на механічних властивостях покриття. Отже, у підсумку оптимізована структура наплавлення забезпечує баланс між твердістю, пластичністю та зносостійкістю.

Введення високовуглецевого хромистого чавуну призводить до утворення в матриці металу, карбідів хрому, які володіють високою мікротвердістю, що забезпечує підвищення зносостійкості наплавленого металу.

В останні роки доволі активно розвиваються дослідження з вивчення можливості модифікування наплавленого металу шляхом введення нанорозмірних компонентів до складу наплавних матеріалів [174-175]. Зокрема, запропоновано склад порошкових дротів для електрошлакового наплавлення деталей, що працюють в умовах ударно-абразивного зношування. Шихта дроту містить, мас. %: графіт 0,4...1,2, марганець 12... 15, хром 7... 9, а також ультрадисперсний (10...100 нм) порошок карбіду кремнію SiC 12...15.

Введення нанорозмірного SiC в 2 рази підвищує зносостійкість наплавленого хромомарганцевого металу внаслідок появи в ньому великої кількості надтвердих карбідів SiC, які практично не розчиняються в процесі наплавлення, а також сприяє подрібненню зерна і підвищенню опірності наплавленого металу. Разом з тим очевидно, що настільки велика масова частка нанорозмірних компонентів

призводить до необґрунтованого подорожчання наплавного матеріалу.

Відповідно продовжує залишатися актуальною розробка нових складів порошкових дротів для електрошлакового наплавлення абразивостійкого металу, що містять менш дефіцитні модифікуючі домішки і більш тверді та зносостійкі сполуки.

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 1

1. Застосування електрошлакового наплавлення, використання модифікуючих домішок і розробка нових легованих сталей дають змогу домогтися значного підвищення експлуатаційної надійності деталей. Ці заходи сприяють зниженню витрат на обслуговування техніки та підвищенню ефективності сільськогосподарського виробництва, а також поліпшенню екологічної ситуації за рахунок зменшення споживання ресурсів і кількості відходів.

2. Електрошлакове наплавлення має низку унікальних переваг. Одні з основних переваг – це висока продуктивність і економічна ефективність процесу. Електрошлакове наплавлення дає змогу не тільки підвищити експлуатаційні характеристики сільськогосподарської техніки, а й знизити її вплив на навколишнє середовище. Застосування нових модифікаторів, таких як бентонітова глина, також сприяє поліпшенню екологічності процесу, оскільки дає змогу використовувати природні та менш токсичні матеріали. Крім того, можливість повторного відновлення деталей без значного погіршення їхніх характеристик дає змогу скоротити капітальні витрати та забезпечити більш стійку експлуатацію техніки.

3. Встановлено основні переваги використання ЕШН для відновлення та зміцнення деталей сільськогосподарської техніки:

- міцність зчеплення наплавленого шару з матеріалом основи;
- стійкість процесу наплавлення у широких межах густини струму (від 0,2 до 300 А/мм²);
- висока продуктивність (до 150 кг наплавленого металу в годину);
- економічність процесу (для наплавлення рівної кількості електродного металу електроенергії витрачається на 15...20% менше, ніж при дуговому напавленні);

- можливість наплавлення сплавів з підвищеною схильністю до утворення тріщин;
- можливість наплавлення за один прохід шарів великої товщини (від декількох міліметрів до десятків сантиметрів);
- рафінування (очищення) металу від шкідливих домішок і високий захист ванни рідкого металу від впливу повітря;
- можливість надавати наплавленому металу необхідної форми та поєднувати з електрошлаковим зварюванням.

4. Застосування модифікуючих домішок для підвищення стійкості відновлювальних покриттів є ефективним інструментом для збільшення терміну служби і поліпшення експлуатаційних характеристик деталей сільськогосподарської техніки. Використання легуючих елементів і наноматеріалів дає змогу цілеспрямовано змінювати властивості покриття, покращувати його зносостійкість, корозійну стійкість, термостійкість і адгезію, а також підвищувати технологічність процесу нанесення. Найкращі результати, з погляду рівномірності розподілу модифікуючих частинок, твердості та зносостійкості наплавленого металу, отримані при спільному введенні в шлакову ванну шихтового матеріалу та порошкового дроту. Застосування цих інноваційних технологій дає змогу не тільки підвищити надійність і довговічність сільськогосподарської техніки, а й знизити витрати на її експлуатацію та ремонт, що позитивно впливає на віддачу виробництва загалом. Комплексне застосування модифікуючих присадок в процесі електрошлакового наплавлення робочих органів сільськогосподарської техніки сприяє формуванню дрібнозернистої, рівномірної структури наплавленого покриття з підвищеною твердістю та опором абразивному зношуванню. Це забезпечить збільшення експлуатаційного ресурсу відновлених деталей щонайменше на 30–40% порівняно з традиційними методами зміцнення. Результати проведених досліджень стали підґрунтям для формулювання гіпотези цієї роботи. На основі аналізу літературних даних визначено мету та завдання дослідження.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Методологія досліджень

Розроблено методологію досліджень, яка передбачає проведення комплексних експериментів з оцінки структури та властивостей відновлювальних покриттів, отриманих за допомогою електрошлакового наплавлення. Методологія базується на застосуванні модифікуючих присадок, що забезпечують легування відновлюваного шару, та раціоналізації технологічних параметрів процесу нанесення покриття.

Запропоновано послідовність проведення досліджень для вирішення поставлених завдань і досягнення мети дослідження, які знайшли відображення у діаграмі Ісікави (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Діаграма Ісікави, яка описує систематизований підхід до проведення комплексних досліджень, дійсних при розробці інноваційного та ефективного технологічного процесу відновлення деталей

Однорідність властивостей покриття з додаванням модифікуючих домішок оцінювали за низкою критеріїв. Зокрема, проводилися вимірювання рівня мікротвердості, аналіз розподілу хімічних компонентів у покритті та детальний

огляд його мікроструктури за допомогою металографічних методів. Такий підхід дозволяє точно визначити ступінь однорідності сформованого шару та забезпечує об'єктивну оцінку його якості.

Особливу увагу приділено дослідженню кінетики кристалізації покриття. Аналіз швидкості росту зерен та фазових переходів дозволяє встановити оптимальні параметри для отримання дрібнозернистої та рівномірної структури. Крім того, проведено детальний аналіз виникаючих залишкових напружень, що мають вплив на механічні властивості та довговічність відновлених деталей.

Отже, розроблена методологія досліджень дозволяє комплексно оцінити вплив модифікуючих присадок і параметрів електрошлакового наплавлення на формування структури покриттів, що сприяє підвищенню їх зносостійкості та експлуатаційної надійності. Дані результати створюють надійну базу для подальшої оптимізації технологічних процесів у сфері відновлення та зміцнення деталей.

2.2. Технологічне обладнання та матеріали для виготовлення порошкових дротів

Технологічне обладнання експериментальні порошкові дроти виготовляли на волочильному стані ОБ-575 із застосуванням стрічки Св-08кп товщиною 0,3 мм. Процес волочіння включав чотириразову протяжку дроту через ряд волок (табл. 2.1). Це забезпечувало необхідний контроль розмірів дроту, які становили 4 мм та 3 мм, з коефіцієнтами заповнення 0,55 і 0,45 відповідно.

Таблиця 2.1 – Параметри волочіння експериментальних дротів

Етап протяжки	Діаметр волока (мм)	Товщина дроту після протяжки (мм)
1	4,6	4,3
2	4,3	4,0
3	4,0	3,8
4	3,8	3,0

Для досягнення необхідної якості дроту використовували натрієве мило в якості мастила, що мінімізувало тертя та сприяло зниженню можливості утворення дефектів на поверхні дроту.

Компонентами шихти порошкового дроту слугували: ферохром, металеві порошки нікелю та марганцю, сріблястий графіт і модифікуючі домішки. У додатку А, таблиці А.5 наведено типи використовуваних матеріалів та їх розміри.

Для покращення рівномірності складу та зниження впливу різних факторів на властивості кінцевого продукту, під час підготовки шихти всі її складові змішувалися протягом 30 хвилин на кульовому електромлині. При цьому важливо було забезпечити рівномірність розподілу кожного з компонентів у загальній масі, оскільки від цього залежала стабільність властивостей отриманих покриттів.

Варіювання гранулометричного складу здійснювалося шляхом класифікації з використанням сит, паперових фільтрів, а також вібраційної установки, що дозволяло відбирати частинки необхідних розмірів для забезпечення відповідних параметрів наплавлених покриттів. Частотний розподіл частинок різного розміру в складі шихти після класифікації наведено на рис. 2.2.

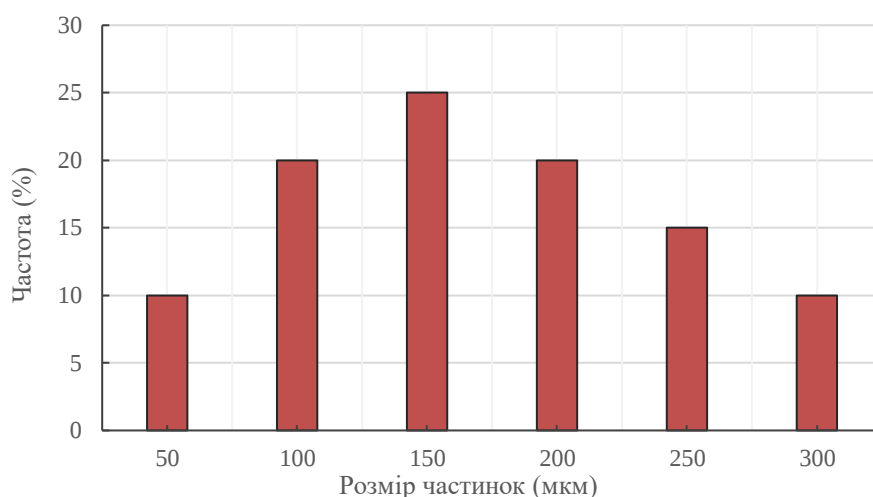


Рисунок 2.2 – Розподіл гранулометричного складу компонентів у шихті

У додатку А, таблиці А.6 наведено склад і використання 10 типів експериментальних дротів, які застосовуються для створення зносостійких покриттів у різних умовах експлуатації. Кожен дріт має унікальний склад, що включає ферохром, високохромистий чавун, бентонітову глину, алмази, флюси та

інші компоненти. Вони забезпечують різноманітні властивості покриттів: високу твердість, зносостійкість, корозійну стійкість, термостійкість і пластичність. Ці дроти використовуються для деталей, що працюють у складних умовах тертя, абразивного зносу і динамічних навантажень.

Матеріалом для транспортування нанорозмірних частинок модифікаторів служив порошок нікелю з розміром частинок < 50 мкм, у який під час спільної обробки в кульовому млині вводили частинки модифікаторів. В результаті одержували нікелеві гранули з вмістом модифікуючих домішок у кількості 5-7 мас. %. Це забезпечувало рівномірний розподіл модифікатора в матеріалі і впливало на підвищення зносостійкості отриманих покриттів.

Вміст модифікуючих домішок у наплавлених покриттях, отриманих з різних типів дротів показано на рисунку 2.3. Він відображає концентрації ключових елементів, таких як хром, марганець, нікель, карбіди та інші домішки, які впливають на структуру та експлуатаційні характеристики покриттів.

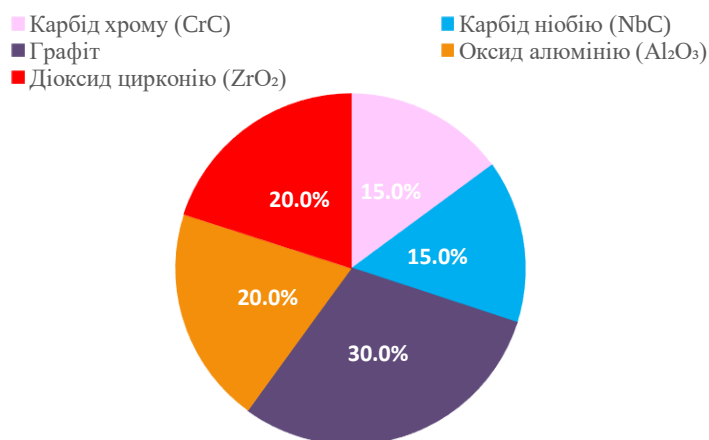


Рисунок 2.3 – Вміст модифікаторів у наплавлених покриттях

Шихта порошкового дроту складалася з різних компонентів, які впливали на фізико-механічні характеристики наплавленого металу. В якості складових використовували ферохром, металеві порошки марганцю і нікелю, сріблястий графіт, а також модифікуючі домішки. Компоненти відповідали вимогам ДСТУ і мали встановлені розміри, що дозволяло гарантувати однорідність матеріалу та його відповідність вимогам експерименту.

Для контролю якості порошкових дротів використовували декілька методів

[229]. Основним показником якості був коефіцієнт заповнення, який у процесі експерименту коливався в межах від номінального значення не більше ніж на 3% (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Контроль якості порошкових дротів

Параметр	Номінальне значення	Фактичне значення (відхилення)
діаметр дроту (мм)	3,0–4,0	$\pm 0,1$
коефіцієнт заповнення	0,45–0,55	$\pm 3\%$
рівномірність домішок (%)	100	> 95

З рисунка 2.4 видно, що процес виготовлення дротів характеризується високою стабільністю, з мінімальними відхиленнями, що вказує на результативність вибраних технологічних режимів.

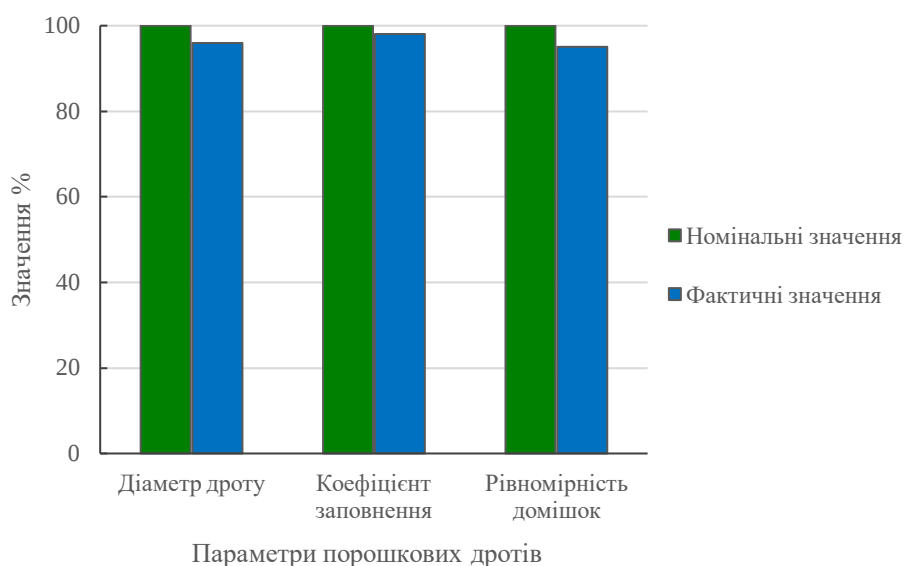


Рисунок 2.4 – Відхилення параметрів порошкових дротів від номінальних значень

Отримані експериментальні порошкові дроти були використані для дослідження властивостей наплавлених покриттів, де особлива увага приділялася забезпеченню стійкого електрошлакового процесу при мінімальній тепловіддачі в дротах, з метою уникнення перегріву. Важливим було те, що максимальне відхилення фактичного коефіцієнта заповнення експериментальних порошкових дротів від номінального значення становило не більше 3%, що гарантувало

стабільність складу і властивостей наплавленого шару.

Внаслідок цього, описана технологія виготовлення порошкових дротів забезпечує високу якість отриманих матеріалів, що робить їх придатними для подальших досліджень в галузі електрошлакового наплавлення та відновлення сільськогосподарської техніки.

2.3. Модифікуючі домішки та їх вплив на властивості наплавленого металу

Порошкові дроти для електрошлакового наплавлення виготовляли із застосуванням модифікаторів різного хімічного складу, що дозволило змінити властивості наплавленого металу та підвищити його зносостійкість.

Далі наведено детальний опис компонентів різних експериментальних порошкових дротів:

Дріт №1 (ПП-Нп-А1) – до його складу входять ферохром (ФХ-800) та модифікатори алмази та бентонітова глина. Ферохром забезпечує підвищення твердості наплавленого металу завдяки утворенню карбідних фаз. Алмазні домішки додають високі абразивні властивості.

– коефіцієнт заповнення: $32\% \pm 3\%$

Дріт №2 (ПП-Нп-А2) – містить ферохром та флюс АНФ-29. Ферохром виконує функцію зміцнення наплавленого металу, а флюс АНФ-29 допомагає підтримувати стабільність шлакової ванни, знижуючи її окиснювальні властивості.

– коефіцієнт заповнення: $32\% \pm 3\%$ (отримали 30,7 %)

Дріт №3 (ПП-Нп-А3) – має в своєму складі високохромистий чавун та алмазні домішки. Високохромистий чавун забезпечує високу твердість і стійкість до зношування, а алмаз сприяє додатковому абразивному зміцненню.

– коефіцієнт заповнення: $32\% \pm 3\%$ (отримали 31,4 %)

Дріт №4 (ПП-Нп-А4) – включає високохромистий чавун та флюс АНФ-29. Високохромистий чавун додає міцність, а флюс АНФ-29 сприяє раціональній роботі шлакової ванни під час наплавлення, знижуючи ризики окиснення.

– коефіцієнт заповнення: $32\% \pm 3\%$ (отримали 31,8%)

Дріт №5 (ПП-Нп-А5) – містить хром, нікель та карбід ніобію (NbC). Хром забезпечує зміцнення покриття, нікель покращує пластичність та адгезію до базового металу, а карбід ніобію додає стійкість до зношування та підвищує міцність. Така комбінація компонентів особливо ефективна для отримання зносостійких покриттів для важких умов експлуатації.

– коефіцієнт заповнення: 40%

Дріт №6 (ПП-Нп-А6) – зі складом, хромовий карбід (CrC), графіт, кристалічний кремній (Si) та оксид алюмінію (Al_2O_3). Хромовий карбід підвищує твердість, графіт додає змащувальні властивості, кристалічний кремній зміцнює структуру, а оксид алюмінію надає додаткову зносостійкість.

– коефіцієнт заповнення: 40%

Дріт №7 (ПП-Нп-7) – містить порошок заліза (Fe) та діоксид цирконію (ZrO_2). Залізо слугує основою, а діоксид цирконію підвищує зносостійкість та стабільність покриття в умовах високих температур. Це робить даний дріт ефективним для роботи в агресивному середовищі з інтенсивним абразивним зношуванням.

– коефіцієнт заповнення: 40%

Дріт №8 (ПП-Нп-А8) – містить хром, марганець та нікель, які формують зносостійке покриття з комбінованою структурою. Легувальні елементи сприяють стабілізації мартенситної структури, підвищуючи механічну міцність і пластичність покриття. Така композиція дозволяє ефективно використовувати дріт для деталей, що працюють під динамічним навантаженням та в умовах середнього тертя.

– коефіцієнт заповнення: 40%

Дріт №9 (ПП-Нп-А9) – містить хром, марганець та кремній, які утворюють покриття із дендритною комірковою структурою. Завдяки високому вмісту хрому забезпечується підвищена корозійна стійкість, а марганець і кремній додають покриттю міцності та пластичності. Дріт ефективно застосовується для захисту деталей, що працюють в агресивних середовищах та піддаються тертю.

– коефіцієнт заповнення: 39%

Дріт №10 (ПП-Нп-А10) – містить хром (16,43%), марганець (1,16%), нікель

(12,15%) та карбід кремнію (5-7%). Хром і нікель забезпечують корозійну стійкість та стабілізують аустенітну матрицю, тоді як високодисперсні часточки SiC підвищують зносостійкість покриття. Дріт ідеально підходить для використання в умовах комбінованого впливу тертя та корозії, забезпечуючи тривалий термін служби покриття.

– коефіцієнт заповнення: 38%

Модифікуючі домішки у складі дротів, відіграють різну роль в процесі електрошлакового наплавлення, залежно від їх хімічного складу та фізичних властивостей [176]. Основні функції модифікаторів полягають у наступному:

1. Високохромисті компоненти, ферохром та високохромистий чавун, сприяють формуванню карбідних фаз у наплавленому металі, що підвищує його твердість і стійкість до абразивного зношування;
2. Карбіди CrC і NbC, формують тверді включення, які підвищують механічну міцність і запобігають пластичній деформації наплавленого металу;
3. Графіт, як змащувальний матеріал, додає антифрикційні властивості металу, що знижує коефіцієнт тертя в умовах експлуатації;
4. Оксид алюмінію (Al_2O_3) та діоксид цирконію (ZrO_2) забезпечують контроль над кристалізацією розплаву, зменшуючи розмір зерен та підвищуючи стабільність структури в умовах високих температур і зносу.

На рисунку 2.5 показано вплив різних комбінацій модифікуючих домішок на твердість наплавлених покриттів, що дозволяє чітко побачити дієвість кожного модифікатора [177].

Застосування різних модифікуючих домішок у складі порошкових дротів дозволило значно покращити фізико-механічні характеристики наплавленого металу.

Показники впливу модифікуючих домішок на зносостійкість наплавлених покриттів наведено на рис. 2.6. Представлено, як різні елементи, такі як хром, нікель, марганець, діоксид цирконію та карбід кремнію, впливають на стійкість покриттів до абразивного зношування. На графіку показано, що покриття з вищим вмістом карбідних фаз і легувальних елементів мають значно кращі

показники зносостійкості, забезпечуючи триваліший термін експлуатації деталей у важких умовах [178].

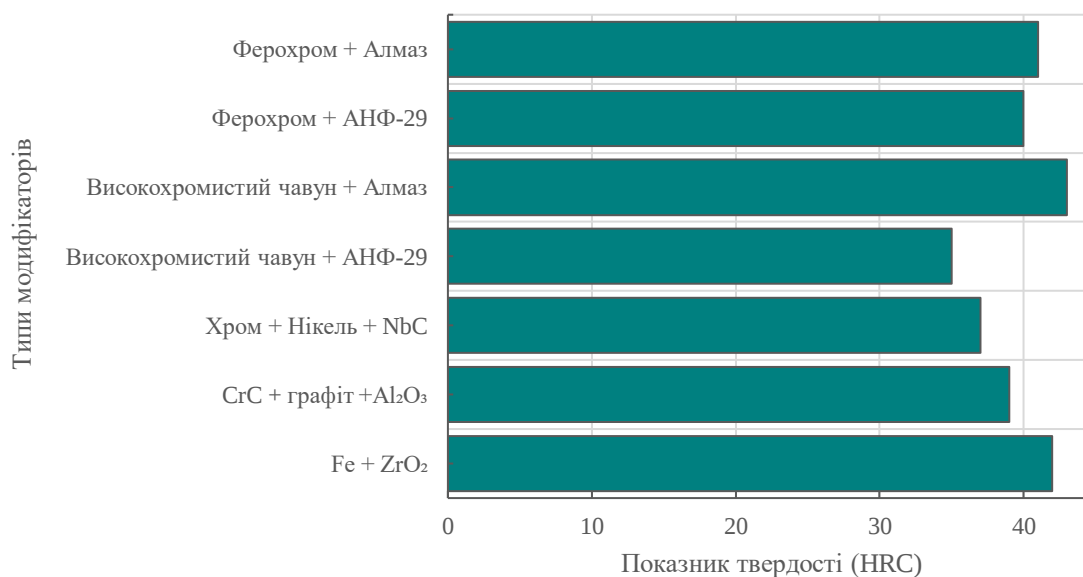


Рисунок 2.5 – Вплив різних модифікаторів на твердість наплавлених покриттів

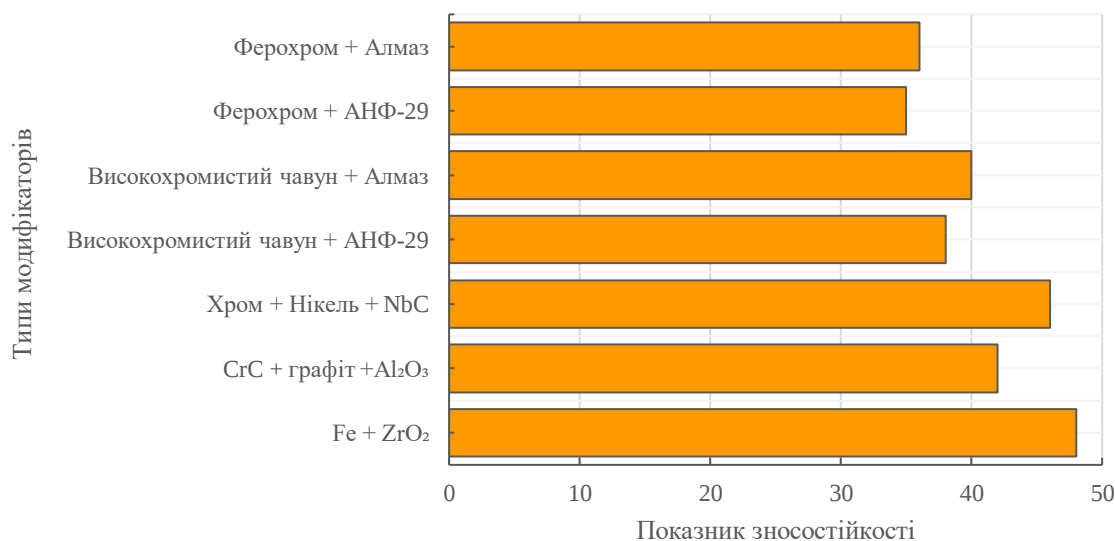


Рисунок 2.6 – Вплив модифікаторів на зносостійкість наплавлених покриттів

Використання ферохрому, високохромистого чавуну, хрому, графіту та інших компонентів сприяло підвищенню твердості та зносостійкості покриттів, що особливо важливо для відновлення ріжучих деталей сільськогосподарської техніки, яка працює в умовах інтенсивного зношування.

2.4. Вплив досліджуваних модифікуючих домішок на зносостійкість наплавлених покриттів

Модифікуючі домішки значно впливають на зносостійкість наплавлених покриттів, оскільки вони змінюють структуру та властивості отриманого металу (покриття).

Основні фактори впливу модифікаторів на зносостійкість:

1. Ферохром, високохромистий чавун, карбід ніобію (NbC) та хромовий карбід (CrC) забезпечують формування твердих карбідних фаз у структурі наплавленого металу. Ці карбідні включення є значно твердішими, ніж основний метал, і виконують роль зміцнюючих елементів, що підвищують опір зносу. Карбіди формують «бар'єри», які запобігають проникненню абразивних частинок у метал, зменшуючи його знос.

2. Ферохром та високохромистий чавун сприяють рафінуванню зерен металу під час кристалізації. Це зменшує розмір зерен та покращує рівномірність розподілу фаз, що підвищує механічну міцність і стійкість до утворення тріщин. Менше зерно означає більшу площу границь зерен, яка забезпечує додатковий опір до руйнування металу під дією постійних навантажень.

3. Нікель забезпечує покращення пластичних властивостей покриття, підвищуючи його здатність витримувати високі механічні навантаження. Завдяки підвищеній пластичності, нікелеві наплавлені покриття краще поглинають навантаження, знижуючи ризик відшарування чи утворення тріщин під дією абразивних частинок.

4. Графіт додає покриттю антифрикційні властивості, що є дуже важливим для зниження зносу в умовах тертя. Завдяки своїм змащувальним властивостям, графіт зменшує коефіцієнт тертя між покриттям та абразивом, знижуючи механічне навантаження та сприяючи збільшенню терміну служби деталей.

5. Діоксид цирконію (ZrO_2) забезпечує наплавленому металу високу стабільність при підвищених температурах. Це важливо в умовах пришвидшеного абразивного зношування (на сухих та кам'янистих ґрунтах), коли звичайні

покриття можуть втратити свої властивості. Діоксид цирконію підтримує твердість і стабільність покриття, що суттєво покращує його зносостійкість.

6. Флюс АНФ-29 сприяє зменшенню окиснення активних елементів під час наплавлення. Це дозволяє зберегти їх хімічний склад, а отже, і забезпечити максимальну продуктивність зносостійких властивостей покриття.

Модифікуючі домішки виконують ключову роль у поліпшенні зносостійкості наплавлених покриттів, додаючи властивості, які дозволяють їм успішно витримувати абразивні та механічні навантаження. Комбінація модифікаторів, що включає карбіди, нікель, графіт та оксиди, створює багатофункціональні покриття з високою твердістю, пластичністю, змащувальними властивостями та стійкістю до термічних впливів. Це робить наплавлений метал надзвичайно ефективним для використання в умовах підвищеного зношування, зокрема для ріжучих деталей сільськогосподарської техніки, які працюють в агресивному середовищі.

2.5. Методика електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі

Електрошлакове наплавлення є важливим методом нанесення покриттів з високою зносостійкістю та забезпеченням стабільності структури металу. Цей метод дозволяє отримувати однорідне покриття з високими експлуатаційними характеристиками завдяки використанню струмопідвідного кристалізатора та специфічних технологічних режимів наплавлення [179].

Електрошлакове наплавлення базується на використанні електричного струму, який проходить через шлакову ванну, викликаючи її нагрівання до температури плавлення. У цьому процесі застосовували порошковий дріт, який, проходячи через розплавлений шлак, плавиться та утворює наплавлений шар на поверхні деталі [180]. Шлакова ванна, утворена з флюсу АНФ-29, виконує декілька важливих функцій:

- завдяки своїм властивостям, шлак створює середовище, яке захищає розплавлений метал від впливу кисню та інших атмосферних газів;
- шлак також сприяє видаленню небажаних домішок, зокрема сірки та

фосфору, підвищуючи чистоту наплавленого металу.

Для проведення ЕШН використовували струмопідвідний кристалізатор, що забезпечує точний контроль над процесом наплавлення та дозволяє уникнути перегріву шлакової ванни.

Експериментальний кристалізатор складався з мідної водоохолоджуваної секції, у якій була встановлена графітова втулка (необхідна для збереження внутрішньої формуючої секції кристалізатора). Графітові електроди подавали електричний струм у шлакову ванну, підтримуючи її стабільне розплавлення [181, 187].

Обладнання експериментальної установки включало наступне:

- струмопідвідний кристалізатор з графітовою втулкою;
- установка ЕШН А-1401, на постійному струмі зворотної полярності;
- джерело струму для підтримки стабільного електрошлакового процесу;
- порошковий дріт з модифікатором особливого хімічного складу та відповідним коефіцієнтом заповнення, який служив основним матеріалом для наплавлення.

Для забезпечення якісного наплавленого шару необхідно було ретельно контролювати основні технологічні параметри, такі як струм, напруга, швидкість подачі дроту та склад флюсу.

- електрошлакове наплавлення здійснювалася за допомогою двоконтурної схеми електроживлення шлакової ванни постійним струмом зворотної полярності;
- діапазони струмів у струмопідвідній секції кристалізатора та з графітового електрода становили 110-130 А і 90-110 А відповідно, напруга на шлаку між секцією кристалізатора і графітовою втулкою становила 20-25 В, а між графітовим електродом і втулкою – 25-30 В;
- флюс АНФ-29 був основним компонентом шлакової ванни, він забезпечував низьку хімічну активність щодо рідкого металу та сприяв активній десульфурзації металу;
- хімічний склад флюсу АНФ-29: містить 60-70% CaF_2 , 30-40% Al_2O_3 , та

не більше 8% SiO_2 і 0,5% S. Флюс АНФ-29 характеризується високою стійкістю та забезпечує економне використання електроенергії;

- для підтримки необхідної швидкості охолодження розплавленого металу в кристалізаторі використовували водоохолоджуваний циліндр (це дозволяло коригувати тепловий баланс шлакової ванни і забезпечувати необхідні фізико-механічні властивості наплавленого металу);

- подача дроту здійснювалася через порожнину графітового електрода діаметром 15 мм (вона була виконана з використанням керамічної трубки для захисту порошкового дроту від контакту з атмосферними газами, що дозволяло зберегти хімічну чистоту модифікатора);

- максимальне відхилення фактичного коефіцієнта заповнення порошкових дротів від номінального значення становило $\sim 3\%$, що свідчить про високий рівень контролю якості виготовлення дроту.

Методика проведення електрошлакового наплавлення:

- на початковому етапі, кристалізатор ретельно очищали, забезпечуючи рівну поверхню для графітової втулки;

- в кристалізатор встановлювали графітову втулку, яка забезпечувала ізоляцію та стабільну теплову віддачу;

- старт електрошлакового процесу здійснювали шляхом електродугового розплавлення флюсу АНФ-29, який завантажували у порожнину кристалізатора;

- після розплавлення флюсу дріт починав поступово подаватися в шлакову ванну (температура шлаку підтримувалася на рівні, що дозволяло плавити дріт без перегріву);

- під час процесу наплавлення постійно контролювали параметри напруги та струму, щоб уникнути перегріву шлакової ванни, що може призвести до утворення дефектів у наплавленому металі;

- регулювання тепловиділення в шлаковій ванні здійснювалося шляхом зміни сили струму, що проходить через дріт і шлак;

- після закінчення процесу, наплавлений зразок залишали в

кристалізаторі для контрольованого охолодження (використання водоохолоджуваного циліндра дозволяло забезпечити рівномірне охолодження і мінімізувати утворення тріщин).

Вплив температури шлакової ванни на твердість наплавленого металу приведено на рис. 2.7. Підвищення температури сприяє утворенню більш дисперсної структури, що забезпечує покращення механічних властивостей. Проте надмірне підвищення температури може призводити до зниження твердості через грубе зерно, або зменшення карбідних включень [182].

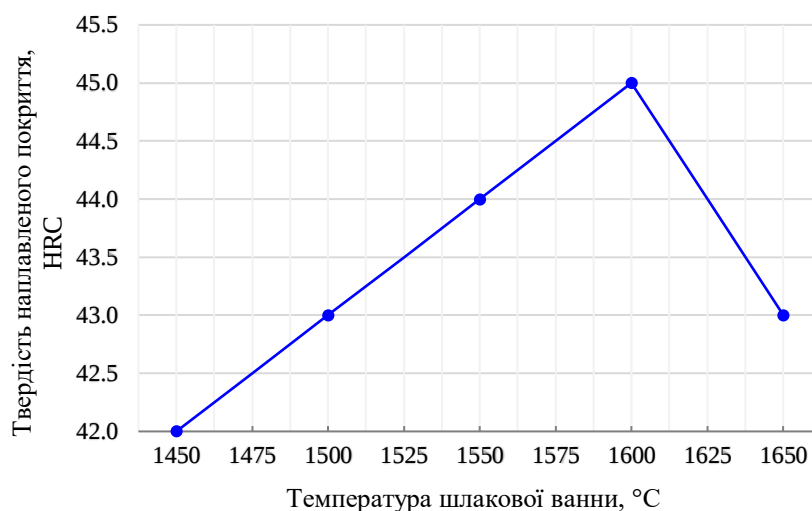


Рисунок 2.7 – Вплив температури шлакової ванни на твердість наплавленого покриття

Залежність зносостійкості наплавленого покриття від температури шлакової ванни запропоновано на рис. 2.8. Раціональна температура сприяє формуванню рівноважної структури, що забезпечує максимальну стійкість до абразивного зносу. Перевищення, або зниження цієї температури негативно впливає на зносостійкість наплавленого металу через зміни мікроструктури покриття [183].

Під час проведення експериментів було визначено, що параметри ЕШН (струм, напруга, склад флюсу та швидкість охолодження) суттєво впливають на кінцеву якість наплавленого металу [184]:

- хімічна чистота наплавленого металу забезпечується правильним підбором флюсу, який сприяє видаленню шкідливих домішок та захисту розплаву від окиснення;

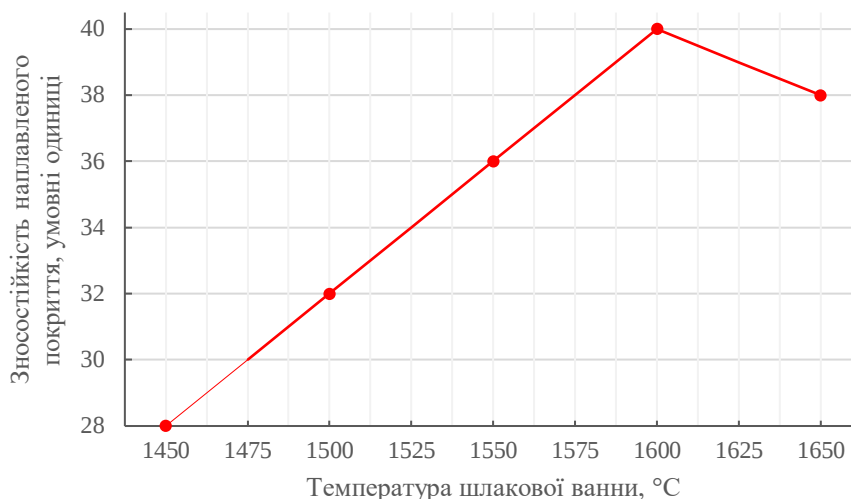


Рисунок 2.8 – Залежність зносостійкості наплавленого покриття від температури шлакової ванни

- структура наплавленого металу контролюється шляхом правильного підбору режимів охолодження (чим швидше відбувається охолодження, тим дрібніша структура наплавленого металу, що позитивно впливає на його механічні властивості);
- показники твердості та зносостійкості наплавленого металу залежали від складу шихти порошкового дроту та параметрів наплавлення (використання високохромистого чавуну або карбідів у складі дроту сприяло підвищенню твердості до значень HRC = 44–45).

Методика здійснення електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі вимагає високого рівня контролю над процесом нанесення покриттів. Правильний підбір технологічних параметрів дозволяє отримати однорідне, хімічно чисте та стійке до зношування покриття, яке відповідає вимогам експлуатації в агресивних умовах експлуатації сільськогосподарської техніки. Використання струмопідвідного кристалізатора з охолоджуючою секцією дозволяє уникнути перегріву шлаку та наплавленого металу, що зменшує ймовірність утворення дефектів і підвищує якість наплавленого покриття [185, 191].

2.6. Металографічні дослідження наплавленого металу

Металографічні дослідження наплавленого металу включали комплексний

аналіз мікроструктури, мікротвердості та морфології кожного дослідного зразка. Отримані результати дозволяють детально оцінити вплив складу модифікуючих домішок які додавали до порошкового дроту та технологічних параметрів на механічні властивості покриття і визначити раціональні умови для їхнього використання в агропромисловому виробництві та інших сферах [186-187].

Завдання металографічних досліджень:

- оцінка впливу технологічних параметрів ЕШН на формування структури наплавленого металу;
- аналіз впливу легуючих і модифікуючих домішок на механічні властивості покриттів;
- визначення можливостей застосування отриманих покриттів у різних умовах експлуатації з врахуванням їх мікроструктурних особливостей.

Дані щодо мікроструктури, морфології та оцінки впливу різних структурних компонентів на властивості наплавленого металу надано у додатку А, таблиці А.7.

Також наведено характеристики основних фаз (ферит, троостит, карбіди), їх морфологію (голчаста, дендритна, евтектична) та їх вплив на твердість, зносостійкість і пластичність покриття. Додаток А, таблиця А.7 дозволяє зрозуміти взаємозв'язок між мікроструктурою покриття та його експлуатаційними характеристиками [188].

На рис. 2.9 наведено показники мікротвердості наплавлених покриттів, отриманих із додаванням різних модифікуючих домішок. Також видно як змінюється твердість покриття залежно від типу і концентрації модифікаторів, таких як хром, карбіди, діоксид цирконію та інші елементи. Найвищі показники мікротвердості досягаються за рахунок утворення карбідних фаз і дисперсних включень, що підвищують зносостійкість і міцність покриття.

Мікроструктура та морфологія дослідних зразків:

1. Наплавлення з дроту №1 (ПП-Нп-А1) — дендритоподібні ділянки фериту та евтектичні включення мають досить дрібнозернисту структуру, це забезпечує їх високу твердість і міцність. Евтектичні включення рівномірно розподілені по матриці, що сприяє зменшенню внутрішніх напружень.

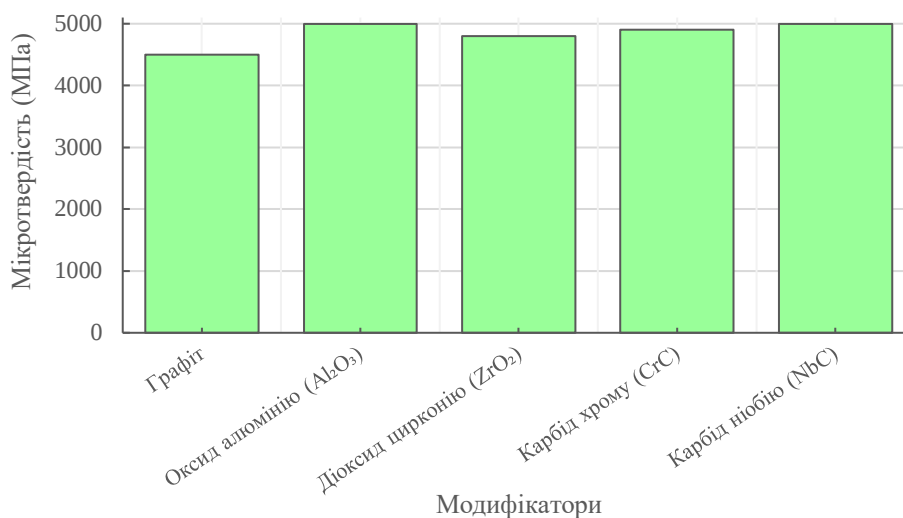


Рисунок 2.9 – Мікротвердість наплавлених покриттів із додаванням різних модифікуючих домішок

Така структура дозволяє використовувати ці покриття на поверхнях, які працюють в умовах високих навантажень, наприклад, вали, підшипники та елементи, які піддаються тертю.

2. Наплавлення з дроту №2 (ПП-Нп-А2) — голчаста евтектика має високу дисперсність, такий показник підвищує твердість і зносостійкість наплавленого металу. Морфологія структури сприяє рівномірному розподілу напружень під час експлуатації.

Висока мікротвердість робить таке покриття раціональним для використання у сільськогосподарській техніці, яка працює в умовах інтенсивного абразивного зношування, наприклад у лемішах плугів та культиваторних лапах.

3. Наплавлення з дроту №3 (ПП-Нп-А3) — голчастий троостит із карбідами по межах зерен має високу міцність і твердість, що дозволяє значно підвищити зносостійкість наплавленого металу. Карбіди мають розвинену поверхню, що забезпечує добре закріплення в матриці та підвищує стійкість до викришування.

Такі покриття підходять для деталей, що зазнають абразивного впливу, наприклад, ріжучих елементів, таких як ножі для різання коренеплодів та леміші плугів.

4. Наплавлення з дроту №4 (ПП-Нп-А4) — ферито-трооститна структура зі збільшеними розмірами зерен знижує твердість і міцність, однак підвищує

пластичність наплавленого металу.

Таке покриття можливо використовувати для деталей, що працюють під середніми навантаженнями, таких як зубчасті колеса, або осі.

5. Наплавлення з дроту №5 (ПП-Нп-А5) — грубозерниста структура з великими карбідними включеннями, що спричиняє викришування під дією навантажень.

Через низьку зносостійкість такі покриття найкраще використовувати для декоративних, або малонавантажених елементів, де знос не є головним фактором.

6. Наплавлення з дроту №6 (ПП-Нп-А6) — грубозерниста перлітна структура з карбідною евтектикою забезпечує середні показники твердості і міцності, але знижує пластичність.

Таке покриття можливо використовувати для зміцнення малонавантажених деталей, наприклад фланців, де зносостійкість важлива, але не є критичним показником.

7. Наплавлення з дроту №7 (ПП-Нп-7) — представляє собою нелегований ферит із включеннями оксиду цирконію, що має низьку твердість та зносостійкість, оскільки наявність великих оксидних включень не сприяє зміцненню структури.

Такий спосіб підходить для декоративних поверхонь, або малонавантажених елементів, де важлива естетика, а не механічна стійкість металу.

Порівняння мікротвердості фериту, евтектики/карбідів і зносостійкості для різних наплавлених покриттів приведено на рис. 2.10. Показано, як підвищення мікротвердості структурних компонентів впливає на загальну стійкість наплавленого покриття до абразивного зносу. Найбільш високі показники зносостійкості спостерігаються у покриттів з раціональним балансом твердого фериту та дисперсних карбідних фаз, котрі забезпечують довговічність у складних умовах експлуатації.

Проаналізувавши отримані дані можливо дійти висновку про те, що:

— найвища зносостійкість спостерігається у покриття, отриманого з дроту №2 (ПП-Нп-А2), це пояснюється дисперсною евтектикою та високою твердістю карбідних включень.

– найнижча зносостійкість спостерігається у покриття з дроту №7 (ПП-НП-7), це в свою чергу буде обумовлено крупнозернистою структурою фериту та відсутністю ефективних зміцнюючих включень.

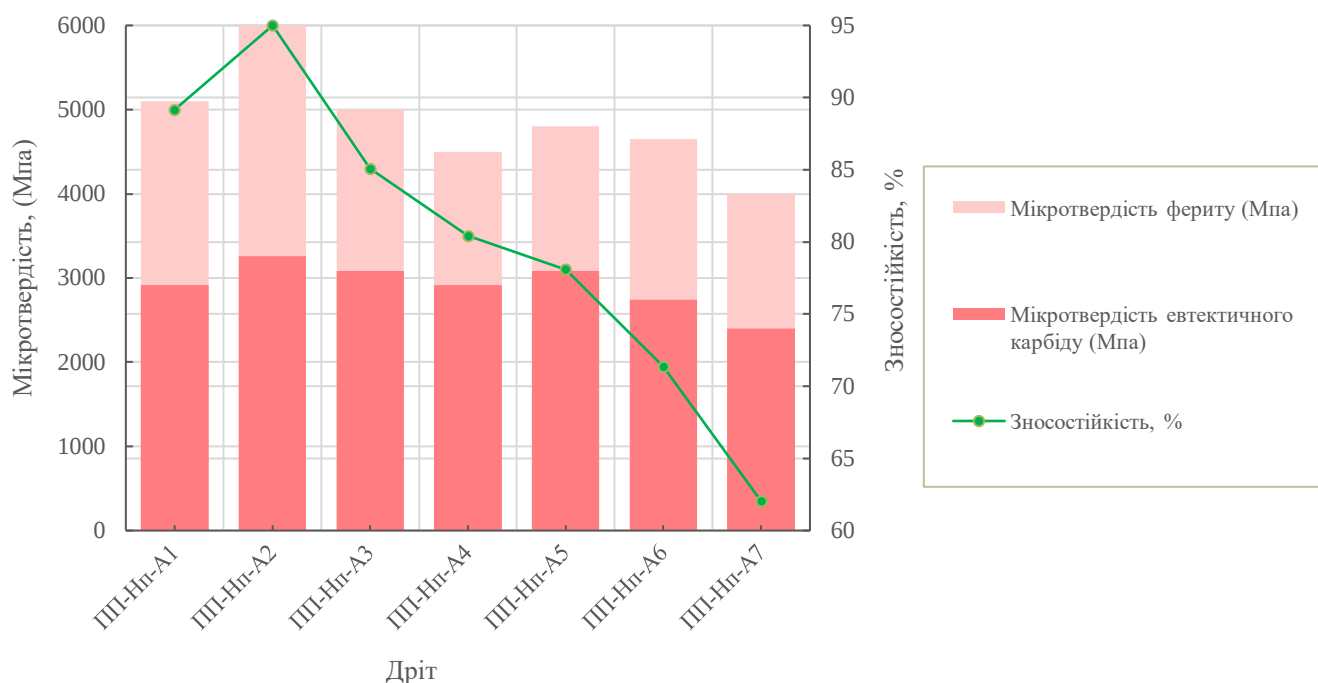


Рисунок 2.10 – Порівняння мікротвердості фериту, евтектики/карбідів та зносостійкості наплавлених покриттів

Проведені металографічні дослідження зразків наплавленого металу із застосуванням різних порошкових дротів показали, що мікроструктурні особливості мають значний вплив на експлуатаційні властивості покриттів. Введення модифікуючих домішок, таких як ферохром, алмаз, та діоксид цирконію, дозволяє покращити мікроструктуру, підвищити твердість та зносостійкість покриттів.

Рациональна структура включає дрібнозернистий ферит із евтектичними включеннями, що забезпечує високу зносостійкість металу, тоді як грубозернисті структури із великими карбідними включеннями схильні до викришування, що знижує довговічність такого покриття. Результати цих досліджень дозволяють оптимізувати технологію наплавлення та підбирати модифікуючі домішки для покриттів, які забезпечуватимуть найкращу продуктивність в різних експлуатаційних умовах.

2.6.1. Функції флюсів у процесі електрошлакового наплавлення

Флюси виконують декілька важливих функцій під час процесу електрошлакового наплавлення [189]. Основні з яких:

1. захист від окиснення (створюючи захисну шлакову ванну, флюс запобігає контакту розплавленого металу з киснем, що зменшує ризик утворення оксидів і пор в наплавленому покритті);
2. регулювання теплового режиму (флюс забезпечує необхідний тепловий баланс у шлаковій ванні, зберігаючи потрібну температуру плавлення і захищаючи метал від перегріву);
3. покращення змочування (флюс знижує поверхневий натяг між рідким металом і шлаком, що покращує змочуваність поверхні, що наплавляється, також сприяє формуванню гладкої поверхні металу і мінімізує можливі дефекти);
4. видалення домішок (флюс сприяє видаленню шкідливих домішок, таких як сірка і фосфор, це покращує чистоту наплавленого металу та підвищує його механічні та якісні властивості).

У процесі експериментального електрошлакового наплавлення використовували різні флюси, основним з яких був флюс АНФ-29 [179, 190-191].

Розглянемо вплив основних компонентів флюсів на структуру наплавленого металу:

1. Фтористий кальцій (CaF_2) — забезпечує низьку активність щодо розплавленого металу, це сприяє захисту від окиснення та підтримці стабільного хімічного складу наплавленого металу, що дозволяє уникнути утворення оксидів і сприяє рівномірному розподілу легуючих елементів у структурі металу.

Використання фтористого кальцію сприяє утворенню дрібнозернистої структури фериту з рівномірним розподілом карбідних включень, це покращує твердість і зносостійкість наплавленого покриття.

2. Оксид алюмінію (Al_2O_3) — впливає на формування шлакової ванни і сприяє контролю процесу кристалізації, зменшуючи швидкість росту зерен під час охолодження, що забезпечує формування дрібнозернистої структури наплавленого металу.

Оксид алюмінію в складі флюсу забезпечує рівномірне охолодження та утворення однорідної мікроструктури, це значно зменшує ризик утворення тріщин та інших дефектів у наплавленому металі.

3. Оксид кремнію (SiO_2) — являється компонентом, який визначає в'язкість шлакової ванни. Раціональна в'язкість сприяє стабільності шлакової ванни і запобігає турбулентним потокам, які можуть призвести до утворення дефектів у наплавленому покритті.

Занадто висока концентрація SiO_2 може призвести до збільшення в'язкості шлаку, а це може призвести до зменшення змочуваності поверхні, що погіршуватиме адгезію наплавленого металу. Збалансована кількість оксиду кремнію сприятиме рівномірному розподілу модифікуючих домішок та утворенню більш однорідної структури з високими показниками міцності.

4. Вплив інших компонентів флюсу, таких як лужні оксиди (Na_2O і K_2O) сприятиме зниженню температури плавлення шлаку, це дозволить легше регулювати температуру шлакової ванни та запобігти перегріву наплавленого металу, також сприятиме уникненню грубозернистої структури та покращить показники міцності [192].

5. Оксид титану (TiO_2): сприятиме формуванню дрібних дендритів та рівномірного розподілу фаз. Це допомагатиме зменшити розмір зерен і підвищити показники твердості наплавленого металу.

Флюс АНФ-29, який було використано в процесі електрошлакового наплавлення, сприяв формуванню якісної структури металу завдяки збалансованому хімічному складу.

Додатково наведено порівняння характеристик наплавлених покриттів, отриманих з використанням флюсу АНФ-29 та без флюсу, це показує вплив флюсу на структуру наплавленого металу (рис.2.11).

Використання флюсів у процесі електрошлакового наплавлення дозволяє досягти високої якості наплавленого металу, зокрема, підвищити показники твердості, зносостійкості, зменшити пористість і забезпечити однорідність структури. Раціональний підбір хімічного складу флюсу та його кількості має

важливе значення для контролю процесу наплавлення і забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик покриття.

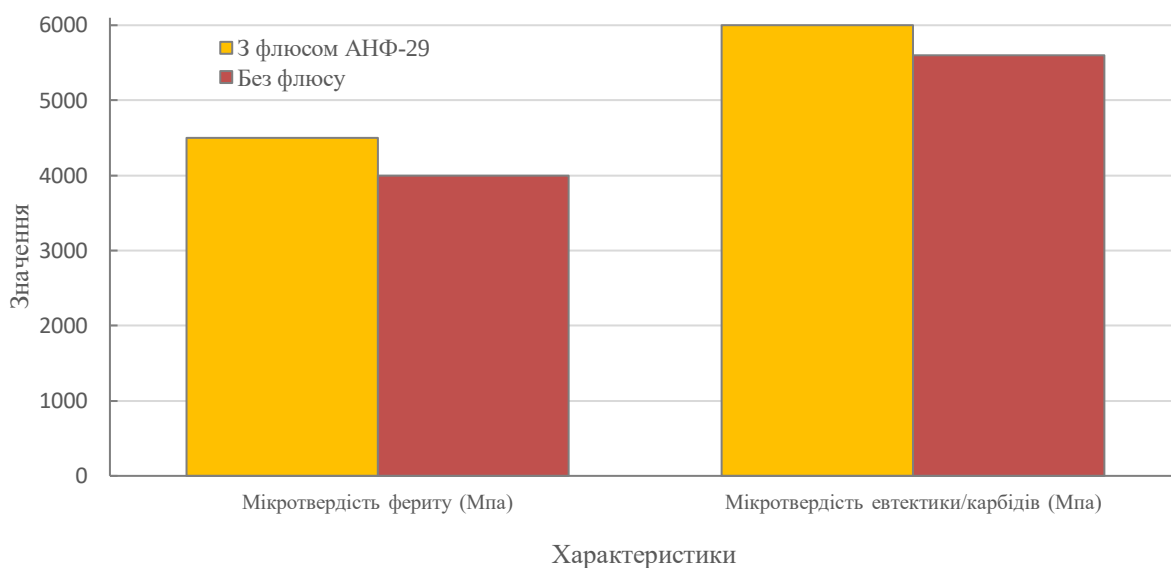


Рисунок 2.11 – Порівняння характеристик покриттів, отриманих при використанні флюсу АНФ-29 та без флюсу

2.6.2. Вплив температури на кристалізацію

Максимальна температура рідкої ванни та наплавленого металу визначає процес кристалізації та структуру покриття.

Висока температура сприяє формуванню грубозернистої структури покриття, це знижує показники твердості і зносостійкості. Великі зерна створюють слабкі зони, де можуть зароджуватися тріщини. Тоді як низька температура та швидке охолодження формують дрібнозернисту структуру, що підвищує показники твердості і міцності металу завдяки більшій кількості меж зерен, які перешкоджають утворенню тріщин і пластичних деформацій.

Температура також впливає на фазовий склад наплавленого металу. При високих температурах формуються перліт і великі карбідні включення, що знижують зносостійкість покриття. При низьких температурах утворюються тверді фази, такі як мартенсит і троостит, що підвищує твердість і стійкість до абразивного зносу.

Розмір зерен напряму залежить від швидкості охолодження. Повільне охолодження сприятиме зростанню зерен, що знижує механічну міцність. Швидке

охладження, особливо в кристалізаторах з водоохолоджуючою секцією, формує дрібнозернисту структуру, що покращує механічні властивості покриття.

Температурний градієнт між шлаковою ванною і основним металом впливає на залишкові напруги. Великий температурний градієнт може спричинити мікротріщини, тоді як рівномірне охолодження знижує ризик дефектів та покращує щільність покриття.

Рациональна температура забезпечує рівномірний розподіл легуючих елементів, мінімізує їх втрату через окиснення та покращує механічні характеристики наплавленого покриття.

