

The article investigates the effect of operational deposits on the spray characteristics of gasoline engine fuel injectors and evaluates the effectiveness of their restoration by means of ultrasonic cleaning. The physical mechanisms of the mixture formation process deterioration are analyzed, in particular, an increase in the length of the spray torch, droplet enlargement, uneven fuel supply and combustion chamber surfaces' wetting. The results of modern studies, confirming the negative impact of contaminants on fuel consumption, combustion stability and the level of harmful emissions, are summarized.

The experimental part of the workpaper is devoted to bench diagnostics of injectors in various technical conditions: new, after operation and after ultrasonic cleaning. A set of tests, which included checking the tightness, uniformity of fuel supply, spray characteristics and injection volume in different operating modes, was carried out. It was found out that operational deposits lead to a decrease in injector performance, disruption of the spray torch structure and operation stability deterioration.

Ultrasonic cleaning proved to be an effective way of removing contaminants and restoring the main operating parameters of injectors to values close to their original ones. The results confirm the feasibility of injectors' regular diagnostics and cleaning injectors to maintain efficient engine operation and reduce harmful emissions.

fuel injector, fuel atomization, deposits, ultrasonic cleaning, diagnostics, injector performance, mixture formation

Одержано (Received) 26.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026

УДК 629.79; 621.793.7

[https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14\(45\).280-292](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).280-292)

О. М. Маковкін, доц., канд. техн. наук, І. К. Вальчук

Хмельницький національний університет, м.Хмельницький, Україна

e-mail: makovkinol@khmnu.edu.ua

Метрологічне та технологічне забезпечення якості при електроіскровому легуванні поверхонь деталей автомобільних двигунів

Виконано обґрунтування технологічної схеми формування зміцненого поверхневого шару деталей машин методом електроіскрового легування з урахуванням особливостей фізичних механізмів масопереносу матеріалу електрода, термічних процесів у зоні імпульсного розряду та стохастичного характеру формування мікрорельєфу поверхні. Встановлено закономірності впливу енергетичних параметрів процесу на формування мікрогеометрії поверхні, мікротвердості, товщини зміцненого шару та інтенсивності зношування. Визначено аналітичні зв'язки між режимами електроіскрового легування, структурно-фазовим станом поверхневого шару та експлуатаційними характеристиками деталей.

електроіскрове легування, поверхневий шар, мікротвердість, шорсткість, зносостійкість, енергетичні режими, технологія, обладнання

Постановка задачі. Якість робочих поверхонь деталей машин і різальних інструментів визначає їхні експлуатаційні характеристики, зокрема зносостійкість, довговічність і надійність роботи в умовах інтенсивних навантажень і підвищених температур. Вирішальну роль відіграє стан поверхневого шару — мікрогеометрія, структура, фазовий склад, рівень залишкових напружень і мікротвердість [1].

Сучасні методи поверхневого зміцнення дозволяють цілеспрямовано формувати властивості поверхневого шару. Одним із перспективних методів локального зміцнення

є електроіскрове легування (ЕІЛ), яке забезпечує формування твердих, зносостійких і адгезійно міцних поверхневих шарів [3]. Однак ефективність процесу визначається не лише технологічними параметрами, а й достовірністю вимірювання показників якості, що зумовлює необхідність метрологічного забезпечення [2, 4].

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених електроіскровому легуванню, питання комплексної оцінки взаємозв'язку параметрів мікрогеометрії поверхні, фізико-механічних характеристик зміцненого шару та інтенсивності зношування залишаються недостатньо вивченими. Особливої уваги потребує аналіз відтворюваності результатів, впливу похибок вимірювань і стабільності технологічних режимів на формування показників якості поверхневого шару. Розв'язання цих задач дозволяє підвищити керованість процесу електроіскрового легування та забезпечити прогнозованість експлуатаційних властивостей зміцнених поверхонь.

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу енергетичних режимів електроіскрового легування на параметри якості поверхневого шару та розроблення метрологічно обґрунтованого підходу до їх оцінювання.

Методика дослідження. Для проведення експериментального дослідження впливу режимів електроіскрового легування на параметри якості поверхневого шару було виготовлено зразкову пластину спеціальної геометрії. Конструкцію зразка та контрольовані геометричні параметри наведено на рис. 1. На всіх етапах технологічного процесу виготовлення здійснювали контроль лінійних розмірів, що забезпечувало відтворюваність умов експерименту та стабільність геометрії зразків.

