

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.18372/0370-2197.1(110).20922

Г.Г. ЛОБАЧОВА, Є.В. ІВАЩЕНКО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ, СТВОРЕНИХ ПЕРЕХІДНИМИ МЕТАЛАМИ З ЗАЛІЗНИМ ПРОШАРКОМ

Досліджено вплив оброблення Fe-анодом в процесі електроіскрового легування (ЕІЛ) поверхні зразка Fe-армко перехідними металами, що наносилися за схемою Me-Fe-Me, де Me – Cr, Cu, Ni, Ti, W, Zr, на стійкість до зношування одержаних покриттів. Випробування зразків з покриттями в умовах сухого тертя-ковзання «площина по площині» протягом 10 годин показали підвищення зносостійкості у 4,92–12,64 разів у порівнянні із вихідним зразком, що не піддавався легуванню.

Ключові слова: електроіскрове легування (ЕІЛ), покриття, залізо, перехідні метали, зносостійкість

Вступ. Серед багатьох методів поверхневого оброблення достойне місце посідає електроіскрове легування (ЕІЛ). Завдяки можливості використання практично будь-яких струмопровідних матеріалів, локальності нанесення, високій адгезії легованих шарів до основи, малогабаритності обладнання, простоті технічної реалізації, економічності та екологічності процесу його ефективність є цілком виправданою [1 – 5].

Багаторазова дія високоенергетичних розрядів та механічний контакт матеріалів електродів дають змогу створити покриття, а фактично новий сплав з унікальними властивостями, який неможливо одержати традиційними металургійними методами [1].

Складні структурно-фазові перетворення поверхні є ключовими у визначенні експлуатаційних характеристик [1 – 4].

Досягати підвищеної твердості, зносостійкості, жаростійкості, корозійної стійкості та інших властивостей легової поверхні дозволяє правильний вибір матеріалів легувальних електродів [1 – 3].

Зазвичай для ЕІЛ застосовують твердосплавні аноди [1 – 3]. Але тугоплавкість компактованих електродів стає головною перешкодою у формуванні покриття за низьковольтних електричних розрядів, внаслідок чого ефективність масоперенесення знижується [5].

Як альтернативу оброблення твердосплавними анодами пропонується пошарове створення покриттів з чистих перехідних металів [5]. Зокрема являє інтерес ЕІЛ металом, ідентичним до катоду. Під час зазначеного процесу має місце повна взаємна розчинність матеріалу, яка виключає окрихчення та руйнування нанесеного шару [5]. Поєднання декількох матеріалів електродів у одному технологічному процесі ЕІЛ може забезпечити комплекс властивостей широкого функціоналу [1 – 5].

Метою даної роботи було дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів з перехідних металів (Cr, Cu, Ni, Ti, W, Zr), що мають залізний прошарок, створених на поверхні Fe-армко.

Матеріали та методи досліджень. Матеріалом основи обрано Fe-армко, а легувальними анодами – метали: Cr, Cu, Ni, Ti, W, Zr та Fe-армко.

ЕІЛ відбувалося у три етапи нанесення за схемою Me-Fe-Me, де Me – Cr, Cu, Ni, Ti, W, Zr, у середовищі повітря.

ЕІЛ здійснювалось на установці «Елітрон – 26А» ($I = 2,5$ А, $U = 60 - 70$ В, $\nu = 50$ Гц). Тривалість нанесення покриття за технологічною схемою Me-Fe-Me складала 9 хвилин (по 3 хвилини легування кожним з анодів).

Мікроструктурним, рентгенофазовим та мікродюрOMETричним аналізом досліджено будову та мікротвердість покриттів.

Випробування на зношування відбувалося шляхом зворотньо-поступального сухого тертя-ковзання «площина по площині» під навантаженням 4 кг протягом 10 годин на оригінальній машині тертя, виготовленій на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки НН ІМЗ ім. Є.О. Патона «КПІ імені Ігоря Сікорського» [5]. Як контртіло застосована сталь Р6М5 після гартування та відпуску. Швидкість ковзання становила 0,08 м/с.