У таблиці 2.3 наведено результати аналізу впливу температурних режимів електрошлакового наплавлення на мікроструктуру отриманих покриттів. Дослідження показують, які показники температури істотно впливають на морфологію, рівномірність розподілу зміцнювальних фаз та механічні характеристики покриття.

Таблиця 2.3 – Порівняння впливу різних температур на структуру покриттів

Температура	Вплив на структуру	Механічні властивості
висока температура	формування грубозернистої структури, великі зерна	низька твердість, знижена зносостійкість
раціональна температура	дрібнозерниста структура, рівномірний розподіл фаз	висока твердість, належна зносостійкість
низька температура	утворення дрібних зерен, високий вміст твердих фаз	висока твердість, ризик крихкого руйнування

Основні показники впливу температури на якість наплавленого покриття:

— низькі температури наплавлення (менше 1300°C) сприяють формуванню грубозернистої структури, що може призводити до зниження зносостійкості внаслідок неоднорідності матеріалу.

- раціональна температура (1300–1500°C) забезпечує формування дрібнозернистої рівномірної структури, це підвищує твердість і стійкість до абразивного зносу.

- високі температури (більше 1500°C) призводять до нагрітого росту зерен, утворюючи пористі зони та можливі дефекти (мікротріщини), тим самим знижуючи механічну міцність наплавленого покриття.

У результаті, контроль температури є критичним для досягнення раціональної структури та експлуатаційних характеристик, що забезпечує довговічність та результативність наплавленого покриття.

2.7. Теоретичні основи прогнозування зносостійкості робочих органів ґрунтообробної техніки

В процесі відновлення та зміцнення робочих органів ґрунтообробної техніки методом електрошлакового наплавлення важливим завданням є оцінка ефективності використання різних матеріалів та технологій для підвищення зносостійкості. Для цього доцільно застосовувати методи прогнозування, які дозволяють визначати ресурс та довговічність робочих органів на стадії їх відновлення.

Для проведення аналізу мікротвердості використовувалися зразки, наплавлені з використанням різних порошкових дротів та додаванням модифікуючих домішок різного хімічного складу. В додатку А, таблиці А.8 наведено результати аналізу мікротвердості всіх експериментальних покриттів.

Значення мікротвердості наплавлених покриттів, отриманих із використанням різних модифікаторів, таких як ферохром, високохромистий чавун, карбід хрому, діоксид цирконію та карбід кремнію показано на рис. 2.12. Дані показують, що найвищі значення мікротвердості спостерігаються у покриттів із карбідом хрому, тоді як інші модифікатори забезпечують стабільний баланс між твердістю та іншими властивостями. Графік показує вплив кожного модифікатора на механічні характеристики покриттів. Основні параметри порівняння експериментальних модифікуючих домішок наведено у таблиці 2.4.

Опис та аналіз модифікуючих домішок:

1. Ферохром (FeCr) забезпечує формування дрібнозернистої структури з карбідними фазами, що позитивно впливає на міцність металу. Модифіковане ферохромом покриття характеризується мікротвердістю на рівні 5000 МПа та низькою втратою маси (0,12 г), що свідчить про його високу стійкість до абразивного зношування. Додаткове легування карбідами хрому (Cr_3C_2) і ніобію (NbC) сприяє утворенню термостійких зміцнювальних фаз, які підвищують зносостійкість та опір втомі. Включення оксиду алюмінію (Al_2O_3) стабілізує структуру наплавленого шару, зменшує пористість і підвищує твердість покриття в умовах експлуатації. Також буде забезпечуватися висока рівномірність зміцнення оскільки карбідні включення рівномірно розподілені по всьому об'єму. Ферохром як модифікатор забезпечує раціональне зміцнення та високу зносостійкість завдяки утворенню твердих карбідів.

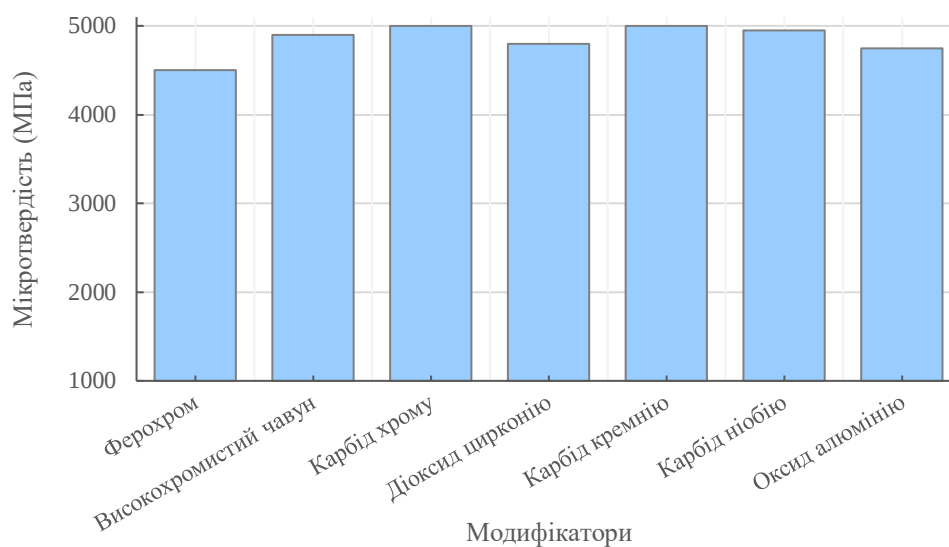


Рисунок 2.12 – Мікротвердість наплавлених покриттів із різними модифікаторами

2. Карбід хрому (CrC) – матиме одні з найвищих показників мікротвердості покриття серед усіх модифікаторів і становитиме 5000 МПа, він утворює тверді карбідні включення, котрі забезпечують високі показники твердості як для феритної, так і для карбідної складових. Показники зносостійкості такого покриття будуть найвищими з усіх досліджуваних зразків, це підтверджується

найнижчою втратою маси на рівні – 0,10 г, що свідчить про дуже високу абразивну стійкість покриття. Мікроструктура твердосплавних карбідних включень забезпечує максимальне зміцнення структури наплавленого металу. Встановлено, що карбіди хрому рівномірно розподілені в матриці, це забезпечує однорідне зміцнення. Ефективність використання такої модифікуючої домішки буде висока, бо карбід хрому створює раціональну комбінацію твердості та абразивної стійкості наплавленого металу.

Таблиця 2.4 – Порівняння ефективності модифікуючих домішок

Модифікатор	Мікротвердість, МПа	Втрата маси, г	Мікроструктура	Рівномірність зміцнення	Загальна ефективність
ферохром (FeCr)	5000	0,12	дрібнозерниста структура з карбідами	висока	висока
карбід хрому (CrC)	5200	0,10	твердосплавні карбіди в матриці	висока	висока
діоксид цирконію (ZrO ₂)	4800	0,14	дрібнозерниста структура, стабільні зерна	середня	висока
графіт	4200	0,18	включення антифрикційних фаз	середня	середня
алмаз	5400	0,09	дисперсні алмазні частинки	висока	висока
ферованадій (FeV)	5100	0,11	ванадієві карбіди у структурі	висока	висока

3. Діоксид цирконію (ZrO₂) – мікротвердість такого покриття буде трохи нижча за ферохром та CrC і знаходитиметься на рівні – 4800 МПа. Втрата маси становитиме 0,14 г, що є задовільним результатом зносостійкості такого покриття. Включення діоксиду цирконію допомагає стабілізувати розмір зерен та запобігає їхньому росту, що позитивно впливає на показники мікротвердості і утворює дрібнозернисту структуру покриття. Рівномірність зміцнення наплавленого покриття буде на середньому рівні, це буде відбуватися через те, що

включення цирконію створюють стабільні центри кристалізації, а їх ефект не такий виражений, як у карбідів. Дієвість використання ZrO_2 в якості модифікуючої домішки буде високою, що добре підходить для підвищення зносостійкості, забезпечуючи стабільність структури покриття.

4. Графіт – має показник мікротвердості на рівні 4200 МПа, який дещо менший порівняно з іншими модифікаторами. Втрата маси буде на рівні 0,18 г, що свідчить про середню абразивну стійкість одержаного покриття. Мікроструктура модифікованого металу має антифрикційні властивості графіту які сприяють зниженню тертя, проте не забезпечують значного зміцнення. Рівномірність зміцнення покриття буде на середньому рівні, це сприяє зменшенню тертя, але не утворює зміцнюючих фаз. Корисність використання графіту в якості модифікуючої домішки забезпечує певний захист від зношування за рахунок антифрикційного ефекту, але не забезпечує зміцнення на рівні карбідів.

5. Алмаз – має найвищі показники твердості та зносостійкості серед усіх досліджених модифікаторів. Мікротвердість становить 5400 МПа, що є максимальним значенням у порівнянні з іншими матеріалами. Втрата маси під час зношування складає лише 0,09 г, що свідчить про високу абразивну стійкість. Мікроструктура алмазу представлена дисперсними включеннями, які значно зміцнюють матрицю та підвищують її опір до абразивного зношування. Завдяки рівномірному розподілу алмазних частинок у структурі покриття забезпечується високий рівень рівномірності зміцнення, що створює численні бар'єри для абразивних частинок. Корисність використання алмазу як модифікуючої домішки є дуже ефективною, оскільки він забезпечує максимальну абразивну стійкість завдяки унікальному поєднанню високої твердості та рівномірного розподілу в структурі покриття.

6. Ферованадій (FeV) – є високоміцним модифікатором з мікротвердістю 5100 МПа, що свідчить про його значну твердість. Втрата маси під час випробувань на знос складала 0,11 г, це підтверджує його високу стійкість до абразивного зношування. Мікроструктура покриття, модифікованого FeV, містить ванадієві карбіди, які сприяють точковому зміцненню та підвищенню зносостійкості.

Завдяки рівномірному розподілу карбідів ванадію в структурі покриття досягається високий рівень рівномірності зміцнення, що забезпечує відмінні механічні властивості. Корисність використання ферованадію як модифікуючої домішки оцінюється на достатньо високому рівні. Він значно покращує зносостійкість і твердість покриття, роблячи його одним із найкращих матеріалів для зміцнення захисних покриттів.

Вибір модифікатора для підвищення мікротвердості залежить від конкретних вимог до покриття, таких як твердість, зносостійкість, антифрикційні властивості та умови експлуатації. Карбідні модифікатори, CrC, FeCr, FeV, та алмаз є найефективнішими для підвищення абразивної стійкості і забезпечення високої мікротвердості, тоді як графіт краще підходить для зниження тертя.

Для визначення динаміки зношування матеріалу введемо поняття зношування еталонного зразка матеріалу еталонним абразивом в еталонних умовах. Візьмемо як еталонний абразив просіяний кварцовий пісок з відносною вологістю 1%, відносну зношувальну здатність якого приймемо $m_{ет} = 1$. Як еталонний матеріал візьмемо зразок зі 30MnB5 у стані постачання твердістю HRB 87, відносну зносостійкість якого візьмемо $\epsilon_{ет} = 1$.

За еталонну умову зношування приймемо: тиск абразиву на поверхню, що зношується, $p_{ет} = 0,1$ МПа; швидкість абразиву частинок відносно зразка $v_{відн.ет} = 1$ км/год; поверхня тертя зразка $S_{ет} = 1$ см²; час зношування $t_{ет} = 1$ год.

Оскільки знос пропорційний до зношувальної здатності абразиву (грунту), тиску, шляху тертя, площі тертя і обернено пропорційний відносній зносостійкості зразка (матеріалу), то знос цього зразка у ваговому вимірі становить [183]:

$$W_{ет} = K \frac{m_{ет}}{\epsilon_{ет}} p_{ет} \cdot v_{відн.ет} \cdot S_{ет} \cdot t_{ет} \quad (2.1)$$

Знаючи фактичний знос еталонного матеріалу в еталонних умовах, можна визначити еталонний коефіцієнт пропорційності:

$$K_{ет} = \frac{W_{ет} \cdot \epsilon_{ет}}{m_{ет} \cdot p_{ет} \cdot v_{ет} \cdot S_{ет} \cdot t_{ет}} \quad (2.2)$$

Знос будь-якого іншого матеріалу в інших умовах може бути визначений за

наступним виразом [184]:

$$W_p = K_{\text{ет}} \frac{m_{\text{ет}} \cdot \eta_1}{\varepsilon_{\text{ет}} \cdot \eta_2} v \cdot p, \text{ г/год.} \quad (2.3)$$

За відомого граничного зносу робочого органу можна визначити його довговічність за такою залежністю [185]:

$$T = \frac{\Delta h_{\text{ет}} \cdot \varepsilon_{\text{ет}} \cdot \eta_1 \cdot A \cdot a}{K_{\text{ет}} \cdot m_{\text{ет}} \cdot \eta_2 \cdot p \cdot v_0}, \text{ га} \quad (2.4)$$

де $\Delta h_{\text{ет}}$ — граничний знос робочого органу на ділянці, що зношується найбільше, мм; $\varepsilon_{\text{ет}}$ — відносна зносостійкість матеріалу, з якого виготовлений робочий орган, за тиску $p_{\text{ет}} = 0,1$ МПа; $m_{\text{ет}}$ — відносна зношувальна здатність ґрунту за механічним складом при еталонному 0,1 МПа тиску абразиву; p — тиск ґрунту (абразиву) на найбільш зношуваній ділянці робочого органу, МПа; η_1 — поправочний коефіцієнт до зношувальної здатності ґрунту залежно від тиску; η_2 — поправочний коефіцієнт на зміну відносної зносостійкості матеріалу залежно від тиску; v_0 — відносна швидкість руху частинок по поверхні робочого органу; A — продуктивність робочого органу, га/год; $K_{\text{ет}}$ — еталонний коефіцієнт пропорційності; a — коефіцієнт, що враховує зміну товщини носової та лезової частин леміша та стрілкової лапи під час їх зміцнення. У разі товщини носової лезової частини, що дорівнює 9 мм, $a = 1$. За товщини носової частини, збільшеної на 3 мм, $a = 1,3$ на 4 мм — $a = 1,4$ і т.д. Відповідно за середньої товщині лезової частини, зменшеної на 1 мм, $a = 0,9$, на 2 мм, $a = 0,8$ тощо.

Відносна зносостійкість матеріалів за еталонного тиску абразиву $p_{\text{ет}} = 0,1$ МПа визначається за емпіричними рівняннями [186]:

для сталі:

$$\varepsilon_{\text{ет}} = 0,8(0,25x_1 + 0,09x_2 + 0,64x_3 + 0,12x_4 - 3,62); \quad (2.5)$$

для наплавленого покриття:

$$\varepsilon_{\text{ет}} = 0,8(0,021x_1 + 0,0031x_2 + 0,4x_3 + 0,24x_4 + 0,21x_5 + 0,082x_6 + 0,7x_7 - 7,54), \quad (2.6)$$

де x_1 — вміст вуглецю, %; x_2 — вміст хрому, %; x_3 — вміст вольфраму, %; x_5 — вміст бору, %; x_6 — вміст молібдену, %; x_7 — вміст титану, %; x_4 — твердість в одиницях HRC.

Відносна зносостійкість матеріалу при тиску абразиву p_i визначається за

виразом:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{\text{ст}} \cdot \eta_2 \quad (2.7)$$

Поправочний коефіцієнт η_2 визначається за формулою:

$$\eta_2 = 1,75p_i + 0,825 \quad (2.8)$$

За тиску абразиву p_i відносна зношувальна здатність ґрунтів визначається за формулою:

$$m_p = m_{\text{ст}} \cdot \eta_1 \quad (2.9)$$

Поправочний коефіцієнт η_1 пропонується визначати за формулою:

$$\eta_1 = 9,5p_i + 0,04 \quad (2.10)$$

Практично всі робочі органи ґрунтообробних агрегатів мають форму клина. Відносна швидкість переміщення частинок $v_{\text{відн.}}$ для робочого органу, що має таку форму, дорівнює:

$$v_{\text{відн.}} = \frac{v_{\text{п}}}{\cos \gamma \cdot \cos \alpha} = \frac{v_{\text{п}}}{\chi} \quad (2.11)$$

де $v_{\text{п}}$ — поступальна швидкість руху робочого ґрунтообробного органу, км/год; γ — кут установки робочої поверхні робочого органу за напрямком руху, град.; α — кут нахилу робочої поверхні клина до горизонту в площині, перпендикулярній ріжучій кромці, град.; $\chi = \cos \gamma \cdot \cos \alpha$ — відношення поступальної швидкості робочого органу до швидкості переміщення пласта ґрунту по робочій поверхні.

Продуктивність робочого органу визначається за наступним виразом [187]:

$$A = \frac{b \cdot v_{\text{п}}}{10}, \text{ га/год.} \quad (2.12)$$

де b — ширина захвату робочого органу, м.

Розглянуто дієвість відновлення дослідного зразка леміша плуга (рис. 2.13) з листової сталі марки: 30MnB5. Розрахунки проведено для оранки чорнозему звичайного, для якого $m_{\text{ст}} = 0,57$.

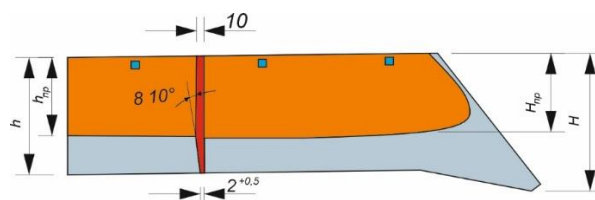


Рисунок 2.13 – Конструктивні та вибракувальні параметри леміша

Твердість ґрунту прийнята $B_1 = 4,0$ МПа. Швидкість оранки становить – 7-9 км/год. Товщина носової частини леміша $a = 10$ мм. Середня товщина лезової частини — 8 мм. Вибракувальні параметри леміша: $\Delta H = H - H_{np}$ — граничний знос за висотою носка, мм. $\Delta h = h - h_{np}$ — граничний знос за шириною лезової частини.

Для дослідного леміша прийнято такі розміри: $H = 155$ мм; $H_{np} = 90$ мм; $h = 130$ мм; $h_{np} = 90$ мм.

Однією з найважливіших вимог під час вибору марки сталі та модифікуючої домішки для відновлення лемішів та стрілчастих культиваторних лап є значення ударної в'язкості, якою повинен володіти метал, що наплавляється на робочу поверхню такої деталі. Його значення має бути не менше ніж 35 Дж/см².

Цього можна домогтися певними режимами термообробки.

Зміни основних характеристик сталі: тимчасовий опір на розрив σ_b , твердість HRC та ударна в'язкість KCU залежно від температури відпуску.

За такого значення твердості відповідно з рівнянням 2.5 відносна зносостійкість сталі за умов еталонного тиску становитиме: 30MnB5 — $\epsilon_{\text{ет}} = 1,51$.

Максимальні тиски, що діють на носку p_n і лезовій частині p_l леміша, визначаються за емпіричними залежностями [188]: Зносостійкий наплавлений метал системи C-Cr-Fe

$$p_n = 0,072 \dots 0,14(1 + 0,031_p)(1 + 0,01\beta)(3,7 + B1,4), \text{МПа}, \quad (2.13)$$

$$p_l = 0,03 \dots 0,042(1 + 0,031_p)(1 + 0,01\beta)(3,7 + B1,4), \text{МПа}, \quad (2.14)$$

де v_n — поступальна швидкість робочих органів під час оранки, км/год; β — кут нахилу леміша до дна борозни, град.; B — твердість ґрунту, МПа; p_n — тиск на носовій частині леміша, МПа; p_l — тиск на лезовій частині, МПа.

В якості прикладу розглянуто ефективність виготовлення дослідного зразка леміша плуга з листової сталі марки: 30MnB5. Розрахунки проведено для оранки суглинистого легкого ґрунту, для якого $m_{\text{ем}} = 0,42$. Твердість ґрунту прийнята $B_1 = 3,0$ МПа. Швидкість оранки — 8 км/год. Товщина носової частини леміша $a = 10$ мм. Середня товщина лезової частини — 9 мм. Вибракувальні параметри леміша: $\Delta H = H - H_{np}$ — граничний знос за висотою носка, мм. $\Delta h = h - h_{np}$ — граничний знос за шириною лезової частини.

Для дослідного леміша прийнято такі розміри: $H = 155 \text{ мм}$; $H_{np} = 90 \text{ мм}$; $h = 130 \text{ мм}$; $h_{np} = 90 \text{ мм}$. Однією з найважливіших вимог під час вибору марки сталі для виготовлення леміша є значення ударної в'язкості, яку повинна мати сталь. Її значення має бути не менше 30 Дж/см^2 . Цього можна домогтися певними режимами термообробки.

У зв'язку з тим, що ціни на матеріали нестабільні й залежать від багатьох факторів, у розрахунках ефективності доцільно оперувати не конкретними, а відносними величинами цін. Як еталон, так само як при характеристиці зносостійкості, прийнято листовий прокат сталі 45 товщиною 8...12 мм. Відносна ціна цього прокату прийнята за одиницю. Як критерій вибору доцільної марки сталі використовували вираз [189]:

$$C_u = \frac{OЦ}{\varepsilon} \rightarrow \min, \quad (2.15)$$

де C_u – вартісна оцінка зносостійкості; $OЦ = \frac{Ц}{Ц_{ет}}$ — відносна ціна сталі; $Ц$ – ціна тієї чи іншої марки сталі, грн.; $Ц_{ет}$ – ціна еталонної сталі, грн.; ε – відносна зносостійкість сталі.

Розрахунки показують (табл. 2.5), що найприйнятнішими для виготовлення леміша марками сталей є (у порядку убутання ефективності вартісної оцінки зносостійкості) є: 30MnB5. Із розрахунків також видно, що коефіцієнти рівностійкості лемішів КР, що дорівнюють відношенню довговічності ділянки, яка найбільш зношується, — носової частини T_1 до довговічності ділянки, яка найменш зношується, — лезової частини T_2 , перебувають у межах від 0,20 до 0,30 залежно від твердості ґрунтів, $K_p = \frac{T_1}{T_2}$. Це означає, що в разі зносу носової частини леміш вибраковується з досить високим залишковим ресурсом лезової частини.

Для виключення цієї обставини необхідно, або підвищувати ресурс носової частини до ресурсу лезової частини, забезпечуючи значення коефіцієнта рівностійкості, близьке до одиниці, або виготовляти леміш із двох частин, долота та власне леміша, щоб у разі зношування долота замінювати тільки його, а леміш продовжувати використовувати до повного зношування. Саме така конструкція леміша застосовується в зарубіжних плугах.

Ресурс носової частини леміша можна підвищити різними варіантами: 1) наплавленням на зворотний бік сплаву ФБХ-6-2; 2) наплавленням на зворотний бік металокерамічної пластини ВК-20; 3) приварюванням на зворотний бік пластини зі сталі Х12; 4) приварюванням на лицьовий бік носової частини пластини завтовшки 3...5 мм з того самого матеріалу, що і сам леміш, плюс один з перших варіантів.

Таблиця 2.5 – Відносні характеристики сталей

Марка сталі	Мінімальна температура відпуску, °С	Ударна в'язкість, КСУ, Дж/см ²	Твердість, HRC	Відносна зносостійкість при еталонному тиску	Відносна ціна, ОЦ	Вартісна оцінка зносостійкості, ОЦ/г
30MnB5	370	30	48	1,33	1,35	1,01
65Г	400	30	48	1,33	1,40	1,05
40Х	370	30	48	1,33	1,35	1,01
30ХГСА	200	90	50	1,47	1,90	1,29
40ХС	150	62	58	2,10	2,10	1,00

Також перспективним є варіант приварювання спеціальних металевих біметалевих вставок отриманих за допомогою електрошлакового наплавлення у спеціально підготовлені вікна на самому леміші. Як показують розрахунки, ресурс леміша, виготовленого зі сталі 40ХС і зміцненого сплавом ФБХ-6-2, становитиме 31 га, металокерамікою ВК — 40 га (за твердості ґрунту 3 МПа). За таким самим принципом було виготовлено дослідну партію лемішів для плуга фірми «Велес-Агро Одеса» зі сталі 40Х зі зміцненням пластини зі сталі Х12. Випробування на полях Харківської області засвідчили, що їхній ресурс склав більше ніж 50 га та є співставним із ресурсом фірмових. У разі виготовлення цих лемішів зі сталі 40ХС їхній ресурс підвищився б додатково не менше ніж на 40%.

Представлена методика прогнозування ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин з достатньою для практичних цілей точністю дає змогу

обґрунтувати вибір необхідних матеріалів і технологій їх виготовлення та зміцнення.

2.8. Методики рентгеноспектрального аналізу

Рентгеноспектральний аналіз дозволив отримати інформацію про розподіл легуючих елементів, наявність домішок, а також оцінити гомогенність структури наплавленого металу. Це дало змогу точно визначити якісний і кількісний склад елементів у наплавленому покритті, що є важливим для забезпечення відповідності матеріалу технічним вимогам.

Вміст основних елементів у наплавлених покриттях, отриманих з використанням різних модифікуючих компонентів, показано на рисунку 2.14. На графіку відображено концентрації хрому, марганцю, кремнію, заліза та інших елементів, які впливають на мікроструктуру, механічні властивості та стійкість покриттів до зношування. Аналіз дозволив оцінити співвідношення елементів характеристики покриттів та їх придатність для експлуатації в різних умовах.

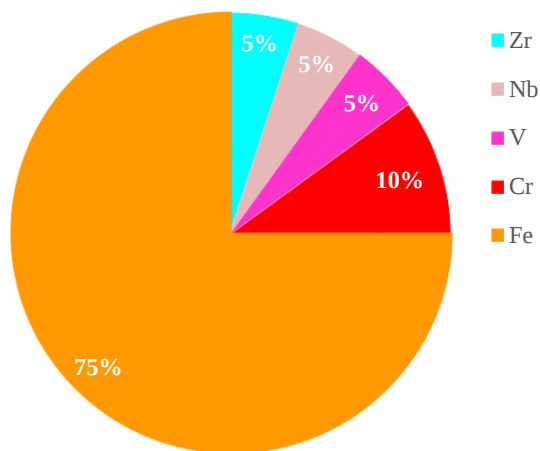


Рисунок 2.14 – Вміст елементів у наплавлених покриттях

Основними завданнями рентгеноспектрального аналізу є:

- визначення хімічного складу наплавленого металу, зокрема вмісту легуючих елементів та модифікуючих домішок;
- аналіз розподілу елементів у структурі наплавленого металу для оцінки однорідності;
- дослідження фазового складу покриття для виявлення карбідних фаз та інших зміцнюючих компонентів.

Рентгеноспектральний аналіз базується на взаємодії рентгенівського випромінювання з атомами матеріалу. При опроміненні зразка рентгенівськими променями, атоми у матеріалі збуджуються, і в результаті переходу електронів з зовнішніх оболонок на внутрішні виділяється енергія у вигляді рентгенівського випромінювання характерної довжини хвилі. Ця довжина хвилі є специфічною для кожного елементу, що дозволяє ідентифікувати елементи та визначити їх концентрацію.

Методики проведення рентгеноспектрального аналізу:

- зразки для рентгеноспектрального аналізу виготовлялися з наплавленого металу розміром 24 мм × 24 мм × 10 мм (важливою вимогою є наявність рівної та гладкої поверхні, яка забезпечує необхідний контакт з променем);

- зразки піддавалися шліфуванню та поліруванню для отримання гладкої поверхні без подряпин, адже нерівності можуть впливати на результати аналізу. Для полірування використовували алмазні пасти з зернистістю 2/1 та 1/0.

Типи рентгеноспектрального аналізу та обладнання:

- рентгенофлуоресцентний аналіз (РФА) — цей метод базується на вимірюванні інтенсивності флуоресцентного випромінювання який виділяється атомами при їх опроміненні (РФА використовується для визначення як якісного, так і кількісного складу, а також дозволяє оцінити вміст легуючих компонентів, таких як хром, ванадій, цирконій, марганець та інші);

- енергодисперсійний рентгенівський спектральний аналіз (EDS) — цей метод дозволяє дослідити елементний склад наплавленого покриття за рахунок реєстрації характерного рентгенівського випромінювання, що виділяється при збудженні атомів (основною перевагою EDS є можливість отримати карти розподілу елементів за зразком, що дозволяє оцінити однорідність розподілу легуючих елементів).

В додатку А, на рисунку А.9 представлені карти розподілу хімічних елементів у наплавлених покриттях. Візуалізація дозволяє оцінити рівномірність розподілу таких елементів, як хром, марганець, нікель, вуглець та інших, які

впливають на мікроструктуру та властивості покриття. Карти демонструють зони збагачення і дефіциту елементів, що допомагає ідентифікувати вплив технологічних параметрів на якість наплавленого покриття (це важливий інструмент для аналізу та оптимізації хімічного складу покриттів).

Аналіз карти розподілу елементів по зразках надає уявлення про концентрацію різних елементів у наплавлених покриттях і їх розподіл по всій площині зразка. Ось кілька ключових аспектів аналізу:

- карти розподілу елементів для кожного зразка показують, наскільки рівномірно елементи, такі як Fe, Cr, V, Nb, Zr, розподілені по площині зразка;
- рівномірний розподіл елементів є важливим для стабільності і якості наплавленого покриття (наприклад, залізо (Fe) як основний елемент має бути розподілене більш рівномірно для забезпечення основної структури покриття);
- легуючі елементи, такі як хром (Cr), ванадій (V), ніобій (Nb) і цирконій (Zr), мають бути рівномірно розподілені для утворення міцних фаз і забезпечення зміцнення (див. додаток А, таблиця А.1);
- середні значення концентрацій різних елементів можна проаналізувати для визначення їхньої частки у складі покриття;
- згідно з таблицею порівняння, залізо (Fe) складає найбільшу частину у складі наплавленого покриття, а інші елементи присутні в меншій кількості, що відповідає їх функції як легуючих елементів;
- аналіз концентрації допомагає зрозуміти, наскільки правильно були підібрані пропорції компонентів модифікуючої шихти для забезпечення бажаних властивостей наплавленого покриття.

Порівняння зразків наплавлених покриттів за середньою концентрацією ключових хімічних елементів, таких як хром, марганець, кремній, залізо та інші представлено на рис. 2.15. (див. дод. А, таблиця А.8). Також відображено розподіл елементів у структурі покриттів, що дозволяє оцінити вплив кожного елемента на формування механічних властивостей, зокрема твердості, зносостійкості та корозійної стійкості. Графік показує різницю у хімічному складі між зразками, що є важливим для вибору покриття для конкретних умов експлуатації [193].

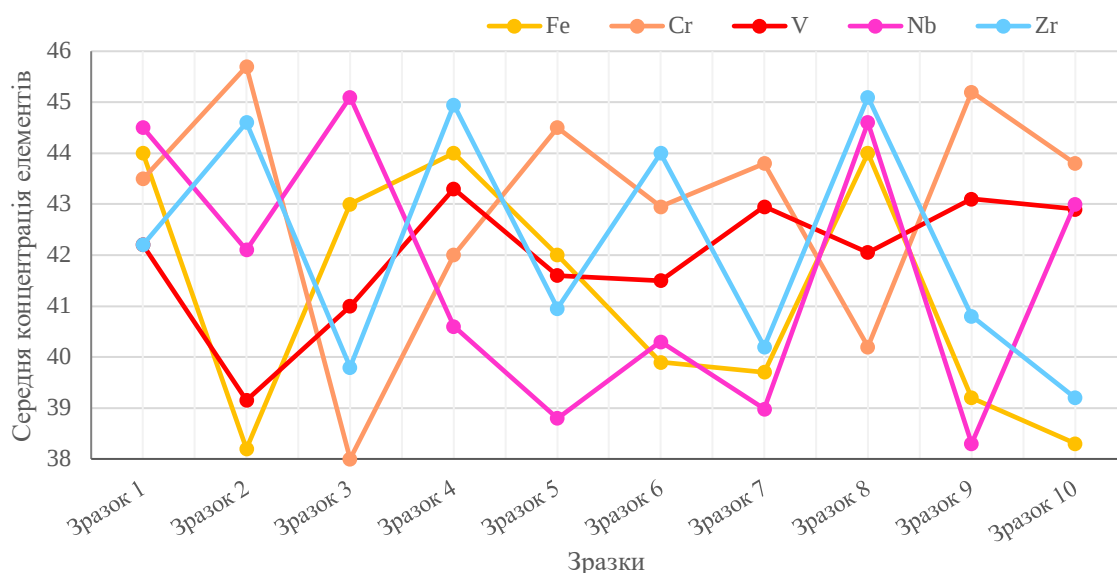


Рисунок 2.15 – Порівняння зразків за середньою концентрацією елементів

Кожен елемент представлений окремою лінією, це дозволяє бачити зміну концентрацій у різних зразках:

- аналіз показує можливі варіації у розподілі та концентрації елементів між різними зразками;
- відмінності у розподілі елементів можуть бути наслідком незначних відхилень в технологічному процесі, або умовах наплавлення;
- наприклад, якщо один із зразків має більшу концентрацію хрому в певних ділянках, це може впливати на локальну твердість та зносостійкість покриття.

Вплив на властивості покриттів:

- рівномірність розподілу легуючих елементів, таких як Cr, V, Nb, Zr, суттєво впливає на властивості покриттів, зокрема їх твердість, міцність і стійкість до зношування.
- концентрація хрому (Cr) і ванадію (V) забезпечує утворення карбідних фаз, які значно підвищують зносостійкість покриття (якщо концентрація цих елементів нерівномірною, це може призводити до утворення ділянок з різною твердістю та, відповідно, нерівномірного зношування).

Візуалізація дефектів:

- карти розподілу можуть також показувати області з високою, або

низькою концентрацією певного хімічного елемента, що вказує на можливі дефекти у покритті (висока концентрація одного з легуючих елементів у певних місцях може призводити до виникнення внутрішніх напружень, тріщин, або погіршення загальної міцності);

- зони з недостатньою кількістю легуючих елементів можуть бути вразливі до корозії, або пришвидшеного механічного зношування.

- карти розподілу елементів надають важливу інформацію про те, наскільки рівномірно легуючі елементи розподілені по всій площі наплавленого покриття (цей аналіз дозволяє ідентифікувати ділянки з можливою концентрацією дефектів, а також оцінити ефективність технологічного процесу наплавлення, правильне розуміння розподілу елементів по площині зразка сприяє оптимізації процесу і покращенню якості кінцевого покриття).

Устаткування для проведення аналізу:

- рентгеноспектрометр — для проведення рентгеноспектрального аналізу використовувався рентгеноспектрометр типу OxfordInstruments X- MaxN, який забезпечує високу чутливість і точність вимірювань. Система дозволяє визначати вміст елементів від Be (4) до U (92);

- скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) — для дослідження розподілу елементів використовували скануючий електронний мікроскоп JEOL JSM-6510LV із системою EDS, що дозволяло отримати високоякісні карти розподілу легуючих компонентів.

Параметри аналізу:

- напруга на трубці — під час аналізу використовували напругу на рентгенівській трубці 20-25 кВ залежно від типу досліджуваного елемента, це забезпечувало необхідну інтенсивність випромінювання для збудження атомів дослідного зразка;

- час експозиції для кожного зразка становив 200-300 секунд, що дозволяло досягти високої точності вимірювань і зменшити похибку аналізу;

- для калібрування використовували дослідні зразки з відомим вмістом елементів, це забезпечувало точність визначення кількісного складу елементів у

досліджуваних зразках.

Рентгеноспектральний аналіз підтвердив відповідність фазового складу отриманих покриттів прогнозованій мікроструктурі, що підтверджує ефективність обраної технології наплавлення.

2.9. Загальна методика проведення експериментальних досліджень

Рентгеноспектральний аналіз проведено для визначення елементного складу та характеру розподілу хімічних елементів у структурі модифікованих зразків. Отримані результати дозволяють оцінити ефективність легування та рівномірність розподілу модифікуючих домішок у наплавленому покритті, а також виявити фази, що утворюються під час наплавлення.

Якісний склад наплавленого металу — аналіз показав наявність таких основних елементів, як Fe, Cr, Mn, Si, V, Nb, Zr. Легуючі елементи, такі як Cr і V, є важливими для зміцнення структури та підвищення зносостійкості покриттів. Також було визначено наявність модифікуючих компонентів, таких як Zr і Nb, які були рівномірно розподілені по всій структурі наплавленого шару. За допомогою РФА та EDS визначено кількісний вміст кожного з елементів у структурі. Наприклад, вміст хрому становив близько 12-14%, ванадію — 2-3%, ніобію (1.5%) та цирконію (0.8%), що дозволяє формувати твердосплавні фази для зміцнення матриці наплавленого металу. Основу покриття складає залізо (68.5%). Це підтверджує ефективне легування та модифікацію структури наплавленого металу.

Карти розподілу елементів, отримані за допомогою EDS, підтвердили, що легуючі елементи розподілені рівномірно, це забезпечує однорідність покриття та покращує його експлуатаційні характеристики. Однорідний розподіл елементів важливий для зменшення внутрішніх напружень і підвищення міцності металу.

Концентрації ключових елементів, таких як хром, марганець, кремній, нікель та інші, які впливають на механічні властивості наплавлених покриттів, показано в таблиці 2.6. Дані дозволяють оцінити вплив легувальних елементів на формування структури покриття, його твердість, зносостійкість та стійкість до корозії. Це забезпечує рекомендації для вибору раціональних складів для конкретних умов

експлуатації.

Таблиця 2.6 – Кількісний вміст елементів у наплавлених покриттях

Елемент	Вміст (%)
Fe	68.5
Cr	13.5
Mn	1.8
Si	2.0
V	3.0
Nb	1.5
Zr	0.8

Фазовий склад наплавленого металу показав наявність карбідних фаз, таких як Cr_3C_2 та NbC , які утворюються під час наплавлення. Ці фази забезпечують зміцнення покриття, що є важливим для підвищення абразивної стійкості.

Рентгеноспектральний аналіз підтвердив ефективність введення модифікуючих домішок, таких як ферохром і ферованадій, які утворюють зміцнюючі фази, що покращують механічні властивості наплавленого металу, зокрема підвищують його твердість і зносостійкість.

В додатку А, на рисунку А.10 представлені карти розподілу твердості по всіх дослідним зразкам, які показують варіації механічних властивостей у різних зонах наплавленого покриття. Карти дозволяють візуалізувати зони з підвищеною та зниженою твердістю, що виникають через неоднорідність структури, вплив модифікаторів та процеси охолодження. Аналіз таких карт забезпечує розуміння локальних механічних характеристик покриття та дозволяє оптимізувати технологічні параметри наплавлення для покращення експлуатаційних властивостей покриттів.

Аналіз показав, що використання різних модифікуючих домішок, таких як хром, ванадій, ніобій, цирконій і т.д., дозволяє досягти значного покращення експлуатаційних властивостей наплавлених покриттів, зокрема їх абразивної

стійкості та твердості.

Рентгеноспектральний аналіз підтвердив відповідність фазового складу отриманих покриттів прогнозованій мікроструктурі, що підтверджує ефективність обраної технології наплавлення.

2.10. Оцінка ефективності та перспективи застосування карбіду кремнію як модифікуючої домішки

Додавання карбіду кремнію в якості модифікатора до наплавленого металу дозволяє суттєво підвищити зносостійкість наплавленого покриття. Карбід кремнію утворює твердосплавні фази, які діють за принципом бар'єрів для абразивних частинок. Це зменшує втрати маси металу під час абразивного зношування, знижує швидкість зносу та забезпечує тривалий термін служби деталей. Карбідні включення SiC є дуже міцними і ефективно запобігають проникненню та руйнуванню металевої матриці під дією абразивів.

Карбід кремнію завдяки своїй дрібнодисперсній формі, може служити центрами кристалізації, що сприяє утворенню дрібнозернистої структури наплавленого металу. Це, у свою чергу, знижує рівень внутрішніх напружень і тріщиноутворення, покращуючи цілісність та довговічність покриття. Дрібнозерниста структура має більше меж зерен, які перешкоджають росту тріщин, що підвищує ударну в'язкість і стійкість до крихкого руйнування.

Зміцнення покриття за рахунок карбіду кремнію також дозволяє підвищити твердість і міцність наплавленого металу. Введення твердих включень SiC утворює міцну металокерамічну структуру, що забезпечує високу мікротвердість та опір до пластичних деформацій. Це є особливо важливим для деталей, що працюють під постійним навантаженням, або в умовах абразивного тертя.

Наприклад додавання SiC до наплавлених покриттів може бути використано для зміцнення ріжучих елементів сільськогосподарської техніки, таких як плуги та борони, які піддаються значному абразивному зношуванню при роботі з ґрунтами з високим вмістом абразивних частинок (каміння, пісок).

Карбід кремнію (SiC) є перспективним модифікуючим компонентом, що

дозволяє значно покращити експлуатаційні характеристики наплавлених покриттів, зокрема їх зносостійкість, мікротвердість та стійкість.

Подальші дослідження повинні зосередитися на оптимізації концентрації SiC у шихті та на дослідженні взаємодії карбиду кремнію з іншими легуючими елементами в наплавленому металі для забезпечення максимального ефекту зміцнення.

2.11. Оптико-математичне моделювання структур для оцінки зносостійкості наплавлених покриттів

В ході досліджень також було проведено створення оптико-математичної моделі деяких структур, які можна якісно згрупувати по морфологічним ознакам. До такої групи можна віднести наплавлення з дроту №1, 2 та 9. Модель дозволяє прогнозувати певні властивості матеріалу по морфологічним ознакам структури і не звертатися в подальшому до більш трудоемних випробувань у межах однакових морфологій. Ця модель має деякі обмеження:

- модель враховує взаємозв'язок структура – властивість тільки по одній властивості, на знос, і не враховує рівень мікротвердості структурних складових;
- модель працює у межах однієї характерної морфології і не може застосовуватись до мікроструктур з якісно іншою морфологією;
- фото мікроструктур повинні бути отримані при однаковому збільшенні, або приведені до однакового масштабу.

Опишемо алгоритм отримання і застосування даних.

На рисунку 2.16 представлено інвертоване зображення отриманої структури наплавлення. Інверсія потрібна для узгодженого розуміння графічної інформації з фізичною картиною. Це застосування базується на тому уявленні, що при виготовленні шліфа на кінцевій стадії (полірування) більш м'яка фаза (легований твердий розчин) лежить нижче по висоті відносно фокусу оптичної системи мікроскопу (об'єктиву), ніж більш тверда фаза карбідів. Тоді при створенні гістограми рельєфу за яскравістю, програма, більш тверді виступи на мікрошліфі сприйматиме як піки рельєфу а темні ділянки – як впадини.

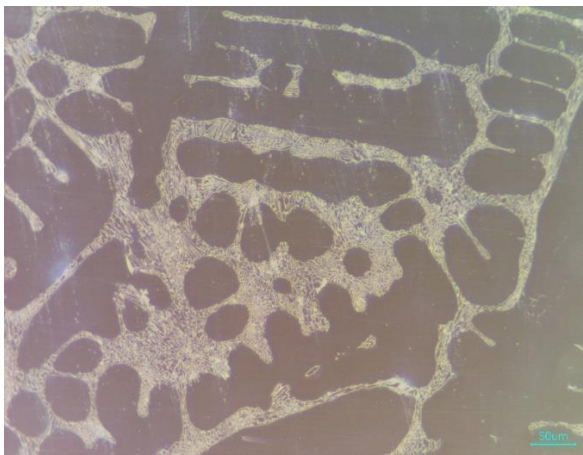


Рисунок 2.16 – Інверсія зображення мікроструктури зразка наплавлення з дроту №1 ($\times 200$)

При побудові площинної гістограми розподілу за яскравістю формується тривимірне зображення мікро-ділянки поверхні, де зеленим кольором відображено тверді виступи, а синьо-темним — м'які впадини (рис. 2.17).

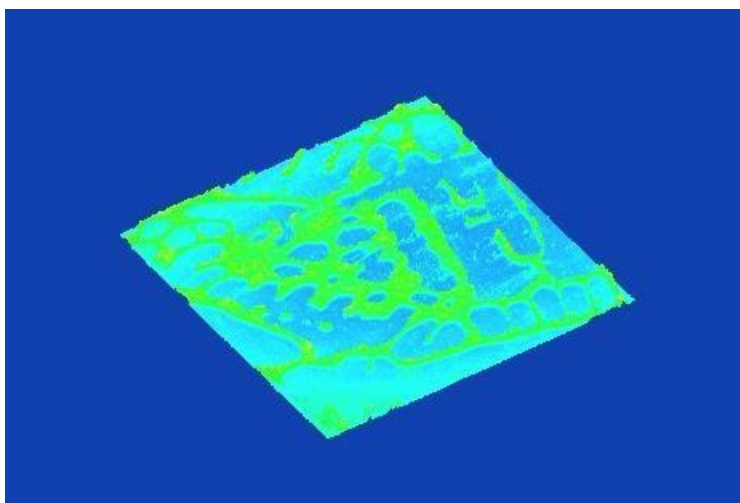


Рисунок 2.17 – 3D уявлення мікроструктури зразка наплавлення з дроту №1 ($\times 200$)

Не зважаючи на наглядність отриманої картини, вона дає лише якісне уявлення про рельєф. Більш інформативним є побудова умовного профілю по більш характерним, або усередненим перерізам (рисунок 2.18). По вісі абсцис показано розвертку профілю за перетином мікрографії, де кожні 200 у. о. = 50 мкм. По вісі ординат розвертку по висоті, де нульовий рівень – це фактично 100 нм.

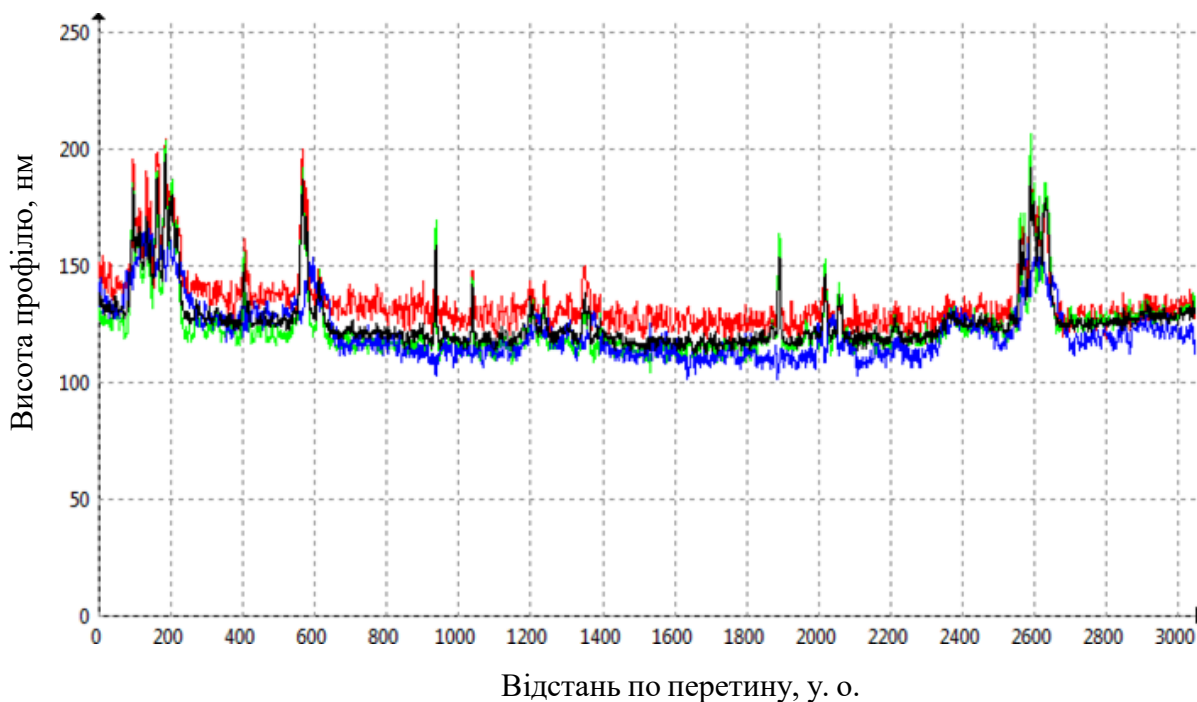


Рисунок 2.18 – Характерний умовний профіль мікроструктури зразка покриття з дроту №1 ($\times 200$)

Після інтерполяції кривої (у програмі OriginPro 8.5) підраховуємо кількість піків, які перевищують 25% загальної висоти від нульового рівня. Цей параметр у питомому вигляді можна пов'язати зі зносом:

Кількість піків на одиницю довжини визначає показник зносу. Визначаємо коефіцієнт K для наплавлення з дроту №1: $K = 0,0021/150 = 1,4 \cdot 10^{-5}$

Також визначаємо коефіцієнт K для наплавлення дротом №2 з аналогічною мікроструктурою. На рисунку 2.19 представлено інвертоване зображення отриманої структури наплавлення. На рисунках 2.20 та 2.21 відповідно представлено трьохвимірне уявлення мікроділянки поверхні та умовний профіль. Визначмо коефіцієнт K для наплавлення з дроту №2: $K = 0,003/493 = 6 \cdot 10^{-6}$.

Усереднене значення коефіцієнту K по двома мікроструктурам становить: $K_{\text{ср}} = 10^{-5}$. На рисунку 2.19 представлено інверсійне зображення мікроструктури зразка наплавлення, отриманого за допомогою дроту №2, при збільшенні $\times 200$. Інверсія дозволяє чіткіше відобразити межі зерен та розподіл карбідних включень у структурі. Завдяки цьому підходу стає можливим більш точний аналіз однорідності матриці та впливу структури на механічні властивості покриття.

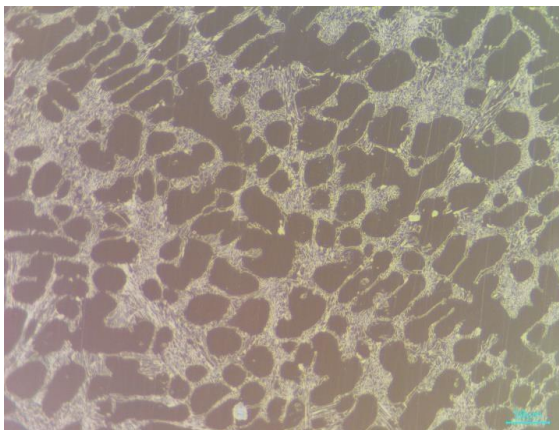


Рисунок 2.19 – Інверсія зображення мікроструктури зразка наплавлення з дроту №2 ($\times 200$)

На рисунку 2.20 представлено 3D уявлення мікроструктури зразка наплавлення, отриманого за допомогою дроту №2, з масштабом $\times 200$.

На зображенні видно рівномірний розподіл карбідних фаз у матриці та дрібнозернисту структуру, характерну для цього типу дроту. Така мікроструктура забезпечує покращені механічні властивості, зокрема підвищену твердість і зносостійкість покриття.

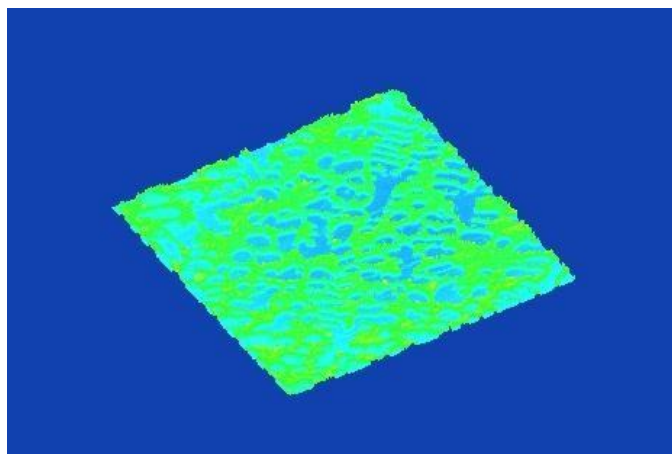


Рисунок 2.20 – 3D уявлення мікроструктури зразка наплавлення з дроту №2 ($\times 200$)

На рисунку 2.21 показано характерний умовний профіль мікроструктури зразка наплавлення, отриманого за допомогою дроту №2, при збільшенні $\times 200$. Профіль має рівномірний розподіл фаз у структурі, що включає дрібні карбідні включення, інтегровані в однорідну матрицю. Така мікроструктура забезпечує

покращену механічну міцність, твердість і зносостійкість покриття.

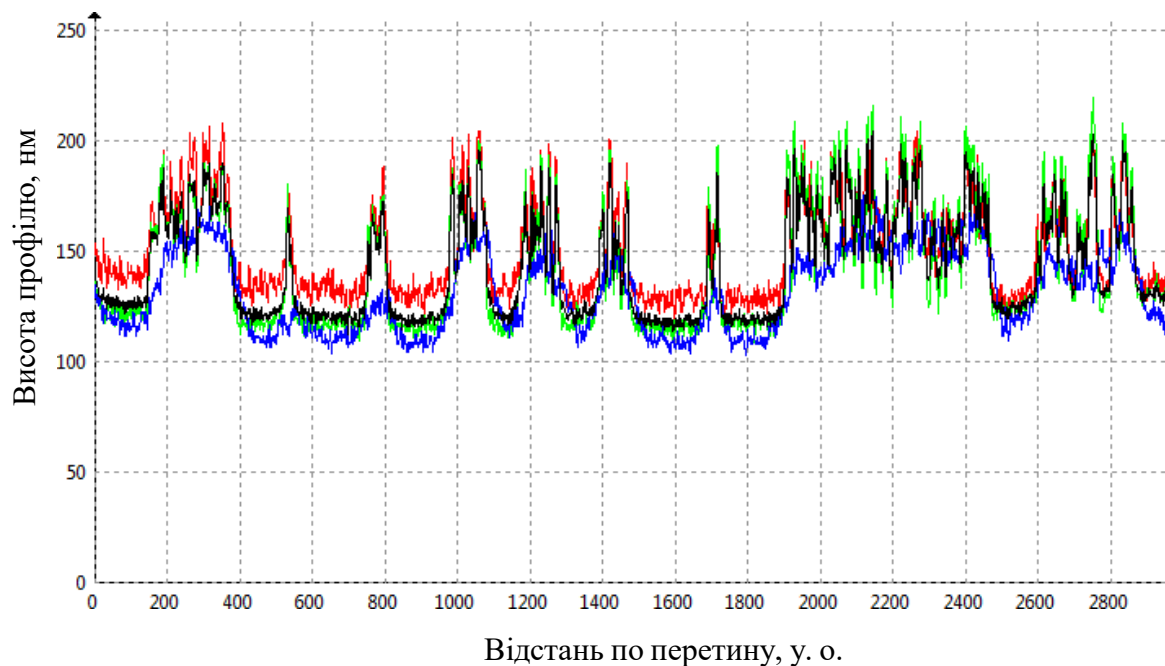


Рисунок 2.21 – Характерний умовний профіль мікроструктури зразка наплавлення з дроту №2 ($\times 200$)

Наплавлення з дроту №9 має схожу морфологію з попередніми наплавленнями. Спрогнозуємо знос використавши $K_{\text{ср}} = 10^{-5}$. Розрахуємо втрату ваги: $(3000/22) \cdot 10^{-5} = 136,36 \cdot 10^{-5} = 0,00136$ г. За результатами випробувань фактичний знос становить 0,003 г, іншими словами, розбіжність у визначенні дорівнює 0,0016 г, що свідчить про високу точність результату.

На рисунку 2.22 показано інверсію зображення мікроструктури зразка наплавлення, отриманого за допомогою дроту №9 (збільшення $\times 200$). Інверсія дозволяє детальніше проаналізувати структуру, що характеризується рівномірним розподілом фаз карбіду хрому (CrC) у матриці. Така структура сприяє підвищенню зносостійкості покриття та забезпечує стабільність механічних властивостей.

На рисунку 2.23 представлено 3D уявлення мікроструктури зразка наплавлення, отриманого за допомогою дроту №8 (збільшення $\times 200$). Візуалізація показує просторовий розподіл карбідних включень хрому в міцній матриці. Чітко видно рівномірність структури та відсутність значних дефектів, що забезпечує твердість покриття (HRC 47) і його придатність для використання в умовах помірного абразивного навантаження.