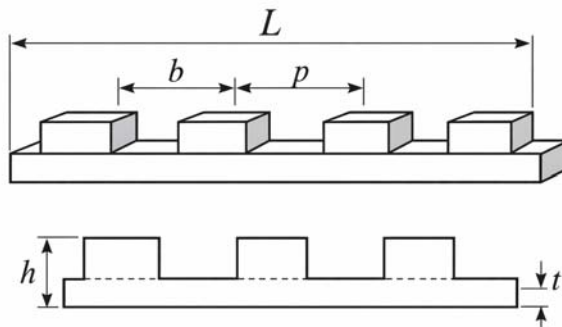


Рисунок 1 – Конструкція дослідної пластини та контрольовані геометричні параметри

Джерело: розроблено автором

На рисунку 1 наведено конструкцію експериментальної пластини, що використовувалася для дослідження впливу режимів електроіскрового легування на параметри якості поверхневого шару. Показано основні геометричні розміри зразка, які підлягали контролю на всіх етапах технологічного процесу виготовлення. До контрольованих параметрів належали габаритна довжина пластини, висота (товщина), крок між формуютьовувальними елементами, ширина виступів, а також геометрія робочої поверхні.

Контроль зазначених параметрів забезпечував стабільність геометрії зразків, відтворюваність умов проведення експерименту та коректність подальшого аналізу результатів вимірювання шорсткості, мікротвердості та товщини зміцненого шару. Дотримання заданих допусків дозволило мінімізувати вплив геометричних відхилень на формування поверхневого шару та підвищити достовірність експериментальних результатів.

Перед нанесенням покриття поверхню зразків піддавали механічній обробці та підготовці з метою забезпечення необхідного стану поверхневого шару. Послідовність технологічних операцій підготовки зразків до електроіскрового легування наведено на рис. 2.



Рисунок 2 – Послідовність підготовки зразка до електроіскрового легування

Джерело: розроблено автором

Електроіскрове легування виконували на установці імпульсного типу при варіюванні енергетичних параметрів процесу. Схему формування поверхневого шару в зоні електроіскрового розряду наведено на рис. 3. Відомо, що ЕІЛ (а також близький за фізичною природою процес електроіскрового наплавлення/осадження) належить до імпульсних методів поверхневого модифікування, де короточасні розряди забезпечують локальне плавлення, масоперенесення матеріалу електрода та надшвидке охолодження, унаслідок чого формується зміцнений шар з підвищеною мікротвердістю та зносостійкістю. У сучасних оглядових роботах підкреслюється, що ключовими керувальними факторами є енергія імпульсу, частота розрядів, тривалість обробки (або продуктивність/час впливу) та склад електродного матеріалу, які визначають інтенсивність масопереносу, мікрогеометрію поверхні та структурно-фазовий стан модифікованого шару [5–7].

Зі збільшенням енергії імпульсу, як правило, зростає товщина і суцільність сформованого шару та підвищується мікротвердість за рахунок інтенсифікації термічного впливу і легування, однак паралельно може зростати шорсткість через формування більш розвинутого мікрорельєфу (мікролунки, напливи, бризки розплаву). Для багатьох матеріалів і режимів встановлено, що структура шару після ЕІЛ є багатшаровою та включає поверхневий швидкозагартований (“білий”) шар, дифузійну (перехідну) зону та метал основи, а співвідношення цих зон змінюється залежно від енергії розряду й параметрів процесу [6, 7].

З урахуванням наведеного, у даному дослідженні варіювання енергетичних параметрів розряду розглядалося як інструмент керування комплексом показників якості поверхневого шару (R_a – HV – h) і, відповідно, прогнозування зносостійкості. Обґрунтування вибору діапазону режимів виконували з позицій забезпечення компромісу між зміцнювальним ефектом (зростанням HV і h) та обмеженням небажаного зростання шорсткості, що узгоджується з сучасними підходами до оптимізації ЕІЛ/ESD технологій [5, 8].