Для оцінки та порівняння зносостійкості покриттів розраховувалась інтенсивність зношування (I , $\text{кг}/\text{м}^2$) із співвідношення втрати маси зразка Δm , кг до його площі s , м^2 (10^{-4} м^2). Масу зразків визначали гравіметричним методом з точністю ($5 \cdot 10^{-7}$ кг) на лабораторних вагах «AXIS AD50» через кожні 20 хвилин випробування.

Аналіз результатів та обговорення. Мікроструктурний аналіз досліджуваних зразків показав, що товщини покриттів на основі Fe-армко є різними (рівномірними або нерівномірними), що залежить від ступеню ерозії перехідного металу у міжелектродному середовищі повітря. Але незалежно від типу розчинності елементів легувальних електродів з матеріалом основи, самі покриття є суцільним без видимих дефектів. Ймовірно, легування Fe-анодом на другому етапі оброблення, після попереднього нанесення перехідних металів, приводить до розбавлення твердих розчинів до певної міри – зменшення їх концентрації у покритті, і, як наслідок, зменшення внутрішніх напружень в процесі надшвидкого охолодження. Це, в свою чергу, сприяє меншій крихкості легованих шарів та підвищенню їх пластичності, і може бути доказом хімічної, термічної та механічної взаємодії матеріалів обох електродів внаслідок екстремальних умов електричного розряду: високої температури, що перевищує температуру плавлення, великих швидкостей нагрівання та охолодження, а також впливу міжелектродного середовища, в якому здійснюється оброблення.

МікродюрOMETричним аналізом встановлено зростання поверхневої мікротвердості після всіх проведених процесів ЕІЛ.

Основні характеристики електроіскрових покриттів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика покриттів на поверхні Fe-армко після ЕІЛ

Схема ЕІЛ	Товщина, мкм	Фазовий склад	Мікротвердість, ГПа
Cr-Fe-Cr	30 – 35	α -(Fe,Cr), γ -Fe, Fe ₂ O ₃	6,3
Cu-Fe-Cu	30 – 35	Cu, α -Fe, CuO	4,3
Ni-Fe-Ni	20 – 25	Ni, α -Fe	3,7
Ti-Fe-Ti	30 – 45	α -Fe, Fe ₂ Ti, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃ , TiN	7
W-Fe-W	15 – 20	α -Fe, W, Fe ₂ W	10,4
Zr-Fe-Zr	30 – 50	Zr, α -Fe, γ -Fe, ZrN, ZrO ₂	7,5

Під час тертя протягом 10 годин інтенсивність зношування усіх досліджуваних зразків з покриттями є незначною порівнянні із вихідним зразком, що не піддавався обробці (рис. 1).

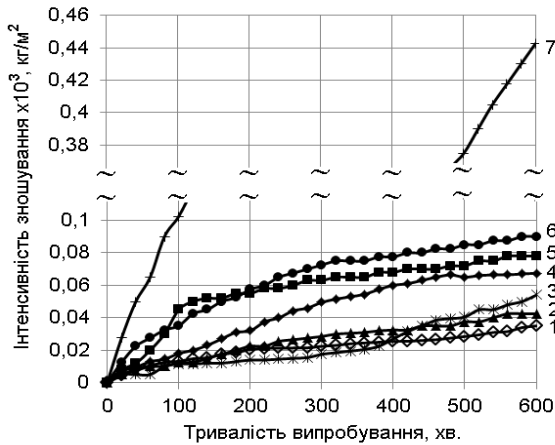


Рис. 1. Кінетичні криві інтенсивності зношування поверхні Fe-армко після ЕІЛ за схемою: 1 – Cu-Fe-Cu; 2 – Cr-Fe-Cr; 3 – W-Fe-W; 4 – Ni-Fe-Ni; 5 – Zr-Fe-Zr; 6 – Ti-Fe-Ti; 7 – без покриття

Характер побудованих кривих інтенсивності зношування за результатами гравіметричного аналізу протягом випробування показав поступове стирання покриттів Cu-Fe-Cu, Cr-Fe-Cr, Ni-Fe-Ni. Це можна пояснити їх рівномірністю за товщиною, а також меншими значеннями мікротвердості у порівнянні з трьома іншими покриттями.

Для зразків, легованих за схемами Ti-Fe-Ti та Zr-Fe-Zr спостерігається інтенсивне зношування на початковому етапі випробувань, що відповідає часу припрацювання між контактуючими поверхнями (100 – 300 хвилини).