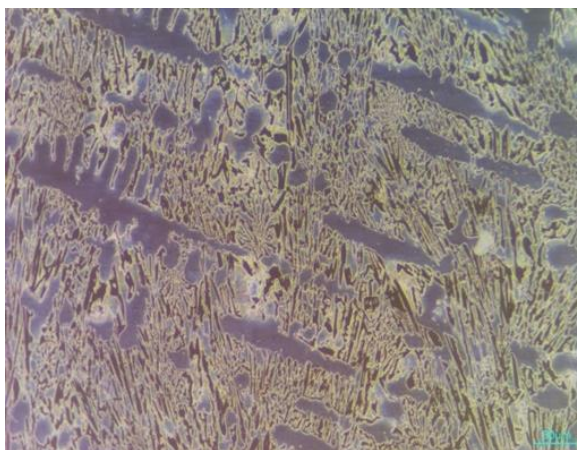


Рисунок 2.22 – Інверсія зображення мікроструктури зразка наплавлення з дроту №9 ($\times 200$)

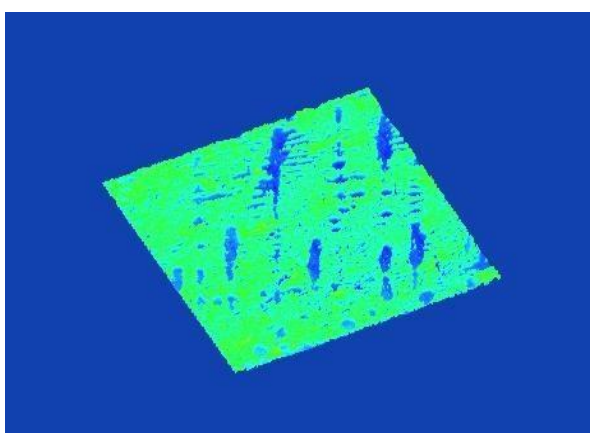


Рисунок 2.23 – 3D уявлення мікроструктури зразка наплавлення з дроту №8 ($\times 200$)

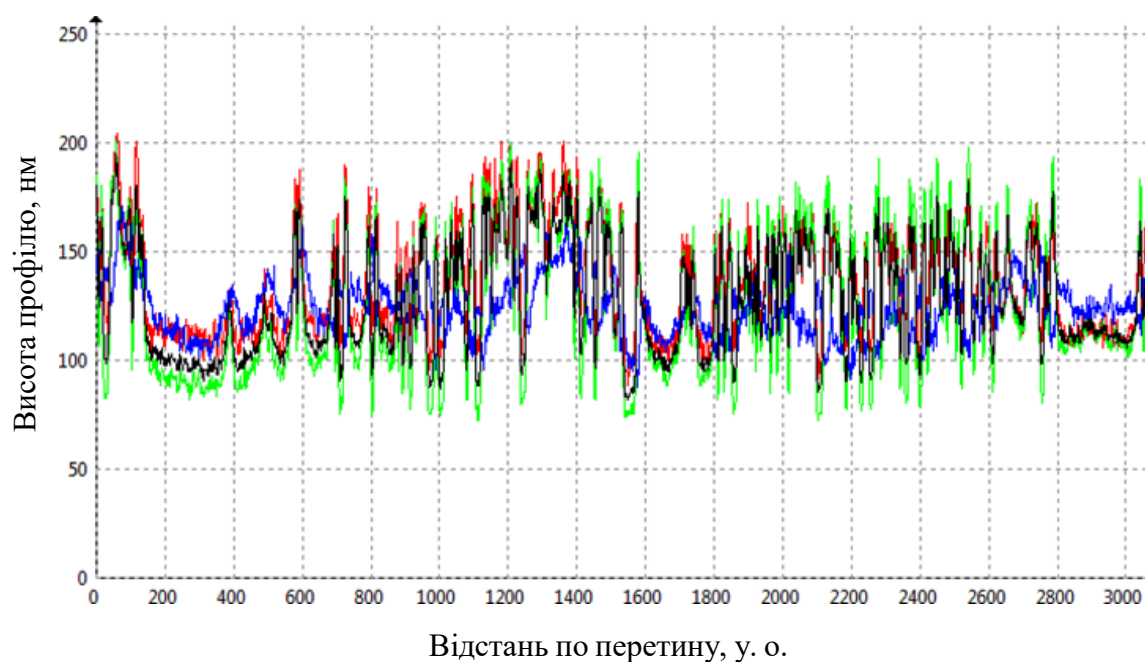


Рисунок 2.24 – Характерний умовний профіль мікроструктури зразка наплавлення з дроту №9 ($\times 200$)

За результатами аналізу мікроструктури, оптико-математичної моделі і випробувань на знос у межах мікроструктури з ідентичною морфологією можна зробити висновки про можливість прогнозування параметрів зношування без застосування випробувань на знос маючи зображення мікроструктури; є певний оптимум у сполученні структурних складових у рамках моделі в'язкі – тверді включення. В цьому плані структура наплавлення з дроту №2 раціональніша ніж більш груба структура наплавлення №1, та дисперсного наплавлення №9. Такий аналіз корисний тоді, коли складно визначитись з параметром розміру зерна чи кристалітів.

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 2

1. Процес виготовлення порошкових дротів на волочильному стані із застосуванням стрічки Св-08кп забезпечує високий рівень якості кінцевого продукту завдяки ретельному контролю технологічних параметрів, зокрема діаметра дроту, товщини стрічки та коефіцієнта заповнення, що сприяє стабільності властивостей наплавлених покриттів.

2. Використання натрієвого мила як мастила в процесі волочіння дозволило істотно знизити тертя та зменшити ймовірність утворення дефектів на поверхні дроту, що є важливою умовою для забезпечення високої якості матеріалу. Це сприяло мінімальним відхиленням від номінальних параметрів дроту, що підтверджує стабільність технологічного процесу.

Контроль якості порошкових дротів, здійснений у ході експерименту, засвідчив, що відхилення коефіцієнта заповнення не перевищують 3%, що свідчить про ефективність застосованих методів виготовлення та високий рівень технологічної точності.

Ретельний підбір і змішування компонентів забезпечили рівномірність складу шихти, що є критичним фактором для стабільності властивостей наплавлених покриттів. Зокрема, змішування компонентів протягом 30 хвилин на електромлині забезпечило необхідну однорідність розподілу частинок у складі шихти, що позитивно вплинуло на якість кінцевого продукту.

3. Важливим елементом дослідження була також оцінка використаних модифікаторів і їхнього впливу на властивості наплавлених покриттів. Кожен з компонентів виконував свою специфічну роль: ферохром забезпечував підвищення твердості завдяки утворенню карбідних фаз, графіт надавав антифрикційні властивості, а нікель сприяв покращенню пластичності та адгезії.

4. Запропонована технологія виготовлення порошкових дротів є ефективною та забезпечує високу якість отриманих матеріалів. Стабільність технологічного процесу та ретельний підбір компонентів шихти дозволили досягти високих фізико-механічних характеристик наплавлених покриттів, що робить ці матеріали придатними для подальших досліджень та практичного застосування в галузі електрошлакового наплавлення, відновлення та зміцнення деталей сільськогосподарської техніки. Введення карбіду кремнію як модифікуючої домішки є перспективним напрямом для підвищення міцності, зносостійкості та довговічності наплавлених покриттів, що можуть бути застосовані в умовах інтенсивного абразивного навантаження.

5. Запропонована методика прогнозування ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин з достатньою для практичних цілей точністю дає змогу обґрунтувати вибір необхідних матеріалів і технологій їх виготовлення та зміцнення.

6. За результатами аналізу мікроструктури, оптико-математичної моделі і випробувань на знос у межах мікроструктури з ідентичною морфологією можна зробити висновки про можливість прогнозування параметрів зношування без застосування випробувань на знос маючи зображення мікроструктури; є певний оптимум у сполученні структурних складових у рамках моделі в'язкі – тверді включення.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ, ФАЗОВОГО СКЛАДУ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПЛАВЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

3.1. Дослідження закономірностей зміни структури та фазового складу покриттів

Основною метою дослідження є аналіз впливу компонентного складу порошкових дротів на структуру, фазовий склад і властивості наплавлених покриттів за допомогою електрошлакового наплавлення. Дослідження спрямовані на виявлення закономірностей, що забезпечують раціональну комбінацію механічних та експлуатаційних характеристик.

Систематизована інформація про склад модифікуючої шихти десяти типів порошкових дротів, їх вплив на формування структури та механічні властивості покриттів показана в таблиці 3.1. Також наведено дані про основні компоненти, такі як ферохром, карбід хрому (CrC), карбід ніобію (NbC), графіт, оксид алюмінію (Al_2O_3), та їх роль у забезпеченні твердості, зносостійкості, однорідності мікроструктури й термічної стабільності наплавлених покриттів.

Таблиця 3.1 – Основні компоненти порошкових дротів і їх вплив на властивості покриттів

Тип дроту	Основні компоненти	Вплив на структуру	Вплив на властивості
1	2	3	4
№1	ферохром, алмаз/глина	зерниста матриця з карбідними включеннями	твердість HRC 43, середня зносостійкість
№2	ферохром, АНФ- 29	рівномірна структура	твердість HRC 44, покращена зносостійкість
№3	високохромистий чавун, алмаз	дрібнозерниста структура	HRC 45, найвища зносостійкість

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
№4	високохромистий чавун, АНФ-29	грубі включення, нерівномірна структура	HRC 26, низька механічна міцність
№5	хром, нікель, карбід ніобію (NbC)	однорідна структура	HRC 49, висока корозійна стійкість
№6	карбід хрому, графіт, Al_2O_3	однорідна дрібнозерниста структура	HRC 50, максимальна твердість і стабільність
№7	ферохром, ZrO_2	щільна структура	HRC 48, термостійкість
№8	хром, графіт	міцна структура з карбідами	HRC 47, середня механічна міцність
№9	нікель, CrC	рівномірний розподіл фаз	HRC 46, підвищена зносостійкість
№10	Al_2O_3 , графіт	дрібнозерниста структура	HRC 45, термостійкість

Результати вимірювання твердості (HRC) наплавлених покриттів, отриманих із використанням різних типів порошкових дротів наведено в таблиці 3.2. Виявлено, що максимальну твердість (HRC 50) забезпечує покриття з дроту №6 завдяки раціональному поєднанню карбідів хрому (CrC) та оксиду алюмінію (Al_2O_3), тоді як мінімальне значення твердості (HRC 26) спостерігається у покриттів із дроту №4 через менший вміст легувальних елементів і наявність структурних дефектів.

Порівняльні показники твердості покриттів, отриманих із використанням десяти типів порошкових дротів показано на рисунку 3.1.

Показники зносостійкості оцінювали за втратами маси під час абразивного тертя. Результати абразивних випробувань, проведених для наплавлених покриттів,

отриманих із десяти типів порошкових дротів наведено в таблиці 3.3. Ці дані показують залежність зносостійкості від хімічного складу модифікаторів.

Таблиця 3.2 – Твердість покриттів для різних типів дротів (HRC)

Тип дроту	Твердість (HRC)
№1	43
№2	44
№3	45
№4	26
№5	49
№6	50
№7	48
№8	47
№9	46
№10	45

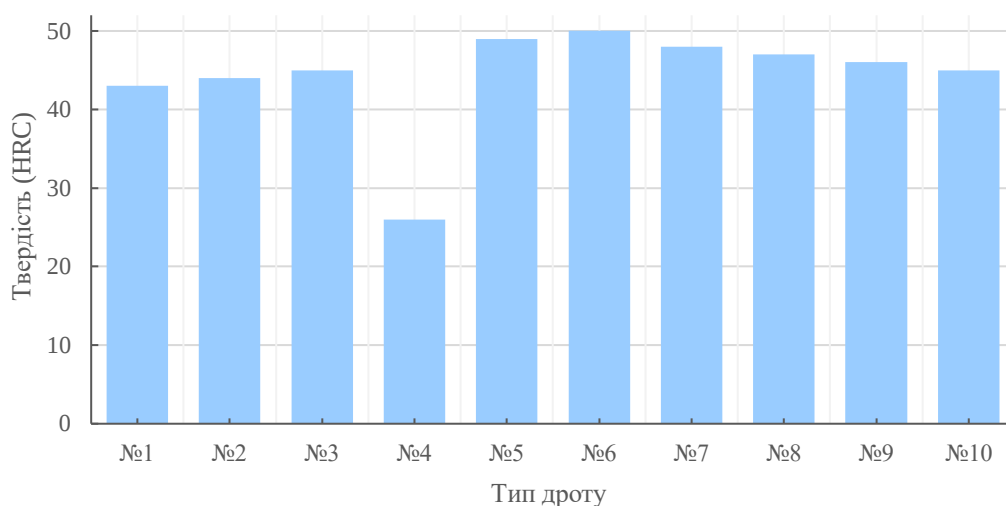


Рисунок 3.1 – Твердість покриттів для різних типів дротів (HRC)

Покриття з дроту №3 показало найкращий результат (втрата маси 0.00175 г) завдяки рівномірній дрібнозернистій структурі з високим вмістом фаз Cr_{23}C_6 . Найгірший результат спостерігався у покритті з дроту №4 (втрата маси становила 0.0030 г), що пояснюється грубозернистою структурою і нерівномірним

розподілом карбідних фаз.

Таблиця 3.3 – Зносостійкість покриттів для різних типів дротів (г)

Тип дроту	Зносостійкість (г)
№1	0.0024
№2	0.0019
№3	0.00175
№4	0.0030
№5	0.00435
№6	0.0021
№7	0.0025
№8	0.0028
№9	0.00325
№10	0.0027

Результати абразивних випробувань покриттів, отриманих із десяти типів порошкових дротів представлено на рисунку 3.2. Додатково показані залежності зносостійкості покриттів від хімічного складу дротів, допомагаючи ідентифікувати найефективніші матеріали для роботи в умовах інтенсивного абразивного впливу.

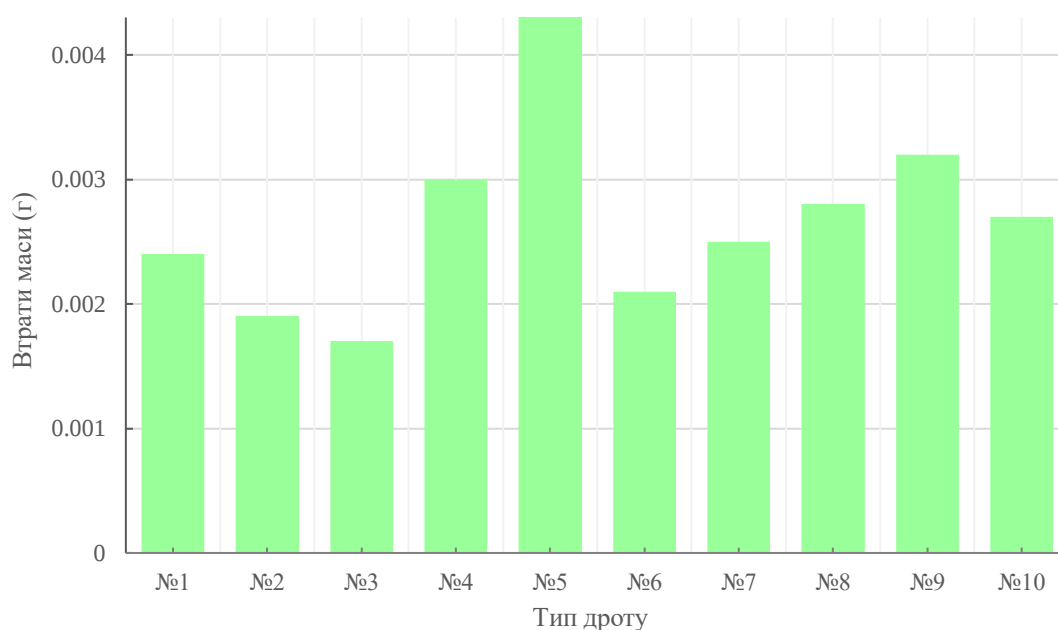


Рисунок 3.2 – Зносостійкість покриттів для різних типів дротів (г)

Дослідження показали, що покриття отримані з використанням дротів №3 і №6, мають найвищі механічні та експлуатаційні властивості. Це підтверджується високою твердістю, зносостійкістю та рівномірністю мікроструктури. Отримані результати є основою для розробки раціональних технологій наплавлення деталей, які працюють у важких умовах експлуатації.

3.2. Металографічний аналіз наплавлених покриттів

Для оцінки морфології отриманих структур проведено металографічний аналіз наплавлених покриттів та здійснено вимір мікротвердості окремих структурних складових. На рисунку 3.3 представлено мікроструктуру металу з дроту №1.

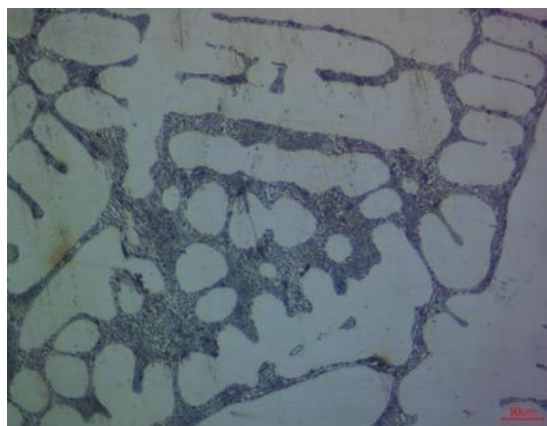


Рисунок 3.3 – Мікроструктура наплавленого металу з дроту №1 (×200)

Мікроструктура характеризується світлими дендритоподібними ділянками хромистого фериту (3545 МПа, з твердістю дещо вищою, ніж традиційний ферит у сталі), у проміжках якої розміщена евтектика (ферит + залізо + хромистий цементит), це має підвищену мікротвердість до рівня 5597 МПа.

Це свідчить про те, що отримано мікрокомпозицію з відносно пластичної структурної складової (фериту) та твердої евтектики. Така композиція позитивно відображається на показниках зносостійкості. Особливо важливо, що твердість фериту збільшується не тільки за рахунок формування твердого розчину заміщення, у якому частина вузлів кристалічної решітки займає хром, але і за рахунок спотворення решітки твердого розчину втілення вуглецю, який у

хромистому фериті має збільшену концентрацію (аналогічно сталям феритного класу, наприклад у сталі 15X25Т, де у фериті розчиняється до 0,15% вуглецю), це означає, що розрихлення кристалічної решітки сприяє більшій розчинності модифікуючих домішок у твердому розчині.

Слід відмітити наявність невеликої кількості неметалевих включень, деякі з яких корозійно-активні (руді ореоли на ділянках мікроструктури рисунку 3.7). Такі включення суттєво не впливають на комплекс механічних властивостей, однак можуть провокувати корозійні процеси. Наявність підвищеного складу хрому у наплавці позитивно впливає на корозійну стійкість, оскільки корозійна активність буде блокуватись пасиваційним шаром оксидів хрому.

На рисунку 3.4 представлено мікроструктуру наплавленого металу з дроту №2, яка за морфологією повторює структуру попереднього зразка. Вище описане по структурі справедливе, також для цього покриття. Мікротвердість хромистого фериту буде аналогічною, а мікротвердість евтектики вища і становитиме 6053 МПа.

Збільшення мікротвердості евтектики пояснюється збільшенням дисперсності її складових. Розмір структурно вільних феритних ділянок також у декілька разів менший в порівнянні з попереднім зразком. Всі ці показники збільшують комплекс механічних властивостей наплавленого матеріалу і позитивно відображаються на зносостійкості такого покриття.

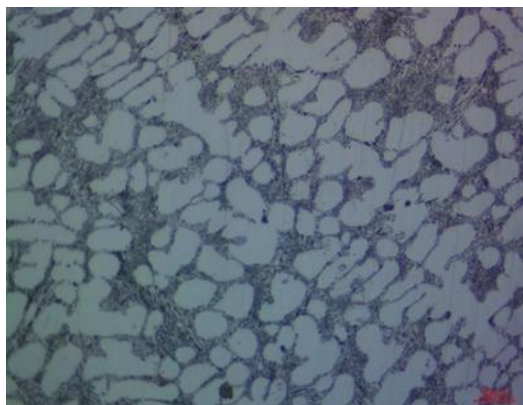


Рисунок 3.4 – Мікроструктура наплавленого металу з дроту №2 ($\times 200$)

Корозійно–активних неметалевих включень на мікрошліфі не виявлено, це

пов'язано з використанням флюсу у наплавочному дроті.

Ферохром марки ФХ-800, який використовується в якості модифікуючої домішки наплавочного дроту у покриттях зразків №1 та №2, складається головним чином з хрому (65 %) і має високий вміст вуглецю (8 – 8,5 %). Частина вуглецю вигорає і йде на розкислення наплавленого металу, однак саме ферохром забезпечує формування колоній карбідної евтектики та більш легованого і міцного фериту. При наплавленні відбувається повна перекристалізація модифікатора.

Мікроструктуру наплавки з дроту №3 представлено на рисунку 3.5. Мікроструктура представляє собою голчасту морфологію з твердістю на рівні 4825 МПа, яку ідентифіковано, як голчастий троостит. Така твердість і морфологія, а також сліди границь колишніх аустенітних зерен, який існував при температурі аустенізації говорить про початкове формування голчастої мартенситної, або бейнітної структури з розвитком процесу самовідпуску, який і сформував трооститну структуру. По границям колишніх аустенітних зерен сформувалися помірно тверді (5455 МПа) карбіди, що не травляться. Частина карбідів має рівноважну кулясту форму, частина має розвинену поверхню, що обумовлювалось їх виділенням на границях розподілу, а також недостатністю часу для їх сфероїдизації.

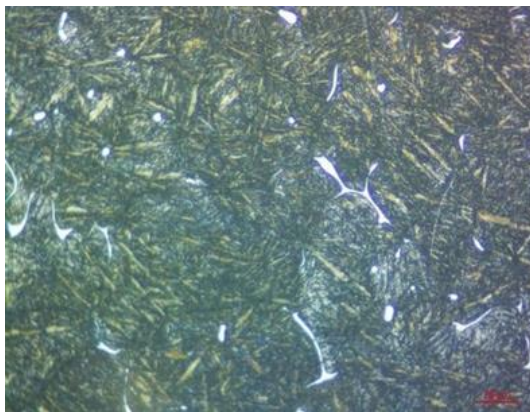


Рисунок 3.5 – Мікроструктура наплавленого металу з дроту №3 (×200)

Сформована структура обумовлена складом наплавленого металу. Карбідна складова, а також наявність карбідної фази говорить про присутність значної концентрації вуглецю, який перенісся з наплавленого матеріалу. Частину

вуглецю (~10%) було втрачено в процесі його окислення при наплавленні, який відіграв роль флюсуючого елементу. Така структура покриття забезпечує високі показники зносостійкості.

На рисунку 3.6. представлено мікроструктуру наплавленого металу з дроту №4.

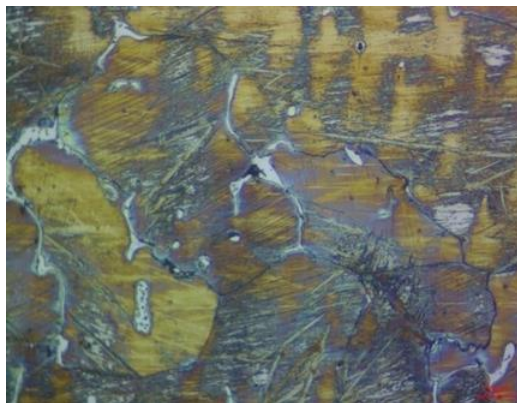


Рисунок 3.6 – Мікроструктура наплавленого металу з дроту №4 (×200)

Мікроструктура наближена до мікроструктури зразка на рисунку 3.9, однак окрім легованого цементиту (мікротвердість якого 5743 МПа), що виражено виділився по границях зерен, грубих голок трооститу, спостерігається дендритоподібні поля легованого фериту. Ферито-трооститна структура має дещо знижену твердість на рівні 4023 МПа в порівнянні з попереднім зразком. Голчаста структура троститу успадковується від мартенситу. Великі розміри спадкового аустенітного зерна, грубі виділення по його границям, грубі трооститні виділення та наявність фериту говорить про уповільнений процес охолодження при наплавленні за високих температур в порівнянні з попереднім зразком. Як наслідок – менший показник зносостійкості в порівнянні з двома попередніми зразками. Загрублення мікроструктури може призводити до зниження контактної міцності і викришування мікрооб'ємів металу при роботі в абразивному середовищі.

Високохромистий чавун відіграє таку саму роль, що і ферохром у зразках №1 та №2 де проходить процес повної перекристалізації. Внаслідок меншої кількості вуглецю у складі високохромистого чавуну у структурах зразків №3 та №4 відсутні колонії карбідів. На зміну морфології від голчастої (зразок №3) до більш

рівноважної (зразок №4) призводить зміна режиму охолодження об'ємів металу. Так у зразку №3 в якості захисного шару використано алмази, що забезпечує більшу теплопровідність і віддачу тепла у навколишнє середовище, ніж флюс АНФ-29 у зразку №4. В той же час видно на прикладі зразка №1, що додавання до алмазів бентонітової глини буде помітно зменшувати теплопровідність системи і вирівнювати мікроструктуру.

На рисунку 3.7 представлено мікроструктуру наплавлення з дроту №5. Мікроструктура представляє собою легований ферит, який слабо протравлюється, також спостерігаються значні конгломерації карбідів, які потрапили у наплавлений метал з шихти. Розміри окремих карбідних включень сягають до 25 мкм. Нерівномірність розподілу карбідної фази призводить до викришування окремих часточок при виготовленні шліфа. Низька твердість матричної структури фериту (4300 МПа) та легкість викришування карбідів (мікротвердість скупчення часток сягає лише рівня 4943 МПа), що призводить до зниження показників зносостійкості. Позитивним результатом дослідження даного покриття буде те, що воно має явно вищу корозійну стійкість мікроструктури, в порівнянні з попередньо розглянутих.

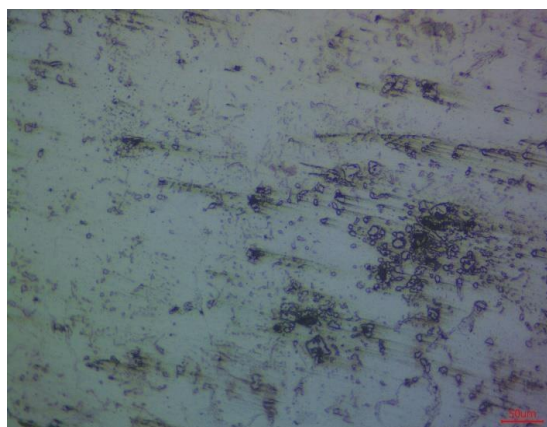


Рисунок 3.7 – Мікроструктура наплавленого металу з дроту №5 ($\times 200$)

Слабке травлення пояснюється наявністю основних легуючих компонентів дроту – хрому та нікелю, які повністю перекристалізуються. В той же час вуглець знаходиться повністю у зв'язаному стані у складі карбиду ніобію і повністю зберігається у вихідному стані, оскільки має високі температури плавлення і дисоціації ($3600^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$) [194]. Тому в даному покритті буде повністю відсутнє

засвоєння вуглецю, що кардинально відрізняє його від попередніх зразків (зразки № 1 – 4).

Мікроструктуру наплавленого металу з дроту №6 представлено на рис. 3.8.

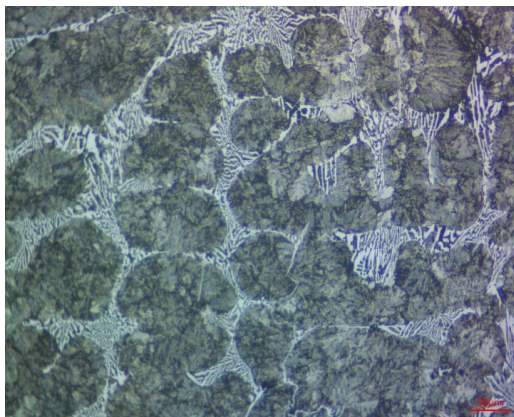


Рисунок 3.8 – Мікроструктура наплавленого металу з дроту №6 (×200)

В структурі даного зразка чітко спостерігається перлітна структура (3773 МПа) з достатньо грубими включеннями карбідної евтектики (5190 МПа). Структура сформована при повільному охолодженні. Колонії евтектики, які формують комірчасту структуру також можуть спричинити викришування мікрооб'ємів наплавленого металу.

Графіт, кремній і карбід хрому у металі повністю перекристалізуються, однак не забезпечують формування в'язкої структурної складової, як це відбувається у наплавленому металі зразків № 1 – 5. Корунд не впливає на структуроутворення і не зберігається в якості часток, оскільки при високих температурах плавлення у присутності великої кількості кремнію і вуглецю відновлюється до алюмінію.

На рисунках 3.9 та 3.10 представлено мікроструктуру наплавленого металу з дроту №7. Мікроструктура представляє собою нелегований ферит з низькою мікротвердістю (1642 МПа) і порівняно рівномірно розпорошені часточки оксиду цирконію (скупчення часток на рівні 2111 МПа). На рисунку 3.13 видно світлі смуги, які вільні від часток і представляють границі зерен колишнього аустенітного зерна значних розмірів. Дисперсність самих частинок велика і становить 1-5 мкм. Однак така висока дисперсність обумовлює намагання частинок сформувати локальні конгломерації (рисунок 3.14). В цілому мікроструктура внаслідок низької

твердості структури має найменшу зі всіх розглянутих зразків зносостійкість (менша на порядок величини в порівнянні з представлених).

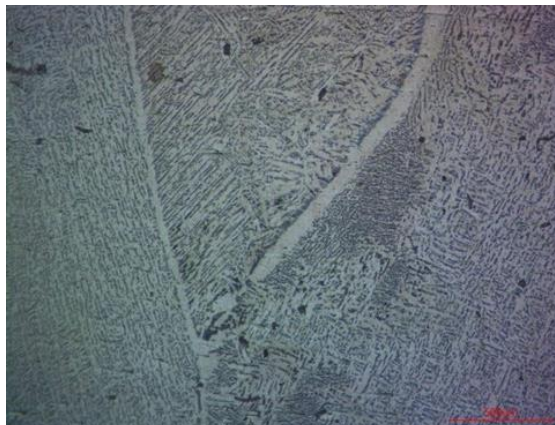


Рисунок 3.9 – Загальний вид мікроструктури наплавленого металу з дроту №7 (×50)

Як і у випадку з карбідом ніобію, діоксид цирконію дуже тугоплавкий (точка плавлення приблизно 2700°C) [195] і не проходить перекристалізацію. Розподіляється значно рівномірніше ніж карбід ніобію. Однак відсутність додаткових елементів і вуглецю унеможливорює реалізацію карбідного чи твердорозчинного зміцнення у даному покритті, що пояснює порівняно низький показник зносостійкості.

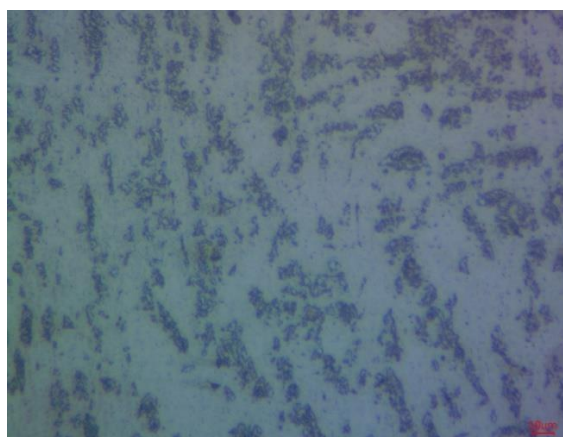


Рисунок 3.10 – Дисперсність структурних складових мікроструктури наплавленого металу з дроту №7 (×500)

На рисунку 3.11 представлено мікроструктуру покриття з дроту №8. Мікроструктура представляє собою ферито-трооститну суміш. Голкоподібний

тритит успадкував свою морфологію від мартенситу, який сформувався спочатку, внаслідок бездифузійного перетворення. Збереження морфології було забезпечено наявністю цілого спектру легуючих елементів (за даними мікроспектрального аналізу РЕМ) які затримують дифузійне переміщення атомів заліза і вуглецю.

Сам розпад мартенситу був забезпечений процесами самовідпуску. Результатом цих процесів є комбінована структура з помірною твердістю (3937 – 4204 МПа) причому мікротвердість на окремих скупченнях голок може сягати рівня 5190 МПа, а білих зон – 6390 МПа. Така нерівномірність обумовлюється ускладненням дифузійних процесів і вирівнюванням елементного складу в наплавленому покритті. За зносостійкістю структура наближається до структур покриттів з дротів №3 та №4 і має порівняно високі показники.

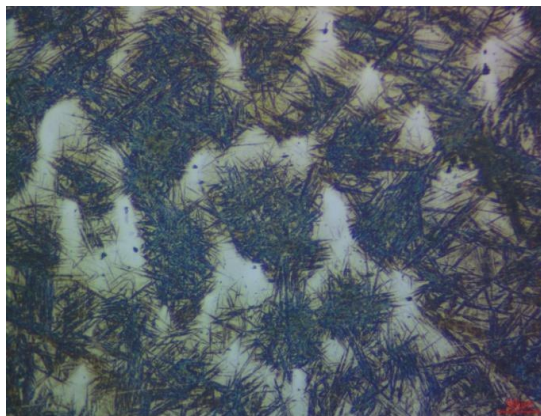


Рисунок 3.11 – Мікроструктура наплавленого металу з дроту №8 (×200)

На рисунку 3.12 та 3.13 подано мікроструктури покриття з дроту №9. Також на рисунку 3.12 показано зону сплавлення з основним металом, яка має високі якісні показники. Мікроструктура наплавленого металу (рисунок 3.13) представляє собою матричний твердий розчин легованого фериту з виродженою дендритною морфологією. Вироджені дендрити фактично утворили коміркову структуру з мікротвердістю на рівні 3940 МПа. Окрім легованого фериту присутня висока частка карбідних колоній з високим вмістом хрому, що забезпечило цій фазі помірну мікротвердість – 4300 МПа.

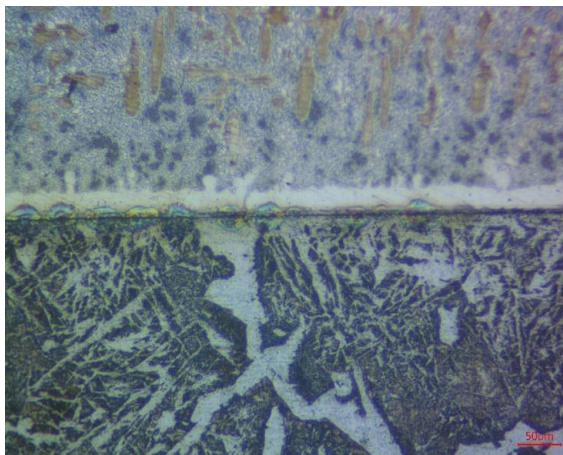


Рисунок 3.12 – Зона сплавлення наплавленого металу з основою (з дроту №9), ($\times 200$)

На рисунку 3.18, 3.19 і 3.20 представлено мікроструктури наплавленого металу з дроту № 10 (покриття за результатами РФА містить – 16,43% Cr, 1,16% Mn, 68,89% Fe, 12,15% Ni, 1,21% Cu, 0,17% Mo + SiC). На рисунку 3.18 показано характерну морфологію товстого шару металу (порядку 8 мм), на рисунках 3.19 та 3.20 – тонкого шару наплавленого металу (порядку 4-5 мм).

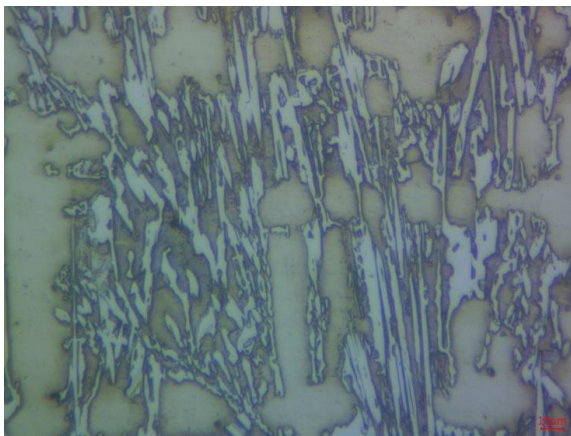


Рисунок 3.13 – Мікроструктура наплавленого металу з дроту №9 ($\times 500$)

На мікроструктурах прослідковується легкий муар, який формується дуже дисперсними часточками карбиду кремнію розмірами менше 1 мкм. Матрична структура являє собою аустеніт, який стабілізувався внаслідок наявності в металі великої кількості нікелю та марганцю які, як відомо, відносяться до аустенітно-стабілізуючих елементів. Мікровердність структури у товстому шарі наплавленого металу становить 2015 МПа, у тонкому – 1740 МПа. У місцях скупчення включень

твердість може зростати до рівня 2730 МПа. Загальна мікротвердість металу становить 45 HRC, або 115 HB. Незважаючи на помірну твердість очікується підвищена зносостійкість металу за рахунок наявності аустенітної матриці з високодисперсними частинками.

На рисунку 3.14. показано мікроструктуру товстого шару наплавленого металу отриманого за допомогою дроту №10, з масштабом $\times 50$. Структура характеризується дрібнозернистою матрицею з рівномірно розподіленими графітними включеннями, що забезпечує високу термічну стабільність та знижену схильність до утворення дефектів. Така мікроструктура сприяє покращенню механічних властивостей та довговічності наплавленого покриття.

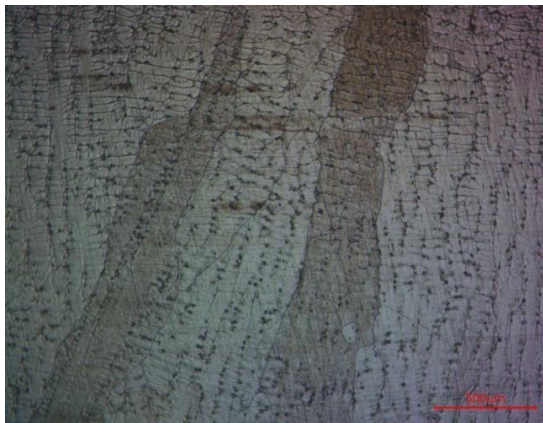


Рисунок 3.14 – Мікроструктура товстого шару наплавленого металу з дроту №10 ($\times 50$)

Для уточнення фазового складу наплавленого металу, було проведено рентгеноструктурний аналіз на дифрактометрі ДРОН-4М з наступним розшифруванням у програмі Mach!4, результати якого показано на рисунку 3.17. На рисунку 3.18. показано розподіл фаз і елементів, розрахованих програмою Mach!4. Як видно з рисунків 3.17 та 3.18 на фоні залізної матриці присутні фази карбіду хрому Cr_3C_2 (майже 30%) та силіциду нікелю Ni_3Si (7,7 %). Фази карбіду кремнію не виявлено. Отже, у підсумку карбід кремнію дисоціював у процесі наплавлення і став джерелом для формування карбіду хрому і силіциду нікелю.

Мікроструктуру тонкого шару наплавленого металу, отриманого за допомогою дроту №10 (збільшення $\times 200$) показано на рисунку 3.15. Структура

характеризується дрібнозернистою матрицею з рівномірно розподіленими графітними включеннями. Така мікроструктура забезпечує високу термічну стабільність, твердість покриття (HRC 45) та стійкість до термічних і механічних навантажень.



Рисунок 3.15 – Мікроструктура тонкого шару наплавленого металу з дроту №10 (×200)

На рисунку 3.16 показано мікроструктуру тонкого шару наплавленого металу, отриманого з використанням дроту №10, при збільшенні ×500. Мікроструктура характеризується дрібнозернистою матрицею з рівномірно розподіленими графітними включеннями. Така структура сприяє підвищенню термічної стабільності, зменшенню внутрішніх напружень і покращенню антифрикційних властивостей покриття, забезпечуючи стабільність його механічних характеристик.

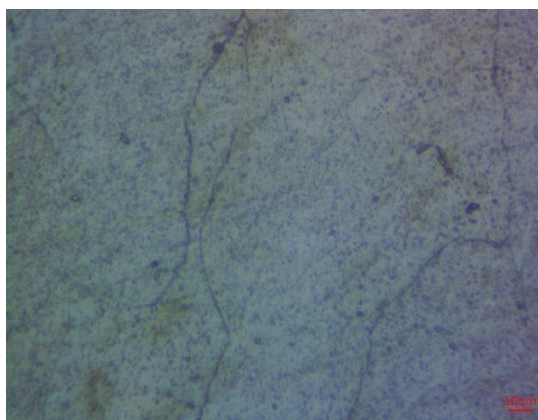


Рисунок 3.16 – Мікроструктура тонкого шару наплавленого металу з дроту №10 (×500)

На рисунку 3.17 зображено дифрактограму наплавленого металу, отриману з використанням дроту №10, разом зі штрих-діаграмою фазових кандидатів. Дифрактограма демонструє наявність фазових складових, таких як карбіди хрому (CrC), графітні включення та інші фазові компоненти, що формуються у процесі наплавлення. Штрих-діаграма вказує на відповідність ідентифікованих піків фазовим кандидатам, підтверджуючи формування дрібнозернистої структури покриття з рівномірним розподілом включень.

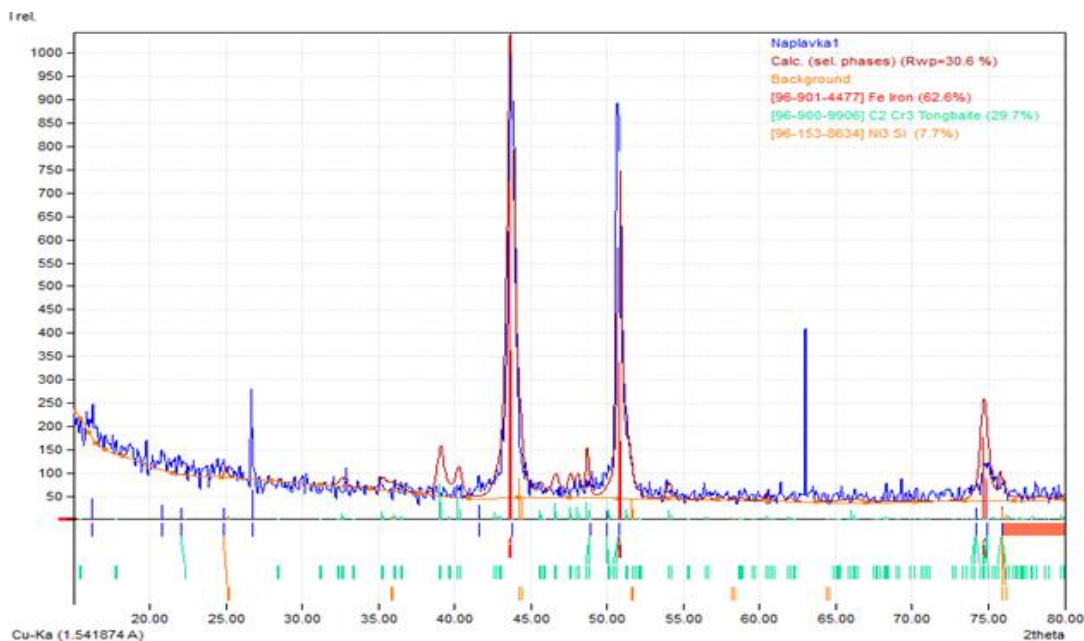


Рисунок 3.17 – Дифрактограма наплавленого металу з дроту №10 разом зі штрих-діаграмою кандидатів

Розподіл фаз та елементів наплавленого металу з дроту №10 за результатами рентгеноструктурного аналізу показано на рисунку 3.18. Відображено дрібнозернисту структуру з рівномірно розподіленими фазами оксиду алюмінію (Al_2O_3) і графіту, що забезпечує високу термічну стабільність покриття. Така структура сприяє зниженню внутрішніх напружень і підвищенню механічних властивостей у процесі експлуатації.

Результати вимірювання твердості структурних складових по зразкам, отриманих у ході металографічного аналізу наплавлених покриттів наведено у таблиці 3.4. Таблиця показує твердість матриці та карбідних включень для кожного типу дротів, а також містить додаткові примітки щодо мікроструктурних

особливостей. Отримані дані вказують на суттєвий вплив хімічного складу шихти порошкових дротів на формування мікроструктури, рівномірність фазового розподілу та механічні властивості наплавлених покриттів. Результати свідчать про перспективність використання дротів із високим вмістом карбідних фаз та дрібнозернистої матриці для підвищення експлуатаційних характеристик наплавлених покриттів.

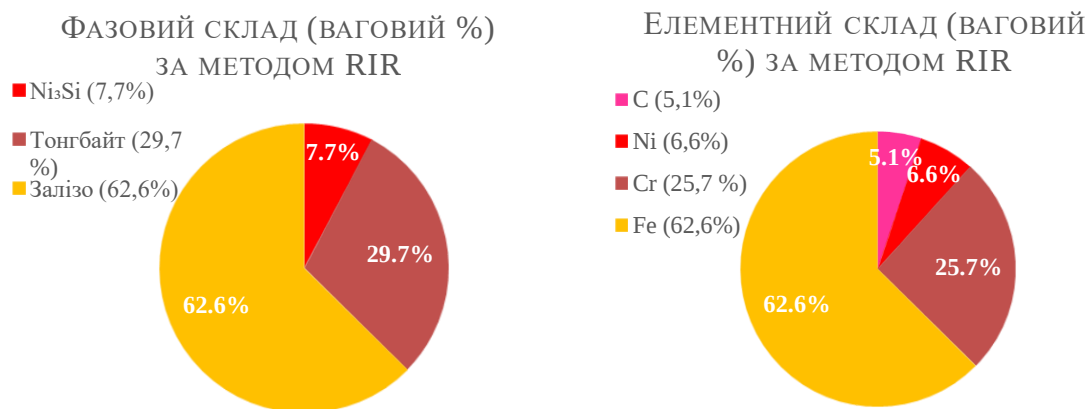


Рисунок 3.18 – Розподіл фаз та елементів наплавленого металу з дроту №10 за даними рентгеноструктурного аналізу

Результати металографічного аналізу показали, що структура наплавлених покриттів формується під значним впливом компонентного складу порошкових дротів. Основними структурними складовими є ферит, карбідні фази (CrC , Cr_{23}C_6 , NbC), а також евтектика. Однорідність та дрібнозернистість матриці суттєво покращують механічні властивості покриттів, зокрема їх твердість, зносостійкість і корозійну стійкість. Покриття з рівномірним розподілом фаз демонструють менший рівень внутрішніх напружень та стабільність у процесі експлуатації (див. додаток А, табл. А.7).

Дроти №3 і №6 забезпечують формування дрібнозернистих структур із високим вмістом карбідних фаз (CrC , Cr_{23}C_6) та графітних включень. Така комбінація сприяє досягненню найвищої твердості (HRC 50–55), термічної стабільності та зносостійкості покриттів. Рівномірність структури зразків з цих дротів знижує ймовірність утворення дефектів покриття та підвищує довговічність у важких умовах експлуатації.

Таблиця 3.4 – Твердість структурних складових по дослідним зразкам

Зразок	Твердість матриці (МПа)	Твердість карбідів (МПа)	Додаткові примітки
№1	3545	5597	великі дендритоподібні області фериту
№2	3545	6053	збільшена дисперсія карбідів
№3	4825	5455	голкоподібна структура трооститу
№4	4023	5743	груба ферито-трооститна структура
№5	4300	4943	конгломерація карбідів, слабкий розподіл
№6	3773	5190	перлітна структура з грубою евтектикою карбідів
№7	1642	2111	рівномірна дисперсія часток діоксиду цирконію
№8	3937	6390	суміш фериту та трооститу, помірна твердість
№9	3940	4300	вироджені дендрити у матриці
№10	2015	2730	дрібнозерниста аустенітна матриця з включеннями графіту

Дроти №4 і №5 утворюють грубозернисті структури з високим рівнем дефектів, нерівномірним розподілом фаз і викришуванням карбідних включень. Це знижує експлуатаційні характеристики, зокрема твердість (HRC 38 для дроту №4), а також сприяє високим втратам маси під час абразивних випробувань.

Наплавлені покриття, отримані за допомогою дроту №10, продемонстрували унікальні характеристики, обумовлені раціональним балансом легувальних елементів, таких як нікель, хром та графіт. Формування дрібнозернистої

аустенітної матриці з рівномірним розподілом графітних включень забезпечує високу термічну стабільність, помірну твердість (HRC 45) та стійкість до механічних і термічних навантажень. Крім того, висока дисперсність включень сприяє покращенню антифрикційних властивостей, що робить такі покриття перспективними для використання в умовах тертя, де необхідна поєднана зносостійкість і довговічність. Покриття з дроту №10 особливо ефективні для застосування в машинах і механізмах, які працюють під високими динамічними та термічними навантаженнями.

Ферохром сприяє утворенню карбідної евтектики та легованого фериту, які значно підвищують твердість і корозійну стійкість покриттів. Раціональний вміст ферохрому забезпечує дрібнозернисту матрицю, проте перевищення допустимих концентрацій призводить до утворення грубих включень, що негативно впливають на однорідність структури.

Карбід ніобію (NbC), що використовується в дротах із високим вмістом нікелю і хрому, підвищує термічну стабільність наплавлених покриттів. Завдяки цьому метал здатний витримувати інтенсивні термічні цикли без втрати механічних властивостей.

Графіт сприяє рівномірності розподілу фаз, зменшенню рівня внутрішніх напружень і покращенню антифрикційних властивостей покриттів. Це особливо важливо для деталей, що працюють в умовах високих навантажень і тертя.

3.3. Визначення фізико-механічних властивостей наплавлених покриттів

Експериментальне дослідження фізико-механічних властивостей наплавлених покриттів є ключовим етапом оцінки їхньої придатності до використання в реальних умовах експлуатації.

Для експерименту використовувались десять типів порошкових дротів із різним хімічним складом. Основні етапи дослідження включали:

- метод Роквелла (HRC) для оцінки механічної міцності покриттів;
- визначення втрат маси зразків після абразивного впливу;

– експозиція зразків у 5%-му розчині NaCl протягом 72 годин.

Твердість покриттів є важливим показником їхньої здатності протистояти механічним навантаженням. Усі зразки продемонстрували значний діапазон твердості, що залежав від хімічного складу порошкових дротів.

Зносостійкість оцінювалась за втратами маси зразків після впливу абразивного середовища. Покриття, виготовлені з дротів із високим вмістом CrC і Cr₂₃C₆, показали найкращі результати.

Результати зносостійкості покриттів виготовлених із різних типів порошкових дротів, у вигляді втрат маси (г) після абразивного випробування показано у таблиці 3.5. Ці дані вказують на значний вплив хімічного складу модифікуючої домішки на зносостійкість наплавлених покриттів.

Таблиця 3.5 – Результати зносостійкості покриттів (зменшення маси, г)

Тип дроту	Зменшення маси (г)
№1	0.0024
№2	0.0019
№3	0.00175
№4	0.0030
№5	0.0028
№6	0.0018
№7	0.0023
№8	0.0022
№9	0.0025
№10	0.0027

Корозійна стійкість визначалась через втрати маси після експозиції у розчині NaCl. Найкращі результати показали покриття, що містили оксиди цирконію (ZrO₂) та карбід ніобію (NbC).

Результати корозійної стійкості покриттів виготовлених із різних типів порошкових дротів, у вигляді втрат маси (мг) після експозиції в 5%-му розчині NaCl

протягом 72 годин наведено у таблиці 3.6. Найкращу корозійну стійкість показало покриття з дроту №6 (0.35 мг) завдяки високому вмісту NbC, який сприяє стабільності структури при хімічних впливах. Найбільші втрати маси зафіксовані у покриття з дроту №4 (1.20 мг), що пов'язано з низькою однорідністю структури та дефіцитом модифікуючих компонентів.

Таблиця 3.6 – Результати корозійної стійкості покриттів (зменшення маси, мг).

Тип дроту	Зменшення маси (мг)
№1	0.75
№2	0.60
№3	0.50
№4	1.20
№5	0.40
№6	0.35
№7	0.55
№8	0.60
№9	0.65
№10	0.55

Порівняльний аналіз результатів (табл. 3.7) узагальнює порівняння основних фізико-механічних властивостей наплавлених покриттів отриманих із використанням різних типів порошкових дротів. Наведено твердість (HRC), втрати маси при зносі (г), а також втрати маси після корозійного випробування (мг). Найкращі показники продемонстрували покриття з дротів №3 і №6, що характеризуються найвищою твердістю (HRC 51), мінімальними втратами маси при зносі (0.00175 г і 0.0018 г) та високою корозійною стійкістю 0.50 мг і 0.35 мг відповідно).

На рисунку 3.19. показано взаємозв'язок між твердістю покриттів (HRC) та їхньою зносостійкістю (втратами маси в грамах). Видно, що покриття з вищою твердістю, як у дротів №3 і №6, мають мінімальні втрати маси, що свідчить про

їхню високу зносостійкість. Покриття з дроту №4, яке має найнижчу твердість (HRC 26), має найбільші втрати маси, це вказує на низькі показники зносостійкості.

Таблиця 3.7 – Порівняння основних фізико-механічних властивостей наплавлених покриттів

Тип дроту	Твердість (HRC)	Втрати маси при зносі (г)	Втрати маси в корозійному тесті (мг)
№1	42	0.0024	0.75
№2	45	0.0019	0.60
№3	50	0.00175	0.50
№4	38	0.0030	1.20
№5	48	0.0028	0.40
№6	51	0.0018	0.35
№7	46	0.0023	0.55
№8	47	0.0022	0.60
№9	44	0.0025	0.65
№10	43	0.0027	0.55

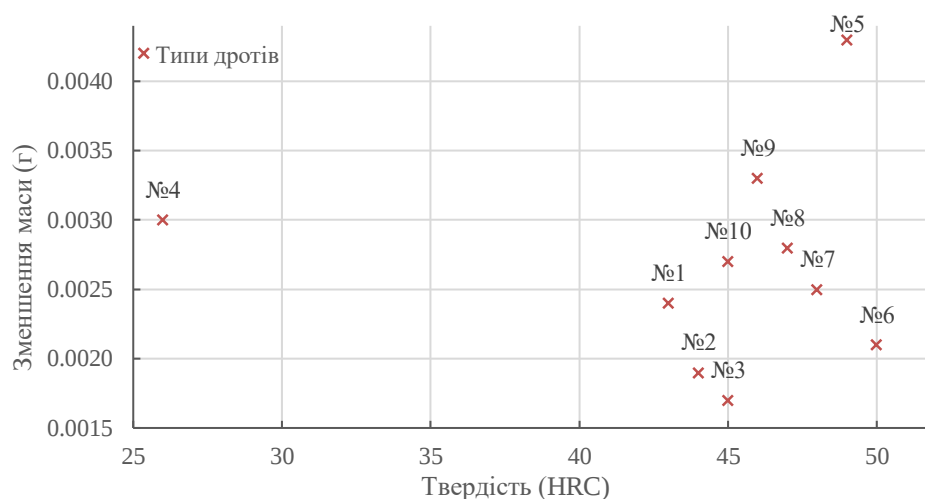


Рисунок 3.19 – Взаємозв'язок між твердістю і зносостійкістю покриттів

На рисунку 3.20 представлено корозійну стійкість покриттів, отриманих із різних типів дротів, через втрати маси (мг) після експозиції в 5%-му розчині NaCl.

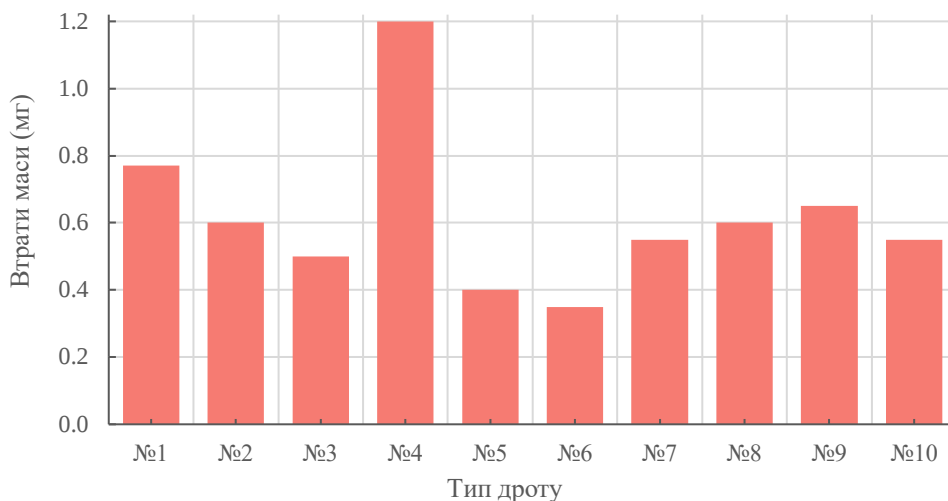


Рисунок 3.20 – Корозійна стійкість покриттів для різних типів дротів

Результати експериментів підтверджують, що склад порошкових дротів суттєво впливає на фізико-механічні властивості наплавлених покриттів.