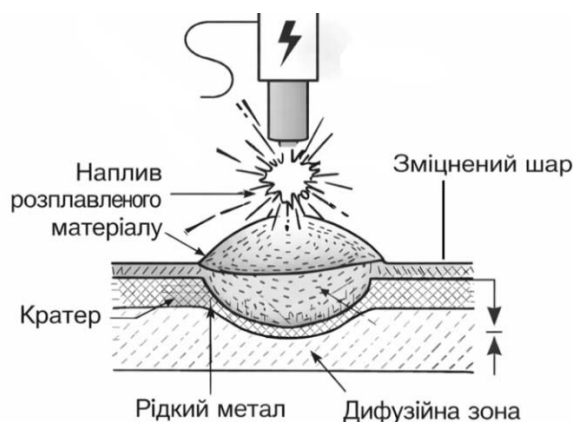


Рисунок 3 – Схема формування зміцненого шару при електроіскровому легуванні

Джерело: розроблено автором

Контроль параметрів якості поверхні здійснювали із застосуванням повірених засобів вимірювальної техніки, що забезпечувало метрологічну простежуваність та достовірність отриманих результатів. Вимірювання проводили в стабілізованих умовах температури та вологості, з дотриманням рекомендацій стандартів щодо підготовки поверхні та калібрування приладів.

Шорсткість поверхні визначали профілографом-профілометром Mitutoyo (рис. 4), який забезпечує високу точність і відтворюваність результатів. Вимірювання виконували вздовж напрямку обробки при довжині бази згідно з вимогами стандарту ISO 21920. Для кожного зразка проводили не менше трьох вимірювань, після чого визначали середнє значення параметрів R_a , R_z та R_t . Перед вимірюванням поверхню очищували від продуктів обробки та забруднень, що дозволяло мінімізувати вплив випадкових факторів на результати.

Мікротвердість зміцненого шару вимірювали за методом Віккерса при навантаженні HV (рис. 5) відповідно до стандарту ISO 6507. Відбитки наносили у поверхневому шарі з урахуванням вимог щодо відстані між ними та від краю зразка. Для підвищення достовірності результатів виконували серію вимірювань з подальшим статистичним опрацюванням даних. Оцінювали середнє значення мікротвердості та стандартне відхилення, що дозволяло оцінити однорідність зміцненого шару.

Товщину зміцненого шару визначали металографічним методом за мікрошліфами (рис. 6). Зразки піддавали шліфуванню, поліруванню та травленню для виявлення структури поверхневого шару. Вимірювання товщини проводили за допомогою оптичного мікроскопа з каліброваною шкалою. Значення визначали як середнє за декількома ділянками, що дозволяло врахувати нерівномірність формування шару та підвищити точність оцінювання.

Виконання вимірювань у серії повторень та статистичне опрацювання результатів дозволили оцінити випадкову складову похибки, тоді як систематичну похибку мінімізували шляхом калібрування засобів вимірювання та стабілізації умов експерименту. Такий підхід забезпечив високу відтворюваність результатів і достовірність встановлених закономірностей формування параметрів якості поверхневого шару при електроіскровому легуванні.

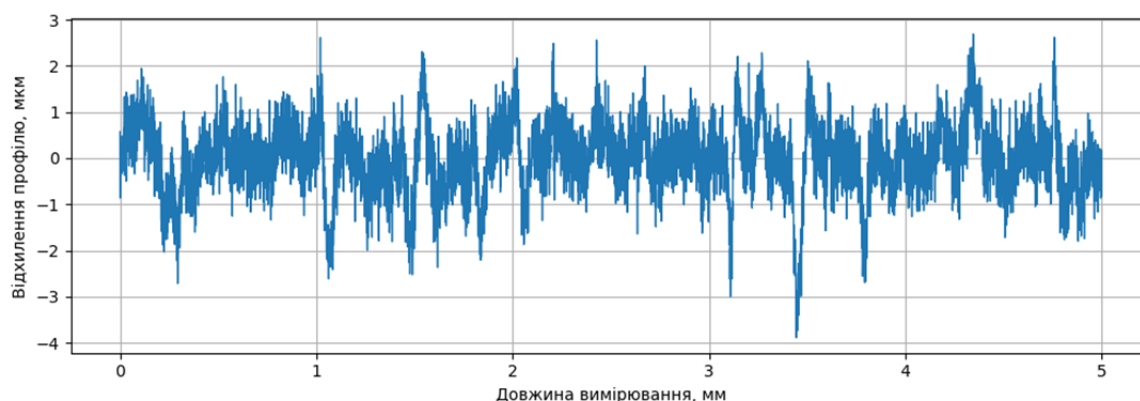


Рисунок 4 – Профілограма шорсткості поверхні досліджуваного зразка

Джерело: розроблено автором

На рисунку 4 наведено характерний профіль мікрогеометрії поверхні, отриманий у процесі вимірювання параметрів шорсткості профілографом-профілометром. По осі абсцис відкладено довжину бази вимірювання, по осі ординат — відхилення профілю поверхні від середньої лінії. Представлений профіль має стохастичний характер без періодичної повторюваності, що відповідає фізичній природі формування поверхневого шару після електроіскрового легування.