Інтенсивність зношування покриття з найбільшою мікротвердістю та, водночас, найменшою товщиною (W-Fe-W), є плавною до 360 хвилини, після чого починається зростання значень.

Оцінювання зносостійкості покриттів після завершення випробування здійснювалось порівнянням величини інтенсивності зношування нанесених покриттів з поверхнею вихідного зразка (без ЕІЛ). Беручи до уваги, що інтенсивність зношування є оберненою величиною до зносостійкості, було з'ясовано, що її значення для усіх зразків з покриттями від 4,92 до 12,64 разів більше за необроблену поверхню заліза (рис. 2).

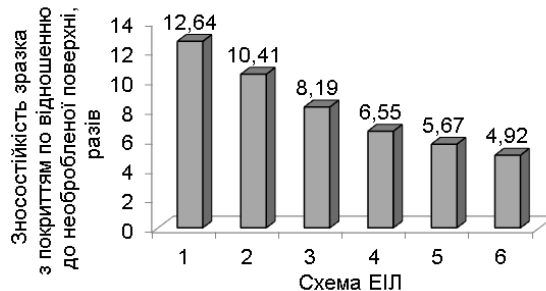


Рис. 2. Підвищення зносостійкості поверхні Fe-армко після ЕІЛ за схемою: 1 – Cu-Fe-Cu; 2 – Cr-Fe-Cr; 3 – W-Fe-W; 4 – Ni-Fe-Ni; 5 – Zr-Fe-Zr; 6 – Ti-Fe-Ti

Оскільки процес зношування супроводжується утворенням вторинних структур (оксидних плівок), формування яких залежить від структури поверхні, то знаходячись між контактуючими поверхнями вони здатні виконувати роль

твердого мастила, внаслідок чого й зростає поверхнева зносостійкість. Для покриттів, що містять карбідні або нітридні фази, які є твердими частинками у пластичному твердому розчині, виконується правило Шарпі, а, отже спостерігається підвищена стійкість до зношування.

Висновки.

Встановлено, що проміжний етап нанесення металу, ідентичного до основи (Fe-армко), в процесі електроіскрового легування перехідними металами (Cr, Cu, Ni, Ti, W, Zr) сприятливо впливає на будову та властивості утворених покриттів.

Результати випробувань за умов сухого тертя-ковзання «площина по площині» протягом 10 годин показали, що зростання зносостійкості покриттів відбувається у ряду: Ti-Fe-Ti → Zr-Fe-Zr → Ni-Fe-Ni → W-Fe-W → Cr-Fe-Cr → Cu-Fe-Cu, що у 4,92 – 12,64 разів перевищує значення вихідної поверхні заліза без обробки.

Список літератури

1. Охріменко В.О. Застосування методів електроіскрового легування для покращення якості поверхневих шарів металевих деталей: фактори та перспективи / В.О. Охріменко, О.П. Гапонова, А.І. Дегула // Вісник ХНАДУ. – 2025. – Вип. 108. – С. 44 – 53. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.44>
2. Коновал В.П. Вплив хімічного складу електродних матеріалів та режимів легування на властивості електроіскрових покриттів. I. Інтенсивність масопереносу та склад покриттів / В.П. Коновал, О.П. Уманський, А.Д. Панасюк, О.Ф. Лук'янчук // Порошкова металургія. – 2014. – № 01/02. – С. 41 – 51. <http://www.materials.kiev.ua/article/1183>
3. Коновал В.П. Вплив хімічного складу електродних матеріалів та режимів легування на властивості електроіскрових покриттів. II. Твердість та зносостійкість покриттів / В.П. Коновал, О.Д. Костенко, І.С. Марценюк // Порошкова металургія. – 2014. – № 03/04. – С. 110 – 120. <http://www.materials.kiev.ua/article/1210>
4. Скворцов О.О. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах впливу абразиву / О.О. Скворцов, О.О. Мікосянчик // Проблеми тертя та зношування. – 2023. – № 3(100). – С.64 – 72. <https://jml.nau.edu.ua/index.php/PTZ/article/view/17895/25230>
5. Лобачова Г.Г. Поверхневе зміцнення сплавів заліза електроіскровим легуванням цирконієм, титаном, хромом та хіміко-термічною обробкою: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.16.01 «Металознавство та термічна обробка металів» / Г.Г. Лобачова. – Київ, НТУУ «КПІ», 2012. – 200 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2313>