Мікроструктурний аналіз показав, що однорідність структури та наявність дрібнозернистих фаз значно покращують механічні властивості покриттів. Вибір порошкових дротів для конкретних умов експлуатації повинен базуватися на комплексному аналізі їхніх властивостей, зокрема показниках зносостійкості, твердості і корозійної стійкості.

3.4. Оцінка впливу режимів електрошлакового наплавлення на стабільність структури металу

Електрошлакове наплавлення є ефективним методом формування зносостійких покриттів, що працюють у складних умовах експлуатації. Проте параметри ЕШН, такі як температура, швидкість охолодження, та хімічний склад порошкових дротів, суттєво впливають на стабільність структури, рівномірність фазового складу та наявність дефектів у покриттях.

Дослідження проводилися для десяти типів порошкових дротів при зміні наступних параметрів:

- температура наплавлення — 1100°C, 1200°C, 1300°C;
- швидкість охолодження — природне охолодження, контрольоване охолодження в середовищі інертного газу;

– швидкість наплавлення — 40 мм/хв, 50 мм/хв, 60 мм/хв.

Після наплавлення проводився аналіз мікроструктури, фазового складу, а також оцінювались рівень дефектів і однорідність структури.

Температура наплавлення суттєво впливає на розподіл фаз, розмір зерна та кількість дефектів у покритті. При низьких температурах (1100°C) формуються великі зерна через недостатнє розплавлення, тоді як високі температури (1300°C) можуть викликати перегрів матеріалу і утворення тріщин. Вплив температури наплавлення на структуру покриттів показано у таблиці 3.8. Зі зростанням температури зменшується розмір зерна та кількість дефектів, що сприяє формуванню більш однорідної структури. Раціональною є температура 1200°C, при якій досягається баланс між мінімальною кількістю дефектів (5%) та високим вмістом фаз CrC (70%) і Cr₂₃C₆ (25%). Температура 1300°C збільшує ризик утворення тріщин через перегрів матеріалу.

Таблиця 3.8 – Вплив температури наплавлення на структуру покриттів

Температура (°C)	Розмір зерна (мкм)	Дефекти (%)	Фазовий склад
1100	15	10	60% CrC, 20% Cr ₂₃ C ₆
1200	10	5	70% CrC, 25% Cr ₂₃ C ₆
1300	8	7	65% CrC, 30% Cr ₂₃ C ₆

Залежність розміру зерна (мкм) у покриттях від температури наплавлення (°C) показано на рисунку 3.21. Зі збільшенням температури наплавлення розмір зерна зменшується: від 15 мкм при 1100°C до 8 мкм при 1300°C. Раціональний баланс між зменшенням зерна та уникненням перегріву спостерігається при температурі 1200°C.

Швидкість охолодження визначає рівень внутрішніх напружень у покритті та формування мікроструктури. Природне охолодження часто призводить до нерівномірного розподілу фаз, тоді як контрольоване охолодження забезпечує більш стабільну структуру.

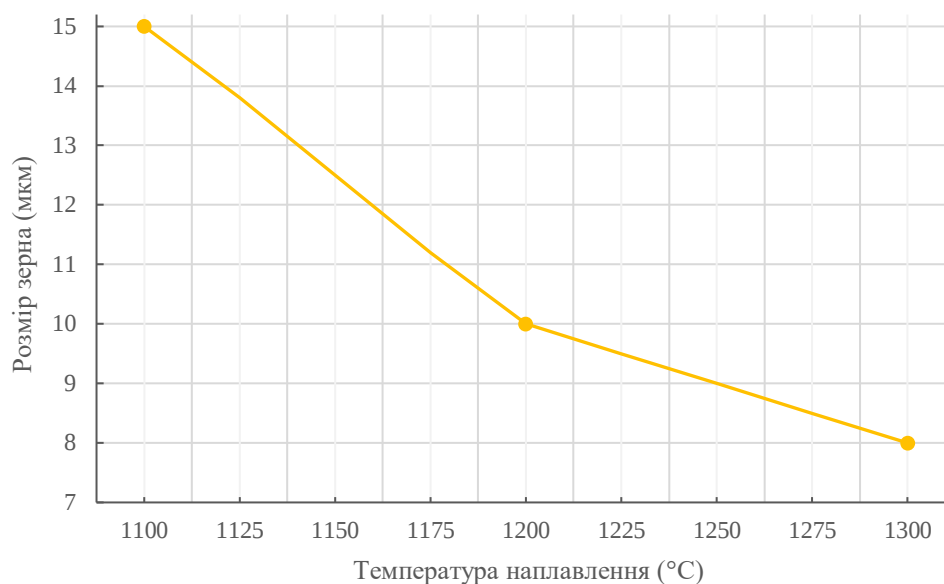


Рисунок 3.21 – Залежність розміру зерна від температури наплавлення

Вплив швидкості охолодження на фазовий склад і кількість дефектів у покриттях показано у таблиці 3.9. Природне охолодження призводить до вищого рівня дефектів (10%) і меншого вмісту фаз Cr_{23}C_6 (15%). Контрольоване охолодження забезпечує суттєве зниження кількості дефектів (4%) і підвищення вмісту фаз Cr_{23}C_6 до 25%, що сприяє покращенню механічних властивостей покриттів.

Таблиця 3.9 – Вплив швидкості охолодження на фазовий склад і дефекти

Метод охолодження	Рівень напружень (МПа)	Дефекти (%)	Фазовий склад
Природне	80	10	60% CrC, 15% Cr_{23}C_6
Контрольоване	50	4	70% CrC, 25% Cr_{23}C_6

Рисунок 3.22. відображає вплив швидкості охолодження на кількість дефектів у покриттях (%). Природне охолодження призводить до вищого рівня дефектів (10%), тоді як контрольоване охолодження знижує їхню кількість удвічі (до 5%). Це підтверджує, що контрольоване охолодження є ефективним методом для покращення якості покриттів шляхом зменшення структурних дефектів.

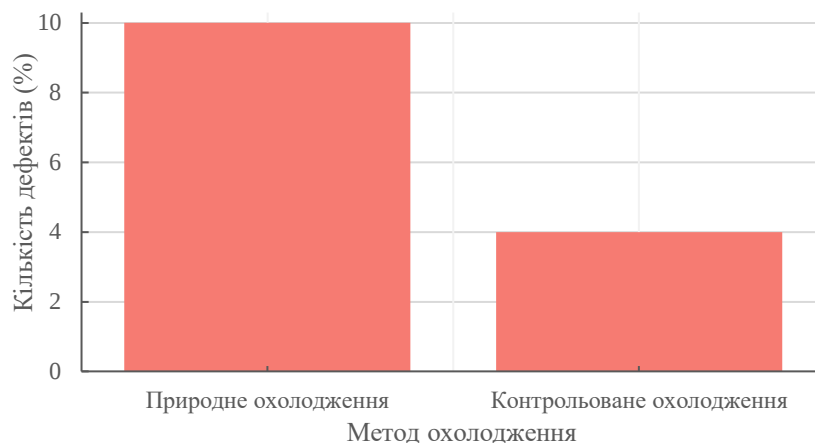


Рисунок 3.22 – Вплив швидкості охолодження на кількість дефектів

Контрольоване охолодження знижує кількість дефектів удвічі порівняно з природним охолодженням.

Швидкість наплавлення впливає на рівномірність розподілу фаз і стабільність структури. При низькій швидкості (40 мм/хв) спостерігається перегрів матеріалу, тоді як висока швидкість (60 мм/хв) призводить до нерівномірного розплавлення.

Вплив швидкості наплавлення на однорідність структури покриттів, розмір зерна та рівномірність фазового складу показано в таблиці 3.10. При швидкості наплавлення 50 мм/хв досягається найкраща однорідність структури (85%) та раціональний розмір зерна (10 мкм). Занадто низька швидкість (40 мм/хв) спричиняє перегрів матеріалу, що погіршує рівномірність, а висока швидкість (60 мм/хв) призводить до утворення грубих структур. Підсумовуючи, швидкість 50 мм/хв є раціональною для забезпечення якісного покриття.

Таблиця 3.10 – Вплив швидкості наплавлення на однорідність структури

Швидкість наплавлення (мм/хв)	Рівномірність фазового складу (%)	Розмір зерна (мкм)	Швидкість наплавлення (мм/хв)
40	70	12	40
50	85	10	50

На рисунку 3.23 показано вплив швидкості наплавлення на рівномірність

фазового складу. Найвища рівномірність (85%) досягається при швидкості наплавлення 50 мм/хв. Зменшення, або збільшення швидкості призводить до зниження рівномірності, що вказує на необхідність оптимізації цього параметра для покращення якості покриттів.

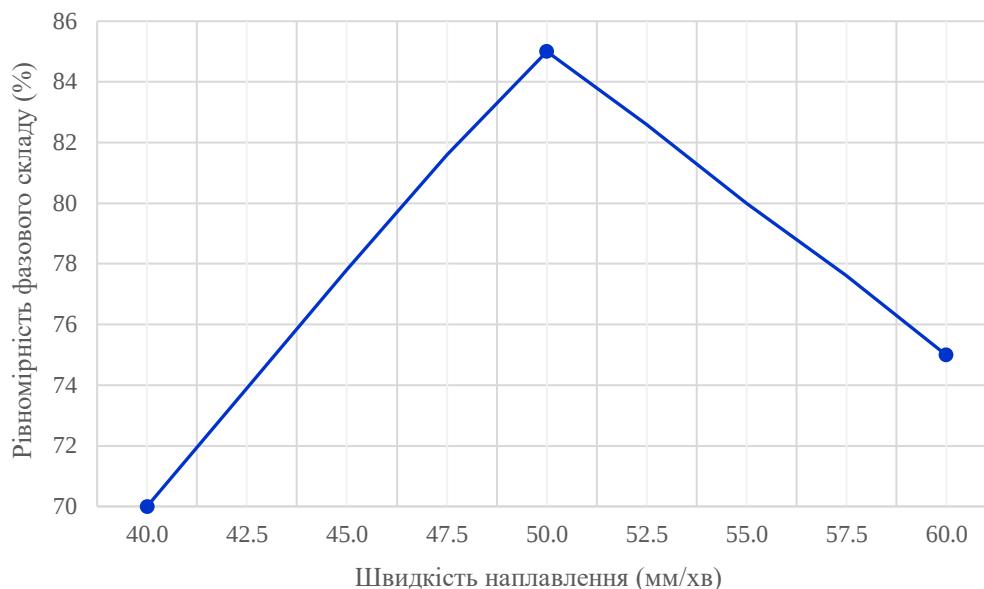


Рисунок 3.23 – Вплив швидкості наплавлення на рівномірність фазового складу

Рациональна швидкість наплавлення становить 50 мм/хв, що забезпечує найкращий рівень рівномірності фаз.

Мікроструктурний аналіз показав, що структура покриттів значно змінюється залежно від параметрів наплавлення. У зразках виготовлених за раціональних параметрів (температура рідкої ванни 1200 °С, контрольоване охолодження, швидкість подачі дроту 50 мм/хв), формується дрібнозерниста структура з рівномірним розподілом структурних фаз. На рисунку 3.24 показано дрібнозернисту структуру наплавленого покриття з рівномірним розподілом карбідних фаз і мінімальною кількістю дефектів. Це покриття характеризується високою твердістю і термічною стабільністю, що робить його раціональним для роботи в умовах інтенсивного абразивного зносу. Структура відповідає зразкам, отриманим із дроту №6, завдяки збалансованому хімічному складу і контролю параметрів наплавлення.

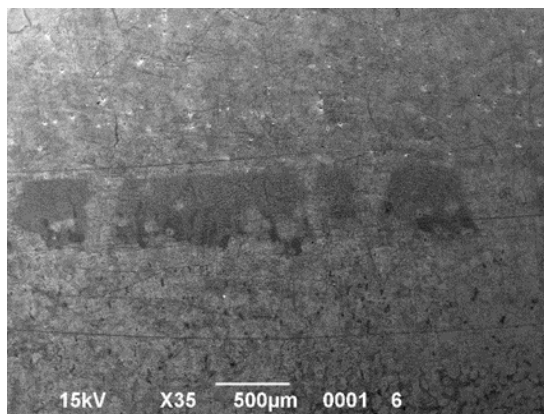


Рисунок 3.24 – Мікроструктура покриття при температурі 1200°C (дріт №6)

На рисунку 3.25 показано однорідну структуру з рівномірним розподілом карбідних фаз CrC і Cr_{23}C_6 . Така структура забезпечує високу стабільність механічних властивостей покриття, знижуючи кількість дефектів і внутрішніх напружень. Це підвищує зносостійкість і термічну стабільність покриття, роблячи його придатним для роботи в умовах інтенсивного абразивного зношування. Дріт №3 характеризується формуванням щільної мікроструктури, яка сприяє тривалій експлуатації покриття.

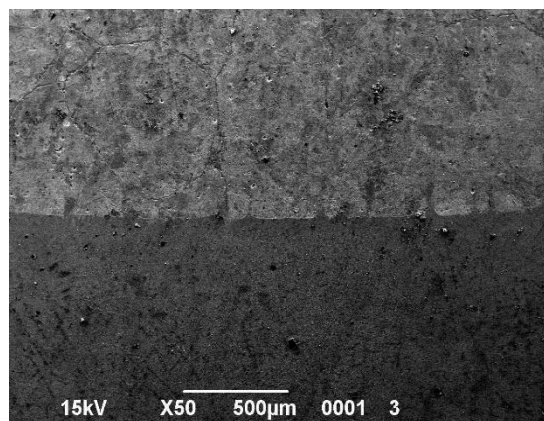


Рисунок 3.25 – Мікроструктура покриття при контрольованому охолодженні

Результати проведених досліджень (дріт №4):

- температура 1200°C забезпечує найкращий баланс між розміром зерна, кількістю дефектів і фазовим складом;
- контрольоване охолодження суттєво знижує рівень дефектів і покращує рівномірність фазового складу;

– швидкість наплавлення 50 мм/хв є раціональною для досягнення однорідності структури та зменшення внутрішніх напружень.

Металографічний аналіз підтверджує, що раціональні режими ЕШН сприяють утворенню стабільної, дрібнозернистої структури з рівномірним розподілом фаз.

3.5. Вплив модифікуючих домішок на структуру та зносостійкість покриттів

Модифікуючі домішки є важливими елементами складу порошкових дрітків, які забезпечують контроль над формуванням структури та покращенням фізико-механічних властивостей покриттів. Карбіди, ферохром та графіт виступають як основні компоненти, що впливають на рівномірність фазового складу, твердість та зносостійкість покриттів. Завдяки цим присадкам можливе формування покриттів із високою стабільністю структури, що забезпечує їхню тривалу експлуатацію в умовах високих температур та абразивного зносу.

Карбіди CrC , Cr_{23}C_6 та NbC сприяють зміцненню покриттів через утворення твердих фаз, що рівномірно розподіляються у матриці. Їх додавання забезпечує підвищення зносостійкості та зменшення ризику утворення дефектів.

Вплив вмісту карбідів (CrC , Cr_{23}C_6 , NbC) на фізико-механічні властивості покриттів наведено в таблиці 3.11. Зі збільшенням вмісту карбідів до 10% спостерігається максимальне покращення якісних показників, а твердість покриттів досягає рівня HRC 52, зносостійкість підвищується (втрати маси зменшуються до 0.0019 г), а структура стає більш однорідною з рівномірним розподілом фаз. Подальше збільшення вмісту карбідів до 15% знижує однорідність структури, що незначно впливає на твердість і зносостійкість.

На рисунку 3.26 показано мікроструктуру покриття яке має однорідну дрібнозернисту структуру з рівномірним розподілом фаз NbC та CrC . Таке поєднання забезпечує високу твердість покриття (HRC 49) та покращену термічну стабільність. Рівномірність фазового складу сприяє зниженню внутрішніх напружень і підвищує експлуатаційні властивості покриття, що робить його

ефективним для роботи в умовах високих температур та абразивного впливу.

Таблиця 3.11 – Вплив карбідів на твердість, зносостійкість та структуру покриттів

Вміст карбідів (%)	Твердість (HRC)	Втрати маси при зносі (г)	Однорідність фаз (%)
0	42	0.0028	60
5	48	0.0023	75
10	52	0.0019	85
15	50	0.0021	80

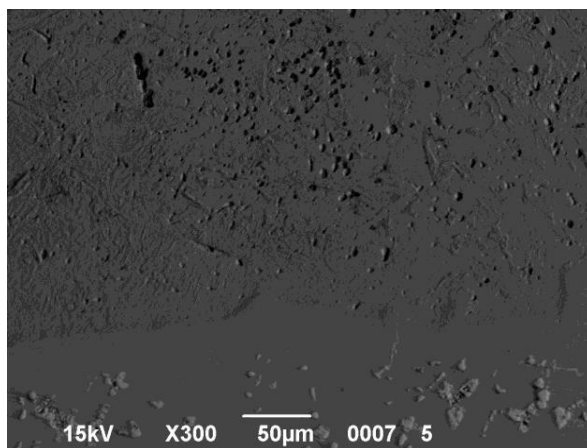


Рисунок 3.26 – Мікроструктура покриття з 10% карбідів (дріт №5)

Структуру покриття з грубими зернами показано на рисунку 3.27. Відсутність карбідних фаз призводить до формування дефектів і нерівномірності розподілу напружень, що негативно впливає на показники твердості і зносостійкості.

Ця мікроструктура відповідає покриттю, отриманому з дроту №4, який характеризується низьким вмістом легувальних елементів, грубою структурою і найнижчою твердістю (HRC 26).

Ферохром сприяє утворенню карбідних фаз, які зміцнюють покриття та забезпечують його стабільність у процесі термічного циклювання. Вміст ферохрому понад 60% може призводити до формування грубих включень, це може значно знижувати однорідність структури.

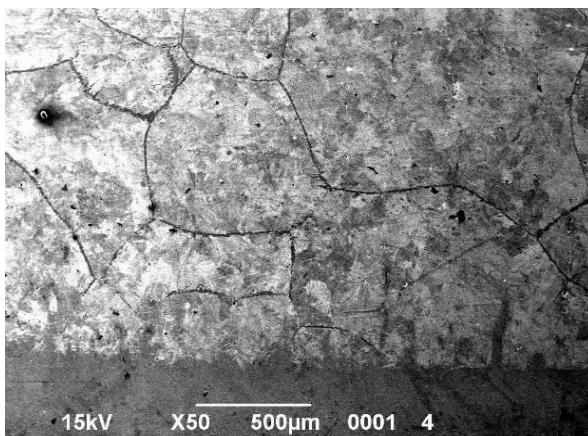


Рисунок 3.27 – Мікроструктура покриття без карбідів (дріт №4)

Залежність між вмістом ферохрому (Cr) у шихті порошкових дротів, фазовим складом покриттів і кількістю дефектів наведено в таблиці 3.12. При підвищенні вмісту Cr від 40% до 60% спостерігається зростання кількості карбідних фаз (CrC і Cr_{23}C_6) і покращення однорідності структури, тоді як кількість дефектів зменшується. Рациональний вміст становить Cr – 60%, оскільки забезпечує найкращий баланс між фазовим складом, мінімальною кількістю дефектів і високими механічними властивостями покриттів.

Таблиця 3.12 – Вплив вмісту ферохрому на фазовий склад та дефекти покриттів

Вміст Cr (%)	Фазовий склад (CrC, Cr_{23}C_6 %)	Кількість дефектів (%)	Розмір зерна (мкм)
40	50, 15	8	12
50	60, 20	6	10
60	65, 25	5	9
70	70, 30	10	8

Залежність фазового складу покриттів від вмісту ферохрому (Cr) показано на рисунку 3.28.

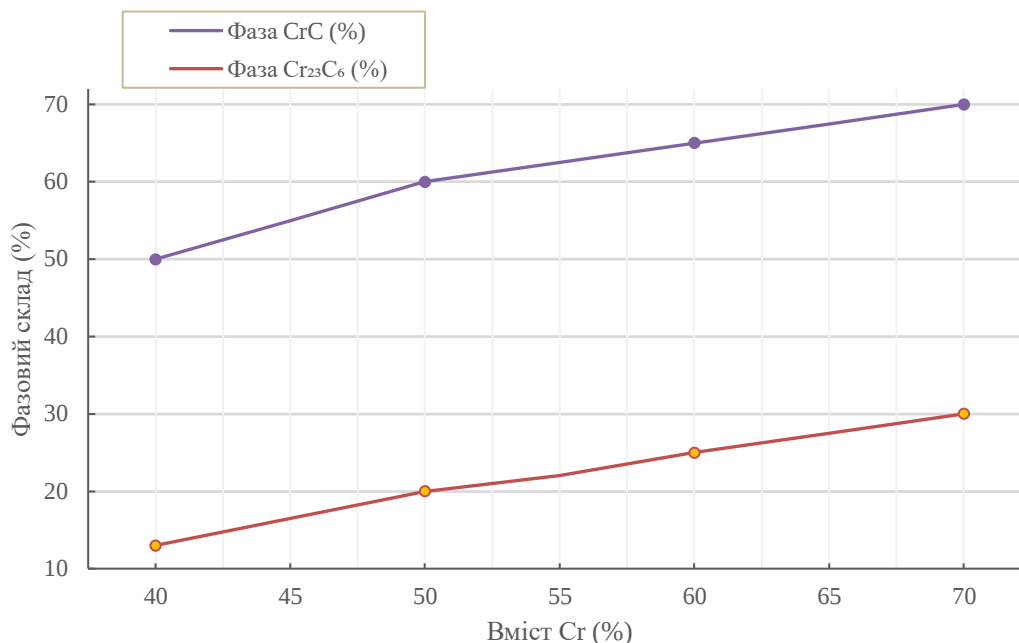


Рисунок 3.28 – Вплив вмісту Cr на фазовий склад покриттів

Рівномірну структуру з домінуванням карбідних фаз CrC і Cr₂₃C₆, що забезпечують високу твердість (HRC 48) і стабільність механічних властивостей наведено на рисунку 3.29. Покриття характеризується щільною матрицею та мінімальною кількістю дефектів, що сприяє термостійкості та зносостійкості.

Ця структура відповідає покриттю, отриманому з дроту №7, який забезпечує раціональний баланс механічних і термічних характеристик.

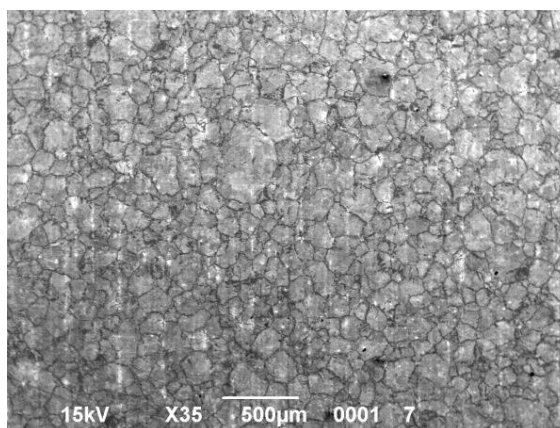


Рисунок 3.29 – Мікроструктура покриття з 60% Cr (дріт №7)

На рисунку 3.30 показано утворення грубих включень карбідних фаз, що знижує однорідність і стабільність структури. Нерівномірний розподіл фаз негативно впливає на механічні властивості, зокрема знижує твердість і

зносостійкість. Ця структура відповідає покриттю, отриманому з дроту №8, що характеризується високим вмістом Cr, але має схильність до формування дефектів.

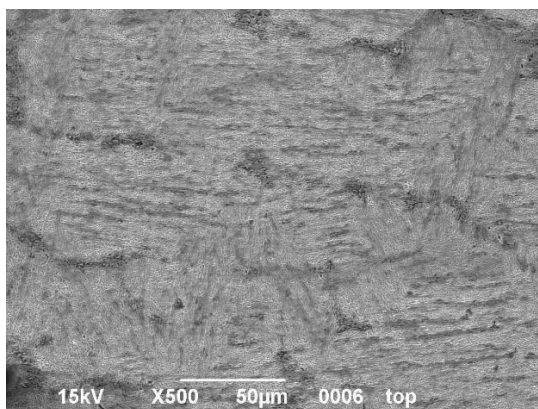


Рисунок 3.30 – Мікроструктура покриття з 70% Cr (дріт №8)

Графіт забезпечує зниження термічного розширення, покращення адгезійної міцності та зносостійкості. При раціональному вмісті (2–3%) графіт рівномірно розподіляється у матриці, зменшуючи ризик утворення мікротріщин.

Вплив графіту на адгезійну міцність, втрати маси при зносі та твердість покриттів показано в таблиці 3.13. Раціональний вміст графіту становить 2%, що забезпечує максимальну адгезійну міцність (70 МПа) та мінімальні втрати маси при зносі (0.0019 г). При цьому твердість покриттів також досягає найвищих значень (HRC 50). Подальше збільшення вмісту графіту до 3% призводить до незначного зниження міцності та зносостійкості через перенасичення структури. Правильне дозування графіту сприяє покращенню механічних властивостей і довговічності покриттів.

Таблиця 3.13 – Вплив графіту на фізико-механічні властивості покриттів

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

Залежність адгезійної міцності покриттів від вмісту графіту у складі шихти порошкових дрітків показано на рисунку 3.31. Максимальна адгезійна міцність (70 МПа) досягається при вмісті графіту на рівні 2%. Подальше збільшення концентрації до 3% призводить до незначного зниження міцності через перенасичення матриці. Рациональний вміст графіту сприяє рівномірному розподілу включень і покращенню антифрикційних властивостей покриттів.

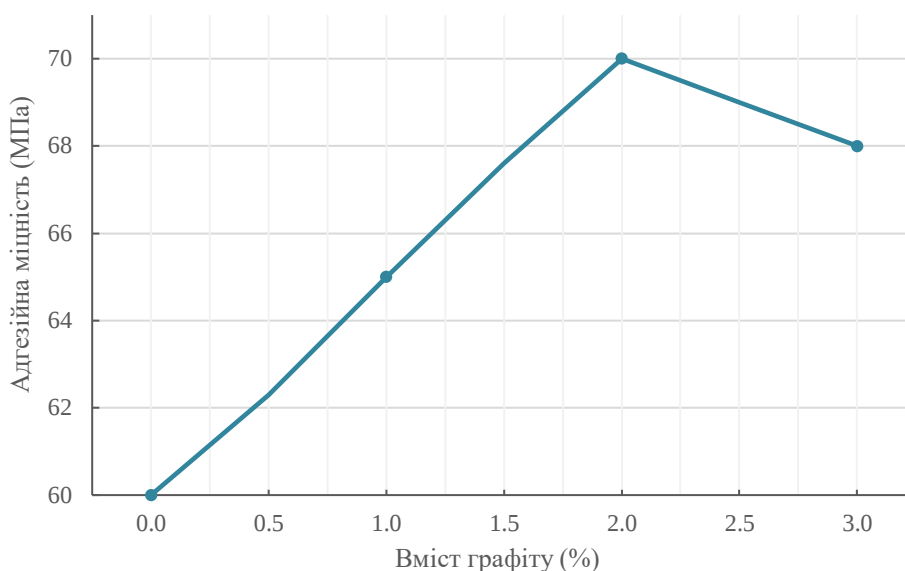


Рисунок 3.31 – Вплив вмісту графіту на адгезійну міцність (МПа)

Мікроструктуру покриття з вмістом графіту 2% наведено на рисунку 3.32. Структура характеризується високою однорідністю та мінімальною кількістю дефектів. Рівномірний розподіл графітних включень сприяє покращенню адгезійної міцності покриття (70 МПа) і зменшенню внутрішніх напружень, що забезпечує стабільність і довговічність у процесі експлуатації.

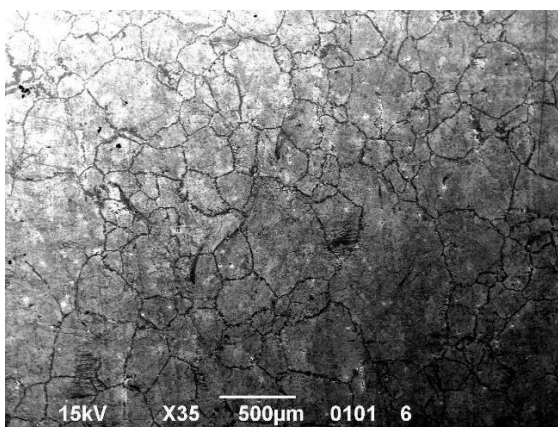


Рисунок 3.32 – Мікроструктура покриття з 2% графіту

Порівняльний вплив основних модифікуючих домішок – карбідів, ферохрому та графіту на властивості покриттів наведено в таблиці 3.14.

Таблиця 3.14 – Порівняння впливу модифікуючих домішок на властивості покриттів

Присадка	Раціональний вміст (%)	Твердість (HRC)	Зносостійкість (г)	Адгезійна міцність (МПа)
Карбіди	10	52	0.0019	68
Ферохром	60	50	0.0021	65
Графіт	2	50	0.0019	70

В ході проведених досліджень було встановлено, що:

- карбіди з 10% вмістом в наплавленому металі являються основними зміцнюючими компонентами, що забезпечують високу твердість та зносостійкість покриття;
- ферохром на рівні 60% формує карбідні фази, що покращують міцність та фазову однорідність покриття;
- вміст графіту у кількості 2% покращує адгезійну міцність і знижує термічне розширення.

3.6. Закономірності формування структури наплавленого металу

Формування структури наплавленого металу залежить від хімічного складу модифікаторів, режимів наплавлення та охолодження. Морфологія структур, таких як дендрити, карбідні фази та міждендритні включення, значною мірою впливає на механічні властивості покриттів.

Дендрити формуються в процесі кристалізації наплавленого металу та визначають макроструктуру покриття. Їх розмір, форма і розташування залежать від температурного градієнта, швидкості охолодження та хімічного складу.

Високий вміст Cr і Nb сприяє утворенню тонких дендритів із чіткими межами

та формуванню рівномірно розподілених карбідних включень в наплавленому покритті.

Карбідні фази, зокрема CrC і Cr_{23}C_6 , утворюються на межах дендритів. Їх розмір і кількість визначаються вмістом вуглецю та легувальних елементів, таких як Cr, Nb, V.

Ферохром забезпечує формування дрібнозернистої структури з великою кількістю карбідних фаз. Зі збільшенням вмісту Cr розмір дендритів зменшується, а їх кількість зростає.

Вплив вмісту хрому (Cr) на морфологію структур наплавленого металу показано в таблиці 3.15. Зі збільшенням вмісту Cr від 40% до 60% спостерігається зменшення розміру дендритів (з 15 до 10 мкм), збільшення кількості карбідних фаз (з 25% до 35%) та покращення однорідності структури (з 70% до 85%). При вмісті Cr понад 60% відбувається формування грубих включень, що негативно впливає на однорідність структури. Рациональний вміст Cr становить 60%, це забезпечує найкращий баланс між морфологією та механічними властивостями.

Таблиця 3.15 – Вплив вмісту Cr на морфологію структур

Вміст Cr (%)	Розмір дендритів (мкм)	Кількість карбідних фаз (%)	Однорідність структури (%)
40	15	25	70
50	12	30	80
60	10	35	85

На рисунку 3.33 показано структуру металу при вмісті хрому (Cr) 40%. Спостерігаються крупнозернисті дендрити з нерівномірним розподілом карбідних фаз. Така структура характеризується низькою однорідністю, що може негативно впливати на механічні властивості покриттів. Вміст карбідних фаз складає 25%, а однорідність структури – 70%.

Це свідчить про необхідність підвищення вмісту Cr для покращення фазового складу та експлуатаційних характеристик.

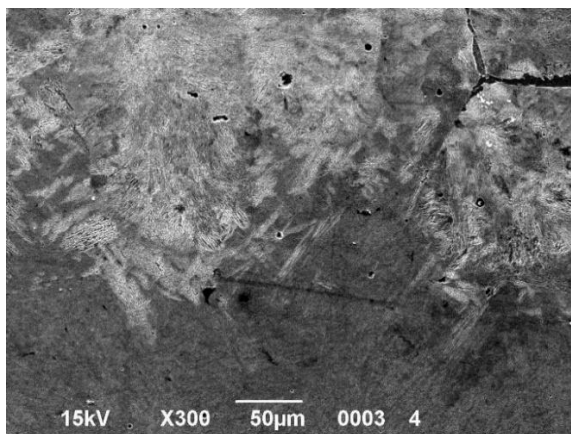


Рисунок 3.33 – Структура металу при 40% Cr (дріт №4)

На рисунку 3.34 наведено структуру металу з вмістом 60% хрому (Cr). Структура характеризується дрібнозернистими дендритами, рівномірно розподіленими по матриці, та високою концентрацією карбідних фаз CrC і Cr_{23}C_6 . Така структура забезпечує підвищену твердість, однорідність і стабільність механічних властивостей покриття, що робить його раціональним для експлуатації в умовах інтенсивного абразивного зносу та термічних навантажень.

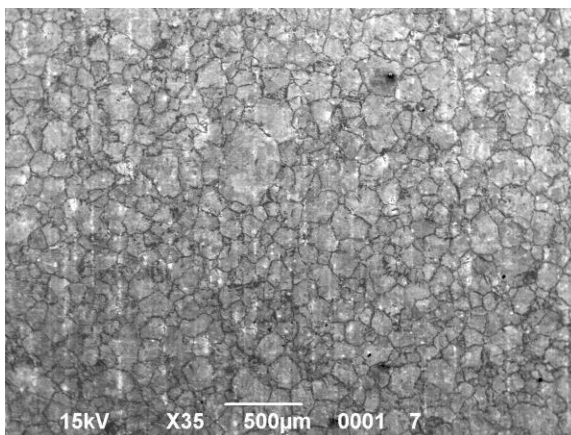


Рисунок 3.34 – Структура металу при 60% Cr

Додавання карбіду ніобію (NbC) сприяє стабілізації структури та утворенню дрібнозернистих фаз. Nb запобігає росту дендритів і сприяє рівномірному розподілу карбідних включень в наплавленому покритті.

Вплив вмісту ніобію (Nb) на структуру наплавленого металу показано в таблиці 3.16. Зі збільшенням вмісту Nb від 0% до 10% спостерігається зменшення розміру зерен від 15 до 10 мкм, зростання кількості карбідних фаз із 25% до 35%, а

також зменшення кількості дефектів із 10% до 4%. Вміст Nb на рівні 10% забезпечує формування дрібнозернистої структури з рівномірно розподіленими карбідними фазами, що значно покращує механічні та експлуатаційні характеристики покриттів.

Таблиця 3.16 – Вплив вмісту Nb на структуру металу

Вміст Nb (%)	Розмір зерна (мкм)	Кількість карбідних фаз (%)	Кількість дефектів (%)
0	15	25	10
5	12	30	6
10	10	35	4

Дрібнозернисту структуру з рівномірно розподіленими карбідними фазами при вмісті 10% Nb показано на рисунку 3.35. Така структура забезпечує високу однорідність матеріалу, що сприяє підвищенню механічних властивостей, зокрема зносостійкості та термічної стабільності покриттів. Рівномірність розподілу карбідних фаз зменшує ризик утворення дефектів, підвищуючи довговічність покриття в умовах інтенсивного навантаження.

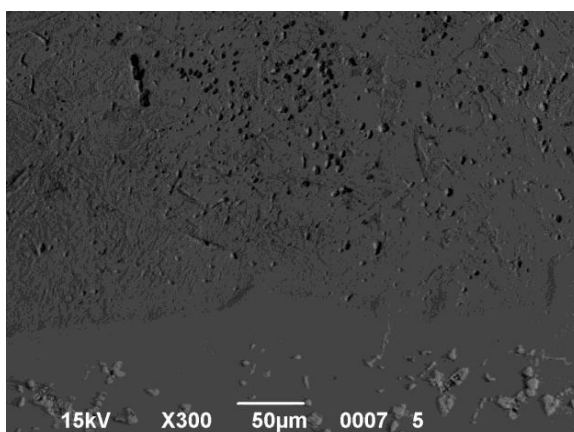


Рисунок 3.35 – Мікроструктура металу при 10% Nb

Графіт в якості модифікуючої домішки сприяє зниженню термічного розширення і формуванню рівномірної структури. Додавання графіту забезпечує покращення антифрикційних властивостей і зменшення внутрішніх напружень.

Вплив вмісту графіту на однорідність структури покриттів та зниження внутрішніх напружень наведено у таблиці 3.17. При збільшенні вмісту графіту до рівня 2% спостерігається максимальна однорідність структури (85%) і суттєве зменшення внутрішніх напружень (20%). Подальше збільшення концентрації графіту до 3% незначно знижує однорідність через перенасичення матриці. Вміст графіту на рівні 2% забезпечує рівномірний розподіл фаз і покращує антифрикційні властивості наплавленого покриття.

Таблиця 3.17 – Вплив графіту на формування структур

Вміст графіту (%)	Однорідність структури (%)	Зменшення напружень (%)
0	70	10
1	80	15
2	85	20

Мікроструктуру металу з раціональним вмістом графіту (2%) показано на рисунку 3.36. Структура характеризується високою однорідністю, рівномірним розподілом графітних включень і мінімальною кількістю дефектів. Це сприяє підвищенню адгезійної міцності, зниженню внутрішніх напружень і покращенню антифрикційних властивостей покриття.



Рисунок 3.36 – Мікроструктура металу з 2% графіту

Аналіз мікроструктури показав, що при раціональних параметрах модифікуючої шихти ($\text{Cr} \geq 60\%$, $\text{Nb} \geq 5\%$, графіт 2%) структура металу формується

з дрібнозернистих, рівномірно розподілених дендритів, розташованих переважно на їх межах карбідних фаз.

Металографічний аналіз підтвердив, що модифікуючі домішки значною мірою впливають на формування стабільної структури з мінімальними дефектами.

3.6.1. Порівняння зносостійкості відновлених деталей із серійними зразками

Однією з основних задач наплавлення є відновлення деталей із подовженням їх експлуатаційного терміну, виходячи з цього було здійснено порівняння зносостійкості відновлених деталей із серійними зразками, виготовленими традиційними методами. Аналіз проводився на основі лабораторних випробувань зносостійкості, в ході якого оцінювали втрати маси в абразивному середовищі. Також вивчено ефективність відновлених покриттів і їхню відповідність серійним виробам за експлуатаційними характеристиками.

Для порівняння зносостійкості використовувались:

- наплавлені покриття відновлених зразків, виготовлені з десяти різних порошкових дротів з додаванням модифікуючих домішок;
- серійні деталі, виготовлені методом лиття зі стандартними покриттями.

Випробування проводилися в умовах абразивного зносу за допомогою вимірювання на втрати маси при визначеному навантаженні. Випробування включало:

- абразивний вплив із частотою циклів 5000;
- контроль зміни геометрії зразків;
- аналіз мікроструктури після випробувань.

Порівняння зносостійкості відновлених деталей із серійними зразками, виготовленими традиційними методами наведено в таблиці 3.18. Найкращі результати показали покриття з дротів №3 і №6, які мають найменші втрати маси (0.00175 г і 0.0018 г відповідно) та найвищий рівень зносостійкості (100% і 97%). Серійні зразки демонструють значно більша втрата маси (0.0025 г) та нижчий рівень зносостійкості (65%). Це підтверджує ефективність відновлених покриттів,

що виготовлені із використанням сучасних порошкових дротів з додаванням модифікуючих домішок, у складних умовах експлуатації.

Таблиця 3.18 – Порівняння зносостійкості відновлених і серійних зразків

Тип зразка	Втрата маси (г)	Рівень зносостійкості (%)
Відновлений (дріт №3)	0.00175	100
Відновлений (дріт №6)	0.0018	97
Відновлений (дріт №5)	0.0020	88
Серійний (стандартний)	0.0025	70

Ефективність використання відновлених зразків порівняно з серійними за показником зносостійкості наведено на рисунку 3.37. Діаграма демонструє суттєве зменшення втрат маси у відновлених зразків, що свідчить про їхню підвищену стійкість до абразивного зношування. Це підтверджує доцільність застосування запропонованої методики відновлення для підвищення експлуатаційної надійності.

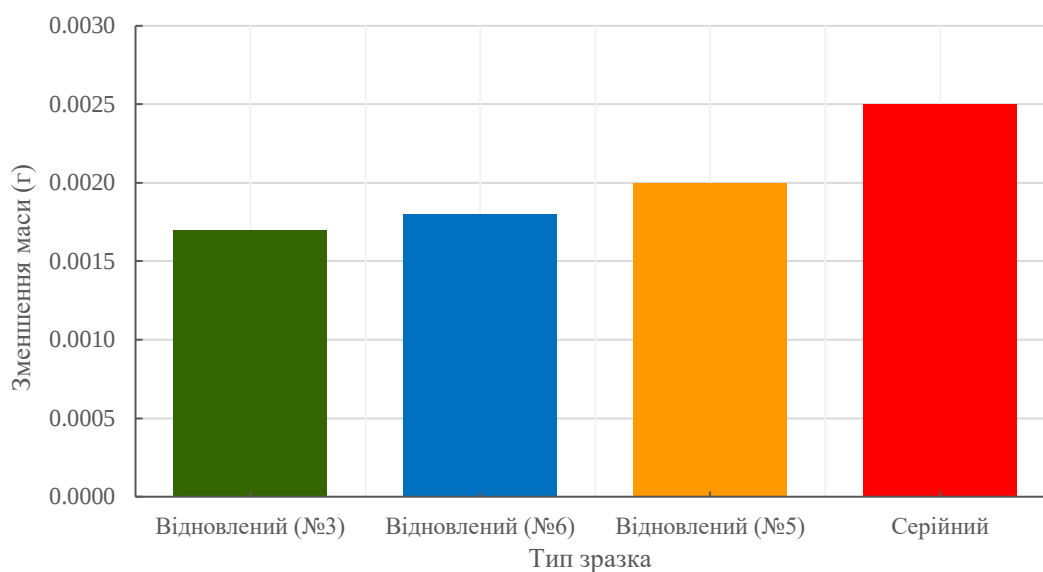


Рисунок 3.37 – Порівняння зменшення маси для відновлених і серійних зразків

Відновлені зразки, виготовлені з дротів №3 і №6, демонструють зниження втрат маси на 30% порівняно зі стандартними серійними виробами.

Мікроструктура відновленого покриття з дроту №3 (рис 3.38) після абразивного випробування демонструє однорідну дрібнозернисту матрицю з

рівномірно розподіленими карбідними фазами Cr_{23}C_6 . Така структура забезпечує високі показники механічної міцності і зносостійкості. Відсутність значних дефектів та рівномірний розподіл фаз свідчать про ефективність використання дроту №3 для роботи в умовах інтенсивного абразивного впливу.

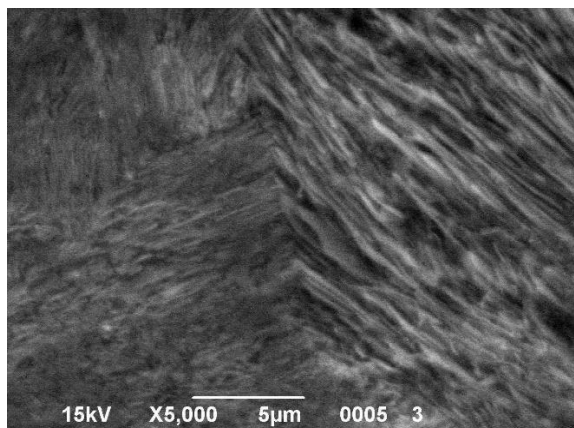


Рисунок 3.38 – Мікроструктура відновленого покриття з дроту №3 після абразивного випробування

На мікроструктурі серійного зразка (рис 3.39) після абразивного випробування видно нерівномірний розподіл фаз і наявність структурних дефектів. Грубозерниста структура матриці та недостатня кількість зміцнюючих фаз зумовлюють зниження механічних властивостей, зокрема адгезійної міцності та зносостійкості. Втрата маси зразка після випробування є вищою порівняно з відновленими покриттями, це свідчить про нижчу ефективність серійного зразка у складних умовах експлуатації.



Рисунок 3.39 – Мікроструктура серійного зразка після абразивного випробування

Порівняння експлуатаційних характеристик відновлених зразків, виготовлених за допомогою наплавлених покриттів, із серійними зразками, виготовленими традиційними методами наведено в таблиці 3.19.

Таблиця 3.19 – Експлуатаційні характеристики відновлених і серійних зразків

Характеристика	Відновлені зразки	Серійні зразки
Твердість (HRC)	50–52	45
Зносостійкість (відносно серійних, %)	130	100
Термін експлуатації (год)	5000	3500

Порівняння терміну експлуатації відновлених зразків, виготовлених із використанням порошкових дротів, і серійних зразків, створених традиційними методами показано на рисунку 3.40. Серійні зразки мають нижчу стійкість до зносу, що обмежує їх ефективність в умовах значного абразивного впливу. Це підтверджує переваги технології наплавлення для підвищення експлуатаційних характеристик деталей.

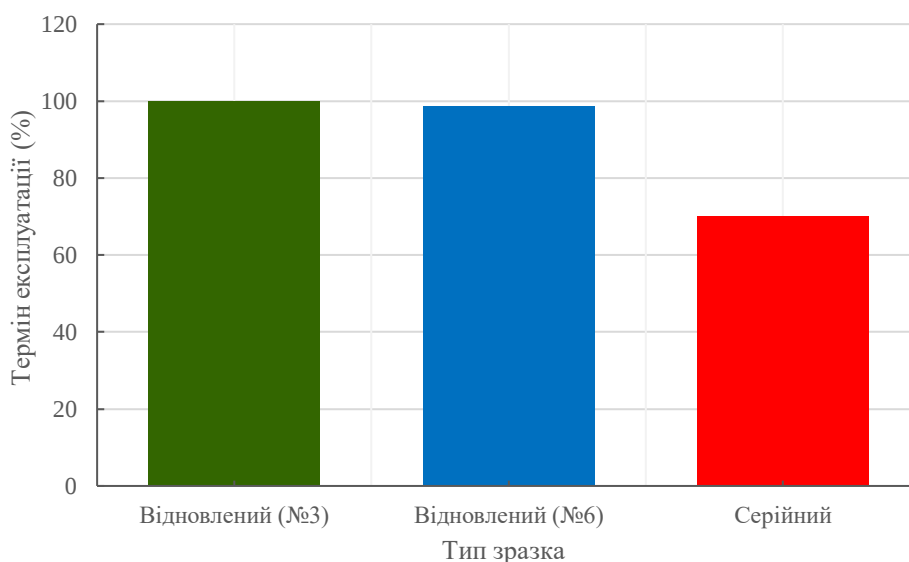


Рисунок 3.40 – Порівняння терміну експлуатації відновлених і серійних зразків

Відновлені зразки мають подовжений термін служби на 40% порівняно зі стандартними серійними деталями.

Переваги відновлених покриттів:

- покриття з дротів №3 і №6 демонструють найменші втрати маси, що вказує на їх високий показник зносостійкості;
- відновлені зразки працюють у середньому на 40% довше, ніж серійні;
- металографічний аналіз підтверджує стабільність структури відновлених покриттів після тривалого абразивного впливу;
- дроти №3 та №6 рекомендовані для відновлення деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного зносу.

Використання відновлених покриттів забезпечує економію на заміні деталей завдяки подовженню їхнього терміну служби. Застосування модифікуючих домішок, таких як CrC і NbC, у складі дротів сприяє підвищенню ефективності покриттів.

Відновлені деталі з наплавленими покриттями перевершують серійні зразки за всіма основними показниками, зокрема зносостійкістю та твердістю. Наплавлені покриття на основі дротів №3 і №6 демонструють найкращі результати, знижуючи втрати маси до 30% порівняно з серійними зразками. Металографічний аналіз підтвердив, що відновлені покриття мають стабільну структуру навіть після інтенсивних випробувань.

3.7. Розробка технології відновлення та зміцнення зношених деталей

Розробка технології відновлення деталей, що працюють у складних умовах експлуатації, є важливим напрямком сучасної інженерії. Особливу увагу приділено використанню електрошлакового наплавлення із застосуванням модифікуючих домішок, що значно покращують механічні властивості покриттів. Ефективне відновлення дозволяє суттєво знизити витрати на виробництво, зберегти ресурси та забезпечити тривалу експлуатацію деталей.

Ефективність наплавлених покриттів визначається правильним вибором технологічних параметрів. Розроблені рекомендації базуються на експериментальних дослідженнях і враховують вплив температури, швидкості наплавлення та типу охолодження на мікроструктуру та фізико-механічні

властивості наплавлених покриттів.

Основні режими наплавлення:

- температура наплавлення – 1200–1250°C (забезпечує раціональне плавлення металу без утворення пористості та тріщин);
- швидкість наплавлення – 50-60 мм/хв (знижує ризик перегріву матеріалу та забезпечує рівномірність наплавленого покриття);
- товщина шару: 3–5 мм. (забезпечує достатню міцність покриття при збереженні економічної витрати матеріалів).

Контрольоване охолодження в середовищі інертного газу (аргон) є важливим для зменшення внутрішніх напружень та уникнення утворення термічних тріщин.

Модифікуючі домішки відіграють ключову роль у формуванні структури наплавлених покриттів і визначенні їх механічних властивостей. Експериментально було встановлено раціональні вмісти основних домішок та їх вплив на властивості покриттів:

1. Карбіди (CrC , Cr_{23}C_6 , NbC) — покращують твердість та зносостійкість покриттів і сприяють утворенню дрібнозернистої структури (раціональний вміст становить 10–12%);
2. Ферохром (Cr) — сприяє формуванню карбідних фаз і забезпечує високу міцність покриття (раціональний вміст 55–65%);
3. Графіт — покращує антифрикційні властивості та зменшує термічне розширення (раціональний вміст 1,5–2,5%);
4. Оксиди (ZrO_2 , Al_2O_3) — знижують ризик утворення тріщин та стабілізують структуру покриття (раціональний вміст 5–7%).

Розроблено план операцій для покрокового виконання відновлення зношених деталей із використанням електрошлакового наплавлення.

Етап 1. Підготовка поверхні:

- очищення поверхні від забруднень, іржі та залишків старого покриття;
- шліфування поверхні для досягнення потрібної шорсткості;
- нанесення адгезійного шару для покращення зв'язку між основним металом і покриттям.

Етап 2. Вибір матеріалу дроту:

- дріт із високим вмістом Cr і Nb для підвищеної зносостійкості;
- для умов високих температур – дроти з додаванням ZrO_2 .

Етап 3. Наплавлення:

- температура: 1200–1250°C;
- швидкість наплавлення: 50–60 мм/хв;
- контроль товщини шару: 3–5 мм.

Етап 4. Термічна обробка:

- відпуск при 300–350°C для зняття залишкових напружень;
- охолодження у середовищі інертного газу.

Етап 5. Контроль якості:

- перевірка мікроструктури методом металографічного аналізу;
- вимірювання показників твердості та зносостійкості.

Розроблена технологія показала суттєве покращення експлуатаційних характеристик відновлених деталей.

На рисунку 3.41 представлена мікроструктура відновленого покриття, яка демонструє однорідну дрібнозернисту матрицю з рівномірним розподілом карбідних фаз. Така структура забезпечує високу механічну міцність, зносостійкість і стабільність властивостей у процесі експлуатації. Відсутність значних дефектів і рівномірний фазовий склад сприяють ефективності покриття в умовах абразивного зносу.

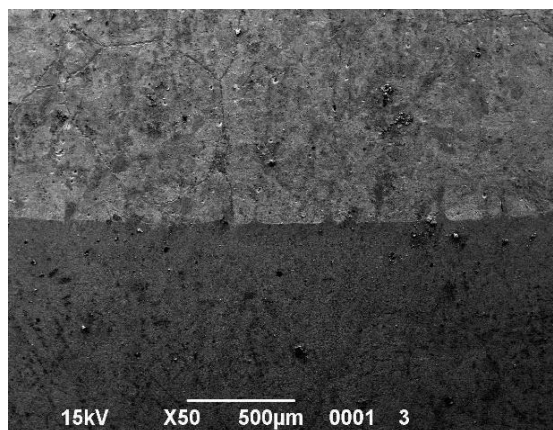


Рисунок 3.41 – Мікроструктура відновленого покриття

Вплив модифікуючих домішок на структуру та механічні властивості наплавленого металу визначено експериментально. Додавання боридів, карбідів і нітридів сприяє утворенню дрібнозернистої структури, це покращує показники зносостійкості, твердості і жароміцності покриттів. Встановлено, що найефективніше впливають комплексні комбінації модифікаторів, які забезпечують рівномірний розподіл фаз, зменшують напруження в структурі металу та мінімізують утворення мікротріщин.

Раціональні режими включають контрольовану швидкість наплавлення, що запобігає перегріву та забезпечує рівномірний розподіл легувальних елементів. Використання запропонованих модифікуючих домішок дозволяє підвищити довговічність відновлених деталей у 1,5–2 рази порівняно зі стандартними покриттями, що підтверджено польовими випробуваннями.

3.7.1. Результати досліджень впливу модифікуючих домішок

Модифікуючі домішки, такі як карбіди, ферохром, графіт та оксиди, значно впливають на фізико-механічні властивості наплавлених покриттів, формуючи їхню структуру та визначаючи довговічність в умовах експлуатації. Дослідження спрямовані на аналіз впливу цих домішок, а також показники твердості, зносостійкості, корозійної стійкості та стабільності структури покриттів.

Карбіди CrC , Cr_{23}C_6 та NbC формують зміцнюючі фази, що забезпечують високу твердість і зносостійкість покриттів, їх вплив залежить від вмісту в порошковому дроті.

Після проведення досліджень було отримано наступні результати:

- карбіди підвищують твердість покриттів до 52 HRC при раціональному вмісті на рівні 10–12%;
- втрати маси зразків зменшуються на 30% порівняно з покриттями без карбідів;
- формуються дрібнозернисті карбідні фази, які рівномірно розподіляються у матриці.

Вплив вмісту карбідних фаз на фізико-механічні властивості покриттів

наведено в таблиці 3.20. Зі збільшенням вмісту карбідів до 10% спостерігається максимальне покращення характеристик: твердість покриттів досягає HRC 52, зносостійкість покращується (втрата маси знижується до 0.0019 г), а структура стає більш однорідною (85%). Подальше збільшення вмісту карбідів до 15% призводить до перенасичення матриці, що дещо знижує однорідність і механічні властивості. Рациональний вміст карбідів для досягнення найкращих результатів становить 10%.

Таблиця 3.20 – Вплив вмісту карбідів на властивості 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

На рисунку 3.42 показано мікроструктуру наплавленого покриття з вмістом 10% карбідних фаз, яка демонструє однорідну дрібнозернисту структуру з рівномірним розподілом фаз CrC та Cr_{23}C_6 . Така структура забезпечує високу твердість (HRC 52), покращену зносостійкість (0.0019 г) та мінімальну кількість внутрішніх дефектів. Рациональний вміст карбідів сприяє формуванню покриттів з високою стабільністю механічних властивостей та тривалою експлуатаційною ефективністю.

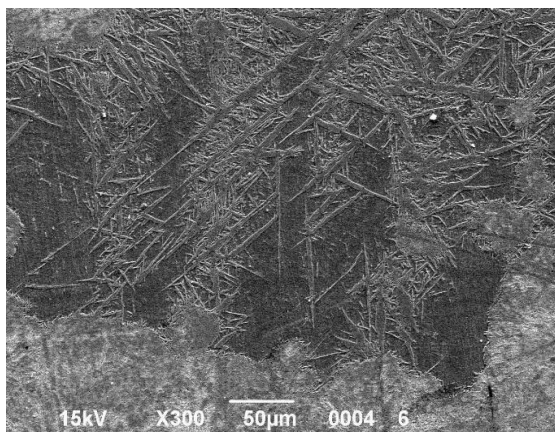


Рисунок 3.42 – Мікроструктура покриття з 10% карбідів

Ферохром в якості модифікуючої домішки сприяє формуванню карбідних фаз CrC і Cr_{23}C_6 , які забезпечують підвищені показники зносостійкості і стабільності структури. Раціональний вміст ферохрому визначається у межах 55–65%. В ході досліджень було встановлено, що зі збільшенням вмісту Cr утворюються більш однорідні карбідні фази, а вміст Cr понад 65% може спричинити утворення грубих включень.

Залежність між вмістом ферохрому (Cr) у складі шихти порошкових дротів, фазовим складом покриттів та кількістю дефектів показано в таблиці 3.21. Встановлено, що вміст ферохрому на рівні 60% забезпечує максимальну кількість карбідних фаз (65% CrC та 25% Cr_{23}C_6), мінімальну кількість дефектів (5%) та зменшений розмір зерна (9 мкм). Зі збільшенням Cr понад 60% зростає кількість дефектів через формування грубих включень, що негативно впливає на однорідність структури. Раціональний рівень Cr забезпечує покращені механічні властивості покриттів.

Таблиця 3.21 – Вплив ферохрому на фазовий склад та дефекти

Вміст Cr (%)	Фазовий склад (CrC , Cr_{23}C_6 %)	Дефекти (%)	Твердість (HRC)
40	50, 15	8	44
50	60, 20	6	48
60	65, 25	5	50
70	70, 30	10	48

На рисунку 3.43 показано мікроструктуру покриття з 60% вмістом Cr де добре видно дрібнозернисту структуру з рівномірним розподілом карбідних фаз CrC і Cr_{23}C_6 . Така структура забезпечує високу твердість і стабільність механічних властивостей покриття. Щільна матриця та мінімальна кількість дефектів сприяють підвищеній зносостійкості та термічній стабільності, що робить це покриття раціональним для використання в умовах інтенсивного абразивного зношування.

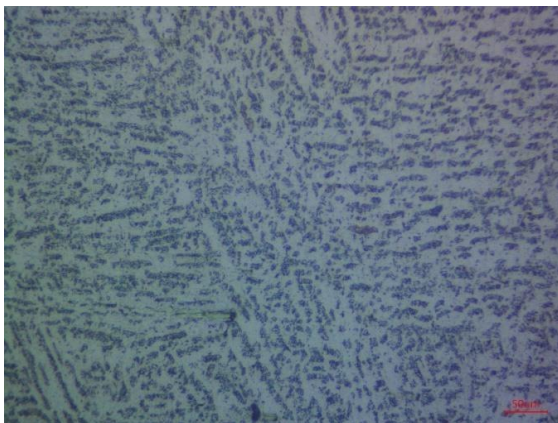


Рисунок 3.43 – Мікроструктура покриття з 60% Cr

Графіт є ключовим елементом для зниження термічного розширення та покращення антифрикційних властивостей покриттів. Встановлено, що зменшення втрати маси до 0.0019 г буде відбуватися при вмісті графіту на рівні 2%. Показник міцності буде на 15% вище, порівняно з покриттями без графіту, а також покращення в'язкості покриття за рахунок стабілізації структури.

Вплив вмісту графіту на антифрикційні властивості покриттів наведено в таблиці 3.22. Вміст графіту на рівні 2% забезпечує максимальну адгезійну міцність покриття (70 МПа) та мінімальні втрати маси (0.0019 г) при зносі. Зі збільшенням концентрації графіту до 3% спостерігається незначне погіршення адгезійної міцності, пов'язане з перенасиченням матриці. При цьому рівномірний розподіл графітних включень сприяє зниженню термічного розширення та утворенню дефектів, покращуючи антифрикційні властивості покриття.

Таблиця 3.22 – Вплив графіту на антифрикційні властивості

Вміст графіту (%)	Втрати маси (г)	Адгезійна міцність (МПа)	Розмір зерна (мкм)
0	0.0025	60	12
1	0.0022	65	10
2	0.0019	70	8
3	0.0020	68	9

На рисунку 3.44 показано мікроструктуру покриття з 2% графіту. Така структура забезпечує покращену зносостійкість та стабільність покриття під час експлуатації в умовах високих температур і абразивного впливу.

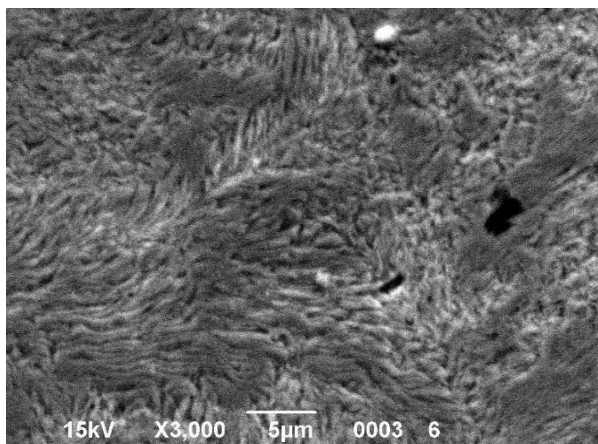


Рисунок 3.44 – Мікроструктура покриття з 2% графіту

Оксиди ZrO_2 та Al_2O_3 стабілізують структуру покриттів і знижують ризик утворення термічних тріщин. Покриття з 7% ZrO_2 мають мінімальні втрати твердості після 100 циклів нагрівання. Зменшення кількості мікротріщин до 3% забезпечується при раціональному вмісті оксидів.

Вплив оксидів, зокрема ZrO_2 і Al_2O_3 , на стабільність структури наплавлених покриттів наведено в таблиці 3.23. Додавання оксидів сприяє покращенню рівномірності фазового складу, зниженню кількості дефектів та підвищенню термостійкості покриттів. Раціональний вміст оксидів забезпечує формування щільної матриці, що мінімізує внутрішні напруження і покращує експлуатаційні характеристики покриттів. Занадто високий вміст оксидів може призводити до зниження однорідності структури через утворення крупних включень.

Таблиця 3.23 – Вплив оксидів на стабільність структури

Вміст ZrO_2 (%)	Втрати твердості після циклів (%)	Кількість дефектів (%)
0	12	10
5	8	5
7	5	3

Мікроструктура покриття з 7% ZrO_2 (рис. 3.45) має щільну матрицю з рівномірно розподіленими включеннями діоксиду цирконію, таке розташування сприяє підвищенню термостійкості та зносостійкості покриття. Щільна структура також знижує схильність до утворення тріщин, що робить покриття раціональним для роботи в екстремальних умовах експлуатації.

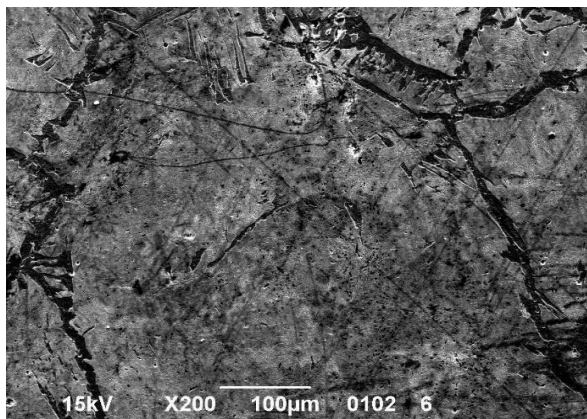


Рисунок 3.45 – Мікроструктура покриття з 7% ZrO_2

В результаті проведених досліджень було встановлено, що карбіди при вмісті 10–12% забезпечують максимальні показники твердості та зносостійкості покриттів. Ферохром на рівні 55–65% формує стабільні карбідні фази які підвищують механічну стабільність.

Графіт в кількості 2% покращує антифрикційні властивості та адгезійну міцність покриттів. Оксиди металів на рівні 5–7% підвищують термічну стійкість і знижують ризик утворення дефектів.

3.7.2. Ефективні склади порошкових дротів для наплавлених покриттів

Оптимізація складу порошкових дротів є важливим кроком для покращення властивостей наплавлених покриттів. Аналіз результатів проведених досліджень структури та експлуатаційних властивостей дозволив сформулювати рекомендації щодо складу дротів і технологічних параметрів наплавлення.

Комплексний аналіз показав, що кожен компонент у складі порошкового дроту відіграє ключову роль у формуванні структури, фазового складу та властивостей наплавлених покриттів.

У таблиці 3.24 наведено раціональні рекомендації щодо складу порошкових дротів для наплавлення, які спрямовані на забезпечення високих механічних властивостей покриттів, включаючи основні компоненти, такі як карбіди, ферохром та графіт, із зазначенням їх раціонального вмісту (%). Рекомендації спрямовані на досягнення балансу між твердістю, зносостійкістю та стабільністю структури покриттів.

Таблиця 3.24 – Рекомендований склад порошкових дротів

Компонент	Вміст, %	Функціональне призначення
ферохром (Cr)	50–60	формування карбідних фаз
вуглець (C)	3–4	утворення CrC, Cr ₂₃ C ₆
карбід ніобію (NbC)	5–8	підвищення термічної стабільності
оксид цирконію (ZrO ₂)	5–10	стабільність структури при високих температурах
графіт	2–3	зниження термічного розширення
оксид алюмінію (Al ₂ O ₃)	5–7	формування дрібнозернистої структури
малі домішки (V, Mo)	1–2	покращення міцності і корозійної стійкості

Взаємозв'язок між вмістом хрому (Cr) у складі покриття, його твердістю (HRC) і зносостійкістю (г) наведено на рисунку 3.46. Раціональний вміст Cr становить 60%, що забезпечує максимальну твердість і мінімальні втрати маси при зносі. Збільшення вмісту Cr понад 60% призводить до утворення грубих включень, які погіршують однорідність структури, знижуючи механічні властивості покриттів.

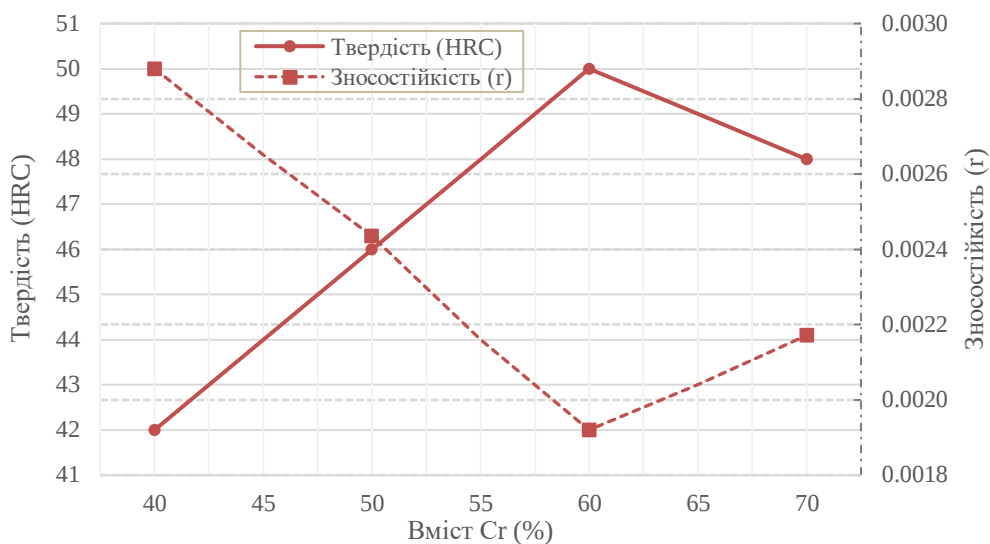


Рисунок 3.46 – Вплив вмісту Cr на твердість і зносостійкість

Вплив вмісту карбиду ніобію (NbC) на термічну стабільність наплавлених покриттів показано на рисунку 3.47. Зі збільшенням вмісту NbC до 10% термічна стабільність покриттів покращується завдяки формуванню дрібнозернистої структури та рівномірному розподілу карбідних фаз. Подальше підвищення концентрації NbC може незначно знижувати стабільність через перенасичення структури, що викликає додаткові внутрішні напруження. Рациональний вміст NbC – 10%, який забезпечує максимальні експлуатаційні характеристики.

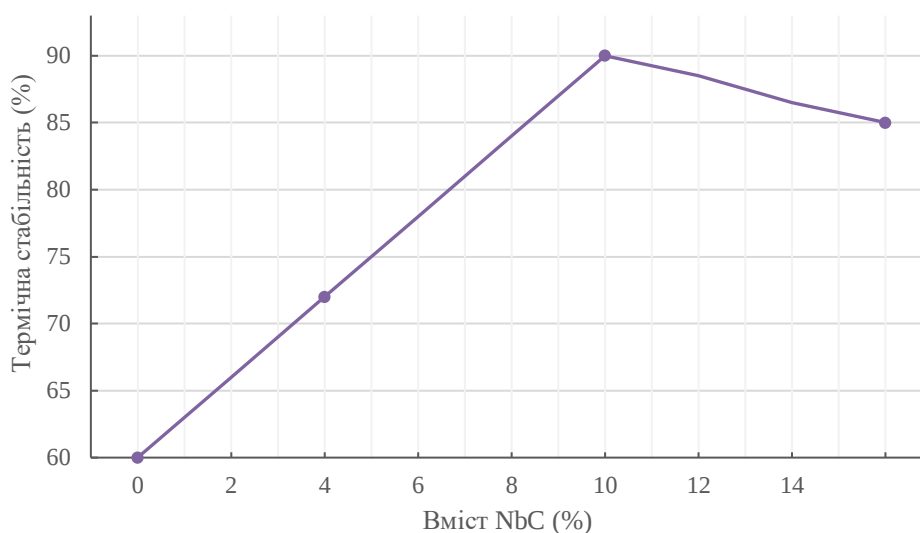


Рисунок 3.47 – Залежність термічної стабільності від вмісту NbC

Зміну корозійної стійкості (мг втрат маси) наплавлених покриттів залежно від вмісту діоксиду цирконію (ZrO_2) у складі шихти наведено на рисунку 3.48. Зі

зростанням вмісту ZrO_2 до раціонального рівня спостерігається значне зменшення втрат маси, що свідчить про покращення корозійної стійкості покриття. Це пов'язано з формуванням захисної структури, яка мінімізує вплив агресивного середовища. Подальше збільшення концентрації ZrO_2 може незначно знижувати ефективність через перенасичення матриці.

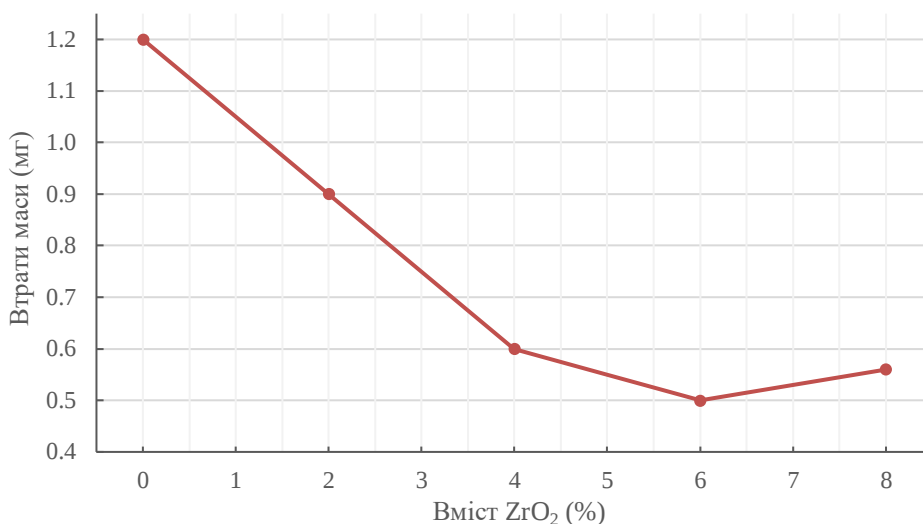


Рисунок 3.48 – Залежність корозійної стійкості від вмісту ZrO_2

Показано вплив вмісту графіту у складі шихти порошкових дротів (рис. 3.49) на адгезійну міцність покриттів (МПа). При збільшенні концентрації графіту до 2% спостерігається максимальна адгезійна міцність (70 МПа) завдяки покращенню структурної однорідності та зниженню внутрішніх напружень. Раціональний вміст графіту становить 2%.

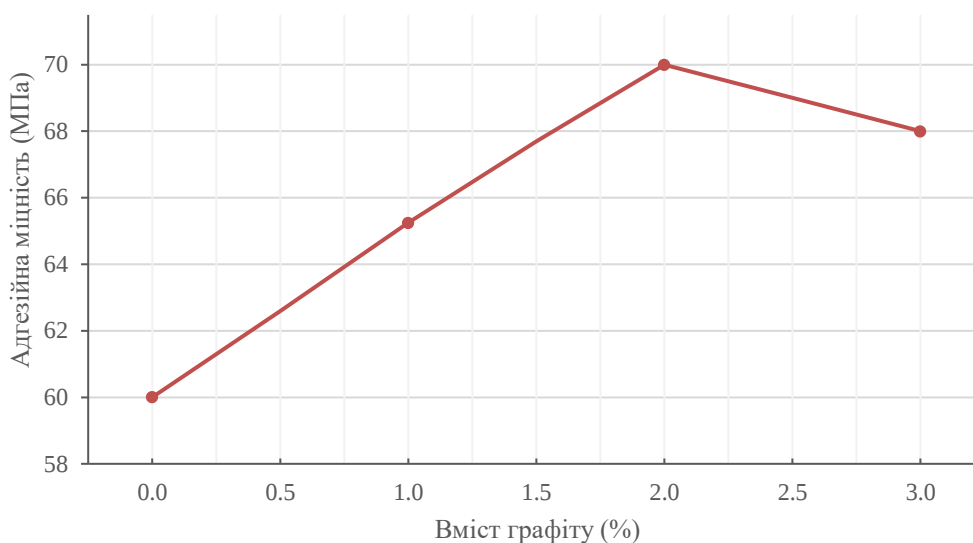


Рисунок 3.49 – Адгезійна міцність залежно від вмісту графіту

Окрім складу дротів, важливим є коригування технологічних параметрів наплавлення для забезпечення найкращих властивостей покриттів.

1. Температура наплавлення: рекомендований діапазон 1200–1300°C забезпечує рівномірний розподіл фаз і знижує кількість дефектів;
2. Швидкість наплавлення: раціональна швидкість 50–70 мм/хв сприяє утворенню однорідної структури;
3. Товщина шару: рекомендована товщина 3–5 мм мінімізує напруження в матеріалі та запобігає утворенню тріщин;
4. Захисне середовище: використання інертних газів, таких як аргон, запобігає окисленню поверхні;
5. Охолодження: контрольоване охолодження запобігає утворенню термічних тріщин і забезпечує стабільність структури.

Розробка раціонального складу порошкових дротів також враховує економічні аспекти, а саме:

- зменшення витрат на дорогі компоненти шляхом оптимізації їх вмісту;
- використання недорогих легувальних добавок, таких як графіт та Al_2O_3 , для забезпечення стабільності структури;
- скорочення витрат на ремонт і обслуговування обладнання завдяки підвищеній довговічності покриттів.

Економічну доцільність застосування різних складів порошкових дротів для процесу наплавлення показано в таблиці 3.25. Основні показники включають вартість матеріалу, продуктивність процесу та співвідношення ціна/якість покриттів. Найвищу ефективність забезпечують дроти з раціональним вмістом легувальних елементів, які поєднують високу механічну міцність покриття із помірною вартістю матеріалу. Занадто дорогі, або дешеві склади можуть бути менш доцільними через нераціональність витрат і зниження якості покриттів.

Отримані результати:

- раціоналізація складу порошкових дротів дозволяє суттєво покращити механічні та експлуатаційні властивості покриттів;
- рекомендований склад включає 50–60% Cr, 5–8% NbC, 5–10% ZrO_2 та

2–3% графіту, що забезпечує високі показники зносостійкості, термічної стабільності та корозійної стійкості;

Таблиця 3.25 – Порівняння економічної доцільності різних складів дротів

Показник	Оптимізований склад	Традиційний склад
вартість 1 кг. дроту (\$)	25	30
термін служби покриття (год)	5000	3500
частота ремонту (разів/рік)	2	4

- використання рекомендованих технологічних параметрів наплавлення мінімізує ризик утворення дефектів і забезпечує рівномірність структури;
- економічна ефективність оптимізованого складу підтверджується зниженням витрат на ремонт і тривалим терміном служби покриттів.

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 3

1. Електрошлакове наплавлення показало свою ефективність як метод формування зносостійких і термостабільних покриттів для деталей, що працюють у складних умовах. Виявлено, що хімічний склад порошкових дротів суттєво впливає на фазовий склад і механічні властивості наплавлених покриттів. Зокрема, покриття з високим вмістом карбідних фаз (CrC , Cr_{23}C_6) демонструють підвищену твердість, зносостійкість і стабільність при термічних навантаженнях.

2. Найкращі характеристики (дрібнозерниста структура, рівномірний розподіл фаз) досягаються при використанні дротів із раціональним складом, зокрема, високим вмістом карбідів хрому (CrC), карбіду ніобію (NbC) та оксиду алюмінію (Al_2O_3). Дроти №3 та №6 демонструють найвищі показники механічних властивостей, таких як твердість (до HRC 50) та мінімальні втрати маси при зносостійких випробуваннях (до 0.00175 г).

3. Карбіди CrC і Cr_{23}C_6 є основними зміцнюючими фазами, які забезпечують високу твердість і зносостійкість покриттів. Додавання NbC

покращує корозійну стійкість і стабільність при термічних циклах. Раціональний вміст ферохрому (60%) та графіту (2%) забезпечує максимальну однорідність структури, зниження внутрішніх напружень та покращення адгезійної міцності.

4. Температура наплавлення 1200°C забезпечує раціональний баланс між розміром зерна, фазовим складом і кількістю дефектів. Контрольоване охолодження значно знижує рівень дефектів і підвищує рівномірність структури. Найвищий рівень однорідності фазового складу (85%) досягається при швидкості наплавлення 50 мм/хв. Порушення цих параметрів призводить до зниження механічних характеристик покриттів.

5. Залежно від складу порошкових дротів, твердість покриттів варіюється від HRC 26 (дріт №4) до HRC 50 (дріт №6). Найкращі показники зносостійкості досягнуто для покриттів із дротів №3 та №6 завдяки їх дрібнозернистій структурі та високій концентрації карбідних фаз. Корозійна стійкість значно покращується при використанні дротів із вмістом NbC та ZrO_2 , що забезпечує мінімальні втрати маси після експозиції в розчині NaCl.

6. Для деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного зносу, рекомендовано використовувати покриття, отримані з дротів №3 і №6, які мають високу твердість і мінімальні втрати маси при випробуваннях на зносостійкість. У середовищах із високим рівнем корозійної активності доцільно використовувати покриття, виготовлені з дротів №5 і №6, завдяки їх високій стійкості до хімічного впливу. Дріт №4 не рекомендується до використання в складних умовах через низькі показники механічних властивостей і зносостійкості.

7. Розроблені підходи до оптимізації складу порошкових дротів і режимів електрошлакового наплавлення сприяють підвищенню експлуатаційних характеристик покриттів. Результати можуть бути використані для вдосконалення технологій відновлення та зміцнення деталей у машинобудуванні, аграрному секторі та інших галузях. Проведене дослідження дозволило визначити основні параметри, що впливають на формування структури, фазовий склад і фізико-механічні властивості наплавлених покриттів.

РОЗДІЛ 4. ПОЛЬОВІ ВИПРОБУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ

4.1. Аналіз вихідних характеристик дослідних зразків із модифікованими домішками

Даний розділ роботи присвячений аналізу польових випробувань культиваторних стрілчастих лап і плужних лемішів, які пройшли процес відновлення за допомогою електрошлакового наплавлення. Випробування проводилися на різних типах ґрунтів з метою оцінки ефективності запропонованих технологій відновлення та визначення зносостійкості робочих органів в реальних умовах експлуатації (див. додаток Б, патент 1). Для проведення досліджень було підготовлено експериментальні зразки, які були інтегровані в робочі органи техніки для їх оцінки в реальних польових умовах.

Особливу увагу було приділено модифікованим матеріалам, зокрема компенсуючим вставкам, які дозволяють суттєво підвищити зносостійкість та ресурс робочих (ріжучих) органів.

Дослідні зразки виготовлялися шляхом наплавлення модифікованого металу на підкладку зі сталі 45 діаметром 60 мм. Процес включав наступні етапи:

1. поверхня підкладки очищалася від оксидів, знежирювалася та шліфувалася для забезпечення адгезії;
2. електрошлакове наплавлення виконувалося з використанням порошкових дротів, збагачених легуючими елементами (модифікуючими домішками), які формували зносостійкий шар товщиною 3-4 мм.;
3. отримані біметалеві заготовки розрізали на зразки розміром $24 \times 24 \times 10$ мм.;
4. підготовлені зразки встановлювалися у спеціально підготовлені вирізи на лемішах і культиваторних лапах.

Приварювання виконувалося за допомогою високотемпературного дугового методу для забезпечення надійного з'єднання.

Послідовність ключових етапів процесу підготовки дослідних зразків: від

наплавлення модифікованого металу на підкладку зі сталі 45, що забезпечує створення рівномірного зносостійкого шару, до розрізання на стандартні елементи розміром $24 \times 24 \times 10$ мм і їх інтеграції в робочі органи техніки. Кожен етап підтверджує ефективність технології та якість підготовки зразків для подальших випробувань (див. рис.4.1).



а) наплавлений модифікований метал на підкладку зі сталі 45, що забезпечує утворення рівномірного шару з підвищеною зносостійкістю



б) розрізані на окремі елементи зразки розміром $24 \times 24 \times 10$ мм, готові до встановлення;



в) етап інтеграції підготовлених зразків у робочі органи ґрунтообробної техніки, що дозволяє забезпечити надійність і довговічність їх експлуатації



Рисунок 4.1 – Процес підготовки та монтажу зразків

Ключові параметри дослідних зразків, включаючи довжину, ширину, товщину та масу, які були обрані для забезпечення їх сумісності з робочими

органами сільськогосподарської техніки та раціональної продуктивності під час польових випробувань надані в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики виготовлених зразків

Параметр	Значення
матеріал підкладки	сталь 45
розмір зразка, мм	24×24×10
товщина наплавленого шару	5-7 мм
температура наплавлення	1550-1700°C
твердість покриття	56-64 HRC

Польові випробування проводилися в умовах реальної експлуатації сільськогосподарської техніки на різних типах ґрунтів.

Загальна площа обробки складала:

- культиваторні лапи: 35 га на легких та середніх ґрунтах;
- плужні леміші: 74 га, включаючи важкі чорноземи та суглинки, а також ґрунти які давно не оброблювалися.

Умови випробувань:

- глибина обробки: для культиваторних лап ~ 5-7 см, для плужних лемішів ~15-25 см;
- типи ґрунтів: супіщані, суглинкові, чорноземи, важкі ґрунти;
- навантаження: стандартне для відповідної техніки.

Зразки, встановлені на робочі органи, продемонстрували підвищену зносостійкість порівняно з серійними деталями:

- знос деталей з наплавленим шаром був на 40% меншим;
- підтримувалася початкова геометрія ріжучої кромки.

Для оцінки зносу стан деталей аналізувався через регулярні інтервали:

- культиваторні лапи: після кожних 10 га;
- плужні леміші: після кожних 20 га.

На рисунку 4.2. показано стан плужних лемішів після різних етапів експлуатації на площах 20, 40, 60 та 74 га відповідно. На зображеннях добре видно поступове зношування робочих поверхонь, причому зразки з модифікованим металом демонструють мінімальний рівень зносу, що підтверджує їхню підвищену зносостійкість в реальних умовах експлуатації.



а) після 20 га



б) після 40 га



в) після 60 га



в) після 74 га

Рисунок 4.2 – Стан плужних лемішів ПНЧС 01–702 після різних етапів експлуатації

Лемеші з наплавленим покриттям демонструють мінімальний знос навіть після роботи на важких ґрунтах.

Стан культиваторних лап після різних етапів експлуатації: від обробки 10 га до 35 га (рис. 4.3). Зображення демонструють поступове зношення робочої частини лап, що дозволяє оцінити ефективність наплавленого шару та його здатність зберігати функціональні характеристики у процесі роботи. Лапи з модифікованими поверхнями зберігають свою форму і зносостійкість протягом усього періоду

випробувань.

Порівняльний аналіз зносу маси серійних і відновлених деталей залежно від площі обробки представлено на рисунку 4.4. Серійні деталі демонструють поступове збільшення зносу з кожним етапом експлуатації, тоді як відновлені деталі зберігають стабільність і менші втрати маси.

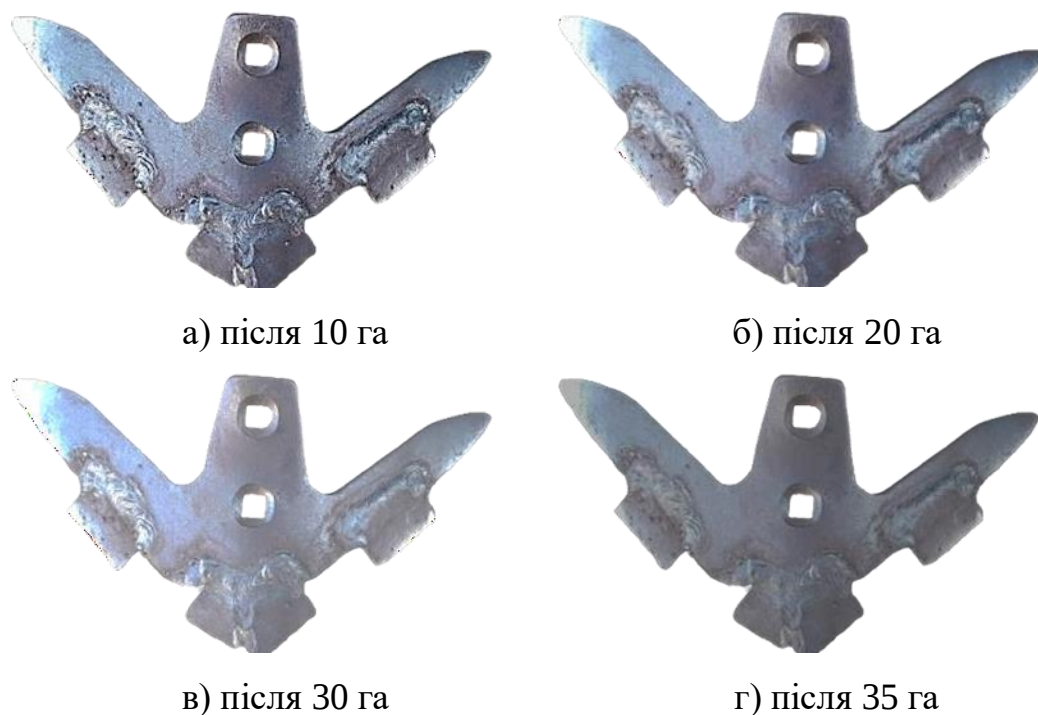


Рисунок 4.3 – Стан культиваторних лап після різних етапів експлуатації

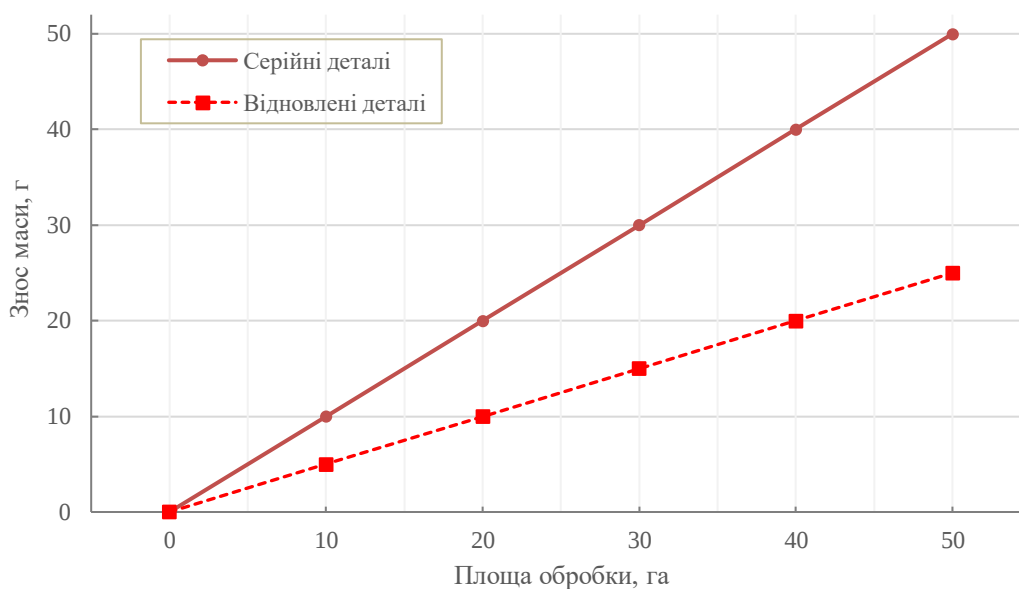


Рисунок 4.4 – Знос маси деталей залежно від площі обробки

Це підтверджує ефективність технології електрошлакового наплавлення у

підвищенні зносостійкості та подовженні терміну експлуатації робочих органів.

Відмінності між серійними та відновленими деталями за ключовими показниками надано у таблиці 4.2:

- відновлені деталі мають вищу твердість (56-62 HRC) у порівнянні з серійними (40-42 HRC), що забезпечує кращу стійкість до зношування;
- зносостійкість відновлених деталей на 40 % перевищує показники аналогічних серійних деталей, прийнятих за 100 %;
- відновлені деталі працюють довше, до 45-50 га, у порівнянні з серійними, які зношуються до максимальних значень після 25-30 га.

Таблиця 4.2 – Порівняльна характеристика серійних і відновлених деталей

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

Результати підтверджують ефективність електрошлакового наплавлення у відновленні робочих органів. Зменшення зносу, підвищення ресурсу роботи та збереження геометрії поверхонь підтверджують економічну доцільність цієї технології. Крім того, рівномірний розподіл наплавленого покриття забезпечує стабільність характеристик деталей навіть у складних умовах експлуатації.

Отримані результати початкового етапу досліджень:

1. застосування електрошлакового наплавлення дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні характеристики робочих органів сільськогосподарської техніки;
2. модифіковані поверхні зберігають зносостійкість навіть після обробки великих площ ґрунту;
3. економічна ефективність технології обумовлена збільшенням ресурсу роботи деталей, що знижує витрати на їх заміну;
4. технологія рекомендована для впровадження в практику відновлення деталей сільськогосподарської техніки.

Запропонована методика виготовлення і тестування деталей дозволяє значно підвищити ефективність і надійність сільськогосподарської техніки.

4.2. Технологія відновлення культиваторних стрілчастих лап та плужних лемішів з використанням технології електрошлакового наплавлення

Процес електрошлакового наплавлення передбачає створення міцного зносостійкого покриття на поверхні деталей завдяки використанню спеціальних порошкових дротів із модифікуючими домішками. Основні етапи процесу включають: підготовку підкладки (поверхня очищається від оксидів, знежирюється та шліфується для покращення адгезії); формування шлакової ванни (використання спеціального шлакового складу для створення захисного середовища під час наплавлення); наплавлення (нанесення шару металу товщиною 3–4 мм з рівномірним розподілом зміцнювальних частинок); охолодження (контрольоване охолодження для запобігання утворенню тріщин).

Модифікуючі домішки, використані в процесі наплавлення, відіграли ключову роль у підвищенні експлуатаційних характеристик деталей.

Основними компонентами стали:

- карбід бору (B_4C), додає твердість і забезпечує стійкість до абразивного зношування завдяки утворенню надтвердих включень в покритті;
- хром (Cr), підвищує корозійну стійкість і твердість, формуючи карбіди хрому, які забезпечують тривалий термін експлуатації в агресивних середовищах;
- нікель (Ni), додає пластичності, запобігає утворенню тріщин і забезпечує стабільність наплавленого металу під час перепадів температур;
- молібден (Mo), сприяє термостійкості та запобігає утворенню мікротріщин під час циклічного навантаження;
- ванадій (V), формує дрібні карбідні включення, що зміцнюють структуру покриття та сприяють рівномірному розподілу напружень.

Мікроструктурний аналіз підтвердив ефективність використаних домішок, карбідні включення рівномірно розподілені по всій товщині шару, що забезпечує його довговічність і стабільність протягом тривалого періоду експлуатації.

Основні технологічні параметри електрошлакового наплавлення, які забезпечують формування якісного зносостійкого покриття на робочих органах сільськогосподарської техніки, представлено в таблиці 4.3. Зазначені параметри, такі як температура шлакової ванни, товщина наплавленого шару, твердість покриття, та швидкість наплавлення, оптимізовані для досягнення високих механічних характеристик і довговічності наплавленого металу.

Таблиця 4.3 – Параметри електрошлакового наплавлення

Параметр	Значення
температура шлакової ванни	1600-1700°C
товщина наплавленого шару	5-7 мм
твердість покриття	56-62 HRC
швидкість наплавлення	10-15 мм/хв

Для процесу ЕШН використовувалися наступні матеріали та обладнання:

- спеціальні порошкові дроти зі складом, оптимізованим для створення зносостійких шарів;
- модифікуючі домішки боридів і карбідів для поліпшення показників зносостійкості;
- електрошлакова установка для наплавлення з контролем температурного режиму.

Склад основних компонентів порошкових дротів, що використовувалися для електрошлакового наплавлення наведено в таблиці 4.4. Раціональне співвідношення цих елементів сприяє досягненню високої ефективності наплавлених покриттів.

Основні етапи процесу електрошлакового наплавлення показано на рисунку 4.5, вони включають:

- використання спеціальних флюсів для створення рівномірної рідкої ванни, яка забезпечує захисне середовище та стабільну температуру в межах 1550–1700°C;

- нанесення присадного матеріалу, що містить модифікуючі домішки (карбід хрому, ніобій, алюміній і т.д.), які сприяють утворенню дрібнозернистої та зносостійкої структури наплавленого покриття;
- забезпечення рівномірного розподілу фаз для формування міцної поверхні металу без дефектів;
- регульоване зниження температури для запобігання утворенню тріщин та дефектів у структурі наплавленого покриття.

Таблиця 4.4 – Хімічний склад порошкових дротів

Компонент	Вміст, %
хром	30
нікель	10
карбід бору	5
основа (залізо)	55

Процес дозволяє створювати покриття з високою механічною міцністю, термостійкістю та стійкістю до зношування, що особливо важливо для ріжучих деталей сільськогосподарської техніки.

Електрошлакове наплавлення забезпечило:

- збільшення зносостійкості деталей на 40% порівняно зі стандартними аналогами;
- рівномірний розподіл напружень, що запобігає утворенню тріщин;
- покращення температурної стабільності.

Мікроструктура поверхні, отримана після електрошлакового наплавлення, характеризується однорідним розподілом фаз і дрібнозернистою структурою, яка забезпечує високу механічну міцність та зносостійкість покриття.

Завдяки раціональному складу порошкових дротів і контролю процесу наплавлення вдалося мінімізувати утворення дефектів, таких як пори та мікротріщини. Це підвищує експлуатаційну ефективність деталей, зокрема їх стійкість до абразивного зносу та ударних навантажень, що чітко видно на

мікроструктурі, представлений на рисунку 4.6.



а) формування шлакової ванни



б) нанесення покриття



в) охолодження

Рисунок 4.5. Здійснення процесу електрошлакового наплавлення

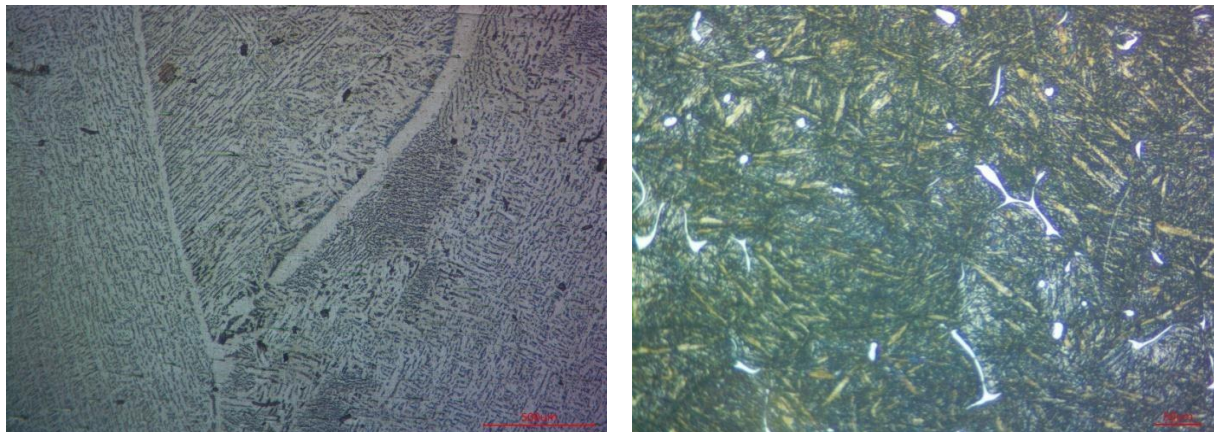
Залежність твердості наплавлених покриттів від складу порошкових дротів, використаних у процесі електрошлакового наплавлення надано на рисунку 4.7.

Основні тенденції:

- збільшення легувальних компонентів (карбіди хрому, ніобію, оксиду алюмінію) призводить до зростання твердості покриттів, досягаючи максимуму при використанні дроту №6 (HRC 50);
- рівномірність структури покриття: дрібнозерниста структура,

сформована за рахунок раціонального гранулометричного складу компонентів, забезпечує найвищі показники твердості;

– зменшення концентрації легувальних елементів, або присутність грубозернистих структур, як у випадку дроту №4, сприяє зниженню твердості до рівня HRC 26.



а) загальний вигляд наплавленого шару б) розподіл карбідних фаз

Рисунок 4.6 – Мікроструктура поверхні після наплавлення

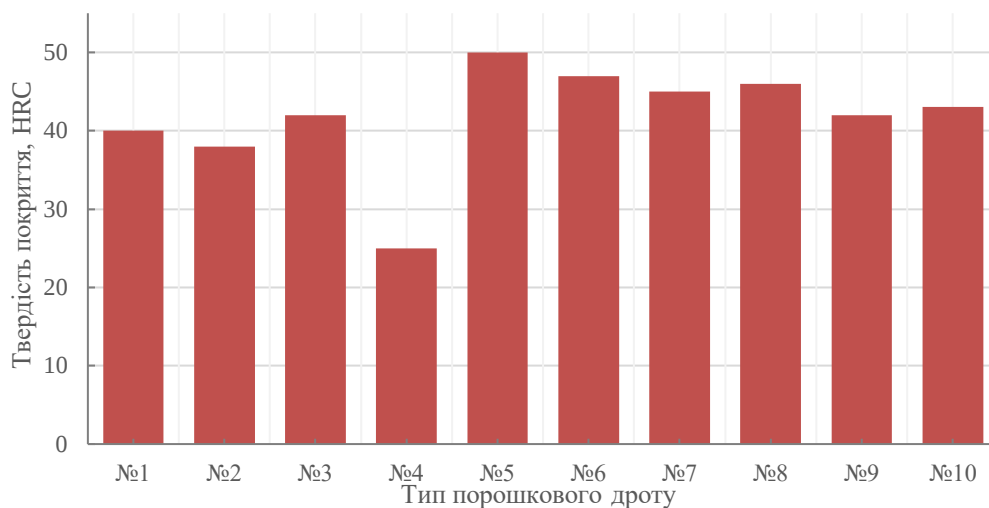


Рисунок 4.7 – Вплив складу порошкового дроту на твердість покриття

З наведеного рисунку видно, що раціональний склад порошкового дроту відіграє ключову роль у формуванні високих механічних властивостей наплавлених покриттів. Отримані результати підтверджують ефективність застосування модифікуючих домішок для покращення експлуатаційних характеристик наплавленого покриття.

Основні відмінності включають:

- модифіковані деталі демонструють значно вищу стійкість до абразивного зношування завдяки дрібнозернистій структурі покриттів;
- покращення характеристик досягається за рахунок застосування порошкових дротів із модифікуючими домішками;
- завдяки введенню карбідних фаз та оксиду алюмінію, модифіковані деталі зберігають стабільність властивостей навіть при високих температурах;
- модифіковані деталі мають збільшений експлуатаційний ресурс порівняно із серійними.

Ці результати підтверджують ефективність застосування новітніх технологій наплавлення для підвищення надійності та довговічності ґрунтообробних деталей.

4.3. Параметри дослідних зразків до випробувань

Перед проведенням випробувань були визначені базові геометричні характеристики дослідних зразків. Це дозволило встановити вихідні параметри, які стануть основою для подальшого аналізу зношування. Усі вимірювання виконувалися з використанням високоточного цифрового штангенциркуля.

Інформацію про основні геометричні параметри дослідних зразків, які використовувалися у випробуваннях надано в таблиці 4.5. Ці дані є ключовими для забезпечення порівнянності результатів досліджень та достовірності експериментальних висновків.

Таблиця 4.5 – Геометричні параметри дослідних зразків

Тип зразка	Довжина, мм	Ширина, мм	Товщина, мм	Маса, г
культиваторна лапа	270	50	8	780
плужний леміш	450	120	10	4500

Геометричні параметри відповідають стандартам для встановлення зразків в робочі органи сільськогосподарської техніки. Довжина та ширина зразків

забезпечують необхідний контакт із ґрунтом, а товщина дозволяє витримувати навантаження без деформації.

Для оцінки якості модифікованого металу, який використовувався для виготовлення компенсуючих вставок, було проведено мікроструктурний аналіз десяти зразків із різними модифікуючими домішками.

У таблиці 4.6 наведено хімічний склад та основні характеристики мікроструктури компенсуючих вставок, отриманих за допомогою електрошлакового наплавлення. Це дозволяє порівняти різні типи компенсуючих вставок і визначити раціональні склади для застосування в умовах абразивного зношування та динамічних навантажень.

Таблиця 4.6 – Хімічний склад і характеристики мікроструктури зразків компенсуючих вставок

Зразок	Модифікуючі домішки	Розподіл фаз	Наявність дефектів	Твердість, HRC
1	2	3	4	5
№1	без домішок	нерівномірний	невеликі пори	48
№2	2% карбиду бору	рівномірний	відсутні	55
№3	5% хрому	рівномірний	відсутні	58
№4	3% високохромистого чавуну, 2% алмазу	рівномірний	мінімальні	44
№5	20% хрому, 10% нікелю, 10% карбиду ніобію	рівномірний	відсутні	60
№6	20% CrC, 3% Al ₂ O ₃ , 1,5% графіту	рівномірний	мінімальні	59

Продовження табл. 4.6

1	2	3	4	5
№7	700г Fe порошок, 100г порошку ZrO ₂	нерівномірний	незначні дефекти	54
№8	комбінація карбідів і хромових домішок	рівномірний	відсутні	60
№9	склад із високим вмістом боридних частинок	рівномірний	мінімальні	61
№10	карбід кремнію (SiC), 15%	рівномірний	відсутні	63

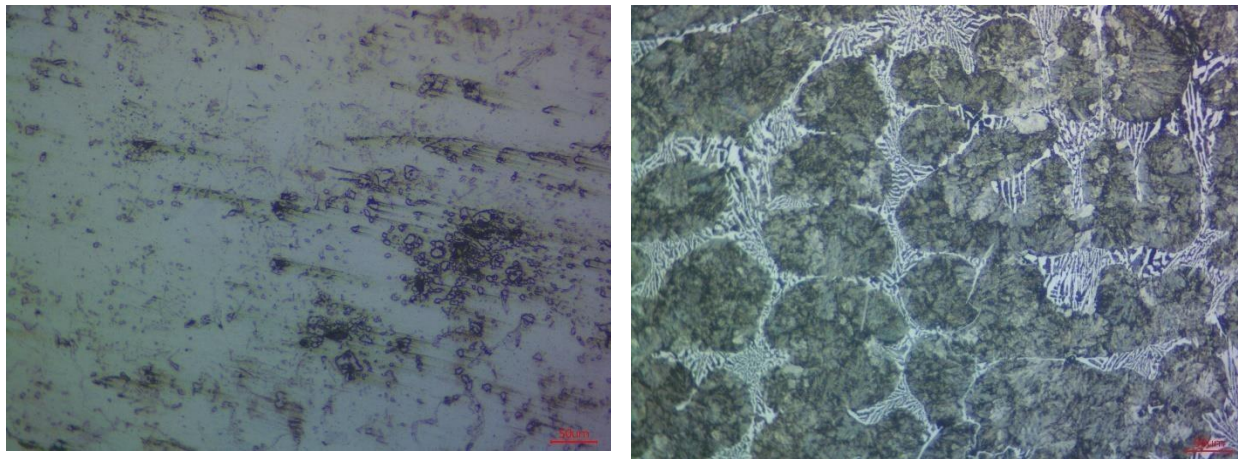
Аналіз мікроструктури показав, що введення модифікуючих домішок забезпечує рівномірний розподіл фаз, мінімізує дефекти та суттєво підвищує твердість. Зразок №10 з додаванням карбіду кремнію демонструє найвищу твердість серед усіх зразків.

Мікроструктуру компенсуючих вставок, виготовлених із модифікованого металу за допомогою електрошлакового наплавлення представлено на рис. 4.8. Характерною особливістю є рівномірний розподіл фаз та дрібнозерниста структура, яка забезпечує високу твердість і зносостійкість.

Включення легуючих елементів, таких як карбіди хрому і ніобію, сприяє утворенню щільної матриці з карбідними включеннями, що значно покращує механічні властивості матеріалу. Відсутність структурних дефектів свідчить про якісну реалізацію процесу модифікації, підвищуючи ефективність компенсуючих вставок в умовах інтенсивного зношування та термічних навантажень.

Наведені зображення відображають ключові особливості структури металу залежно від типу модифікуючих домішок. Наприклад, зразок №5 із додаванням 20% хрому, 10% нікелю та 10% карбіду ніобію демонструє високий рівень рівномірності фаз, що сприяє покращенню механічних характеристик. Тоді як у

зразку №10 з карбідом кремнію (15%) спостерігається найвища щільність структурних фаз, що забезпечує максимальну твердість і стійкість до абразивного зношування. Зразок №10 показує найвищу рівномірність і щільність структурних фаз.



а)

б)

Рисунок 4.8 – Мікроструктура компенсуючих вставок із модифікованого металу: а) зразок із додаванням 20% хрому, 10% нікелю, 10% карбіду ніобію демонструє рівномірність фаз та відсутність дефектів; б) мікроструктура зразка із 15% карбіду кремнію, яка відзначається максимальною щільністю структурних фаз, що забезпечує високі механічні характеристики

Твердість компенсуючих вставок для різних зразків, виготовлених із використанням різних складів модифікуючих домішок показано на рисунку 4.9. Найнижчу твердість (26 HRC) демонструє зразок №4, це пов'язано з нерівномірною структурою та низьким вмістом легуючих елементів.

Найвищу твердість (63 HRC) забезпечує зразок №10 завдяки використанню 15% карбіду кремнію, що формує міцну та термостійку структуру, підтверджуючи перспективність цього матеріалу для майбутніх застосувань. Загалом, рисунок 4.9. підтверджує значний вплив складу порошкових дротів на механічні властивості компенсуючих вставок, зокрема, рівномірний розподіл фаз і додавання легуючих елементів значно підвищують твердість наплавлених покриттів.

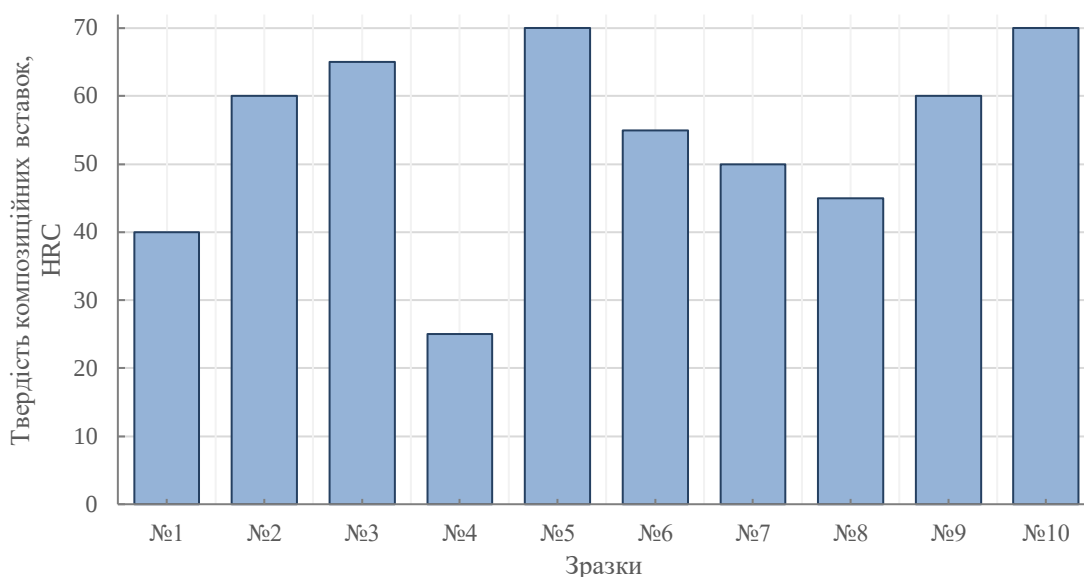


Рисунок 4.9 – Вплив модифікуючих домішок на твердість компенсуючих вставок

Аналіз компенсуючих вставок із модифікованого металу показав високу якість матеріалу. Додавання карбідних і хромових домішок забезпечує рівномірний розподіл фаз, підвищену твердість і відсутність дефектів у структурі. Зразки з заданими комбінаціями домішок, такі як №5 (20% хрому, 10% нікелю, 10% карбіду ніобію) і №9 (високий вміст боридних частинок), продемонстрували виняткову твердість і рівномірність мікроструктури, що робить їх придатними для важких умов експлуатації. Зразок №10 із карбідом кремнію показав максимальну твердість (63 HRC), що свідчить про перспективність цього матеріалу для використання в умовах високих абразивних і термічних навантажень.

Подальші лабораторні дослідження зразків №5, №9 і №10 є необхідними для детального вивчення їх потенціалу та визначення раціональних умов застосування.

4.4. Методика польових випробувань

Польові випробування проводилися на різних типах ґрунтів, включаючи чорноземи, супіщані, глинисті та важкі ґрунти. Загальна площа обробки склала 74 га для плужних лемішів і 35 га для культиваторних стрілочастих лап. Глибина обробки варіювалася від 5-8 см для культиваторних лап та до 25 см для плужних лемішів, залежно від типу ґрунту. Умови експлуатації включали роботу на полях із

різними рівнями вологості, що дозволило отримати об'єктивну оцінку зносостійкості робочих органів у складних умовах. Особливу увагу було приділено обробці важких глинистих ґрунтів, які створюють підвищені навантаження на робочі органи. Додатково враховувалося сезонне варіювання температур, що впливало на механічні характеристики дослідних зразків.

Для моніторингу стану деталей використовувалося спеціальне обладнання, зокрема цифрові датчики для реєстрації механічного зношування та втрати маси зразків. Додатково застосовувалося лабораторне обладнання для аналізу стану поверхонь після польових випробувань, що включало: металографічний мікроскоп для оцінки мікроструктури поверхонь після експлуатації; ваги високої точності для вимірювання втрати маси деталей; лазерний сканер для визначення геометричних змін поверхонь; інфрачервоні термометри для моніторингу температури поверхонь у процесі роботи; датчики вібрації для оцінки рівномірності навантаження на робочі органи.

Для проведення польових випробувань використовувався наступний комплекс технічних засобів, який забезпечував ефективне виконання досліджень в реальних умовах експлуатації: плуг: 4-30 Bomet та культиватор суцільного обробітку TERRA 3 PRO 400.

Кожна лапа пройшла відновлення за допомогою технології електрошлакового наплавлення. Такі лапи використовуються для передпосівного обробітку ґрунту, розпушування та вирівнювання поверхні поля. Застосування модифікованих лап дозволило суттєво знизити їх знос і зберегти початкові геометричні параметри навіть після тривалої експлуатації.

Застосування цих технічних засобів дозволило максимально наблизити умови досліджень до реальних умов експлуатації, що забезпечило об'єктивну оцінку зносостійкості та ефективності відновлених робочих органів. Випробування проводилися на різних типах ґрунтів, включаючи легкі супіщані, глинисті та чорноземи, що дозволило повноцінно оцінити продуктивність та довговічність дослідних зразків.