Отримано: 11 лютого 2026

Прийнято: 12 березня 2026

Опубліковано: 9 квітня 2026

Лобачова Галина Геннадіївна – канд. техн. наук, доцент кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки Навчально-наукового Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, пр. Берестейський, 37, м. Київ, Україна, 03056, тел.: +380969752827, E-mail: lgg22@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7264-3713>

Іващенко Євген Вадимович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки Навчально-наукового Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, пр. Берестейський, 37, м. Київ, Україна, 03056, тел.: +380969752827, E-mail: ivashchenkoe@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8360-5042>

H.H. LOBACHOVA, Ie.V. IVASHCHENKO

WEAR RESISTANCE OF ELECTRIC-SPARK COATINGS CREATED BY TRANSITION METALS WITH IRON INTERMEDIATE LAYER

The effect of treatment by Fe-anode in the electric-spark alloying (ESA) process of the iron sample surface by transition metals, which were applied according to the Me-Fe-Me scheme, where Me - Cr, Cu, Ni, Ti, W, Zr, on the wear resistance of the resulting coatings was investigated. Testing of samples with coatings under dry friction-sliding conditions «plane by plane» for 10 hours showed an increase in wear resistance to 4.92–12.64 times compared to the original sample that was not alloyed.

Keywords: electric-spark alloying (ESA), coating, iron, transition metals, wear resistance

References

1. Okhrimenko V.O. Zastosuvannia metodiv elektroiskrovoho lehuвання dlia pokrashchennia yakosti poverkhnevyykh shariv metalevykh detalei: factory ta perspektyvy / V.O. Okhrimenko, O.P. Haponova, A.I. Dehula // Visnyk KhNADU. – 2025. – Vyp. 108. – S. 44 – 53. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.44>
2. Konoval V.P. Vplyv khimichnoho skladu elektrodnykh materialiv ta rezhymiv lehuвання na vlastyvyosti elektroiskrovyykh pokryttiv. I. Intensyvnist masoperenosu ta sklad pokryttiv / V.P. Konoval, O.P. Umanskyi, A.D. Panasiuk, O.F. Lukianchuk // Poroshkova metalurhiia. – 2014. – № 01/02. – S. 41 – 51. <http://www.materials.kiev.ua/article/1183>
3. Konoval V.P. Vplyv khimichnoho skladu elektrodnykh materialiv ta rezhymiv lehuвання na vlastyvyosti elektroiskrovyykh pokryttiv. II. Tverdist ta znosostiikist pokryttiv / V.P. Konoval, O.D. Kostenko, I.S. Martseniuk // Poroshkova metalurhiia. – 2014. – № 03/04. – S. 110 – 120. <http://www.materials.kiev.ua/article/1210>
4. Skvortsov O.O. Doslidzhennia znosostiikosti elektroiskrovyykh pokryttiv v umovakh vplyvu abrazyvu / O.O. Skvortsov, O.O. Mikosianchyk // Problemy tertia ta znoshuvannia. – 2023. – № 3(100). – S.64 – 72. <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/PTZ/article/view/17895/25230>
5. Lobachova H.H. Poverkhneve zmitsnennia splaviv zaliza elektroiskrovym lehuванняm tsyrkoniiem, tytanom, khromom ta khimiko-termichnoi obrobkoiu: dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.16.01 «Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv» / H.H. Lobachova. – Kyiv, NTUU «KPI», 2012. – 200 s. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2313>

Halyna Lobachova – Ph.D., Senior lecturer in Department of Physical materials science and heat treatment of Y.O. Paton Institute of Materials Science and Welding, National Technical University of Ukraine, “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 03056, Ukraine, Kyiv, ave. Beresteyskyi, 37, tel.number: +380969752827, E-mail: lgg22@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7264-3713>

Ievgen Ivashchenko – Ph.D., Senior lecturer in Department of Physical materials science and heat treatment of Y.O. Paton Institute of Materials Science and Welding, National Technical University of Ukraine, “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 03056, Ukraine, Kyiv, ave. Beresteyskyi, 37, tel.number: +380969752827, E-mail: ivashchenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-8360-5042>