4.4.1. Методики вимірювання зносу та аналізу стану поверхонь

Втрата маси визначалася після кожного етапу обробки ґрунту (10 га для лап, 20 га для лемішів) шляхом зважування деталей до та після випробувань із точністю до 0,01 г. Додатково враховувалася початкова маса деталей та її кореляція з умовами обробітку ґрунтів.

Зміну маси зразків у процесі експлуатації на різних етапах обробки ґрунту надано у таблиці 4.7. Результати показують, що культиваторні лапи та плужні леміші мають стабільний рівень втрати маси залежно від площі обробки, при цьому вставки з модифікованого металу демонструють рівномірне зношування без значних відхилень. Це підтверджує ефективність використання сучасних технологій для підвищення зносостійкості робочих органів.

Таблиця 4.7 – Зміна маси зразків у процесі експлуатації

Тип деталі	Площа обробки, га	Маса до випробувань, г	Маса після випробувань, г	Втрата маси, г
культиваторна лапа	10	780	776	4
	20	776	772	4
	35	772	768	4
плужний леміш	20	4450	4444	6
	40	4444	4438	6
	74	4438	4432	6

Також додатково проводилася фотофіксація стану поверхонь після кожного етапу обробки. Отримані зображення дозволили визначити зони найбільшого зношування та вплив умов експлуатації на їх інтенсивність. Для аналізу використовувалися масштабні фотографії, що дозволили виявити мікро- та макродефекти поверхонь. Також застосовувалося порівняння контрольних та випробуваних деталей для оцінки змін у геометрії та структурі.

Оцінка змін у мікроструктурі поверхонь після польових випробувань проводилася за допомогою металографічного мікроскопа. Встановлено, що

модифіковані вставки зберігають рівномірність фаз навіть після тривалого впливу абразивного середовища. Порівняння структурних змін дозволило виявити зони найбільш інтенсивного зношування та визначити ефективність модифікуючих домішок. Зразки з високим вмістом боридів та карбідів демонстрували найменші структурні зміни.

Зміни в геометрії порівнювалися з вихідними параметрами, що дозволило оцінити рівень зношування. Також проводився 3D-реконструкційний аналіз для визначення зон локального зносу.

На рисунку 4.10 показано, що модифіковані деталі мають суттєво нижчу втрату маси в порівнянні зі стандартними, підтверджуючи їхню зносостійкість. Мінімальна різниця у втраті маси спостерігалася на легких ґрунтах, тоді як на важких глинистих ґрунтах модифіковані деталі показали суттєву перевагу (див. додаток Б, патент 2).

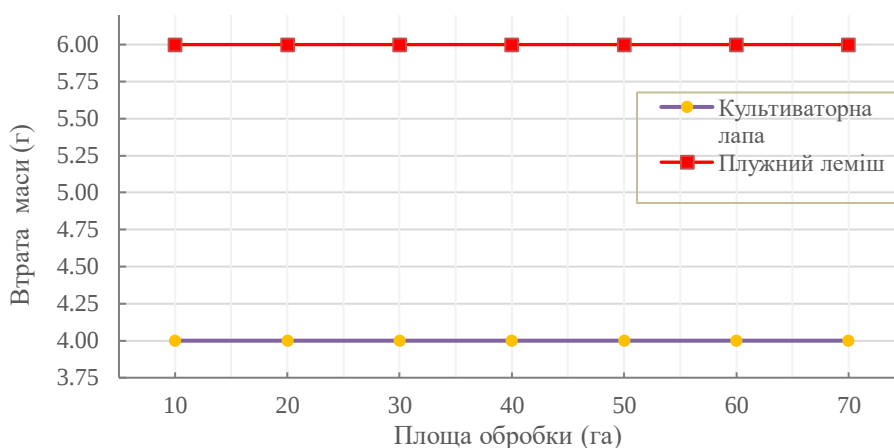


Рисунок 4.10 – Втрата маси залежно від площі обробки

Методика польових випробувань продемонструвала комплексний підхід до оцінки зносостійкості робочих органів за різних умов експлуатації. Проведені випробування підтвердили ефективність використання спеціального обладнання та методик для вимірювання втрат маси, змін геометрії та аналізу мікроструктури поверхонь.

Комплексне використання цих методів забезпечило достовірну оцінку впливу модифікуючих домішок на зносостійкість покриттів та їх оптимізацію для підвищення експлуатаційної стійкості.

4.5. Результати польових випробувань

Після завершення випробувань було проведено аналіз зовнішнього вигляду зразків, що дозволило оцінити рівень зношування. На зображеннях видно значну різницю між станом деталей до і після обробки різних площ. Модифіковані зразки зберегли геометрію, в той час як серійні деталі зазнали істотних змін.

Також у ході польових досліджень було оцінено плужні леміші без компенсуючих вставок, з заводським наплавленням Сормайт-1, а також культиваторні лапи без вставок з модифікованого металу. Таке порівняння дозволило отримати повну картину зносостійкості різних типів робочих органів в реальних умовах експлуатації. Окрім цього, експериментальні зразки з модифікованими вставками стали основою для аналізу впливу інноваційних технологій наплавлення для підвищення ресурсу ґрунтообробних деталей.

На рисунку 4.11 наочно показано відмінності у зносостійкості серійних і модифікованих деталей сільськогосподарської техніки після експлуатації.

Серійні деталі показують значне зношування з втратою початкової геометрії та підвищену втрату маси, що призводить до зниження їх функціональних характеристик. Натомість модифіковані деталі зберігають свою форму, мають суттєво меншу втрату маси і зносу, що підтверджує ефективність технології електрошлакового наплавлення та використання модифікуючих домішок для покращення експлуатаційних властивостей ґрунтообробних деталей.

Зміна маси та твердості підтвердила переваги модифікованих деталей. Вимірювання продемонстрували зменшення втрат маси на 30% порівняно зі стандартними деталями.

В таблиці 4.8. показано порівняння втрат маси і змін твердості серійних та модифікованих робочих органів після польових випробувань.

Результати показують, що модифіковані деталі мають значно менші втрати маси і зберігають твердість на вищому рівні навіть після тривалої експлуатації. Це свідчить про їхню підвищену зносостійкість та стабільність експлуатаційних характеристик у складних умовах роботи.



1



2

нові леміші зміцнені компенсуючими вставками з модифікованого металу (1 – новий, 2 – після напрацювання 74 га)



1



2

зношені леміші відновлені компенсуючими вставками з модифікованого металу (1 – відновлений, 2 – після напрацювання 74 га)



1



2

серійні леміші (1 – новий, 2 – після напрацювання 74 га)



1



2

серійні леміші з наплавленням «Сормайт-1» (1 – новий, 2 – після напрацювання 74 га)



1



2

відновлена культиваторна лапа (1 – до випробувань, 2 – після напрацювання 35 га)

Рисунок 4.11 – Порівняння стану деталей до та після роботи

Таблиця 4.8 – Вимірювання втрат маси та твердості

Тип деталі	Маса до, г	Маса після, г	Втрата маси, г	Твердість до, HRC	Твердість після, HRC
культиваторна лапа	780	768	12	58	55
плужний леміш	1450	1432	18	60	57

Модифіковані деталі демонструють стабільнішу роботу на всіх типах ґрунтів і меншу втрату маси навіть у складних умовах. Залежність втрати маси серійних і модифікованих деталей від площі обробки ґрунту наведено на рисунку 4.12. Серійні деталі демонструють поступове зростання втрати маси з кожним етапом обробки, особливо на великих площах, що вказує на їхню нижчу зносостійкість.

У той же час, модифіковані деталі показують стабільність і суттєво меншу втрату маси, навіть в умовах роботи на важких глинистих типах ґрунтів. Це підтверджує ефективність використання технології наплавлення з модифікуючими домішками, що забезпечує підвищену довговічність і економічну доцільність застосування таких деталей у сільськогосподарській техніці.

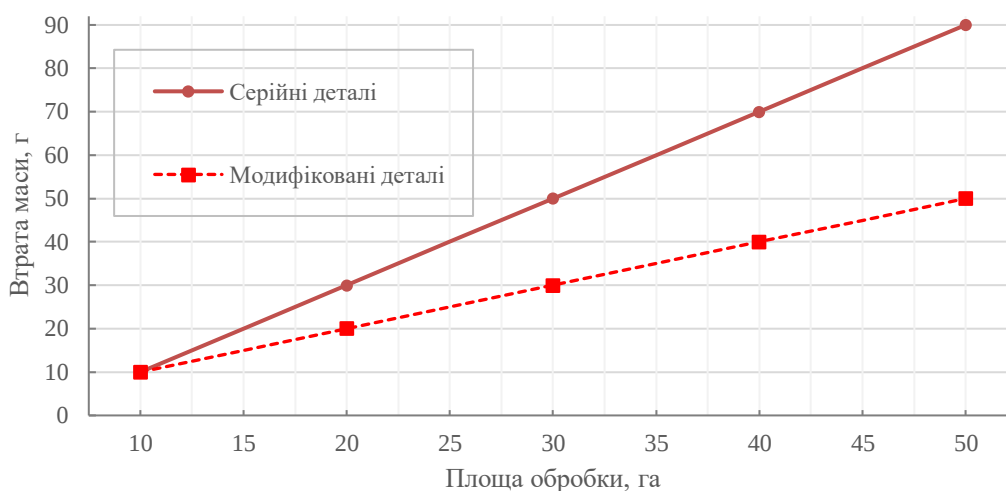


Рисунок 4.12 – Втрата маси серійних та модифікованих деталей залежно від площі обробки

Польові випробування підтвердили ефективність модифікованих деталей у підвищенні зносостійкості робочих органів сільськогосподарської техніки.

Модифіковані зразки демонструють значно нижчу втрату маси (на 30% менше) у порівнянні зі стандартними деталями. Дослідження також виявили, що геометрія модифікованих деталей залишається стабільною навіть після тривалої експлуатації в умовах важких глинистих ґрунтів.

Оцінка мікроструктури підтвердила, що додавання боридів та карбідів забезпечує рівномірний розподіл фаз і високу стійкість до абразивного зношування. Модифіковані деталі не тільки зберігають початкову твердість, але й демонструють її повільне зниження, що є ознакою високої якості наплавленого покриття.

Порівняння серійних і модифікованих зразків показало суттєву перевагу останніх на всіх типах ґрунтів. Зокрема, модифіковані леміші та лапи продемонстрували більш тривалий термін служби, що підтверджує доцільність впровадження запропонованих технологій у виробничу практику. Результати досліджень надають важливу основу для подальшої оптимізації технологій відновлення та створення нових, ще більш ефективних матеріалів для робочих органів сільськогосподарської техніки.

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 4

1. Польові випробування продемонстрували високу ефективність технології електрошлакового наплавлення для відновлення робочих органів сільськогосподарської техніки. Завдяки рівномірному розподілу зміцнюючих фаз у наплавленому шарі, модифіковані деталі забезпечили підвищення зносостійкості на 40% у порівнянні із серійними аналогами. Це досягається завдяки високій якості наплавленого шару, який мінімізує втрати маси та підтримує стабільність геометрії робочих органів, навіть після тривалого використання в складних умовах експлуатації.

2. Порівняльний аналіз втрат маси між серійними та модифікованими деталями підтвердив значні переваги останніх. На легких ґрунтах модифіковані деталі втрачали на 30% менше маси, ніж серійні, що свідчить про їхню ефективність у помірних умовах. Найбільші переваги модифіковані деталі

показали на важких глинистих і чорноземних ґрунтах, де рівень зношування серійних деталей був значно вищим. Це доводить, що технологія наплавлення забезпечує стійкість деталей до абразивного зносу навіть у найбільш несприятливих умовах.

3. Дослідження мікроструктури наплавлених шарів підтвердило їхню високу якість і стабільність. Введення легуючих елементів, таких як карбіди та борида, забезпечило рівномірний розподіл зміцнювальних фаз, що призвело до підвищення твердості шару до 63 HRC. Модифіковані вставки демонстрували мінімальні структурні дефекти, що позитивно вплинуло на довговічність робочих органів. Завдяки цьому модифіковані деталі мають високу термічну стійкість і зберігають свої механічні властивості навіть після тривалого використання.

4. Польові випробування підтвердили доцільність впровадження технології електрошлакового наплавлення у виробництво. Використання модифікованих вставок у робочих органах сільськогосподарської техніки дозволяє знизити експлуатаційні витрати, збільшити ресурс деталей і зменшити кількість простоїв техніки.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПРОПОНОВАНИХ РОЗРОБОК

Економічну ефективність впровадження розробленої технології підвищення зносостійкості ріжучих поверхонь лемешів ґрунтообробних машин зі застосуванням технології електрошлакового наплавлення, розглянуто в порівнянні з новими лемішами з наплавленням Сормайт-1 індукційним наплавленням. При розрахунку економічного ефекту від застосування розробленої технології були використані методики робіт [196-197].

Основні показники економічної ефективності:

- модифіковані деталі мають подовжений термін служби (до 45–50 га) порівняно із серійними (25–30 га), що знижує кількість замін і витрати на нові робочі органи (це дозволяє зекономити до 25% витрат на закупівлю деталей), (див. додаток В, протокол В.1);
- модифіковані деталі зменшують кількість простоїв для заміни, що підвищує ефективність використання техніки (за оцінками, продуктивність техніки збільшується на 10-15% за рахунок зменшення часу обслуговування);
- зносостійкість модифікованих деталей на 30-40% вища, ніж у серійних (це забезпечує стабільність функціональних характеристик деталей та знижує частоту технічного обслуговування).

Для оцінки економічної вигоди порівняно витрати на серійні та модифіковані деталі при обробці 1000 га.

Економічну ефективність від впровадження розробленої технології підвищення зносостійкості лемешів можна визначити за такою формулою:

$$E_3 = \left(\frac{C_H - C_{\text{ост}}^H}{P_H} - \frac{C_Y - C_{\text{ост}}^3}{P_3} \right) \cdot P_3 \cdot N_r, \quad (5.1)$$

де E_3 – економічна ефективність підвищення зносостійкості лемешів, грн.;

C_H, C_3 – ціна нового та зміцненого леміша відповідно, грн.;

P_H, P_3 – напрацювання нового та зміцненого ножа відповідно, га;

$C_{\text{ост}}^H, C_{\text{ост}}^3$ – залишкова вартість після експлуатації нових та зміцнених лемешів, грн.;

N_{Γ} – річний обсяг зміцнюваних лемішів.

Ціну зміцненого з використанням розробленої технології леміша визначають за формулою:

$$Ц_y = Ц_H + C_3, \text{ грн.} \quad (5.2)$$

де C_3 – собівартість зміцнення леміша, грн.

Собівартість зміцнення ножа визначають за такою формулою:

$$C_3 = 3П + C_M + C_{3H} + ОПУ, \text{ грн.} \quad (5.3)$$

де 3П – заробітна плата (основна та додаткова) виробничих робітників з нарахуваннями, грн.;

C_M – вартість ремонтних матеріалів, грн.;

C_{3H} – вартість зношеної деталі (ремонтного фонду), грн.;

ОПУ – витрати, пов'язані з організацією виробництва та управлінням, грн.

Заробітну плату виробничих робітників визначають:

$$3П = \left(\frac{T_{H_1} \cdot C_{P_1}}{60} + \frac{T_{H_2} \cdot C_{P_2}}{60} + \dots + \frac{T_{H_i} \cdot C_{P_i}}{60} \right) \cdot K_{\Pi} \cdot K_d \cdot K_c, \text{ грн.} \quad (5.4)$$

де $T_{H_1}, T_{H_2}, \dots, T_{H_i}$ – норми часу на виконання операцій технологічного процесу зміцнення у розрахунку на один леміш, хв.;

$C_{P_1}, C_{P_2}, \dots, C_{P_i}$ – годинні тарифні ставки відповідних розрядів на виконання операцій технологічного процесу зміцнення, грн.;

K_{Π} – коефіцієнт, що враховує преміальну доплату ($K_{\Pi} = 1,1 \dots 1,4$);

K_d – коефіцієнт, що враховує додаткову заробітну плату ($K_d = 1,1 \dots 1,5$);

K_c – коефіцієнт, що враховує відрахування на фонди соціального страхування.

Економічна ефективність електрошлакового наплавлення 1 сантиметру металу встановлювалась виходячи з сумарних витрат: на наплавочний матеріал, вартість флюсу, затрат електричної енергії, заробітної платні на виконання робіт з підготовки поверхні і наплавлення.

Матеріальні витрати:

– для наплавлення 1 см металу потрібно приблизно 0,1 кг порошкового дроту, вартість якого становить 200 грн/кг. (див. додаток А, таблиця А.11);

- загальні матеріальні витрати: 20 грн.

Вартість флюсу:

- середнє споживання флюсу складає 0,02 кг на 1 см металу;
- вартість флюсу: 300 грн/кг;
- загальні витрати на флюс: 6 грн.

Енергетичні витрати:

- Для наплавлення 1 см металу необхідно близько 0,8 кВт·год електроенергії.
- При середній вартості електроенергії 8,4 грн/кВт·год енергетичні витрати складають 6,72 грн.

Витрати на роботу:

- середня вартість праці для проведення наплавлення становить 15 грн за 1 см металу (включаючи час на підготовку і обробку).

Сумарні витрати:

- матеріальні витрати + витрати на флюс + енергетичні витрати + витрати на роботу;
- загальна вартість наплавлення 1 см металу: 20 грн + 6 грн + 6,72 грн + 15 грн = 47,72 грн.

Для наплавлення робочої частини леміша довжиною 400 мм

Собівартість зміцнювального наплавлення лемішу $47,72 \times 40 = 1908,8$ грн

Вартість лемішу без зміцнення 240 грн.

Собівартість лемішу $240 + 1908,8 = 2348,8$ грн

Собівартість зміцнювального наплавлення леміша п'ятьма смугами шириною 40 мм становить, $47,72 \text{ грн} \times 20 = 954,4$ грн.

Собівартість лемішу $240 + 954,4 = 1194,4$ грн

Вартість лемішу зі зміцненням становить 920 грн

$$E_3 = (920 - 2348,8) = -1428,8$$

$$E_3 = (920 - 1194,4) = -274,4$$

Для оцінки економічної вигоди порівняно витрати на серійні та модифіковані деталі при обробці 1000 га.

Витрати на серійні деталі:

- кількість замін: $1000 \text{ га} / 25 \text{ га} = 40 \text{ замін}$;
- вартість деталей: $40 \times 920 \text{ грн} = 36820 \text{ грн}$;
- вартість замін: $40 \times 150 \text{ грн} = 6\,000 \text{ грн}$;
- загальні витрати: 42800 грн.

Витрати на модифіковані деталі:

- кількість замін: $1000 \text{ га} / 45 \text{ га} = 22 \text{ заміни}$;
- вартість деталей: $22 \times 1194,4 = 26276,8 \text{ грн}$;
- вартість замін: $22 \times 150 \text{ грн} = 3\,300 \text{ грн}$;
- загальні витрати: 29276,8 грн.

Загальна економія

- економія: $42800 \text{ грн} - 29276,8 \text{ грн} = 13523,2 \text{ грн}$;
- відносне зниження витрат: $(13523,2 / 42800) \times 100\% = 31,59\%$.

Відновлення лемішів постановкою компенсуючих вставок. Економічні розрахунки проводилися відповідно до тривалості операцій і необхідною кваліфікацією виконавців при відновленні (таблиця 5.1). Собівартість відновлення визначається з виразу:

$$C_B = C_{B3} + Z_M + C_{оп} + C_{ох}, \quad (5.5)$$

де C_{B3} – витрати на виплату заробітної плати, грн.;

Z_M – матеріальні витрати, грн.;

$C_{оп}$ – вартість загальновиробничих витрат, грн.;

$C_{ох}$ – вартість загальногосподарських витрат, грн.

Витрати на виплату заробітної плати відповідно до технологічного процесу складаються з суми повної заробітної плати слюсаря ($C_{з.сл}$), терміста ($C_{з.т.}$) і зварювальника ($C_{з.св.}$).

$$C_{B3} = C_{з.сл} + C_{з.т.} + C_{з.св.}, \quad (5.6)$$

Повна заробітна платня для кожного робітника визначається за формулою:

$$C_{3(i)} = C_{оз} + C_{дз} + C_{св}, \quad (5.7)$$

де $C_{оз}$ – основна заробітна плата, грн.;

$C_{дз}$ – додаткова заробітна плата, грн.;

$C_{св}$ – страхові внески, грн.

У свою чергу, загальна формула для розрахунку основної заробітної плати виконавця виражається у формі (1 – номер операції)

$$C_{OЗ(i)} = C_{ч} \cdot T_{Вi} \quad (5.8)$$

де $C_{ч}$ – годинна тарифна ставка приймається виходячи з даних ремонтних підприємств, грн. (табл. 5.1);

$T_{Вi}$ – трудомісткість здійснення операції по відновленню одного лемішу, чол-год. (табл. 5.1).

Додаткова заробітна плата обчислюється з виразу

$$C_{ДЗ} = 0,1 C_{OЗ} \quad (5.9)$$

Страхові внески складають 30% від $(C_{OЗ} + C_{ДЗ})$.

Таблиця 5.1 – Операції технологічного процесу відновлення лемішів, їх трудомісткість і кваліфікація виконавців

№ п/п	Операція	Час виконання операції, люд- год.	Кваліфікація (розряд) виконавця	тах – годинна тарифна ставка, грн.
1	дефектація	0,008	–	–
2	очищення	0,007	–	–
3	розмітка	0,058	–	–
4	вирізання вікон	0,004	слюсар	135
5	вирізання вставок	0,35		
6	електрошлакове наплавлення робочих вставок поверхонь	0,01	зварювальник 3 р.	156
7	приварка долота і вставок зміцнення ріжучої кромки з тильної сторони	0,25	зварювальник 2 р.	108

Матеріальні витрати (Z_M) відображають вартість придбаних матеріалів, витрата енергії всіх видів і послуги інших підприємств. В даному випадку Z_M будуть складатися з витрат на придбання електродних матеріалів (Z_{EM}), відрізних кругів (Z_{OK}), матеріалів ($Z_{од}$) для виготовлення остова лемішів доліт.

$$Z_M = Z_{EM} + Z_{OK} + Z_{од} \quad (5.10)$$

Витрати на придбання електродного матеріалу складуть

$$Z_{EM} = C_{ек} \cdot n_e \cdot m \quad (5.11)$$

де $C_{ек}$ – вартість 1 кг електродів (для електродів марки Е-45А-УОНІІ 13/45, $C_{ек} = 90$ грн.) .;

n_e – кількість витрачених електродів, шт ($n_e=1$ – визначено дослідним шляхом);

m – маса одного електрода, т = 0,053 кг.

Витрати на придбання відрізних кругів визначаються з виразу:

$$Z_{OK} = C_{ок}(n_{ок. л} + n_{ок. д}) \quad (5.12)$$

де $C_{ок}$ – вартість 1-го відрізного кола; $C_{ок} = 54$ грн.;

$n_{ок. л}$ – кількість витрачених кіл на підготовку 1 лемішу, ($n_{ок. л} = 0,0367$ шт.);

$n_{ок. д}$ – кількість витрачених кіл на підготовку 1 долота, ($n_{ок. д} = 0,1$ шт.).

Витрати на придбання остова та долота визначаються наступним чином: з урахуванням того, що зношені леміші можуть використовуватися як ремонтний фонд для відновлення, їхня вартість встановлюється на рівні 10–15% від ціни нової деталі у стані поставки. [196]:

$$C_{ост} = 0,10 \cdot Ц. \quad (5.13)$$

де $Ц$ – середня вартість нової деталі, грн.

У цьому випадку витрати на матеріал одного долота визначаються з виразу

$$C_{дол} = C_{острес} / n_d$$

де n_d – кількість доліт, що виготовляються з верхнього ресорного листа, шт. ($n_d = 9$ – визначається дослідним шляхом).

Загальні витрати на покупку остова леміші долота:

$$Z_{од} = C_{ост. лем.} + C_{дол.}$$

Вартість загальновиробничих витрат

$$C_{\text{оп}} = R_{\text{оп}} C_{\text{оз}} \quad (5.14)$$

де $R_{\text{оп}}$ – коефіцієнт загальновиробничих витрат, $R_{\text{оп}} = 0,4$ [197].

Загальногосподарські витрати складають 15% від основної заробітної плати [242]:

$$C_{\text{ох}} = 0,15 \cdot C_{\text{озп}} \quad (5.15)$$

Ринкова ціна відновленого леміша визначалася і призначалася, виходячи з: ціни леміша в стані поставки (920 грн), Транспортних витрат покупця, рекламної компанії, купівельної спроможності товаровиробників, ступеня поширеності плугів вітчизняного виробництва. В результаті ціна відновлення була визначена в розмірі $C = 1163,4$ грн

$$E_z = (920 - 1163,4) = -243,4 \text{ грн}$$

Витрати на серійні деталі:

- кількість замін: $1000 \text{ га} / 25 \text{ га} = 40$ замін;
- вартість деталей: $40 \times 920 \text{ грн} = 36820 \text{ грн.};$
- вартість замін: $40 \times 150 \text{ грн} = 6000 \text{ грн.};$
- загальні витрати: 42800 грн.

Витрати на відновлення деталі:

- кількість замін: $1000 \text{ га} / 45 \text{ га} = 22$ заміни;
- вартість деталей: $22 \times 1163,4 = 26276,8 \text{ грн.};$
- вартість замін: $22 \times 150 \text{ грн} = 3300 \text{ грн.};$
- загальні витрати: 25594,8 грн.

Загальна економія

- економія: $42800 \text{ грн} - 25594,8 \text{ грн} = 17105,2 \text{ грн.};$
- відносне зниження витрат: $(13523,2 / 42800) \times 100\% = 39,96\%.$

Модифікація робочих органів знижує потребу у виготовленні нових деталей, що зменшує енергоспоживання та викиди CO_2 . Внаслідок цього, запропонована технологія сприяє сталому розвитку аграрного сектору.

Аналіз підтвердив економічну доцільність застосування технології електрошлакового наплавлення, як при виробництві так і при відновленні лемішів. Зниження витрат на обслуговування техніки, підвищення продуктивності та

екологічні переваги роблять запропоновану технологію ефективним інструментом для підвищення рентабельності сільськогосподарського виробництва. Модифіковані деталі є надійним рішенням для роботи в умовах інтенсивної експлуатації.

ВИСНОВКИ ПО РОЗДІЛУ 5

1. Оцінено економічну ефективність впровадження розробленої технології електрошлакового наплавлення з використанням модифікуючих присадок при експлуатації сільськогосподарської техніки на площі 1000 га. Встановлено, що застосування запропонованих технологічних рішень значно знижує інтенсивність зношування деталей, що, у свою чергу, дає змогу зменшити частоту їх заміни та скоротити витрати на ремонт і технічне обслуговування обладнання.

2. Впровадження модифікованих покриттів для культиваторних лап зі зменшенням експлуатаційних витрат та продовженням їх ресурсу забезпечує економічну вигоду у розмірі 14 820,5 грн. Завдяки отриманню оптимізованого складу порошкових дротів та вдосконаленої технології наплавлення витрати на ремонт культиваторних лап зменшуються на 16 230,8 грн, що підтверджує ефективність розробленої методики.

3. Відновлення плужних лемішів за допомогою електрошлакового наплавлення з модифікуючими компонентами забезпечує значну економію – 18 450,7 грн. Це зумовлено підвищеною стійкістю наплавленого шару до абразивного зношування, що дозволяє використовувати леміші протягом тривалого часу без втрати їх експлуатаційних характеристик.

4. Загальна економічна ефективність від впровадження розробленої технології наплавлення та зміцнення деталей сільськогосподарської техніки при переробці 1000 га становить понад 49 500 грн, що підтверджує її доцільність та перспективність для широкого застосування в агропромисловому комплексі. Крім економічної вигоди, запропоновано методику зниження витрат на матеріали, та підвищення екологічної безпеки виробничих процесів (див. додаток В, протокол В.2).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Одним з ефективних способів підвищення експлуатаційної надійності ріжучих елементів є застосування спеціальних відновлювальних покриттів і зміцнювальних технологій, серед яких особливо виділяється електрошлакове наплавлення. Цей метод дає змогу істотно поліпшити експлуатаційні характеристики ріжучих елементів і продовжити їхній термін служби завдяки формуванню міцного та зносостійкого покриття. Однією з найважливіших переваг використання модифікуючих присадок є можливість цілеспрямованої зміни мікроструктури покриття.

Додавання присадок, таких як хром, молібден, нікель, ванадій і бор, дає змогу формувати спеціальні фази в структурі покриття, які підвищують його твердість і стійкість до абразивного зносу. Застосування наноматеріалів як модифікуючих присадок відкриває нові можливості для підвищення стійкості відновлювальних покриттів. Наночастинки сприяють зниженню коефіцієнта тертя, що зменшує енергоємність процесу різання та знижує зношування ріжучих елементів.

Для розширення діапазону модифікування наплавленого металу, а також поліпшення його якісних характеристик потрібне створення сучасних ефективних наплавочних матеріалів, таких як порошкові дроти, електроди та стрічки, композиційні дроти, що становлять собою композит з металевих і мінеральних складових особливого хімічного складу з заданими експлуатаційними показниками.

2. Ефективність використання порошкових дротів з різними модифікуючими та легуючими присадками запропоновано вивчати з використанням комплексного підходу, при якому використовували хімічний, рентгеноспектральний, спектральний, локальний аналізи, металографічні дослідження (оптичні та електронні), оцінюванням властивостей згідно мікротвердості покриття та його напруженого стану.

3. Результати металографічного аналізу показали, що структура наплавлених покриттів формується під значним впливом компонентного складу порошкових дротів. Основними структурними складовими є ферит, карбідні фази (CrC , Cr_{23}C_6 ,

NbC), а також евтектика. Однорідність та дрібнозернистість матриці суттєво покращують механічні властивості покриттів, зокрема їх твердість, зносостійкість і корозійну стійкість. Наплавки з рівномірним розподілом фаз демонструють менший рівень внутрішніх напружень та стабільність у процесі експлуатації. Дроти №3 і №6 забезпечують формування дрібнозернистих структур із високим вмістом карбідних фаз (CrC , Cr_{23}C_6) та графітних включень. Така комбінація сприяє досягненню найвищої твердості (HRC 50–51), термічної стабільності та зносостійкості покриттів.

Наприклад, рівномірність структури зразків із цих дротів знижує ймовірність утворення дефектів та підвищує довговічність у важких умовах експлуатації. Дроти №4 і №5 утворюють грубозернисті структури з високим рівнем дефектів, нерівномірним розподілом фаз і викришуванням карбідних включень. Це знижує експлуатаційні характеристики, зокрема твердість (HRC 38 для дроту №4), а також сприяє високим втратам маси під час абразивних тестів. Наплавлені покриття, отримані за допомогою дроту №10, продемонстрували унікальні характеристики, обумовлені раціональним балансом легувальних елементів, таких як нікель, хром та графіт.

Формування дрібнозернистої аустенітної матриці з рівномірним розподілом графітних включень забезпечує високу термічну стабільність, помірну твердість (HRC 45) та стійкість до механічних і термічних навантажень. Крім того, висока дисперсність включень сприяє покращенню антифрикційних властивостей, що робить такі покриття перспективними для використання в умовах тертя, де необхідна поєднана зносостійкість і довговічність.

4. Покриття з дротів №5 і №6 мають найвищу корозійну стійкість, зумовлену наявністю NbC і ZrO_2 у складі. Найгірші результати спостерігаються у зразків із дроту №4 через низький вміст модифікуючих компонентів і грубу структуру. Дроти №3 і №6 рекомендовані для використання в умовах інтенсивного абразивного зносу завдяки їх високій твердості та мінімальним втратам маси. Мікроструктурний аналіз показав, що однорідність структури та наявність дрібнозернистих фаз значно покращують механічні властивості покриттів. Вибір

порошкових дротів для конкретних умов експлуатації повинен базуватися на комплексному аналізі їхніх властивостей, зокрема зносостійкості, твердість і корозійної стійкості.

5. Проведений мікрорентгеноспектральний аналіз підтвердив рівномірний розподіл основних елементів у структурі наплавлених покриттів. Зокрема, у зразках, отриманих із використанням різних типів порошкових дротів, спостерігалися специфічні фази, характерні для кожного типу матеріалу, що визначає їхні механічні та експлуатаційні властивості.

Зразки з високою концентрацією карбідних фаз та рівномірним їхнім розподілом, наприклад, отримані із дротів №5 та №6, продемонстрували підвищену твердість (HRC 45-50) і зносостійкість. Зразки з менш рівномірним розподілом фаз або структурними дефектами, як у випадку дротів №4 та №7, виявили зниження цих властивостей. Аналіз зон сплавлення показав, що високоякісне зчеплення наплавленого шару з основним матеріалом забезпечується за рахунок формування дрібнозернистої структури з рівномірним розподілом карбідних включень. Найкращі показники спостерігалися для зразків із дротами №5 та №6.

6. За результатами аналізу мікроструктури, оптико-математичного моделювання та випробувань на знос, встановлено можливість прогнозування параметрів зношування на основі морфологічних ознак мікроструктури без проведення прямих випробувань. Виявлено оптимальне співвідношення структурних складових у моделі типу «в'язкі — тверді включення». У цьому контексті мікроструктура наплавленого шару з дроту №2 є більш раціональною порівняно з грубозернистою структурою наплавлення №1 та дисперсною структурою наплавлення №9. Такий аналіз корисний тоді, коли складно визначитись з параметром розміру зерна чи кристалітів.

7. За результатами проведеного аналізу мікроструктури, побудови оптико-математичної моделі та випробувань на знос встановлено, що у межах мікроструктур з ідентичною морфологією можливе прогнозування параметрів зношування без проведення безпосередніх випробувань, виключно на основі зображень мікроструктури. Встановлено раціональне поєднання структурних

складових у моделі типу «в'язка матриця — тверді включення», яке забезпечує покращені триботехнічні характеристики. З цієї точки зору мікроструктура наплавлення з дроту №2 є більш раціональною порівняно з грубозернистою структурою наплавлення №1 та дисперсною структурою наплавлення №9.

Такий підхід до аналізу мікроструктур є особливо корисним у випадках, коли ускладнене або неможливе точне визначення параметрів зернистості чи розміру кристалітів.

8. Польові випробування підтвердили ефективність модифікованих деталей у підвищенні зносостійкості робочих органів сільськогосподарської техніки. Модифіковані зразки демонструють значно нижчу втрату маси (на 30% менше) у порівнянні зі стандартними деталями.

Дослідження також виявили, що геометрія модифікованих деталей залишається стабільною навіть після тривалої експлуатації в умовах важких глинистих ґрунтів. Застосування технології електрошлакового наплавлення дозволяє суттєво знизити витрати на заміну робочих органів. За рахунок збільшення терміну служби деталей до 45–50 га (проти 25–30 га для серійних деталей) загальні витрати зменшуються на 25%.

9. Оцінено економічну ефективність впровадження розробленої технології електрошлакового наплавлення з використанням модифікуючих присадок при експлуатації сільськогосподарської техніки на площі 1000 га. Впровадження модифікованих покриттів для культиваторних лап, яке сприяє зниженню експлуатаційних витрат та подовженню їх ресурсу, забезпечує економічний ефект у розмірі 14 820,5 грн.

Витрати на ремонт культиваторних лап зменшуються на 16 230,8 грн. Відновлення плужних лемішів за допомогою електрошлакового наплавлення з модифікуючими компонентами забезпечує значну економію – 18 450,7 грн. Загальна економічна ефективність від впровадження розробленої технології наплавлення та зміцнення деталей сільськогосподарської техніки при обробітку 1000 га становить понад 49 500 грн, що відображається на її доцільності та перспективності для широкого застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

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/server/api/core/bitstreams/79247f36-67f5-4ea6-b5f2-fad137395a84/content>
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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/2.2024.21)
4. Солових Е. К., Солових А. Е., Ворона А. В. Вибір матеріалів для зміцнення робочих органів деталей сільськогосподарської техніки [Електронний ресурс]. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2011. Вип. 24, ч. II. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/aa0f8536-6637-4b7e-87e7-58c75be18f16/content>
5. 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.
6. Сідашенко О. І., Науменко О. А. [та ін.] Ремонт машин та обладнання: підручник. За ред. О. І. Сідашенка, О. А. Науменка. Київ : Агроосвіта, 2014. 665 с.
7. Падалка В. В., Каркач О. С. Аналіз технологій поверхневого зміцнення робочих органів сільськогосподарських машин. Технологічний аудит та резерви

виробництва. 2012. № 2/1(4). С. 28–30. DOI: [10.15587/2312-8372.2012.4881](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4881)

8. Дзюбик А. Р., Войтович А. А., Дзюбик Л. В. Оптимізація технології наплавлення зносостійких шарів на плоскі елементи конструкції [Електронний ресурс]. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 2016. Вип. 50. С. 103–110. Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journalpaper/2017/oct/6457/avtomatyzac20165013.pdf>

9. Рябцев І. О., Бабінець А. А., Лентюгов І. П., Богайчук І. Л., Панфілов А. І. Електродугове наплавлення зносостійких сплавів на основі заліза та нікелю на міді. Автоматичне зварювання. 2022. № 5. С. 10–15. DOI: [10.37434/as2022.05.02](https://doi.org/10.37434/as2022.05.02)

10. 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.

11. Кусков Ю. М., Рябцев І. О. Електрошлакове наплавлення. Матеріали, технології, обладнання. Київ : Інтерсервіс, 2022. 284 с. [ISBN 978-966-999-289-5](https://doi.org/10.37434/as2022.05.02).

12. Ляшенко Б., Антонюк В., Сорока О., Рутковський А. Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів [Електронний ресурс]. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2005. Т. 10, № 1. С. 54–59. Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/31386/2/TSTUSJ_2005v10n1_Lyashenko_B-The_development_of_new_54-59.pdf

13. Скворцов О. В. Дослідження структури та трибологічних властивостей композиційного покриття на основі нанокристалічного хрому. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2023. № 2. С. 45–50.

14. Дудник В. В. Підвищення довговічності робочих органів зернопосівних машин [Електронний ресурс]. Збірник наукових праць ПДАА. 2018. Вип. 3. С. 67–72. Режим доступу: <https://dspace.pdau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/5c586d05-4c3b-40a8-a6c2-a908d776e262/content>

15. 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](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07487-4).
16. 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](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012087).
17. Захаров А. В., Рибалко І. М. Переваги та дефекти технології електрошлакового наплавлення [Електронний ресурс]. Молодь: матеріали науки та інновацій: Х Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року. С. 487–488. Режим доступу: <https://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/162710/>
18. Денисенко М. І., Іващенко С. В., Лісовський Л. В., Смиковський С. М., Дев'ятко О. С. Композиційні порошкові матеріали і покриття для відновлення та зміцнення деталей робочих органів сільськогосподарської техніки [Електронний ресурс]. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали IV Міжнародної наук.-практ. конференції молодих учених (Запоріжжя, 05–29 лютого 2024 р.). Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. С. 6–23. Режим доступу: http://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/denysenko_6-23.pdf
19. Денисенко М. І., Рубльов В. І. Технологічні методи забезпечення довговічності робочих органів і надійності сільськогосподарських машин [Електронний ресурс]. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2013. Вип. 43, ч. II. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/809f4a6a-2aa8-4674-9d62-f8bde8350a5a/content>
20. Дудніков А. А., Дудніков І. А., Дудник В. В., Бурлака О. А. Способи відновлення деталей сільськогосподарських машин. Науковий прогрес та інновації. 2021. № 2. С. 280–285. DOI: [10.31210/visnyk2021.02.37](https://doi.org/10.31210/visnyk2021.02.37)
21. Шаблій О., Пулька Ч., Король О. Основні напрямки індукційного наплавлення робочих органів сільськогосподарських машин [Електронний ресурс].

Вісник ТДТУ. 2008. Т. 13, № 4. С. 100–109. Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/127/1/TSTUB_2008_v13_No4-Shabliy_O_Pulka_Ch_Korol_O-Basic_directions_of_induction100.pdf

22. Мажейка О. Й., Чайковський О. Б., Лутай А. Н. Зміцнення деталей сільськогосподарських машин сучасними технологіями [Електронний ресурс]. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2010. Вип. 40, ч. I. Режим доступу:

<https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/eeb21784-da83-436d-a32d-7ea12fb1cb9e/content>

23. Benami E., Jin Z., Carter M. R., Ghosh A., Hijmans R. J., Hobbs A., Kenduiwo B., Lobell D. B. Uniting remote sensing, crop modelling and economics for agricultural risk management E. Benami, Z. Jin, M. R. Carter [та ін.]. Nature Reviews Earth & Environment. 2021. Vol. 2, № 2. P. 147. DOI: [10.1038/s43017-020-00122-y](https://doi.org/10.1038/s43017-020-00122-y).

24. Рибалко І., Сайчук О., Захаров А., Боровик О. Процес електрошлакового наплавлення з використанням електродних порошкових дрітків. International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2023. Вип. 2, № 1. С. 1–9. DOI: [10.46299/j.isjea.20230201.01](https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230201.01)

25. 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.

26. Кусков Ю. М., Богайчук І. Л., Черняк Я. П., Євдокимов А. І. Електрошлаковая наплавка чугуноной дробины деталей, изготовленных из высокохромистого чугуна [Електронний ресурс]. Автоматическая сварка. – 2013. № 8. С. 47–49. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/as_2013_8_9

27. Кусков Ю. М., Соловйов В. Г., Лентюгов І. П., Жданов В. А. Роль шлаковой ванны в процессе наплавки в струмопідвідному кристалізаторі. Современная электрометаллургия. 2018. № 2. С. 41–44. DOI: [10.15407/sem2018.02.05](https://doi.org/10.15407/sem2018.02.05)

28. Кусков Ю. М., Рябцев І. О. Підвищення довговічності робочих органів обладнання гірничо-металургійного комплексу методом електрошлакового

наплавлення [Електронний ресурс]. Актуальні проблеми транспортної системи. 2024. № 2. С. 236–237.

Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/45612/2/AM_2024_Kuskov_Y-Increasing_the_durability_236-237.pdf

29. Białoברzeska B., Jasiński R., Konat Ł., Szczepański Ł. Analysis of the properties of Hardox Extreme steel and possibilities of its applications in machinery. Metals. 2021. Vol. 11, № 1. Article No. 162. DOI: [10.3390/met11010162](https://doi.org/10.3390/met11010162).

30. Chen P., An J., Shu S., Cheng R., Nie J., Jiang T., Wang Z. L. Super-durable, low-wear, and high-performance fur-brush triboelectric nanogenerator for wind and water energy harvesting for smart agriculture. P. Chen, J. An, S. Shu [та ін.]. Advanced Energy Materials. 2021. Vol. 11, № 9. Article No. 2003066. DOI: [10.1002/aenm.202003066](https://doi.org/10.1002/aenm.202003066).

31. 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. Промисловість в фокусі. 2021. № 5 (101). С. 52–56.

32. Рибалко І. М., Захаров А. В. Розподіл тепла у металевій ванні при електрошлаковій наплавці порошковим електродом. The VII International Scientific and Practical Conference «Theoretical methods and improvement of science» (December 12–14, 2022; Bordeaux, France). 348 p.

33. Рибалко І. М., Сайчук О. В., Захаров А. В., Боровик О. Ю. Процес електрошлакового наплавлення з використанням електродних порошкових дротів. International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2023. Vol. 2, № 1. P. 1–9. DOI: [10.46299/j.isjea.20230201.01](https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230201.01)

34. Захаров А. В., Рибалко І. М. Електрошлакове наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі з використанням порошкових дротів для відновлення робочих органів ґрунтообробної техніки. Science and Global Challenges in the Modern World: Proceedings of the International Scientific Conference (November 4, 2024). Leicester, UK: Bookmundo, 2024.

35. Рябцев І. А., Кузьменко О. Г., Лентюгов І. П. Електрошлакові

технології наплавлення і рециклінгу металевих і металовмісних відходів. за ред. І. А. Рябцева. Київ: Інтерсервіс, 2020. 288 с.

Режим доступу: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/books/ryabtcev2020>

36. Електрошлаковий процес, обладнання, технологія: зб. наук. Праць. Луньов В. В., Парахневич Є. М., Петруша Ю. П. [та ін.]. Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. 56 с.

37. Василик М. М., Яцюк В. О., Лазарюк В. В. Кінетичні закономірності ущільнення твердих сплавів на основі карбідів титану та ніобію [Електронний ресурс]. Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (24–25 листопада 2021 року, Тернопіль). Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/36430/2/MNPK_2021v1_Vasylyk_M_M-Densification_kinetics_of_9-10.pdf

38. Парахневич Є. М., Сперанський Б. С., Петруша Ю. П. Відновлення деталей електрошлаковим методом. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2000. № 2. С. 49–51.

39. Марков А. В., Мальцев Т. В. Использование вторичного сырья для модифицирования при восстановлении деталей наплавкой. Зварювання та споріднені технології: матеріали VIII Міжнародної конференції молодих учених та спеціалістів (20–22 травня 2015 року, Київ). Київ, 2015. С. 112.

40. Технологія наплавлення [Електронний ресурс]. StudFiles. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5199795/>

41. Технологічні процеси при наплавленні порошковими дротами [Електронний ресурс]. Studwood. Режим доступу: [\[https://studwood.net/2609195/tovarovedenie/tehnologichni_protsepi_naplavlennya_p_oroшковimi_drotami\]](https://studwood.net/2609195/tovarovedenie/tehnologichni_protsepi_naplavlennya_p_oroшковimi_drotami)

42. Скобло Т. С., Сідашенко А. І., Гончаренко А. А., Марков А. В., Михайличенко А. С. Нова технологія модифікування при відновленні виробів. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. 2015. Вип. 158. С. 3–8.

43. Skoblo T., Rybalko I., Markov A. [et al.] A new way of getting the charge

with diamond fraction. Nanosistemi, nanomateriali, nanotehnologii. 2021. Vol. 19, № 1. P. 23–33. DOI: [10.15407/nnn.19.01.023](https://doi.org/10.15407/nnn.19.01.023).

44. Нетяга А. В., Кусков Ю. М., Проскудін В. М., Жданов В. А., Лентюгов І. П. Формування шару високохромистого чавуну при електрошлаковому наплавленні в струмопідвідному кристалізаторі квадратного перерізу. Сучасна електromеталургія. 2021. № 4. DOI: [10.37434/sem2021.04.02](https://doi.org/10.37434/sem2021.04.02).

45. Kuskov Yu. M., Soloviov V. G., Zhdanov V. A. Electroslag surfacing of end faces with large-section electrode in current-supplying mould. The Paton Welding Journal. 2017. № 11. P. 29–32. DOI: [10.15407/tpwj2017.12.05](https://doi.org/10.15407/tpwj2017.12.05).

46. Kuskov Yu. M. Influence of flux composition on the process of electroslag surfacing of end faces with discrete feeding of filler material. The Paton Welding Journal. 2018. № 1. P. 33–37. DOI: [10.15407/tpwj2018.01.07](https://doi.org/10.15407/tpwj2018.01.07).

47. Kuskov Yu. M. A new approach to electroslag welding. Welding Journal. 2003. № 4. P. 42–45.

48. Kuskov Yu. M., Kuprin I. N., Sarychev I. S. Thermal processes in electroslag surfacing forming rolls in current-conducting mould. Svarochnoye Proizvodstvo. 2006. № 10. P. 29–32.

49. Tsykulenko K. A., Vislobokov O. M. Physical modeling of slag pool hydrodynamics in slab current-leading mould. Pt 2. Cladding. Advances in Electrometallurgy. 2008. № 3. P. 17–20.

50. Kuskov Yu. M., Tsykulenko K. A. Development of design of current-conducting mould for electroslag surfacing of flat blanks. Stal. 2009. № 1. P. 41–46. DOI: [10.3103/S0967091209010136](https://doi.org/10.3103/S0967091209010136).

51. 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](https://doi.org/10.15407/tpwj2015.06.06).

52. Mank V., Tonkha O., Galimova V., Surovtsev S., Menshov O., Bukova O., Rogovskiy I. Electrochemical investigation of cobalt absorption processes by soils of Ukraine. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv-Geology. 2019; 3(86): 31–39.

53. Medovar L. B., Tsykulenko A. K., Chernets A. V. [et al.] Examination of influence of two-circuit scheme parameters of ESR on dimensions and shape of metal pool. *Problemy Spetsial'noy Elektrometallurgii*. 2000. № 4. P. 3–7.
54. Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Haponenko O.I., Ohiienko M.M., Kulik V.P. Engineering management of tillage equipment with concave disk spring shanks. *INMATEH, Agricultural Engineering*. 2020; 60(1): 45–52. DOI: [10.35633/INMATEH-60-05](https://doi.org/10.35633/INMATEH-60-05).
55. Tsykulenko K. A. Developing Electroslag Technologies and Improving the Design of Electroslag-Remelting Molds. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*. 2007. № 4. P. 8–18.
56. Гориславец 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](https://doi.org/10.15407/techned2022.04.064).
57. Кусков Ю. М., Проскудін В. М., Нетяга А. В. Модернізація печей ЕШП в установки для ЕШН прокатних валків у струмопідвідному кристалізаторі. *Сучасна електрометалургія*. 2021. № 3. С. 4–9. DOI: [10.37434/sem2021.03.02](https://doi.org/10.37434/sem2021.03.02).
58. Білони́к І., Капустя́н О., Білони́к Д., Шумикі́н С., Шумі́лов О., Губа́рь Є. Виготовлення електрошлаковим наплавленням ударної частини молотків механізму струшування електрофільтрів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2021. № 42. С. 14–21. DOI: [10.31498/2225-6733.42.2021.240566](https://doi.org/10.31498/2225-6733.42.2021.240566).
59. 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.
60. 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 ХНТУ*. 2023. № 4(87). DOI: [10.35546/kntu2078-4481.2023.4.15](https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.15).
61. Dilthey U., Woeste K., Aretov I. Modification of the electroslag process

opens up possibilities with regard to weld surfacing. *Welding and Cutting*. 2006. № 4. P. 215–220.

62. Galazzi G., Rigdal S., Kubenka M. Practical application of ESAB strip cladding technology. *Svetsaren*. 2007. № 1. P. 17–22.

63. Munro R. G. Material properties of titanium diboride. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2000. № 5(105). P. 709–720.

64. Scott L., Andreini R. Electroslag process clads ship shafts. *Welding Journal*. 2003. № 11. P. 41–42.

65. Tekeste M. Z., Balvanz L. R., Al-Aani F., Boesenberg A., Hatfield J. L. Hardened edges effects on wear characteristics of cultivator sweeps using circular soil bin test. *Journal of Tribology*. 2022. Vol. 144(2). Article No. 024501. DOI: [10.1115/1.4050805](https://doi.org/10.1115/1.4050805).

66. Tulaganova L., Yunushuzhaev S., Juraeva G. Improving the wear resistance and durability of cultivator tools. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2373. Article No. 022026. DOI: [10.1088/1742-6596/2373/2/022026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2373/2/022026).

67. Unal O., Maleki E., Karademir I., Husem F., Efe Y., Das T. Effects of conventional shot peening, severe shot peening, re-shot peening and precised grinding operations on fatigue performance of AISI 1050 railway axle steel. *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 155. Article No. 106613. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2021.106613](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106613).

68. Wang Y., Wu J., Pu H., Chen W., Yin Q., Yang S., Ma D. Effect of interface geometric parameters on the mechanical properties and damage evolution of layered cemented gangue backfill: Experiments and models. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 349. Art. No. 128678. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.128678](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128678).

69. Yadav Y. K., Singh A. K., Siddhartha. Insights to improve the tribo-performance of materials used under slurry erosion applications: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2023. Vol. 237(1). P. 3–32. DOI: [10.1177/14644207221108565](https://doi.org/10.1177/14644207221108565).

70. Сайчук О. В., Рибалко І. М., Захаров А. В. Електрошлакове нанесення на постійному струмі в струмопідвідному кристалізаторі з електродом великого перерізу. Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні напрямки та рухи

в науці»: Матеріали конференції, 6–8 жовтня. Люксембург, 2022. – С. 229–237.

71. Денисенко М., Опальчук А. Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин. Вісник ТНТУ. 2011. Спецвипуск, ч. 2. С. 201–210.

72. Скобло Т. С., Захаров А. В. Дослідження технологічних процесів для оцінювання ефективності застосування вуглецьвмісних модифікаторів. XV Міжнародний форум молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі»: Збірка матеріалів форуму. Харків: ХНТУСГ, 2019. С. 92.

73. Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Захаров А. В. Наплавлення покриттів із застосуванням модифікуючої домішки – детонаційної шихти. І Всеукраїнська науково-практична конференція «Транспорт: наука та практика», Сєверодонецьк–Дніпро–Кам'янець-Подільський, 27 травня 2022 р.: Збірник наукових праць. Сєверодонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2022. С. 48–51.

74. Рибалко І. М., Сайчук О. В., Захаров А. В. Дослідження покриттів, отриманих електрошлаковою наплавкою сплаву $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{FeSi}_2 + \text{Si}$, модифікуючого маловуглецеву низьколеговану сталь. 3-я міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології», Харків, 22–23 листопада 2022 р.: Тези доповідей. Харків: УкрДУЗТ, 2022. С. 225.

75. Захаров А. В., Рибалко І. М. Отримання та застосування модифікуючої шихти з алмазною фракцією для підвищення експлуатаційної стійкості виробів. Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали V Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції (Полтава, 21–22 лютого 2023 р.). Полтава: ПДАУ, 2023. С. 198.

76. 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.

77. Захаров А. В., Рибалко І. М. Аналіз детонаційної шихти з алмазною фракцією для модифікування покриттів наплавленням. Proceedings of International Multidisciplinary Scientific and Practical Internet Conference for Young Researchers,

Applicants for Higher Education and Scientists «MODERN SCIENCE: INNOVATIONS AND PERSPECTIVES». Kyiv: Ukraine, 6–7 April 2023.

78. Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Захаров А. В. Дослідження та виявлення ефективності наномодифікування чавуну для відновлення деталей сільськогосподарської техніки з використанням процесу електрошлакового наплавлення. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: Матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених. Запоріжжя: ТДАТУ, 2024. 250 с.

79. Захаров А. В., Рибалко І. М. Здійснення процесу ЕШН на деталі малої товщини з додаванням модифікуючого матеріалу та використанням неплавкого графітового електроду. XIV Всеукраїнська конференція «Молоді вчені 2024 – від теорії до практики». Дніпро: Інститут промислових та бізнес-технологій УДУНТ, 21 березня 2024 р.

80. Скобло Т. С., Сідашенко О. І., Кусков Ю. М., Романюк С. П., Сайчук О. В., Автухов А. К., Марков О. В., Таран В. С., Таран А. В., Захаров А. В. Склад детонаційної шихти з алмазами для модифікування: пат. 144463 України. № u201905788; заявл. 27.05.2019; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 19.

81. Скобло Т. С., Нанка О. В., Рибалко І. М., Сайчук О. В., Тіхонов О. В., Сатановський Є. А., Олейник О. К., Захаров А. В. Спосіб підвищення якості та експлуатаційної стійкості відновлюючих покриттів їх модифікуванням маловитратною домішкою: пат. 147660 України. № u202008115; заявл. 18.12.2020; опубл. 02.06.2021, Бюл. № 22.

82. Рибалко І. М., Захаров А. В. Дослідження особливостей перебігу окисно-відновлювальних реакцій при електрошлаковому наплавленні з використанням модифікуючих домішок різного хімічного складу. Science, Technology and Innovation in the Modern World: Scientific Monograph. Riga: Baltija Publishing, 2023. 636 p. DOI: [10.30525/978-9934-26-364-4-3](https://doi.org/10.30525/978-9934-26-364-4-3).

83. Серeda Б. П., Кругляк І. В., Баскевич О. С., Белоконь Ю. О., Кругляк Д. О., Серeda Д. Б. Поверхневе зміцнення конструкційних матеріалів з використанням композиційних насичуючих середовищ: монографія. Кам'янське:

ДДТУ, 2019. 246 с.

84. Дурягіна З. А., Лизун О. Я., Пілюшенко В. Л. Сплави з особливими властивостями: навч. посібник. Львів: Вид-во Національного ун-ту «Львівська політехніка», 2007. 236 с. [ISBN 978-966-553-646-8](#).

85. Солнцев Ю. П., Беліков С. Б., Волчок І. П., Шейко С. П. Спеціальні конструкційні матеріали: підручник для вищих навч. закладів. Запоріжжя: ВАЛПІС-ПОЛІГРАФ, 2010. 536 с. [ISBN 978-966-375-158-0](#).

86. Баклан Д., Цзо Ю., Миронюк О. Корозійна стійкість біфракційних текстурованих покриттів. Композиційні матеріали: Збірник тез XIII Міжнар. наук.-практ. WEB-конф. (26–29 квітня 2024 р.). Уклад.: Ю. О. Коваленко, О. В. Миронюк, Л. І. Мельник. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2024. 248 с. [ISBN 978-966-990-128-6](#).

87. Pogrebnjak A. D., Lisovenko M. A., Turlybekuly A., Buranich V. V. Protective coatings with nanoscale multilayer architecture: Current state and main trends. Physics-Uspekhi. 2021. Vol. 64(3). P. 253–279. DOI: [10.3367/UFNe.2020.08.038823](#).

88. Hovorun T., Khaniukov K., Varakin V., Pererva V., Vorobiov S., Burlaka A., Khvostenko R. Improvement of the physical and mechanical properties of the cutting tool by applying wear-resistant coatings based on Ti, Al, Si, and N. Journal of Engineering Sciences. 2021. Vol. 8(2). P. C 13–23. DOI: [10.21272/jes.2021.8\(2\).c3](#).

89. Ханюков К. С., Говорун Т. П., Пахненко Д. В., Бурлака А. Ю. Зміцнення різального інструмента шляхом нанесення наноструктурованих покриттів на основі Ti, Al, Si та N [Електронний ресурс]. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем. 2022. Режим доступу: <https://ir.stu.cn.ua/bitstream/handle/123456789/27392/Tezy%20-%202022%20Part%205-66.pdf>

90. Колесник О. К., Крюкова О. А. Двошарові нікелеві покриття для підвищення зносо- та корозійної стійкості. Технології та дизайн. 2021. № 1(38). [ISSN 2304-2605](#).

91. Самсонов І. Я., Лоскутова Т. В., Хижняк В. Г., Погребова І. С. Жаростійкість і корозійна стійкість комплексних хромоалітованих покриттів на

титановому сплаві ВТ6 [Електронний ресурс]. Наукові вісті НТУУ "КПІ". 2013. № 1. С. 84–85. Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d21b9a61-bc5f-42b8-a5e1-89540954d4c3/content>

92. Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., Koziar M. Ternary cobalt-molybdenum-zirconium coatings for alternative energies. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 421. P. 68–76. DOI: [10.1016/j.apsusc.2017.01.196](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.01.196).

93. Skoblo T., Rybalko I., Tihonov A., Maltsev T. Evaluation of the stress state of a cultivator blade in production and operation. *Research in Agricultural Engineering*. 2020; 66(2): 60-65. DOI: [10.17221/8/2020-RAE](https://doi.org/10.17221/8/2020-RAE).

94. Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., Nenastina T. Electrodeposition and properties of binary and ternary cobalt alloys with molybdenum and tungsten. *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 445. P. 298–307. DOI: [10.1016/j.apsusc.2018.03.171](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.03.171).

95. Бабінець А. А., Рябцев І. О., Лентюгов І. П., Богайчук І. Л. Вплив мікролегування бором на структуру та властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25Х5ФМС. Автоматичне зварювання. 2022. № 6. DOI: [10.37434/as2022.06.01](https://doi.org/10.37434/as2022.06.01).

96. Kondratiev I. A., Ryabtsev I. A. Flux-cored wires for surfacing of steel hot mill rolls. *The Paton Welding Journal*. 2014. № 6–7. P. 95–96. DOI: [10.15407/tpwj2014.06.20](https://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.20).

97. Shefan V. V., Epifanova A. S., Kovalova A. A., Bairachnyi B. I. Electrolytic deposition of highly hard coatings of a Cobalt-Molybdenum alloy. *Materials Science*. 2017. № 1. P. 47–54. DOI: [10.1007/s11003-017-0042-6](https://doi.org/10.1007/s11003-017-0042-6).

98. Bely A. I., Zhudra A. P., Dzykovich V. I., Petrov V. V. Electrodes for arc hardfacing of composite alloys. *The Paton Welding Journal*. 2018. № 1. P. 29–32. DOI: [10.15407/tpwj2018.01.06](https://doi.org/10.15407/tpwj2018.01.06).

99. Student M. M., Voytovych A. A., Sirak Ya. Ya., Gvozdetskyi V. M. Development of new electrode materials, methods of restoration and protection of thin-walled parts of equipment, which are operated under the conditions of abrasive and gas-abrasive wear. *The Paton Welding Journal*. 2020. № 10. P. 31–34. DOI:

[10.37434/tpwj2020.10.06](https://doi.org/10.37434/tpwj2020.10.06).

100. Shefan V. V., Epifanova A. S., Kovalova A. A., Bairachnyi B. I. Electrolytic deposition of highly hard coatings of a Cobalt-Molybdenum alloy. *Materials Science*. 2017. № 1. P. 47–54. DOI: [10.1007/s11003-017-0042-6](https://doi.org/10.1007/s11003-017-0042-6).

101. Babinets A. A., Ryabtsev I. O. Classification of methods of modification and microalloying of deposited metal (Review). *The Paton Welding Journal*. 2021. № 9. P. 2–8. DOI: [10.37434/tpwj2021.09.01](https://doi.org/10.37434/tpwj2021.09.01).

102. Babinets A. A., Ryabtsev I. O. Influence of modification and microalloying on deposited metal structure and properties (Review). *The Paton Welding Journal*. 2021. № 10. P. 3–10. DOI: [10.37434/tpwj2021.10.01](https://doi.org/10.37434/tpwj2021.10.01).

103. Stepnov K. K., Matvienko V. N., Oldakovsky A. I. Modification of medium-chromium deposited metal. *The Paton Welding Journal*. 2011. № 8. P. 10–12.

104. Krivchikov S. Yu. Modification by boron of deposited metal of white cast iron type. *The Paton Welding Journal*. 2012. № 6. P. 19–21.

105. Hou Q. Y., Huang Z., Wang J. T. Influence of nano- Al_2O_3 particles on the microstructure and wear resistance of the nickel-based alloy coating deposited by plasma transferred arc overlay welding. *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 206(8–9). P. 2806–2812. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2010.10.047](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.10.047).

106. Кузнецов В. Д., Пашенко В. М. Фізико-хімічні основи створення покриттів: навч. посібник. Київ: НМЦВО, 1999. 176 с.

107. Власов А. Ф. Наплавлення: навч. посібник. Краматорськ: ДДМА, 2010. 336 с.

108. Головка В. В., Єрмоленко Д. Ю., Степанюк С. М. Вплив введення тугоплавких сполук до зварювальної ванни на дендритну структуру металу швів. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 6. DOI: [10.37434/as2020.06.01](https://doi.org/10.37434/as2020.06.01).

109. ДСТУ 3362-96. Модифікатори для виливків із чавуну. Загальні технічні умови. Київ: Держстандарт України, 1997. 19 с.

110. Пат. 98213 Україна, МПК (2006.01) B32B 5/14. Спосіб використання детонаційної шихти для зміцнення відновлювального шару деталей. Т. С. Скобло, О. І. Сідашенко, А. В. Марков [та ін.]; заявник та патентотримувач О. В. Марков.

№ а2014 10552; заявл. 26.09.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

111. Обносков К. В., Грешта В. Л., Глотка О. А., Кононов В. В., Фасоль Є. О. Структуроутворення, опір руйнуванню та фізико-механічні властивості. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2024. № 3. DOI: [10.314308/305171](https://doi.org/10.314308/305171).

112. Kvasnytska Y. H., Ivaskevych L. M., Balytskyi O. I. High-Temperature Salt Corrosion of a Heat-Resistant Nickel Alloy. Material Sciences. 2020. № 56. P. 432–440. DOI: [10.1007/s11003-020-00447-5](https://doi.org/10.1007/s11003-020-00447-5).

113. Semiatin S. L., Tiley J. S., Zhang F. [et al.] A Fast-Acting Method for Simulating Precipitation During Heat Treatment of Superalloy 718. Metallurgical and Materials Transactions. 2021. Vol. 52. P. 483–499. DOI: [10.1007/s11661-020-06092-6](https://doi.org/10.1007/s11661-020-06092-6).

114. Glotka A. A., Gaiduk S. V. Distribution of Alloying Elements in the Structure of Heat-Resistant Nickel Alloys in Secondary Carbides. Journal of Applied Spectroscopy. 2020. № 87. P. 812–819. DOI: [10.1007/s10812-020-01075-2](https://doi.org/10.1007/s10812-020-01075-2).

115. Min P. G., Sidorov V. V., Vadeev V. E. Development of Corrosion and Heat-Resistant Nickel Alloys and Their Production Technology with the Aim of Import Substitution. Power Technology and Engineering. 2020. № 54. P. 225–231. DOI: [10.1007/s10749-020-01195-x](https://doi.org/10.1007/s10749-020-01195-x).

116. Kitaguchi H. Microstructure-Property Relationship in Advanced Ni-Based Superalloys. – Open Access Peer-Reviewed Chapter, 2012. 210 p. DOI: [10.5772/52011](https://doi.org/10.5772/52011).

117. Бодрова Л. Г., Крамар Г. М., Лазарюк В. В. [та ін.] Безвольфрамові тверді сплави. Сучасні тенденції розвитку. Вісник ТДТУ. 2000. Т. 5, № 2. С. 16–28.

118. Бодрова Л. Г., Крамар Г. М., Лазарюк В. В. Фізико-механічні властивості безвольфрамових твердих сплавів на подвійній карбідній основі. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2002. Т. 7, № 3. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/38337/2/TSTUSJ_2002v7n3_Bodrova_L-Physical_and_mechanical_properties_9-17.pdf

119. Василик М. М., Яцюк В. О., Лазарюк В. В. Кінетичні закономірності ущільнення твердих сплавів на основі карбідів титану та ніобію. Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів

«Актуальні задачі сучасних технологій». Тернопіль: ТНТУ, 2021.

URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/36430/2/MNPK_2021v1_Vasylyk_M_M-Densification_kinetics_of_9-10.pdf

120. Глотка О. А. Карбіди в жароміцних сплавах направленої кристалізації. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2020. № 2. DOI: [10.15588/1607-6885-2020-2-2](https://doi.org/10.15588/1607-6885-2020-2-2).

121. Lee T.-H., Suh H.-Y., Han S.-K., Noh J.-S., Lee J.-H. Advanced studies on nuclear materials. Journal of Nuclear Materials. 2016. Vol. 479. P. 85–92. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2016.06.038](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.06.038).

122. Wei C. N., Bor H. Y., Ma C. Y., Lee T. S. Influence of chemical composition on material properties. Materials Chemistry and Physics. 2003. Vol. 80. P. 89. DOI: [10.1016/S0254-0584\(02\)00316-4](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(02)00316-4).

123. Balitskii A., Ivaskevich L. Advances in material science and engineering. Advances in Materials Science and Engineering. 2019. Article ID 3680253. DOI: [10.1155/2019/3680253](https://doi.org/10.1155/2019/3680253).

124. Ren W., Lu F., Nie P., Yang R., Liu X., Feng K. [et al.] Studies on material processing technologies. Journal of Materials Processing Technology. 2017. Vol. 247. P. 296–305. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2017.05.003](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.003).

125. Bodrova L., Kramar H., Marynenko S., Koval I., Kovalchuk Y., Kondzelko N. Wear-resistant hard alloys for agricultural machines elements. Scientific Journal of the TNTU. 2020. Vol. 2(98). P. 33–39.

126. Stepnov K. K., Matvienko V. N., Oldakovsky A. I. Modification of medium-chromium deposited metal. The Paton Welding Journal. 2011. № 8. P. 10–12.

127. Перемітько В. В., Коломоєць І. В., Сухомлин В. І. Особливості структури та властивості шарів металу, наплавлених із попереднім нанесенням карбідів титана та бора. Автоматичне зварювання. 2022. № 4. DOI: [10.37434/as2022.04.02](https://doi.org/10.37434/as2022.04.02).

128. Schenfeld V. Y. Increasing of wear resistance of steel parts by surfacing with the use of carbon fiber materials: PhD Thesis. Vinnytsky Derzhavnyy Tekhnichnyy Universytet, Vinnytsya, Ukraine, 2014.

129. Воленко І., Зусін А. Вплив термічної обробки на експлуатаційні показники наплавленого металу розробленими наплавними дротами з метастабільним аустенітом. Матеріали І-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Прикладна механіка», присвяченої 80-річчю з дня народження професора Ч. В. Пульки. 2024.

130. Глушкова Д. Б., Багров В. А., Волчук В. М. Дослідження впливу структури та фазового складу на зносостійкість економнолегованих метастабільних та вториннотвердіючих сталей. Український журнал будівництва та архітектури. 2023. № 3. DOI: [10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.50.954](https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.50.954).

131. Багров В. А., Глушкова Д. Б. Формування структури та фазового складу зносостійких сталей, легованих титаном. Вісник ХНАДУ. 2022. Вип. 97. С. 30–33.

132. Пат. 93302 Україна, МПК В23К 35/368. Порошковий дріт / Л. С. Малінов, В. Л. Малінов, А. А. Голякєвич, Л. Н. Орлов; Приазовський державний технічний університет. Заявл. 17.07.2009; Опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2.

133. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Volchuk V. M., Murzakhmetova U. A. Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys. Functional Materials. 2023. Vol. 30, No. 1. P. 74–78. DOI: [10.15407/fm30.01.74](https://doi.org/10.15407/fm30.01.74).

134. Tarelnyk V., Hlushkova D., Martsynkovskyy V., Dumanchuk M., Antoszewski B., Kundera Cz., Konopiiianchenko Ie., Tarelnik N., Hudkov S., Zahorulko A. Increasing fretting resistance of flexible element pack for rotary machine flexible coupling. Part 1. Analysis of the reasons affecting fretting resistance of flexible elements for expansion coupling. Journal of Physics: Conference Series. 2021. No. 1741. 11 p.

135. Bulaeva M.N., Vaganova O.I., Smirnova Zh.V., Shobonova L.Yu., Chelnokova E.A. Study of the structure of metal materials using microanalysis. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2020; 8(7): 3509–3512, 2020. DOI: [10.30534/ijeter/2020/101872020](https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/101872020)

136. Malinov V. L. Зносостійкість наплавленого металу з метастабільним аустенітом при абразивному та ударно-абразивному впливі. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. 2014. № 25. С. 146–

157. DOI: [10.31498/2225-6733.25.2012.29366](https://doi.org/10.31498/2225-6733.25.2012.29366).

137. Макаренко В. Д., Винников Ю. Л., Ногіна А. М., Петренко О. О. Дослідження мікроструктури зварювального шва, легованого молібденом, на сталі 20К. Проблеми тертя та зношування. 2020. № 1 (86). DOI: [10.18372/0370-2197.1\(86\).14496](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(86).14496).

138. Савуляк В. І., Шиліна О. П., Шенфельд В. Й. Вплив добавки карбідів бору на подрібнення структури наплавлених покриттів [Електронний ресурс]. Вісник Вінницького національного технічного університету. 2022. № 2. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/36702/13365-47880-1-PB.pdf>

139. Падун О. М., Сердітов О. Т., Ключников Ю. В., Горобець О. І. Вплив характеру структури на зносостійкість легованої сталі. Інновації молоді в машинобудуванні. 2020. № 5.

140. Скляр А. В., Сердітов О. Т., Горобець О. І. Підвищення зносостійкості деталей машин поверхневим зміцненням карбідами перехідних металів. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.

141. Кір'янова К. О., Сердітов О. Т., Ключников Ю. В. Дифузійне насичення поверхневого шару інструментальної сталі під час хіміко-термічної обробки. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.

142. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin E.L Structure of high-chromium cast iron. Steel in Translation. 2012; 42(3): 261-268. DOI: [10.3103/S0967091212030151](https://doi.org/10.3103/S0967091212030151)

143. Diachenko O., Opanasyuk A., Protasova T., Kováč J., Novák P., Kováč J. Fabrication and characterization of heterojunction based on a copper oxide layer. 2021 IEEE KhPI Week on Advanced Technologies. Kharkiv, Ukraine, September 13–17, 2021. DOI: [10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569979](https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9569979).

144. Yermakov M., Dobrozhan O., Kakherskyi S., Pshenychnyi R., Opanasyuk A. Influence of temperature annealing on structural and substructural properties of heterojunction $\text{ZnO/Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ obtained by spraying nanoinks. 2021 IEEE 11th

International Conference on "Nanomaterials: Applications & Properties" (NAP2021). Odesa, Ukraine, September 5–11, 2021. DOI: [10.1109/NAP51885.2021.9568597](https://doi.org/10.1109/NAP51885.2021.9568597).

145. Kakherskyi S., Dobrozhan O., Pshenychnyi R., Gnatenko Yu. P., Opanasyuk A. S. Optimization of synthesis conditions of Cu_2ZnSn_4 nanocrystals for use in flexible electronic devices. UkrMiCo'2021 (2021 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics). Ukraine, November 29 – December 3, 2021. P. 283–288.

146. Білоус В. Ю., Пашинський В. В., Березос В. О., Селін Р. В., Вржижевський Е. Л. Структура і властивості зварних з'єднань сталі 20, модифікованої наночастинками на основі карбїду вольфраму. Сучасна електromеталургія. 2022. № 1. DOI: [10.37434/sem2022.01.06](https://doi.org/10.37434/sem2022.01.06).

147. Liang J. W., Shen Y. F., Misra R. D. K., Liaw P. K. High strength-super plasticity combination of ultrafine-grained ferritic steel: The significant role of nanoscale carbides. Journal of Materials Science & Technology. 2021. Vol. 83. P. 131–144. DOI: [10.1016/j.jmst.2020.11.078](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.078).

148. Akhonin S. V., Berezos V. O., Severin A. Yu. [та ін.] Producing by electron beam melting the ingots of iron alloyed with silicon carbide. Suchasna Elektrometalurhiya. 2020. № 3. P. 24–29. DOI: [10.37434/sem2020.03.03](https://doi.org/10.37434/sem2020.03.03).

149. Raghawendra P. S., Sisodia M., Gaspar M. Experimental assessment of microstructure and mechanical properties of electron beam welded S960M high strength structural steel. Manufacturing Letters. 2021. Vol. 29. P. 108–112. DOI: [10.1016/j.mfglet.2021.05.004](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2021.05.004).

150. Bhowmik A., Zhai W., Zhou W., Na S. M. L. Characterization of carbide particle-reinforced 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. Materials Characterization. 2021. Vol. 179. Article 111360. DOI: [10.1016/j.matchar.2021.111360](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111360).

151. Kah P. Advancements in intelligent gas metal arc welding systems: Fundamentals and applications. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. 2021. P. 1–103. DOI: [10.1016/B978-0-12-823905-6.00001-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823905-6.00001-5).

152. Gao F., Cui Y., Li Y., [et al.] Microstructure and properties of Ti-6Al-4V alloy welded joint by keyhole gas tungsten arc welding. Materials Science and

Engineering: A. 2021. Vol. 827. Article 142024. DOI: [10.1016/j.msea.2021.142024](https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142024).

153. Jiao Z. B., Luan J. H., Guo W., [et al.] Effects of welding and post-weld heat treatments on nanoscale precipitation and mechanical properties of an ultra-high strength steel hardened by NiAl and Cu nanoparticles. *Acta Materialia*. 2016. Vol. 120. P. 216–227. DOI: [10.1016/j.actamat.2016.08.066](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.066).

154. Pereira V. S. M., Davis T. P., Mayoral M. H., [et al.] Investigation of coarsening of oxide nanoparticles at 1400 K and its effect on the microstructure formation of an ODS Eurofer steel. *Materials Characterization*. 2022. Vol. 185. Article 111723. DOI: [10.1016/j.matchar.2022.111723](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111723).

155. Рибалко І., Сайчук О., Захаров А., Боровик О. Процес електрошлакового наплавлення з використанням електродних порошкових дрітків. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2023. Vol. 2, No. 1. P. 1–9. DOI: [10.46299/j.isjea.20230201.01](https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230201.01).

156. Sydow Z., Sydow M., Wojciechowski Ł., Bieńczak K. Tribological performance of composites reinforced with agricultural, industrial and post-consumer wastes: A review. *Materials*. 2021. Vol. 14(8). Article 1863. DOI: [10.3390/ma14081863](https://doi.org/10.3390/ma14081863).

157. Neill L., Clarkson C., Schoville B. Holding your shape: Controlled tip fracture experiments on cast porcelain points. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2022. Vol. 44. Article 103505. DOI: [10.1016/j.jasrep.2022.103505](https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103505).

158. Sobirjonov A., Alimova Z. X., Niyazova G. P., Ayrapetov D. A., Siddikov R. B. Prevention of corrosion and accelerated wear of agricultural machinery. *Ilkogretim Online-Elementary Education Online*. 2021. Vol. 20(5). P. 7482–7486. DOI: [10.17051/ilkonline.2021.05.848](https://doi.org/10.17051/ilkonline.2021.05.848).

159. Nguyen T.-T., Le T.-M. Optimization of the internal roller burnishing process for energy reduction and surface properties. *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 67(4). P. 167–179. DOI: [10.5545/sv-jme.2021.7106](https://doi.org/10.5545/sv-jme.2021.7106).

160. Saygili Y. S., Cakmak B. Improvement of wear resistance in toothed harrows coated with HVOF and PVD methods. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2023. Vol. 25(1). P. 47–59. DOI: [10.52547/jast.25.1.47](https://doi.org/10.52547/jast.25.1.47).

161. Okafor C. E., Sunday I., Ani O. I., [et al.] Biobased hybrid composite design

for optimum hardness and wear resistance. *Composites Part C: Open Access*. 2023. Vol. 10. Article 100338. DOI: [10.1016/j.jcomc.2022.100338](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100338).

162. Pekşen H., Kalyon A. Optimization and measurement of flank wear and surface roughness via Taguchi based grey relational analysis. *Materials and Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 36(16). P. 1865–1874. DOI: [10.1080/10426914.2021.1926497](https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1926497).

163. Gadzira M., Gnesin G., Mykhaylyk O., [et al.] Solid solution of carbon in β -SiC. *Materials Letters*. 1998. Vol. 35. P. 277–282. DOI: [10.1016/S0167-577X\(97\)00263-2](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(97)00263-2).

164. 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. Vol. 5–6. P. 30–33. DOI: [10.15407/tpwj2015.06.06](https://doi.org/10.15407/tpwj2015.06.06).

165. Kuskov Yu. M. A new approach to electroslag welding. *Welding Journal*. 2003. Vol. 4. P. 42–45.

166. Tomilenko S. V., Kuskov Yu. M. Power specifics of electroslag process in current-carrying mold. *Svarka*. 1999. Vol. 2. P. 51–53.

167. Похмурський В. І., Студент М. М., Гвоздецький В. М., Ступницький Т. Р., Мажейка О. Й., Маркович С. І. Вплив складу шихти порошкових дротів на механічні властивості електродугових покриттів. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25, ч. II.

168. Пат. 40721 U Україна, МПК (2009) C23C 4/00, B22F 7/00, B32B 15/00. Порошковий дріт для одержання зносостійких електродугових покриттів. В. І. Похмурський, М. М. Студент, Ю. В. Дзьоба, І. Й. Сидорак; заявник і патентовласник ФМІ НАН України. U2008 12842; заявл. 03.11.2008; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8.

169. Пат. 33102 Україна, МПК (2006) B 23 9/04, B 23P 6/00. Спосіб відновлення деталей. В. К. Аветісян, В. М. Власовець, О. О. Гончаренко, В. А. Польотов, О. В. Сайчук, Т. С. Скобло, А. В. Хар'яков – ХНТУСГ (Україна). № U2000801533; заявл. 06.02.2008; опубл. 10.06.2008, Бюл. 2008, № 11. 5 с.

170. Пат. 117615 Україна, МПК В22D 19/08 (2006.01) В22D 19/10 (2006.01). Спосіб підвищення властивостей покриттів модифікуванням при наплавленні. Т. С. Скобло, О. І. Сідашенко, С. П. Романюк, Л. В. Омельченко, І. М. Рибалко, О. О. Гончаренко, В. М. Заєць; власник: Т. С. Скобло. № U201701633; заявл. 20.02.2017; опубл. 26.06.2017, Бюл. 2017, № 12. 4 с.
171. Medovar L. B., Chernets A. V., Grabovskiy Ts. F. Experience in the manufacture and use of fast-cutting ESN rolls. Problemy spetsial'noyi elektrometallurgiyi. 2000. № 3. С. 3–9.
172. Скобло Т. С., Тіхонов О. В., Рибалко І. М. Використання дисперсних домішок вторинної сировини при відновленні деталей машин. Промисловість у фокусі. 2019. № 12 (84). С. 55–57.
173. Рибалко І. М., Захаров А. В. Електрошлакове наплавлення поверхонь виробів композиційними зносостійкими домішками. Матеріали IX Міжнародної науково-технічної онлайн конференції «Крамаровські читання». Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2022. С. 56–59.
174. Захаров А. В. Вплив складу флюсу, роду і полярності струму на ефективність електрохімічних процесів в електрошлаковій системі. Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal. 2023. 1(24). Ostrava: Tuculart Edition, European Institute for Innovation Development. DOI: [10.47451/inn2023-02-0](https://doi.org/10.47451/inn2023-02-0).
175. Рибалко І. М., Захаров А. В. Фізико-хімічні властивості флюсів для електрошлакового наплавлення. Наукові вісті Далівського університету. 2022. № 23. С. 1–5.
176. Скобло Т. С., Рибалко І. М., Захаров А. В. Аналіз електрошлакового наплавлення металу при малій товщині відновлюючого та зміцнюючого робочого шару деталі. Промисловість в Фокусі. 2021. № 10 (106). С. 54–56.
177. Рибалко І. М., Захаров А. В., 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. – 86 с. (Технічні науки).
178. Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Захаров А. В. Наплавлення покриттів із

застосуванням модифікуючої домішки – детонаційної шихти. Збірник наукових праць І-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції «Транспорт: наука та практика» – Сєвєродонецьк – Дніпро – Кам'янець-Подільський, 2022. С. 48–51.

179. Захаров А. В., Рибалко І. М. Дослідження утворення дефектів в зоні сплавлення і наплавленому металі після ЕШН, їх походження і попередження. XIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Молоді вчені 2023 – від теорії до практики». – Дніпро: Журфонд, 2023. 302 с. [ISBN 978-966-934-399-4](#).

180. Рибалко І. М., Захаров А. В. Розподіл тепла у металевій ванні при електрошлаковій наплавці порошковим електродом. The VII International Scientific and Practical Conference «Theoretical methods and improvement of science» – Bordeaux, France, 12–14 December 2022. 348 p.

181. Захаров А. В., Рибалко І. М., Сайчук О. В. Дослідження особливостей регулювання глибини проплавлення основного металу під час процесу ЕШН. Importance of Soft Skills for Life and Scientific Success: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference, March 9–10, 2023. Dnipro, Ukraine: FOP Marenichenko V. V., 146 p.

182. Рибалко І. М., Тіхонов О. В., Гончаренко О. О., Захаров А. В. Модифікування реноваційних покриттів для підвищення зносостійкості культиваторних лап. Вісник Херсонського національного технічного університету. «Інженерні науки». 2022. Вип. 4(83). С. 37–42.

183. Савуляк В. І., Заболотний С. А., Шенфельд В. Й., Українець М. С. Вплив термічних полів процесу наплавлення покриттів на їх структуру та твердість. Вісник ВПІ. 2010. Вип. 2. С. 175–178.

184. Шаблій О., Пулька Ч. Дослідження мікроструктури і властивостей наплавленого металу, отриманого при індукційному нагріванні. Вісник ТДТУ. – 2009. Том 14. № 1. С. 46–55.

185. Савуляк В. І. Наплавлення висовуглецевих зносостійких покриттів: монографія. В. І. Савуляк, В. Й. Шенфельд. Вінниця: ВНТУ, 2016. 124 с.

186. Савуляк В. І., Заболотний С. А., Шенфельд В. Й. Температурні поля та деформації під час відновлення деталей транспортної техніки. Вісник

Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. 2009. № 11(141). С. 48–52.

187. Бабінець А. А., Рябцев І. О., Лентюгов І. П., Богайчук І. Л. Вплив мікролегування бором на структуру та властивості наплавленого металу типу інструментальної сталі 25Х5ФМС. Автоматичне зварювання. 2022. № 6. DOI: [10.37434/as2022.06.01](https://doi.org/10.37434/as2022.06.01).

188. Захаров А. В., Рибалко І. М., Потоскаєв О. М. Особливості технології електрошлакового наплавлення. Молодь: наука та інновації: матеріали Х Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 23–25 листопада 2022 року. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро: НТУ «ДП», 2022. С. 490–491.

189. Рибалко І. М., Захаров А. В. Контроль якості наплавленого ЕШН металу. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції "Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем", 19–21 квітня 2023 р. Кропивницький: ЦНТУ, 2023. 170 с.

190. Захаров А. В. Використання електродних та присадних матеріалів для здійснення процесу електрошлакової наплавки. The VII International Scientific and Practical Conference «Science, Trends and Modern Methods of Solving Problems», February 20–22, Lisbon, Portugal. 286 p. [ISBN 9-789-40368-856-5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-856-5).

191. Захаров А. В., Рибалко І. М., Тіхонов О. В. Застосування глини в ремонтному виробництві. The 3rd International Scientific and Practical Conference «Scientific Research in the Modern World» (January 12–14, 2023). Perfect Publishing, Toronto, Canada, 2023. 796 p. [ISBN 978-1-4879-3795-9](https://doi.org/10.1007/978-1-4879-3795-9).

192. Нетяга А. В., Кусков Ю. М., Проскудін В. М., Жданов В. А., Лентюгов І. П. Формування шару високохромистого чавуну при електрошлаковому наплавленні в струмопідвідному кристалізаторі квадратного перерізу. Сучасна електрометалургія. 2021. № 4. DOI: [10.37434/sem2021.04.02](https://doi.org/10.37434/sem2021.04.02).

193. Охотський В. Б., Костьолов О. А., Сімонов В. К. Теорія металургійних процесів: Підручник. К.: ІЗМН, 1997. – 512 с.

194. Di Vernieri Cuppari M. G., Santos S. F. Physical Properties of the NbC

Carbide. Metals. 2016. DOI: [10.3390/met6100250](https://doi.org/10.3390/met6100250).

195. Fedorov P. Zirconium dioxide. Review. Condensed Matter and Interphases. 2021. DOI: [10.17308/kcmf.2021.23/3427](https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3427).

196. Колпаченко Н. М., Сайчук Ю. А., Луценко І. І., Романченко В. М., Аветісян В. К., Бантковський В. А., Маніло В. Л. Практикум з економіки підприємств технічного сервісу: навч. посіб. для студентів закл. вищ. освіти. – Харків: Діса плюс, 2021. 252 с. [ISBN 978-617-7927-59-3](https://doi.org/10.3390/ISBN978-617-7927-59-3)

197. Колпаченко Н. М., Сайчук Ю. А., Аветісян В. К., Бантковський В. А., Маніло В. Л. Економіка підприємства: навч. посіб. для студентів закл. вищ. освіти. – Харків: Діса плюс, 2019. 277 с. [ISBN 978-617-7645-45-9](https://doi.org/10.3390/ISBN978-617-7645-45-9)

ДОДАТКИ

Таблиця А.1 – Основні легуючі елементи та їх вплив на властивості покриття

Сплав	Вплив на властивості покриття
хром	підвищена твердість, корозійна і зносостійкість
ванадій	освіта карбідних фаз, підвищення міцності
молібден	підвищена стійкість до високих температур
титан	дрібнозерниста структура, покращена адгезія
бор	підвищена твердість і зносостійкість, знижене розтріскування
ніобій	підвищена стійкість до термічних навантажень
ферохром	підвищена стійкість до корозії і механічних впливів
карбід кремнію	підвищена термостійкість, стійкість до агресивних середовищ

Таблиця А.2 – Типи та технологічні властивості різних твердих фаз

Структурна формула з'єднання	Мікротвердість, ГПа	Температура плавлення, °C
ZrB ₂	20,8	3320
VB	21,9	2250
NbB	22,9	2280
Cr ₄ B	11,9	1750
Cr ₃ B ₂	22,1	2200
TiC	31,7	3100

Cr_{23}C_6	15,4	1550
Cr_7C_3	15,8	1670
Mo_2C	15,1	2425
W_2C	31,1	2730
WC	16,9	2700
NbN	17,4	2400
Ta_2N	12,7	2050
Cr_2N	14,5	1650
CrN	11,2	1500

Таблиця А.3 – Структура, твердість та зносостійкість сплавів з карбідним зміцненням

Хімічний склад	Мікроструктура наплавленого металу	Твердість	Показник зносостійкості
$\text{C} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{Ni}$	аустеніт, зміцнений карбідами	$\sim 190 \text{ HB}$	—
$\text{C} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{Mo} + \text{W} + \text{Nb}$	мартенсит з карбідами Ti та Nb	54 HRC	3,4
$\text{C} + \text{Cr} + \text{Mn} + \text{Si} + \text{V} + \text{W}$	безструктурний мартенсит з зернами карбідів $\text{W}_2\text{C} + \text{M}_6\text{C}$.	650 – 700 HV	2,5
$\text{C} + \text{Cr} + \text{W} + \text{Mo} + \text{V} + \text{Co}$	мартенсит з решіткою карбідів	52–57 HRC	—
$\text{C} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{Nb}$	аустеніт з дрібнодисперсними карбідами	240 – 280 HB	—

C + Cr + V + W	аустеніт, мартенсит, карбідна евтектика	48 – 52 HRC	4,9
----------------	--	-------------	-----

Таблиця А.4 – Загальна структура, показники твердості та зносостійкості сплавів з використанням боридних та карбоборидних зміцнень

Хімічний склад	Мікроструктура наплавленого металу	Твердість	Показник зносостійкості
C + Cr + B	первинні карбіди в ледебуриті	50–55 HRC	2,3
B ₄ C + Cr + Ni	карбіди, евтектика, карбобориди	—	0,7...5,7
25% CrB ₂	бориди CrB + CrB ₂	—	5,2
C + Cr + B	первинні карбіди Me ₇ C ₃ та бориди Cr ₂ (B, C)	55 HRC	3,1
W ₂ B ₅ + FeCr + FeV	аустеніт– мартенсит, карбобориди	—	1,5... 2,2
C + Ti + B + Fe	евтектика, бориди і карбіди (FeB ₂ , TiC) C	27–42 HRC	1,5...3,2
CrB + Fe	боридна евтектика, бориди CrB	55–67 HRC	3,9
15%, CrB ₂	твердий розчин (α + β) бориди (Cr, Fe) B ₂	—	2,1
C + Cr + B	ледебурит, первинні карбіди Me ₇ C ₃ і бориди Cr ₂ (B, C)	48 HRC	3,2

С + Cr + В	первинні карбіди Me ₇ C ₃ , борида Cr (С,В) в ледебуриті	55–67 HRC	2,4
------------	--	-----------	-----

Таблиця А.5 – Матеріали оболонок та компонентів шихти порошкових дротів

Компонент	ДСТУ	Розмір частинок (мкм)	Призначення
стрічка св-08кп	2834-94	0,25	основний матеріал оболонки
нікель (ПНЕ-1)	9722-97	< 55	транспортувальна основа
марганець металевий	8923:2019	< 170	легуючий елемент
ферохром (ФХ010А)	4757:2009	< 300	зміцнюючий компонент
графіт сріблястий	2978-94	< 200	покращення зносостійкості

Таблиця А.6 – Склад та використання дротів для створення зносостійких покриттів

Номер та марка дроту	Модифікатор	Якісний показник
№1 (ПП-Нп-А1)	стрічка 0,4x12 мм, ферохром (28,8%), алмаз/глина (3,2%)	зносостійкі покриття для підвищеного тертя
№2 (ПП-Нп-А2)	стрічка 0,4x12 мм, ферохром (28,8%), флюс АНФ-29 (3,2%)	покриття з високою твердістю та дисперсною структурою
№3 (ПП-Нп-А3)	стрічка 0,4x12 мм, високохромистий чавун (28,8%), алмаз (3,2%)	покриття для інтенсивного абразивного зносу
№4 (ПП-Нп-А4)	стрічка 0,4x12 мм, високохромистий чавун (28,8%), флюс АНФ-29 (3,2%)	покриття з підвищеною пластичністю для динамічних навантажень

№5 (ПП-Нп-А5)	хром (20%), нікель (10%), карбід ніобію (10%)	корозійно-стійкі покриття з антифрикційними властивостями
№6 (ПП-Нп-А6)	CrC (20%), графіт (1,5%), кристалічний кремній (1,5%), Al ₂ O ₃ (3%)	покриття зі стійкістю до абразивного зношування
№7 (ПП-Нп-А7)	Fe порошок (700 г), ZrO ₂ (100 г)	високотемпературні умови для деталей, що піддаються тертю
№8 (ПП-Нп-А8)	хром, марганець, нікель	зносостійкі покриття з комбінованою структурою
№9 (ПП-Нп-А9)	хром, марганець, кремній	покриття для агресивних середовищ, що поєднують твердість і пластичність
№10 (ПП-Нп-А10)	хром (16,43%), марганець (1,16%), нікель (12,15%), SiC	покриття з високою стійкістю до зношування в умовах тертя та корозії

Таблиця А.7– Мікроструктура, морфологія та властивості наплавленого шару

Дріт	Тип структури	Мікротв ердість фериту, МПа	Мікротвердість карбідів/евтект ики, МПа	Оцінка зносості йкості	Рекомендована сфера застосування
ПП- Нп-А1	хромистий ферит з евтектичними включеннями	3545	5597	висока	деталі з високою зносостійкістю
ПП- Нп-А2	дисперсна евтектика та ферит	4000	6053	висока	зносостійкі деталі с/г техніки

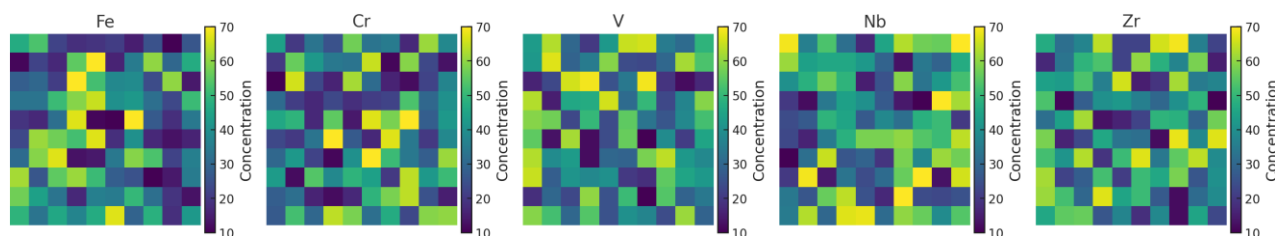
ПП- Нп-А3	голчаста морфологія (троостит) з карбідами	4825	5200	висока	деталі машин з абразивним навантаженням
ПП- Нп-А4	ферито- трооститна структура з легованим феритом	4023	4800	середня	деталі, що працюють під середніми навантаженнями
ПП- Нп-А5	легований ферит з карбідними включеннями	4300	4300	низька	декоративні покриття, не схильні до значного зношування
ПП- Нп-А6	перлітна структура з карбідною евтектикою	5190	5190	середня	зміцнення незначно навантажених деталей
ПП- Нп-7	нелегований ферит з частинками оксиду цирконію	1642	1642	низька	декоративні, або малонавантажені поверхні
№8 (ПП- Нп-А8)	ферито- трооститна суміш	3937 – 4204	5190	висока, придатна для динамічних умов	деталі, що працюють під динамічними навантаженнями

№9 (ПП- Нп-А9)	легований ферит із карбідними колоніями	3940	4300	підвищена, для агресив них середовищ	захист деталей в агресивних середовищах
№10 (ПП- Нп- А10)	аустенітна матриця з дисперсними частками	1740 – 2015	2730–6390	висока, для тертя та корозії	умови комбінованого впливу тертя та корозії

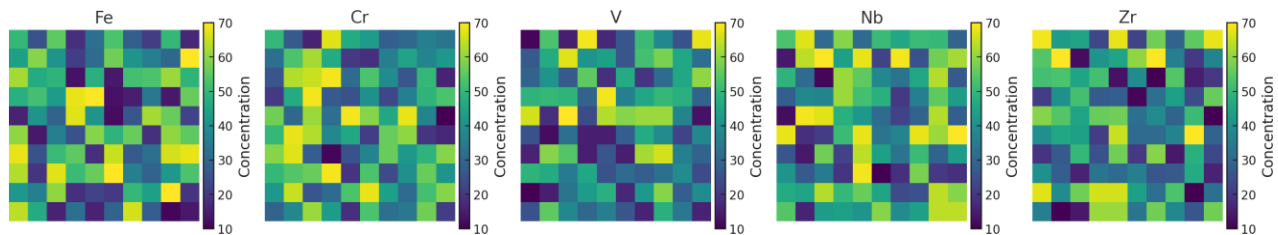
Таблиця А.8 – Мікротвердість наплавлених покриттів з різними модифікаторами

Модифікатор	Мікротвердість фериту, МПа	Мікротвердість карбідів/евтектики, МПа	Середня мікротвердість, МПа
ферохром (FeCr)	5000	6000	5500
карбід хрому (CrC)	5200	6500	5850
діоксид цирконію (ZrO ₂)	4800	5800	5300
графіт	4200	4900	4550
алмаз	5400	7000	6200
ферованадій (FeV)	5100	6400	5750

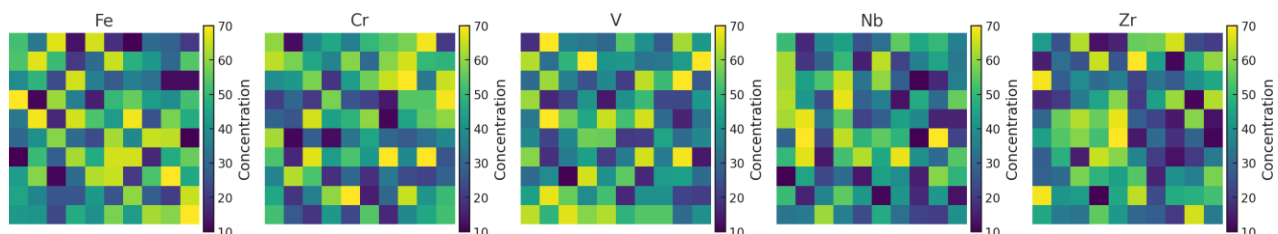
карти розподілу хімічних елементів зразка №1



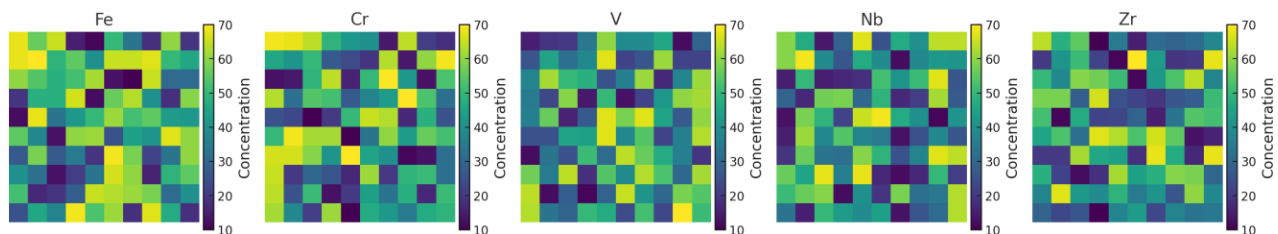
карти розподілу хімічних елементів зразка №2



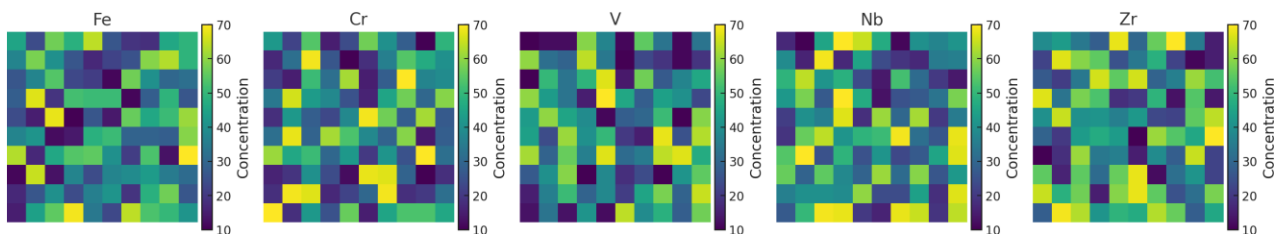
карти розподілу хімічних елементів зразка №3



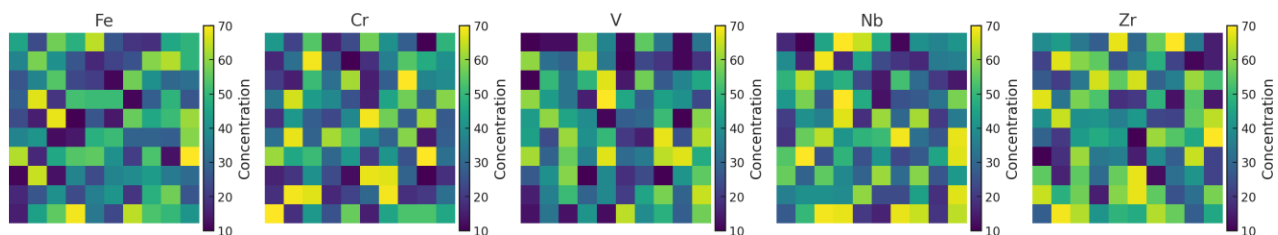
карти розподілу хімічних елементів зразка №4



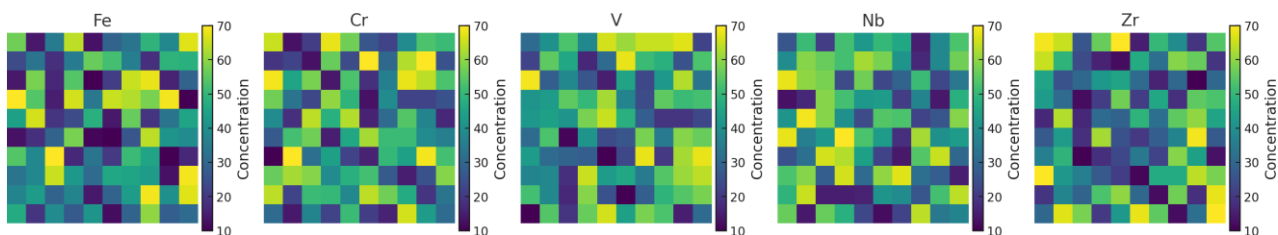
карти розподілу хімічних елементів зразка №5



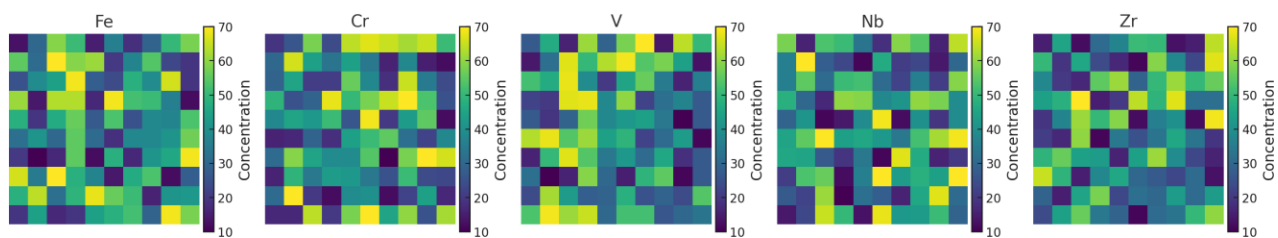
карти розподілу хімічних елементів зразка №6



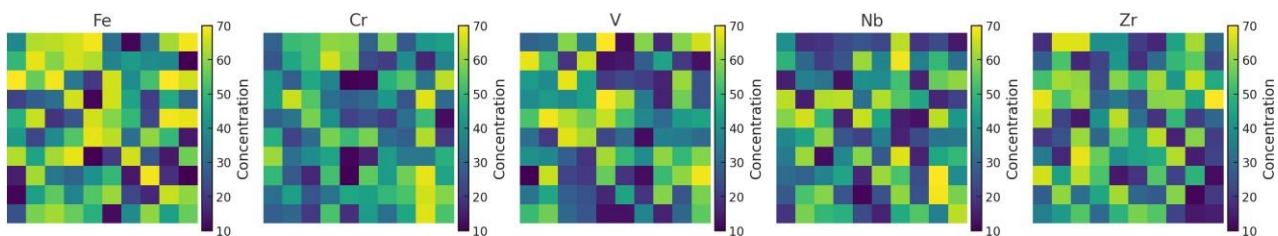
карти розподілу хімічних елементів зразка №7



карти розподілу хімічних елементів зразка №8



карти розподілу хімічних елементів зразка №9



карти розподілу хімічних елементів зразка №10

Рисунок А.9 – Карти розподілу модифікаторів по дослідним зразкам

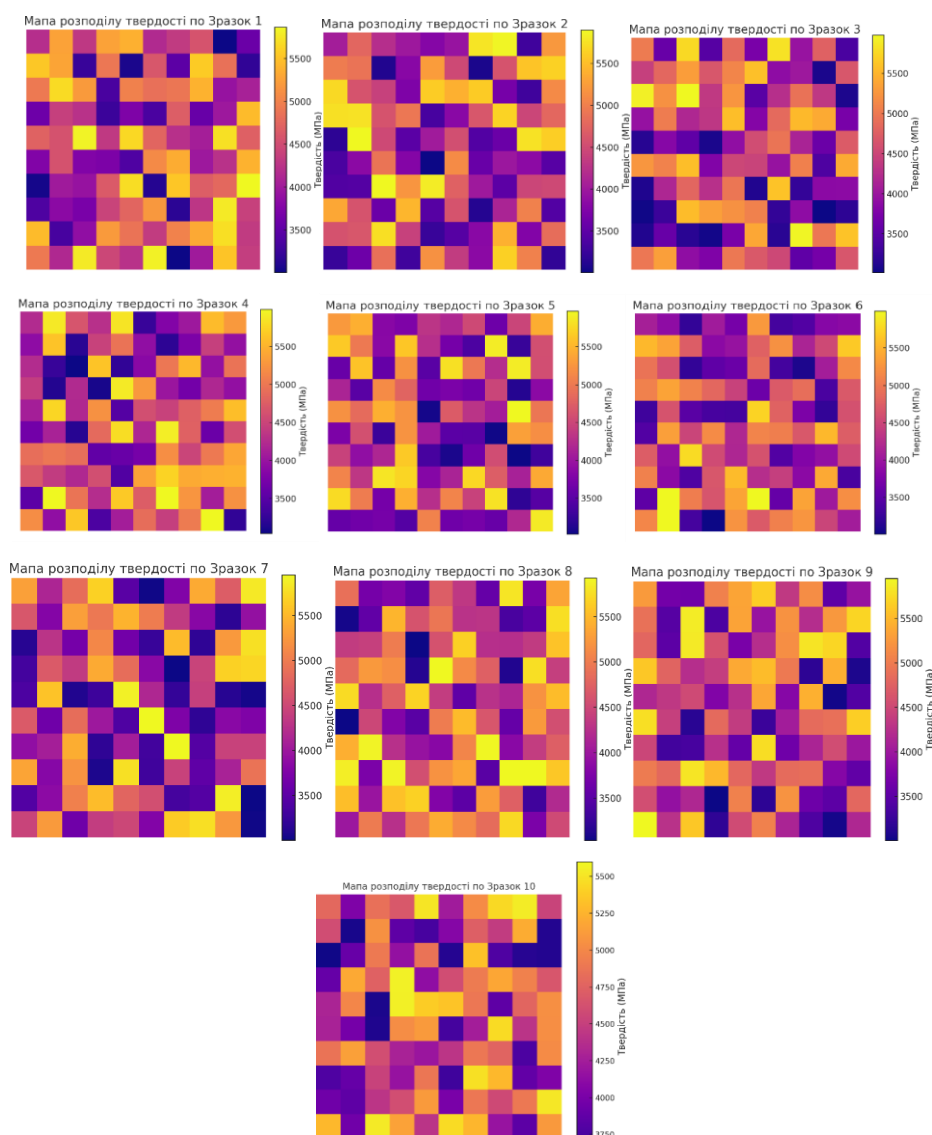


Рисунок А.10 – Карти розподілу твердості по дослідним зразкам

Таблиця А.11 — Характеристика порошкових дротів для електрошлакового наплавлення

Дріт	Компоненти та їх пропорції	Фізико-технічні характеристики	Ефективність	Економічні переваги
дріт ПП-Нп-А1	стрічка 0,5×12: 68 г ферохром (ФХ-800): 28,8 г (вартість: 250 грн/кг) алмаз/глина: 3,2 г (вартість: 500 грн/кг) загальна вага шихти: 32 г	діаметр дроту: $\varnothing=2,8$ мм коефіцієнт заповнення: $32\pm2\%$ твердість: HRC 42-45	підвищення зносостійкості завдяки ферохрому та використанню дрібнозернистої структури, забезпечення раціональної міцності покриття в умовах абразивного зношування	загальна вартість компонентів: 8,96 грн за 32 г низька вартість ферохрому забезпечує економічно вигідне виробництво
дріт ПП-Нп-А2	стрічка 0,5×12: 68 г ферохром (ФХ-800): 28,8 г (вартість: 250 грн/кг) АНФ-29: 3,2 г (вартість: 300 грн/кг) загальна вага шихти: 32 г	діаметр дроту: $\varnothing=2,8$ мм коефіцієнт заповнення: $32\pm2\%$ (отримано 30,9%) твердість: HRC 43-44	покращення зносостійкості та довговічності покриття завдяки стабільності складу	загальна вартість компонентів: 9,36 грн за 32 г АНФ-29 має доступну вартість, що сприяє зменшенню собівартості наплавлення
дріт ПП-Нп-А3	стрічка 0,5×12: 68 г високохромистий чавун: 28,8 г (вартість: 200 грн/кг) алмаз: 3,2 г (вартість: 500 грн/кг) загальна вага шихти: 32 г	діаметр дроту: $\varnothing=2,8$ мм коефіцієнт заповнення: $32\pm2\%$ (отримано 31,4%) твердість: HRC 44-45	висока твердість та зносостійкість завдяки високохромистому чавуну	загальна вартість компонентів: 8,96 грн за 32 г використання високохромистого чавуну оптимізує співвідношення вартості і ефективності

дріт ПП-Нп-А4	стрічка 0,5×12: 68 г високохромистий чавун: 28,8 г (вартість: 200 грн/кг) АНФ-29: 3,2 г (вартість: 300 грн/кг) загальна вага шихти: 32 г	діаметр дроту: $\varnothing=2,8$ мм коефіцієнт заповнення: $32\pm 2\%$ (отримано 31,8%) твердість: HRC 24-26	застосування для менш інтенсивних умов експлуатації	загальна вартість компонентів: 8,36 грн за 32 г. менша вартість складників забезпечує економічність у менш критичних умовах
дріт ПП-Нп-А5	хром: 20 г (вартість: 250 грн/кг) нікель: 10 г (вартість: 600 грн/кг) карбід ніобію (NbC): 10 г (вартість: 800 грн/кг) загальна вага шихти: 42	діаметр дроту: $\varnothing=2,8$ мм коефіцієнт заповнення: 40%	покращення твердості, термостійкості та корозійної стійкості завдяки нікелю та карбиду ніобію	загальна вартість компонентів: 22,6 грн за 42 г. нікель та NbC, хоча й дорожчі, забезпечують довготривалу економічну вигоду завдяки збільшенню терміну служби деталей.
дріт ПП-Нп-А6	CrC: 20 г (вартість: 300 грн/кг) графіт: 1,5 г (вартість: 150 грн/кг) Si кристалічний: 1,5 г (вартість: 200 грн/кг) Al ₂ O ₃ : 3,0 г (вартість: 250 грн/кг) загальна вага шихти: 26 г	діаметр дроту: $\varnothing=2,8$ мм коефіцієнт заповнення: 40%	висока термостійкість і стійкість до зношування завдяки використанню CrC та Al ₂ O ₃	загальна вартість компонентів: 9,68 грн за 26 г. низька вартість графіту та кристалічного Si зменшує загальну ціну виробництва

дріт ПП-Нп-А7	Fe порошок: 700 г (вартість: 50 грн/кг) порошок ZrO ₂ : 100 г (вартість: 1200 грн/кг) Діаметр дроту: $\varnothing=2,8$ мм	коефіцієнт заповнення: 40%	збільшення термостійкості та хімічної інертності завдяки ZrO ₂	загальна вартість компонентів: 92 грн за 800 г використання доступного Fe порошку дозволяє знижувати витрати
дріт ПП-Нп-А8	Cr: 25 г (вартість: 250 грн/кг) Mo: 10 г (вартість: 900 грн/кг) Al ₂ O ₃ : 5 г (вартість: 250 грн/кг) загальна вага шихти: 40 г	діаметр дроту: $\varnothing=3,0$ мм коефіцієнт заповнення: 38%	підвищення зносостійкості та довговічності в умовах високих температур	загальна вартість компонентів: 12,5 грн за 40 г. раціональне співвідношення вартості компонентів і результативності покриття
дріт ПП-Нп-А9	Ti: 15 г (вартість: 300 грн/кг) B: 5 г (вартість: 500 грн/кг) Al: 10 г (вартість: 200 грн/кг) загальна вага шихти: 30 г	діаметр дроту: $\varnothing=2,5$ мм коефіцієнт заповнення: 35%	покращення твердості та адгезії покриття	загальна вартість компонентів: 6,5 грн за 30 г. дешевші компоненти роблять цей дріт вигідним для стандартних умов експлуатації
ПП-Нп-А10	оболонка — стрічка 0,5 × 12 мм, 68 г шихта (= 32 г): Cr 16,43 %, Mn 1,16 %, Ni 12,15 %, SiC 5–7 %, Fe — решта	діаметр дроту: $\varnothing=2,8$ мм, коефіцієнт заповнення: 38-39%	висока зносостійкість і корозійна стійкість у трибокорових умовах; твердість покриття становить $\approx 45-52$ HRC	ефективність оцінюється за рахунок збільшення ресурсу та зниження витрат



(11) **147660**(19) **UA**(51) МПК
C23C 4/131 (2016.01)(21) Номер заявки: **u 2020 08115**(22) Дата подання заявки: **18.12.2020**(24) Дата, з якої є чинними
права інтелектуальної
власності: **03.06.2021**(46) Дата публікації відомостей
про державну реєстрацію
та номер Бюлетеня: **02.06.2021,
Бюл. № 22**

(72) Винахідники:

**Скобло Тамара Семенівна,
UA,
Нанка Олександр
Володимирович, UA,
Рибалко Іван Миколайович,
UA,
Сайчук Олександр
Васильович, UA,
Тіхонов Олександр
Всеволодович, UA,
Сатановський Євген
Абрамович, UA,
Олейник Олександр
Куприянович, UA,
Захаров Андрій Вадимович,
UA**

(73) Володілець:

**Скобло Тамара Семенівна,
вул. Кооперативна, 13/2, кв.
52, м. Харків-3, 61003, UA**

(54) Назва корисної моделі:

**СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ВІДНОВЛЮЮЧИХ
ПОКРИТТІВ ЇХ МОДИФІКУВАННЯМ МАЛОВИТРАТНОЮ ДОМІШКОЮ**

(57) Формула корисної моделі:

1. Спосіб підвищення якості та експлуатаційної стійкості відновлюючих покриттів, що включає модифікування покриттів зношених деталей методом електродугового наплавлення, який **відрізняється** тим, що як зміцнюючу модифікуючу домішку використовують природну речовину - бентонітову глину.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що використовують бентонітову глину, яка складається переважно з компонентів, мас. %: до 1,8 Fe; 0,3 K; 0,2 Ca; 0,08 S; 0,4 Mn; 55,0 Si; 33,0 Al; 0,4 Na; 0,3 Mg, та вводять таку домішку шляхом нанесення її на електрод в кількості 5-7 % від його частки.

(11) **147660**

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент)
Цей паперовий документ ідентичний за документарною інформацією та реквізитами електронному документу з електронним підписом уповноваженої особи Державного підприємства «Український інститут інтелектуальної власності». Паперовий документ містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами. Для доступу до електронного примірника цього документа з ідентифікатором 2992010621 необхідно: 1. Перейти за посиланням https://sis.ukrpatent.org. 2. Обрати пункт меню Сервіси – Отримати оригінал документу. 3. Вказати ідентифікатор електронного примірника цього документа та натиснути «Завантажити».
Уповноважена особа Укрпатенту 03.06.2021   І.Є. Матусевич



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **147660** (13) **U**
 (51) МПК
C23C 4/131 (2016.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2020 08115 (22) Дата подання заявки: 18.12.2020 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 03.06.2021 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 02.06.2021, Бюл.№ 22	(72) Винахідник(и): Скобло Тамара Семенівна (UA), Нанка Олександр Володимирович (UA), Рибалко Іван Миколайович (UA), Сайчук Олександр Васильович (UA), Тіхонов Олександр Всеволодович (UA), Сатановський Євген Абрамович (UA), Олейник Олександр Куприянович (UA), Захаров Андрій Вадимович (UA) (73) Володілець (володільці): Скобло Тамара Семенівна, вул. Кооперативна, 13/2, кв. 52, м. Харків-3, 61003 (UA)
---	---

(54) СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ВІДНОВЛЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ ЇХ МОДИФІКУВАННЯМ МАЛОВИТРАТНОЮ ДОМІШКОЮ

(57) Реферат:

Спосіб підвищення якості та експлуатаційної стійкості відновлюючих покриттів включає модифікування покриттів зношених деталей методом електродугового наплавлення. При цьому як зміцнюючу модифікуючу домішку використовують природну речовину - бентонітову глину.

UA 147660 U

UA 147660 U

Корисна модель належить до машинобудування, а саме - використання маловитратних технологій підвищення якості та експлуатаційної стійкості при нанесенні зміцнюючих відновлюючих покриттів з додатковим модифікуванням рідкого розчину при наплавленні.

- Особливо актуальним такий технологічний процес є для робочих органів машин сільськогосподарського призначення, який найчастіше використовують у спеціалізованих майстернях та фермерських господарствах, де є можливість і обладнання для наплавлення покриттів дротом або електродомом.

Для реалізації процесу відновлення з підвищеним комплексом властивостей використовують модифікуючі домішки зі вторинної сировини, які не потребують великих витрат.

- Відомо спосіб [1] відновлення деталей, схильних до підвищеного зносу, покриттям з наплавленням, що наноситься під шаром флюсу, який одержується від зольних відходів енергетичного виробництва після його переробки. Він є маловитратний та забезпечує підвищення необхідних властивостей тому, що він включає легуючі та модифікуючі домішки (V, Ti, Cu, Mn, Al, Si). Однак, таку технологію модифікування використовують для більш масивних деталей ніж робочі органи сільськогосподарських машин - культиваторних лап товщиною 5,5-6 мм. Це пов'язано з тим, що використання такого додаткового легування потребує підвищення та забезпечення стабільної температури рідкої ванни. Відновлення тонкої деталі призведе до проплавлення культиваторної лапи.

- Також відома модифікуюча домішка для підвищення якості і зносостійкості наплавленням смуг на культиваторну лапу для підвищення її властивостей та експлуатаційної стійкості [2]. Для цього при наплавленні використовують також вторинну сировину - детонаційну шихту від утилізації боеприпасів, які закінчили період зберігання. Така модифікуюча шихта забезпечує зниження температури рідкої ванни при наплавленні за рахунок того, що в її складі міститься алмазна фракція у вигляді нано- та дисперсних включень, які не розчиняються та є мікроохолоджувачами. Вони зменшують і зону термічного впливу та перехідну (до 50 %) і зберігаються в металі при наплавленні, а також відрізняються меншим рівнем напружень.

Недоліком у використанні є те, що ремонтні майстерні та сільськогосподарські підприємства не мають можливості стабільно одержувати таку вторинну сировину для модифікування, а також приладів для контролю її складу.

- Найбільш ефективною та близькою до рішення, що заявляється є використання природної речовини - бентонітової глини з дрібнодисперсною порошковою фракцією для обробки та формування металокерамічної структури [3] за рахунок взаємодії у спряженні. Її вплив на зміну структурного стану поверхні культиваторних лап при наплавленні буде теж сприяти підвищенню зносостійкості, особливо враховуючи і те, що компоненти та їх з'єднання у бентонітовій глині і в ґрунті, з яким працюють ці вироби, є близькими. При виборі такої природної речовини для модифікування виходили з того, що її домішка доступна до використання та вона включає підвищений вміст Si і Al і такі компоненти частково знаходяться у з'єднаннях з киснем (SiO_2 та Al_2O_3). У розглянутому прикладі хімічний склад бентонітової глини має, %: 1,65 Fe; 0,25 K; 0,15 Ca; 0,06 S; 0,2 Mn; 54,88 Si; 32,42 Al; 0,3 Na; 0,2 Mg.

- В основу корисної моделі поставлена задача додатковим введенням бентонітової глини при наплавленні підвищити якість (властивості) покриття, зносостійкість та суттєво знизити втрати на використання модифікуючих домішок.

- Поставлена задача вирішується у способі підвищення якості та експлуатаційної стійкості відновлюючих покриттів, що включає модифікування покриттів зношених деталей методом електродугового наплавлення, згідно з корисною моделлю як зміцнюючу модифікуючу домішку використовують природну речовину - бентонітову глину. При цьому використовують бентонітову глину, яка складається переважно з компонентів, мас. %: до 1,8 Fe; 0,3 K; 0,2 Ca; 0,08 S; 0,4 Mn; 55,0 Si; 33,0 Al; 0,4 Na; 0,3 Mg, та вводять таку домішку шляхом нанесення її на електрод в кількості 5-7 % від його частки.

- Враховуючи той факт, що найбільш ефективна модифікуюча доля такої домішки, яка складає 5-7 % від частки електроду буде дорівнювати, %: 0,10 Fe; 0,02 K; 0,01 Ca; 0,004 S; 0,012 Mn; 3,3 Si; 1,95 Al. При зменшенні частки введення в покриття ефект модифікування суттєво знижується, тому що не рівномірно подрібнюється карбідна фаза, а також зерно за розміром змінюється лише у локальних зонах. Збільшення частки домішки (>10-12 %) призводить до появи та зростанню складних неметалевих включень зі зниженню якості покриття. Одноразово має місце і неоднорідність мікротвердості.

На Фіг. 1 надається склад таких включень, в яких підвищений вміст Cr, Mn, Si та кисню. Одноразово виявлені в них C, AlO_3 , Ca. Такий розподіл компонентів виявлено методом термоелектронної емісії.

Для використання такої модифікуючої домішки її висушували при $t=240^{\circ}\text{C}$, а потім подрібнювали у кульовому млині до розміру зерен 40-50мкм на протязі 2 годин. Після цього до порошку додавали клей, перемішували та наносили на електрод, висушували при $t=180^{\circ}\text{C}$, а потім формували покриття наплавленням.

5 Встановлено, що такий технологічний процес забезпечує зміну структуроутворення. Карбідна фаза подрібнюється, вона розподіляється більш однорідно та доля її зростає на 30 %, зменшується перехідна зона термічного впливу на 40 та 30 % відповідно і ступень проплавлення тонкостінної культиваторної лапи становить лише 60 %, а без домішки глини є випадки повного її пошкодження.

10 При такому модифікуванні суттєво змінюється і мікротвердість. Встановлено, що незалежно від напрямку вимірювань - поперечному або повздовжньому при оптимальному модифікуванні мікротвердість найбільш однорідна та змінюється у покритті з H-50-671,6 (матриці) і до H-50-1193,9 (карбідів), а без модифікування з H-50-686,1 до H-50-1283,3 відповідно. Такий високий рівень змін мікротвердості у вихідному стані покриття (без модифікування) відповідає і
15 перехідній зоні та пов'язаний з тим, що більша частка грубих включень карбідної фази в цьому варіанті характеризує зміну показників, а також залежить від рівня напружень. Однак загальна доля подрібнених карбідних включень збільшується при модифікуванні глиною (фіг. 2). Частка збільшення подрібнених включень досягає 20 % за рахунок зниження температури рідкої ванни при нанесенні покриття з модифікуючою домішкою. Аналіз впливу введення домішки у
20 зміцненому відновленому шарі оцінювали згідно локального розподілу компонентів, що входили до модифікуючої домішки та електроду Т-620 (хімічний склад, %: 3,0 С; 2,2 Si; 1,2 Mn; 22,5 Cr; 0,7 Ti; 0,8 В; 0,03 S).

Встановлено (фіг. 3), що вуглець, Ti, Ca, Al розподіляються достатньо однорідно, Cr - виявлено тільки в фазах структурно вільних карбідів, а у матричній - Mo, Mn. Найбільша частка
25 Si концентрується в матричній фазі, а також цей компонент розподіляється у більш масивних включеннях карбідів хрому, поділяє їх на окремі фрагменти і вони стають більш тонкими. Залізо відсутнє в карбідах хрому, тому їх можна віднести: до масивних включень Cr_7C_3 (евтектичні), а матричні до Cr_{23}C_6 . Розподіл кисню частково неоднорідний але, як показано локальним спектральним мікроаналізом, його частка не перевищує 15,98 %.

30 Для використання такої модифікуючої домішки було також необхідним встановити міцність з'єднання покриття з основним металом. Оцінку проводили за методом вимірювання мікротвердості (Фіг. 4), де було показано, що навантаження навіть до 1 кг на індентор не сприяло пошкодженням. Це можливо пояснити тим, що при модифікуванні знижуються і напруження у граничному перехідному шарі покриття.

35

Таблиця

Випробування на зносостійкість в умовах абразивного середовища

№ з/п	Варіант зміцнення	Коефіцієнт зносу
1	Вихідний матеріал культиваторної лапи сталь 65Г	1,0
4	Наплавлення електродом Т-620	0,62
5	Наплавлення електродом Т-620 з додатковим веденням бентонітової глини	0,45

Виходячи з одержаних результатів модифікування відновлюючого покриття природним компонентом - бентонітовою глиною, можливо підвищити якість (властивості) покриття, зносостійкість та суттєво знизити витрати на використання. Така шихта є доступною до
40 використання малими підприємствами сільгоспоб'єднаннями при відновленні деталей, особливо працюючих з ґрунтом.

Джерела інформації:

1. Патент України № 13760 UA C23C 2/30. Флюс для нанесення покриття / Рідний Р.В., Скобло Т.С., Коломієць В.В. та інш. // 11.07.2016, бюл. № 13

45 2. Патент України №130824 UA A01B 23/00, A01B 35/00. Спосіб підвищення зносостійкості стрілкової лапи культиватора / Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Рибалко І.М. та інш. // 17.04.2006, Бюл. № 4.

3. Patent No.: 7,304,020 BI US B22C 23/02. Nano-particle metal treatment composition for creating a ceramic-metal layer / Dmitry Tananko, Olena Lyubchenko, Oleksandr Oliinik et al. // Dec. 4, 2007.

50

UA 147660 U

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

1. Спосіб підвищення якості та експлуатаційної стійкості відновлюючих покриттів, що включає модифікування покриттів зношених деталей методом електродугового наплавлення, який **відрізняється** тим, що як зміцнюючу модифікуючу домішку використовують природну речовину - бентонітову глину.
2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що використовують бентонітову глину, яка складається переважно з компонентів, мас. %: до 1,8 Fe; 0,3 K; 0,2 Ca; 0,08 S; 0,4 Mn; 55,0 Si; 33,0 Al; 0,4 Na; 0,3 Mg, та вводять таку домішку шляхом нанесення її на електрод в кількості 5-7 % від його частки.

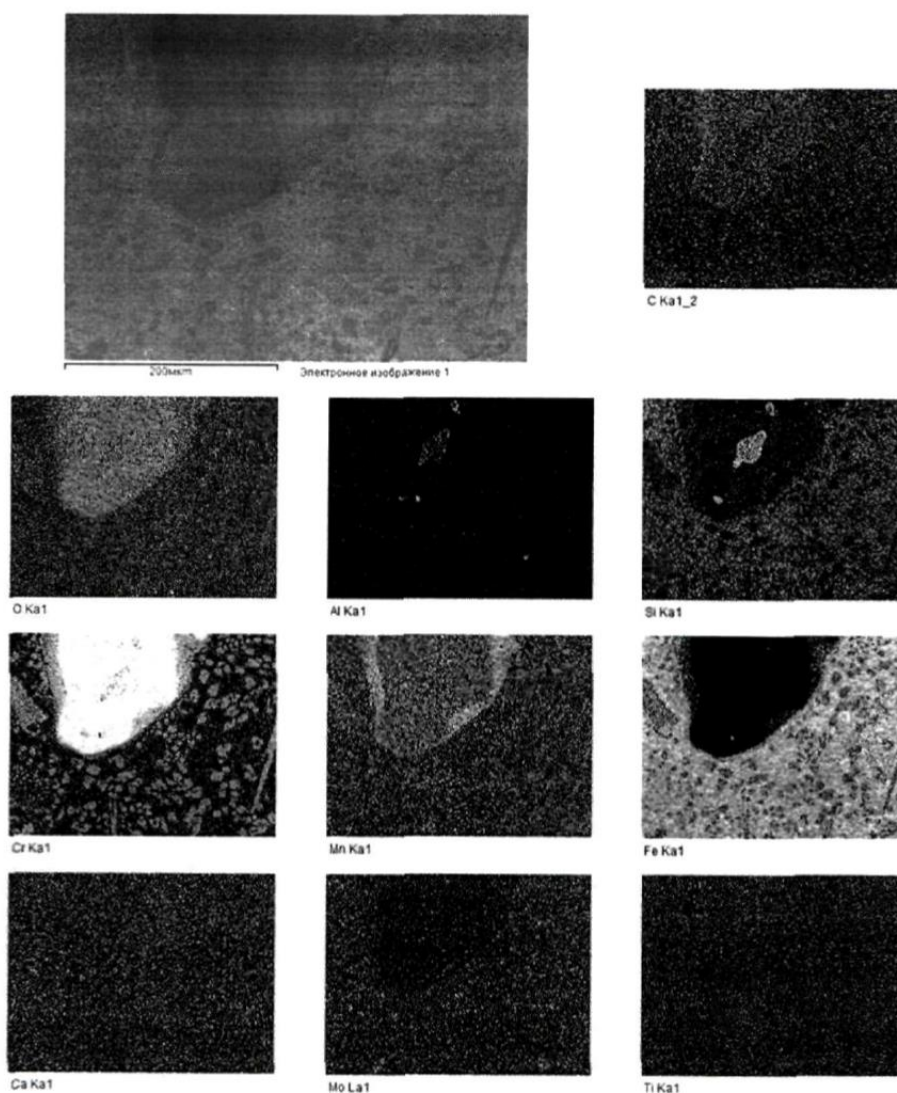
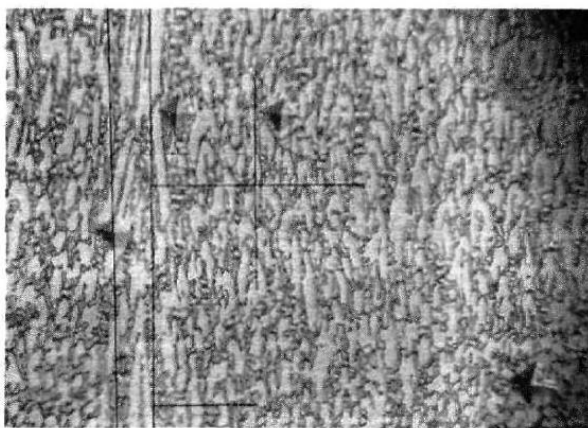


Fig. 1

UA 147660 U

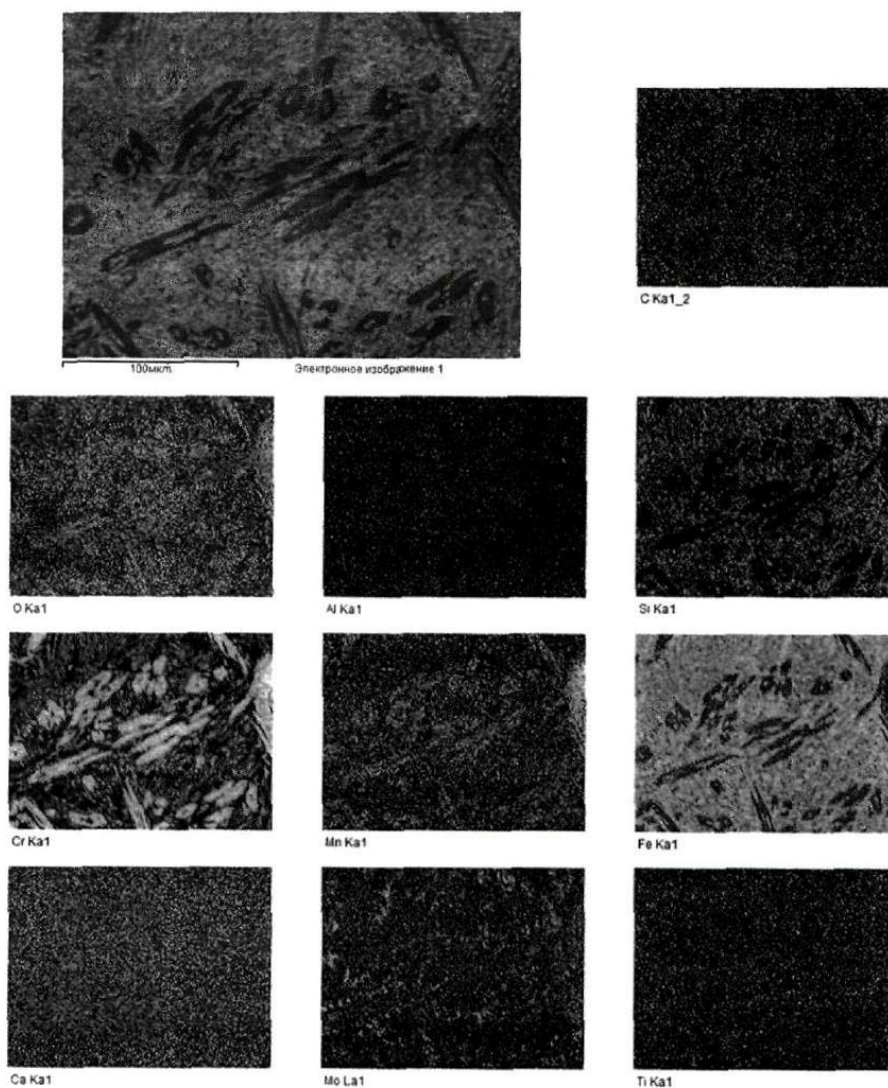


Фиг. 2



Фиг. 3

UA 147660 U



Фіг. 4

Комп'ютерна верстка В. Юкін

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



(11) **144463**(19) **UA**

(51) МПК (2020.01)
C01B 32/25 (2017.01)
B82B 3/00
B01J 3/08 (2006.01)

(21) Номер заявки: **u 2019 05788**(22) Дата подання заявки: **27.05.2019**(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **13.10.2020**(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: **12.10.2020, Бюл. № 19**

(72) Винахідники:

Скобло Тамара Семенівна, UA,
Сідашенко Олександр Іванович, UA,
Кусков Юрій Михайлович, UA,
Романюк Світлана Павлівна, UA,
Сайчук Олександр Васильович, UA,
Автухов Анатолій Кузьмич, UA,
Марков Олександр Вікторович, UA,
Таран Валерій Семенович, UA,
Таран Антон Валерійович, UA,
Захаров Андрій Вадимович, UA

(73) Володілець:

Скобло Тамара Семенівна,
 вул. Кооперативна, 13/2, кв. 52, м. Харків-3, 61003, UA

(54) Назва корисної моделі:

СКЛАД ДЕТОНАЦІЙНОЇ ШИХТИ З АЛМАЗАМИ ДЛЯ МОДИФІКУВАННЯ

(57) Формула корисної моделі:

1. Склад детонаційної шихти з нано- та дисперсними алмазами, одержаний із вторинної сировини, який відрізняється тим, що вторинна сировина з алмазами одержана від утилізації боєприпасів, формує конгломерати зерен з різними компонентами: з модифікуючими домішками - Mg, Al, Si, Ti, Ba, легуючими домішками - Cu, леткими - Cl, K, Na, O₂, з низькою температурою плавлення - Zn, Pb, та алмази - C (вуглець), які відділяються при їх використанні в оптимальній кількості при зміцненні та відновленні покриттів деталей наплавленням.

2. Склад за п. 1, який відрізняється тим, що при відновленні деталей з використанням металургійних процесів наплавлення оптимальна частка такої домішки, відносно електрода або дроту, має бути на рівні 5-7 %, та при цьому середня частка компонентів, додатково введена у рідкий розчин, складає, %: 0,005 - Na, 0,21 - Mg, 0,7 - Al, 0,25 - Si, 0,002 - S, 0,02 - P, 0,36 - Ba, 0,045 - Ca, 0,46 - C, 0,45 - Cl, 0,013 - K, 0,06 - Fe, 2,59 - O₂, 0,07 - Ti, 0,26 - Cu, 0,15 - Zn, 0,29 - Pb.

(11) **144463**

Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент)
Цей паперовий документ ідентичний за документарною інформацією та реквізитами електронному документу з електронним підписом уповноваженої особи Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України. Паперовий документ містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами. Для доступу до електронного примірника цього документа з ідентифікатором 1729081020 необхідно: 1. Перейти за посиланням https://sis.ukrpatent.org. 2. Обрати пункт меню Сервіси – Отримати оригінал документу. 3. Вказати ідентифікатор електронного примірника цього документа та натиснути «Завантажити». Уповноважена особа Укрпатенту 13.10.2020   I.Є. Матусевич



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **144463** (13) **U**
 (51) МПК (2020.01)
C01B 32/25 (2017.01)
B82B 3/00
B01J 3/08 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ
 ЕКОНОМІКИ, ТОРГІВЛІ ТА
 СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2019 05788 (22) Дата подання заявки: 27.05.2019 (24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 13.10.2020 (46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 12.10.2020, Бюл.№ 19	(72) Винахідник(и): Скобло Тамара Семенівна (UA), Сідашенко Олександр Іванович (UA), Кусков Юрій Михайлович (UA), Романюк Світлана Павлівна (UA), Сайчук Олександр Васильович (UA), Автухов Анатолій Кузьмич (UA), Марков Олександр Вікторович (UA), Таран Валерій Семенович (UA), Таран Антон Валерійович (UA), Захаров Андрій Вадимович (UA) (73) Володілець (володільці): Скобло Тамара Семенівна, вул. Кооперативна, 13/2, кв. 52, м. Харків-3, 61003 (UA)
---	--

(54) СКЛАД ДЕТОНАЦІЙНОЇ ШИХТИ З АЛМАЗАМИ ДЛЯ МОДИФІКУВАННЯ

(57) Реферат:

Склад детонаційної шихти з нано- та дисперсними алмазами, одержаний зі вторинної сировини, одержаної від утилізації боеприпасів, формує конгломерати зерен з різними компонентами: з модифікуючими домішками - Mg, Al, Si, Ti, Ba, легуючими домішками - Cu, леткими - Cl, K, Na, O₂, з низькою температурою плавлення - Zn, Pb та алмази - C (вуглець), які відділяються при їх використанні в оптимальній кількості при зміцненні та відновленні покриттів деталей наплавленням. При відновленні деталей з використанням металургійних процесів наплавлення оптимальна частка такої домішки, відносно електрода або дроту, має бути на рівні 5-7 %. Середня частка компонентів, додатково введена у рідкий розчин, складає, %: 0,005 - Na, 0,21 - Mg, 0,7 - Al, 0,25 - Si, 0,002 - S, 0,02 - P, 0,36 - Ba, 0,045 - Ca, 0,46 - C, 0,45 - Cl, 0,013 - K, 0,06 - Fe, 2,59 - O₂, 0,07 - Ti, 0,26 - Cu, 0,15 - Zn, 0,29 - Pb.

UA 144463 U

Корисна модель належить до металургії та машинобудування, зокрема стосується модифікування рідкого розчину при зміцненні та відновленні деталей наплавленням. Встановити за хімічним складом вторинну детонаційну шихту від утилізації боеприпасів є важливим, бо це буде основою для вибору її долі та ефективного використання для підвищення експлуатаційної стійкості деталей.

Відоме підвищення властивостей модифікованого металу при використанні додаткового введення домішок інших компонентів на алмазні включення, наприклад метану (CH_4) та аміаку (NH_3) [1], які дозволяють інтенсифікувати процес перенесення вуглецю в умовах великих навантажень та температур за рахунок газів, що транспортуються при оптимальній температурі обробки до 2000 °C.

Використання цього методу модифікування алмазів при детонації боеприпасів не можливо тому, що процес відбувається при $t=2000-3000$ °C, а наплавлення - при 1600 °C. Крім того, такі з'єднання в зоні розташування алмазів не виявлені статистичними результатами мікрорентгеноспектрального методу у зернах шихти.

Також відомий спосіб [2] спікання алмазів під тиском, який відбувається в присутності SiO_2 (скло), що забезпечує інтенсивне тепловідведення при $t=1500-1600$ °C та це сприяє підвищенню їх твердості. Згідно одержаних авторами даних такого способу, підвищення температури і часу витримки будуть призводити до швидкої графітизації алмазів.

Однак, при високому, багатохвильовому тиску одержання детонаційним методом алмазів вони за складом будуть стабільними і підвищувати при введенні в метал його твердість та міцність. Недоліком цього відомого методу є і те, що при широкому температурному, а також нерівномірному тиску не можливо корегувати такий технологічний процес.

Відомий склад детонаційних алмазів [3], які включають леткі, низькоплавкі компоненти та домішки, що не відділяються при наплавленні. Це 75-90 % алмазів; 0,8-1,2 % водню; 1,5-4,5 % азоту; 4,3-22,7 % кисню. При цьому, азот є типічною домішкою природного алмазу, а наявність кисню можливо пояснити методами оцінки та одержання цього компонента, або параметрами детонації.

Оскільки новому випадку детонації, що розглядається, використовується зовсім інша вихідна шихта та параметри одержання алмазної фракції, то і компоненти, які вона містить, будуть мати інший елементний склад.

Найбільш близьким аналогом хімічного складу алмазної детонаційної шихти (АШ) є [4]. Він містить домішки, що раніше входили до складу металу зривної камери (контейнера) - Fe, а також компоненти, що ініціюють процес детонації, та Cu, Pb.

Недоліком цього складу є відсутність вихідного матеріалу, який використовують для одержання алмазної шихти, що суттєво змінює її склад. Крім того, не наведено кількісний склад цих домішок, а також леткі компоненти.

В основу корисної моделі поставлена задача оцінити якісний та кількісний склад компонентів шихти при їх введенні у рідку ванну відновлюючим наплавленням.

Поставлена задача вирішується тим, що склад детонаційної шихти з нано- та дисперсними алмазами, одержаний зі вторинної сировини, згідно з корисною моделлю, вторинна сировина з алмазами, одержана від утилізації боеприпасів, формує конгломерати зерен з різними компонентами: з модифікуючими домішками - Mg, Al, Si, Ti, Ba, легуючими домішками - Cu, леткими - Cl, K, Na, O_2 , з низькою температурою плавлення - Zn, Pb та алмази - C (вуглець), які відділяються при їх використанні в оптимальній кількості при зміцненні та відновленні покриттів деталей наплавленням.

При відновленні деталей з використанням металургійних процесів наплавлення оптимальна частка такої домішки, відносно електрода або дроту, має бути на рівні 5-7 % та при цьому середня частка компонентів, додатково введена у рідкий розчин, складає, %: 0,005-Na, 0,21-Mg, 0,7 - Al, 0,25-Si, 0,002-S, 0,02-P, 0,36-Ba, 0,045 - Ca, 0,46 - C, 0,45 - Cl, 0,013-K, 0,06-Fe, 2,59 - O_2 , 0,07 - Ti, 0,26-Cu, 0,15-Zn, 0,29-Pb.

При утилізації боеприпасів використовували бойові 12,7 мм та освітлюючі (сигнальні) 15 мм патрони.

Хімічний склад основної частки гільзової сталі патронів 12,7 мм наведений в таблиці 1. Це холоднокатана низьковуглецева сталь. Частка таких бойових патронів складає 99 %, а 1 % - це освітлюючі, та вони виготовлені з алюмінієвого сплаву. Детонаційною речовиною у бронебійних патронів використовується їх порох (марка 1/7) з розміром зерен 0,15-3,5 мм, а у 15 мм - освітлюючих додатково входить магній, (компонент відомий як модифікатор металу), що створює піроефект при горінні, а також введені у рідкий розчин при плавленні.

Таблиця 1

Хімічний склад гільзової сталі

Компоненти	Біметал		Холоднокатана сталь	
Вуглець	0,12-0,20	0,11	0,11	0,16-0,22
Марганець	0,35-0,60	0,35-0,90	0,35-0,55	0,25-0,50
Хром	0,15	0,15	0,15	0,20
Нікель	0,30	0,30	0,30	0,20
Домішки (не більше):				
Кремній	0,08	0,08	0,06	0,13
Мідь	0,20	0,20	0,20	0,20
Сірка	0,04	0,04	0,04	0,03
Фосфор	0,035	0,035	0,035	0,025

- Такий склад вихідної шихти та спосіб її пошарової детонації у контейнері сприяють одержанню алмазів різного розміру, що формуються як окремі зерна (Фіг. 1,а та Фіг. 2), так і - з плівковими з'єднаннями різних компонентів (Фіг. 1,б). Конгломерати складаються з різних зерен, які слабко або сильно з'єднані між собою (табл. 2). При їх введенні у рідкий розчин додатково забезпечується ефект модифікування відновлюючих покриттів - Mg, Al, Si, Ti, Ba; легування - Cu. Леткі компоненти - Cl, K, Na і такі, що мають низьку температуру плавлення, повністю випарюються, а кисень частково залишається в процесі нанесення покриття (створює вторинні захисні плівки при експлуатації деталей).

Таблиця 2

Вміст компонентів в зерні 3 (Фіг. 2)

Елемент	Ум. конц.	Ваговий %	Атомний %
C	8,66	24,17	37,30
O	10,82	37,66	43,64
Mg	1,35	5,34	4,07
Al	2,53	9,74	6,69
Cl	2,43	9,83	5,14
Cu	1,12	4,72	1,38
Zn	1,07	4,55	1,29
Ba	0,64	2,83	0,38
Pb	0,26	1,15	0,10
Всього		100,00	

- Як приклад наведено ефективне використання такої вторинної сировини від утилізації боеприпасів при модифікуванні відновлюючого наплавленням зношеного робочого шару. Встановлено, що частка такої домішки при модифікуванні рідкого розчину металу не повинна перевищувати 5-7 %. При меншій частці її введення ефект слабкіший, а при перевищенні - знижується модифікуючий ефект від використання такої домішки тому, що підвищується частка в суміші магнію (створює піроефект), а також летких та з низькою температурою плавлення компонентів. Це призводить до засмічення покриття цими компонентами та сприяє пороутворенню, формуванню неметалевих включень і зниженню властивостей відновленого шару. Крім того, підвищена частка модифікуючої домішки призводить до осідання алмазної фракції на границю розподілу покриття - основний метал, суттєвому зниженню температури рідкої ванни та недостатньої якості з'єднання покриття

- При оптимальній частці модифікуючої домішки 5-7 % середній локальний вміст компонентів, що вводиться з шихтою в метал при наплавленні, не перевищує %: 0,005-Na, 0,21-Mg, 0,7 - Al, 0,25-Si, 0,002-S, 0,02 - P, 0,36 - Ba, 0,045 - Ca, 0,46 - C, 0,45 - Cl, 0,013-K, 0,06-Fe, 2,59-O₂, 0,07-Ti, 0,26-Cu, 0,15-Zn, 0,29-Pb.

- Такий метод детонаційного одержання складу модифікуючої домішки базується на хвильовому впливі деформації і температури формування шихти та сприяє подрібненню і тих алмазних включень, які знаходяться в середині зерен, з покриттями різними кисневими

сполуками. В таких зернах за результатами аналізів доля вуглецю (алмазів) змінюється від 7 до 24 %. Це залежить ще і від товщини плівкового їх покриття (Фіг. 2), які не дозволяють надійно оцінити тільки вміст алмазної фракції, згідно з методом локального мікрорентгеноспектрального аналізу. При використанні такого модифікування не виявили вміст летких та низькоплавких компонентів, що свідчить про виключення необхідності додаткового очищення шихти від таких домішок.

Розглянуто як приклад наявність компонентів, які можуть з'явитися у наплавленому шарі при використанні такої детонаційної шихти при модифікуванні. Встановлено, що при порівняльній однакових методів оцінювання вмісту компонентів при наплавленні шарів з модифікуючими домішками та без них лише незначно підвищуються вони в деяких локальних зонах модифікованих покриттів %: до 0,06 - Al; до 0,18-Si; до 0,09 - Cu; до 0,14 - Ti. Таке модифікування Al, Si, Ti рідкого розчину зменшує розмір зерен на 15-20 % та формує хвилясту перехідну зону зчеплення покриття-основа, яка має підвищену міцність.

В локальних зонах осідання алмазів на границі сплавлення покриття з основою виявлено підвищення долі вуглецю на 20 % та наявність кисню до 0,9-1,0 % при перевищенні введеної домішки до 10 % від маси дроту.

Таким чином, встановлено, що використання такої вихідної детонаційної шихти з алмазами для модифікування рідкого розчину не потребує додаткового очищення від шкідливих домішок. Вони при наплавленні відділяються, а деякі з них додатково ще і модифікують метал покриття (Mg, Ca, Ba, Ti, Si, Al).

Надається якісний і кількісний склад та частка домішок детонаційної шихти з алмазами, одержаних від утилізації боеприпасів для модифікування робочого шару при відновленні деталей наплавленням, що не потребує додаткового її очищення та є ефективним при оптимальній частці домішки на рівні 5-7 % від частки металу електрода або дроту. Такий склад шихти має і модифікуючий ефект, який зменшує зерно на 15-20 % та формує міцну хвилясту зону зчеплення: відновлений шар - основний метал деталі.

Джерела інформації:

1. Senyut V. Polycrystalline materials based on modified ultradispersed diamond / V. Senyut // Materials and coatings for extreme performances: Investigations, applications, ecologically safe technologies for their production and utilization: proc/ of the second international conference, Katsiveli-town, Crimea, Ukraine, 16-20 September 2002. - Kiev, 2002. - P. 336-337.

2. Алмазосодержащий материал на основе порошков детонационного синтеза /В.Б. Шипило [и др.] // Порошковая металлургия: сб. науч. ст. - Минск, 1997. - № 20. - С. 61-63.

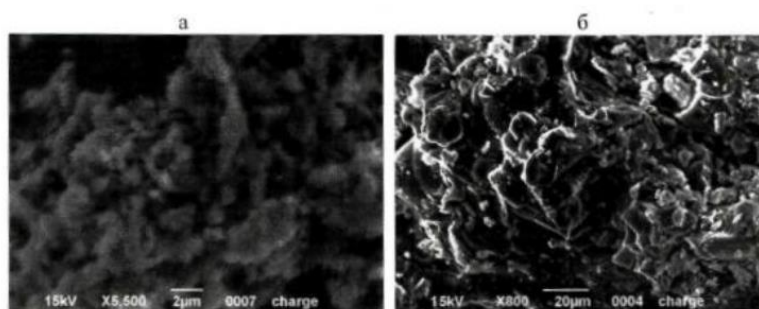
3. Patent № 5861349 US, B01J3/06, C01B31/06 Synthetic diamond-containing material and method of obtaining it from /A.L. Vereschagin, E.A. Petrov, G.V. Sakovich et al. Puble 19.01.99/

4. К вопросу об элементном составе и кристаллохимических параметрах детонационных наноалмазов /В.Ю. Долматов //Сверхтвердые материалы. - 2009. - № 3. - С. 26-33.

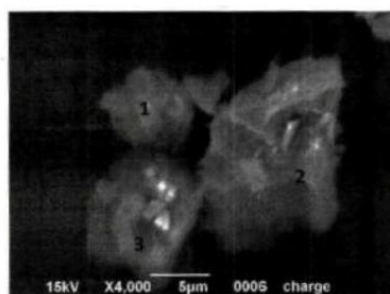
ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

1. Склад детонаційної шихти з нано- та дисперсними алмазами, одержаний із вторинної сировини, який **відрізняється** тим, що вторинна сировина з алмазами одержана від утилізації боеприпасів, формує конгломерати зерен з різними компонентами: з модифікуючими домішками - Mg, Al, Si, Ti, Ba, легуючими домішками - Cu, леткими - Cl, K, Na, O₂, з низькою температурою плавлення - Zn, Pb, та алмази - C (вуглець), які відділяються при їх використанні в оптимальній кількості при зміцненні та відновленні покриттів деталей наплавленням.

2. Склад за п. 1, який **відрізняється** тим, що при відновленні деталей з використанням металургійних процесів наплавлення оптимальна частка такої домішки, відносно електрода або дроту, має бути на рівні 5-7 %, та при цьому середня частка компонентів, додатково введена у рідкий розчин, складає, %: 0,005 - Na, 0,21 - Mg, 0,7 - Al, 0,25 - Si, 0,002 - S, 0,02 - P, 0,36 - Ba, 0,045 - Ca, 0,46 - C, 0,45 - Cl, 0,013 - K, 0,06 - Fe, 2,59 - O₂, 0,07 - Ti, 0,26 - Cu, 0,15 - Zn, 0,29 - Pb.



Фіг. 1



Фіг. 2

Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України,
вул. М. Грушевського, 12/2, м. Київ, 01008, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



А К Т

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник Фермерське господарство «КАЛИНОВЕ 7»
(найменування організації)

Приходько Микола Олексійович
(П.І.Б. керівника організації)

Цим актом підтверджується, що результати роботи «Проведення експериментальних досліджень для промислових випробувань нової технології зміцнення культиваторних стрілчастих лап» № держресстрації 0121U111046, яку виконано на кафедрі сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні імені О.І. Сідашенка.
Вартість НДР згідно договору № 4/4-2021 становить 10000.00 (десять тисяч гривень. 00 коп.)
(цифрами та прописом)

Термін виконання: з 12 травня 2021 року по 30 вересня 2022 року
впроваджені в Фермерське господарство «КАЛИНОВЕ 7»
(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів нова технологія зміцнення робочих органів - культиваторних лап

2. Характеристика масштабу впровадження партія культиваторних лап

3. Форма впровадження: Технологія наплавлення зміцнюючих валиків електродом Т-620 і додатковим модифікуванням бентонітовою глиною

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: розроблено спосіб зміцнення культиваторних лап на основі аналізу їх зношування та деформації при експлуатації, що дозволяє знизити схильність до зношування.

5. Дослідно-промислова перевірка партія зміцнених культиваторних лап.
(вказати номер і дату актів випробувань)

Фермерське господарство «КАЛИНОВЕ 7», червень - вересень 2022 року
(найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:

- в промислове виробництво технологічний процес зміцнення культиваторних лап нанесенням валиків згідно розробленої схеми й технології.
(участок, цех и, процес)

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Керівник НДР

Андрій ЗАХАРОВ
«06» вересня 2022 р.

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Головний інженер «КАЛИНОВЕ 7»

Микола ПРИХОДЬКО
«06» вересня 2022 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ПОРОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи ДБТУ


Валерій МИХАЙЛОВ
«05» вересня 2022 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Голова ФГ «КАЛИНОВЕ 7»

Микола ПРИХОДЬКО
«05» вересня 2022 р.

А К Т

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У ВИРОБНИЦТВО

Замовник Фермерське господарство «КАЛИНОВЕ 7»

(найменування організації)

Приходько Микола Олексійович

(П.І.Б. керівника організації)

Цим актом підтверджується, що результати роботи «Проведення експериментальних досліджень для промислових випробувань нової технології зміцнення культиваторних стрілочастих лап» № держресстрації 0121U111046, яку виконано на кафедрі сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні імені О.І. Сідашенка.

Термін виконання: з 12 травня 2021 року по 30 вересня 2022 року

впроваджені в Фермерське господарство «КАЛИНОВЕ 7»

(найменування підприємства, де здійснювалось впровадження)

1. Вид впроваджених результатів нова технологія зміцнення робочих органів – культиваторних лап.

2. Характеристика масштабу впровадження партія культиваторних лап

(унікальне, одиначне, партія, масове, серійне)

3. Форма впровадження: розробка технології модифікування металу з додаванням модифікуючих домішок, для створення нового складу зміцнюючого покриття та технологія його одержання.

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: отримано результати експериментальних досліджень, покращення зносостійкості наплавлених поверхонь, зменшення кількості дефектів в перехідній зоні та витрат на відновлення культиваторних стрілочастих лап.

5. Дослідно-промислова перевірка партія зміцнених культиваторних лап.

(вказати номер і дату актів випробувань,

Фермерське господарство «КАЛИНОВЕ 7», серпень - вересень 2022 року

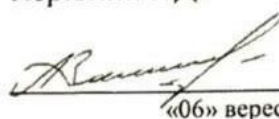
найменування підприємства, період)

6. Впроваджені:

- в промислове виробництво технологічний процес зміцнення культиваторних лап згідно розробленої схеми й технології.

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Керівник НДР


Андрій ЗАХАРОВ
«06» вересня 2022 р.

Виконавець роботи


Іван РИБАЛКО
«05» вересня 2022 р.

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Голова ФГ «КАЛИНОВЕ 7»


Микола ПРИХОДЬКО
«05» вересня 2022 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи ДБТУ

Валерій МИХАЙЛОВ

«15» листопада 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Шляхоремонтне підприємство «ПІВДЕНЬ»

Евгеній ЗУБРИЛІН

«15» листопада 2024 р.

А К Т

ВПРОВАДЖЕННЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ У
ВИРОБНИЦТВО

Замовник Товариство з обмеженою відповідальністю «Шляхоремонтне підприємство «ПІВДЕНЬ», в особі директора Зубриліна Євгенія Сергійовича,
(П.І.Б. керівника організації)

Цим актом підтверджується, що результати роботи, яку виконано на тему «Дослідження закономірностей зносу та розробка способів відновлення різців дорожніх фрез та робочих елементів ґрунтообробних знарядь» ДОГОВІР № 39-23-24 Д, Державний реєстраційний номер: 0123U104561

на кафедрі сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні ім. О.І. Сідашенка Державного біотехнологічного університету, вартістю послуг з ПДВ складає 8400,00 грн (вісім тисяч чотириста грн 00 коп.)

яка виконувалася з «24» жовтня 2023 р. по «15» листопада 2024 р.

впроваджені Товариство з обмеженою відповідальністю «Шляхоремонтне підприємство «ПІВДЕНЬ»

1. Вид впроваджених результатів спосіб, технологічне оснащення, виробництво та експлуатація виробів.

(експлуатація виробу, роботи, технології; виробництво виробу, роботи, технології, функціонування систем)

2. Характеристика масштабу впровадження одиначне, партія.

3. Форма впровадження:

Методика (метод) відновлення дорожніх фрез та робочих елементів ґрунтообробних знарядь лемішей, обладнання.

4. Новизна результатів науково-дослідних робіт: якісно нові

5. Дослідно-промислова перевірка Товариство з обмеженою відповідальністю «Шляхоремонтне підприємство «ПІВДЕНЬ»», 1.04.2024р- 15.10.2024р.

6. Впроваджені:

- в промислове виробництво участок шляхо-ремонтний

- в проектні роботи ні

7. Річний економічний ефект

—

8. Соціальний і науково-технічний ефект економія ресурсів, легуючих елементів, використання вторинної сировини.

ВІД ВИКОНАВЦЯ

Науковий керівник теми

Олександр ТІХОНОВ

«15» листопада 2024 р.

Відповідальний виконавець

Іван РИБАЛКО

Виконавець

Андрій ЗАХАРОВ

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Директор ТОВ «Шляхоремонтне підприємство «ПІВДЕНЬ»

Євгеній ЗУБРИЛІН

«15» листопада 2024 р.



ОРИЄНТОВАНИЙ РІЧНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОЗРОБОК

1. ВІД ВІДНОВЛЕННЯ РІЗЦІВ ДОРОЖНІХ ФРЕЗ

Розрахунки економічної ефективності відновлення корпусу різця дорожніх фрез наведені ТОВ «Шляхоремонтного підприємства «ПІВДЕНЬ» Харківського району Харківської області на якому розроблений спосіб прийнята для впровадження.

Очікуваний економічну ефективність від впровадження розробленої технології відновлення зношеної деталі визначається по формулі:

$$E_e = \left(\frac{C_n}{P_n} - \frac{C_v - C_{ост}^B}{P_v} \right) P_v, \quad (1)$$

де E_e – економічна ефективність від відновлення деталей, грн.; $C_n > C_v$ – ціна нових і відновлених деталей, грн.; P_n, P_v – наробіток нової й відновленої деталі, мото-годин; , $C_{ост}^B$ – залишкова вартість після експлуатації нових і відновлених деталей, грн.

По даним ТОВ «Украгрозапчасть» середня ціна одного нового різця дорожньої фрези, становить 170 грн.

Для визначення ціни відновленої деталі необхідно здійснити розрахунок собівартості її відновлення.

Собівартість відновлення різця дорожньої фрези визначається по формулі:

$$C_v = 3_{п} + C_m + C_{из} + O_{пу}, \quad (2)$$

де $3_{п}$ – заробітна плата (основна й додаткова) виробничим робітником з нарахуваннями, грн.; C_m – вартість основних і допоміжних матеріалів, застосовуваних при відновленні, грн.; $C_{из}$ – вартість зношеної деталі (вартість

відносних показниках) в 2,8 рази, імпортих в 4,4 рази.

Очікувана економічна ефективність відновлення й зміцнення одного різця дорожньої фрези складе:

$$E_v = 737 \times 0,8 - 359 = 230,6 \text{ грн.}$$

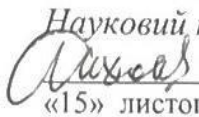
Беручи до уваги значні кількості розташованих різців на одному агрегаті, можна припустити, що мінімальна річна програма відновлення у ТОВ складатиме не менш 100 шт.

Орієнтована економічна ефективність від впровадження нового способу відновлення й зміцнення, розраховуючи на прийняту програму відновлення буде рівна:

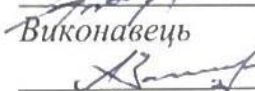
$$E_v = 230,6 \times 100 = 23060 \text{ грн.}$$

Сумарний економічний ефект від впроваджених способів може скласти: очікуваний: $27,775 + 23\,060 = 50,835$ тис. грн.,

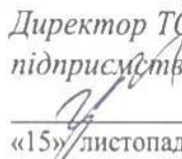
ВІД ВИКОНАВЦЯ

Науковий керівник теми
 Олександр ТИХОНОВ
«15» листопада 2024 р.

Відповідальний виконавець
 Іван РИБАЛКО

Виконавець
 Андрій ЗАХАРОВ

ВІД ПІДПРИЄМСТВА

Директор ТОВ «Шляхоремонтне підприємство «ПІВДЕНЬ»
 Євгеній ЗУБРИЛІН
«15» листопада 2024 р.

Відповідальний спеціаліст
ТОВ «Шляхоремонтне підприємство «ПІВДЕНЬ»

 Констянтин КОШАРНОВСЬКИЙ

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор СТОВ «Мрія»

Ю.А. Кондратенко

20 21 р.



ЗАТВЕРДЖЕНО

Проректор з наукової роботи ХНТУСГ

д.т.н. с.н.с.

В.І. Мельник

20 21 р.



Акт

дослідно-виробничої перевірки

зміцнених культиваторних лап електродом Т-620 з додатковим модифікуванням
бентонітовою глиною, згідно розробленої нової технології

Ми, що нижче підписалися, професор кафедри ТСПВ д.т.н. Скобло Т.С., старший викладач, к.т.н. Рибалко І.М., доцент, к.т.н. Тіхонов О.В., асистент Захаров А.В. та представники від підприємства СТОВ «Мрія», керівник інженерної служби Труш О.І., провідний інженер Глебов М.М., менеджер із закупівель з/ч та матеріалів Колодяжний С.С. склали цей акт про те, що в умовах СТОВ «Мрія» проведена дослідно-виробнича перевірка нової технології для робочих органів – культиваторних лап, які зміцнені за технологією, розробленою в ХНТУСГ, із використанням наплавлення електродом Т-620 і додатковим модифікуванням бентонітовою глиною. Спосіб захищено патентом України №130824. Представлений документ підтверджує, що в результаті дослідно-виробничої перевірки культиваторних лап Tiger Mate II, зміцнених згідно схеми та технології ХНТУСГ, ресурс становить 3185 га на один робочий орган, величина лінійного зношення за шириною леза становить від 10 до 42 мм, при цьому стандартно виготовлені лапи від 39 до 86 мм та мають більш високі за рівнем значення в ~ 2,5 рази відповідно.

За результатами дослідно-виробничої перевірки культиваторних лап комісія рекомендує технологію такого зміцнення електродом Т-620 і додатковим модифікуванням бентонітовою глиною робочих органів машин, до широкого впровадження в умовах сільськогосподарських підприємств АПК України.

Робота виконувалась згідно деждоговірних та госпдоговірних тематик. Економічний ефект від впровадження тільки 1210 шт. культиваторних лап (10 культиваторів) складе 196927,5 грн.

Від ХНТУСГ



Т.С. Скобло (науковий керівник роботи)



І.М. Рибалко (відповідальний виконавець)



О.В. Тіхонов (виконавець)



А.В. Захаров (виконавець)

Від СТОВ «Мрія»




О.І. Труш

М.М. Глебов

С.С. Колодяжний

УЗГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи
Державного біотехнологічного університету

«15» листопада 2024 р.

Валерій МИХАЙЛОВ



УЗГОДЖЕНО

Проректор з науково-педагогічної роботи
Державного біотехнологічного університету

«15» листопада 2024 р.

Максим СЕРІК

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**результатів науково-дослідних, дослідно-конструкторських і технологічних робіт в освітній процес закладів вищої освіти**Замовник Державний біотехнологічний університет
найменування організації
В.о. ректора ДБТУ к.т.н. Кудряшов А.І.Дійсним актом підтверджується, що результати науково-дослідної роботи:
Дослідження закономірностей зносу та розробка способів відновлення різців дорожніх фрез
та робочих елементів ґрунтообробних знарядь
(назва роботи)виконаної на кафедрі: сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні
імені О.І. Сідашенкавпроваджено в освітній процес кафедри: сервісної інженерії та технології матеріалів в
машинобудуванні імені О.І. Сідашенка
(найменування структурного підрозділу, де здійснювалося впровадження)**1. Вид впроваджених результатів:** способи відновлення, теоретичні та практичні
рекомендації**2. Форма впровадження:** наукова продукція, публікації у збірниках наукових праць,
матеріалах конференцій, а також у навчальній – використовується при підготовці лекцій,
розрахункових завдань для практичних робіт, написання кваліфікаційних робіт магістрів**3. Новизна результатів науково-дослідних робіт:** якісно нові способи відновлення
різців дорожніх фрез та робочих елементів ґрунтообробних знарядь. Способи відновлення
мають місце в застосуванні на дорожніх підприємствах, як альтернативна та економлять час
та засоби при ремонті дорожніх фрез та ґрунтообробних знарядь.
(піонерське, принципово нове, якісно нове, модифікації, модернізації старих розробок)**4. Перелік курсів і дисциплін, у рамках яких впроваджено результати НДР:**- по кафедрі сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні імені О.І.
Сідашенка, за дисциплінами «Основи проектування технологічної оснастки», «Енерго- та
матеріалозберігаючі технології та обладнання», «Основи трибології» (спеціальність 133 –
«Галузеве машинобудування»); «Ремонт будівельних машин» (спеціальність 192 – «Будівництво
та цивільна інженерія»)**5. Соціальний і науково-економічний ефект:** економія легуючих елементів,
використання вторинної сировини, ресурсо- та енергозбереження.

Керівник НДР:

канд. техн. наук, доцент
кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в
машинобудуванні імені О.І. Сідашенка

Олександр ТІХОНОВ

«15» листопада 2024 р.

Завідувач кафедри сервісної інженерії та
технології матеріалів в машинобудуванні імені О.І.
Сідашенка, докт. техн. наук, професор

Анатолій Автухов

«15» листопада 2024 р.