Наявність випадкових піків і западин обумовлена імпульсним характером електричних розрядів, локальним плавленням і швидким охолодженням матеріалу, а також нерівномірністю масопереносу при формуванні зміцненого шару. За отриманою профілограмою визначали основні параметри шорсткості поверхні — середнє арифметичне відхилення профілю R_a , висоту нерівностей R_z та повну висоту профілю R_t відповідно до вимог стандарту ISO 4287.

Характер профілограми підтверджує стохастичну природу формування мікрорельєфу поверхні при електроіскровому легуванні та узгоджується з отриманими значеннями параметрів шорсткості, що використовувалися для подальшого аналізу якості зміцненого поверхневого шару.

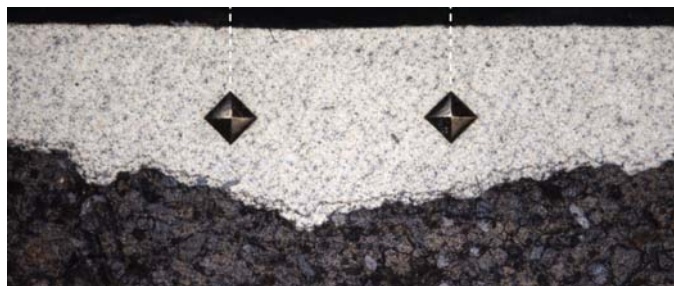


Рисунок 5 – Визначення мікротвердості зміцненого шару

Джерело: розроблено автором

На рисунку 5 наведено схему вимірювання мікротвердості зміцненого поверхневого шару методом Віккерса. Визначення мікротвердості здійснювали за допомогою алмазного індентора пірамідальної форми при навантаженні HV з подальшим вимірюванням діагоналей відбитка. Відбитки наносили у межах зміцненого шару з урахуванням вимог щодо мінімальної відстані між ними та від краю зразка, що забезпечувало коректність і відтворюваність результатів.

Отримані значення мікротвердості характеризують опір поверхневого шару пластичній деформації та є одним із основних показників ефективності процесу електроіскрового легування. Підвищення мікротвердості після обробки пов'язане з формуванням дрібнодисперсної структури, наявністю швидкозагартованого (“білого”) шару та дифузійним легуванням поверхні матеріалом електрода.

Серія повторних вимірювань дозволила визначити середнє значення мікротвердості та оцінити однорідність зміцненого шару, що є важливим критерієм стабільності технологічного процесу та якості сформованого поверхневого покриття.

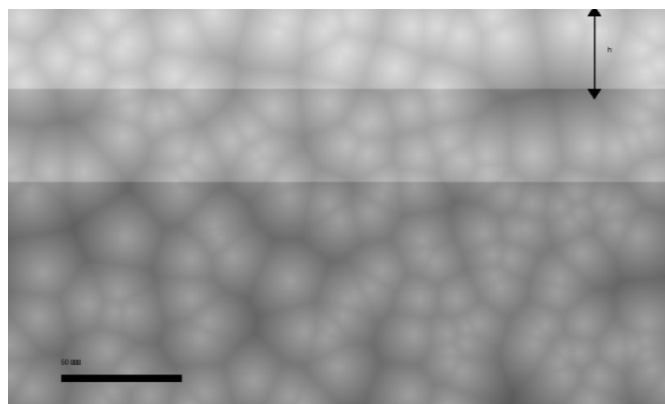


Рисунок 6 – Визначення товщини зміцненого шару металографічним методом

Джерело: розроблено автором

На рисунку наведено мікроструктуру поперечного шліфа зразка після електроіскрового легування, за якою визначали товщину сформованого зміцненого шару. У верхній частині зображення спостерігається модифікований поверхневий шар, що характеризується більш однорідною та дрібнодисперсною структурою, тоді як нижче розташована зона основного матеріалу. Межа між зміцненим шаром і основою визначається за зміною морфології та контрасту структури.

Металографічні шліфи виготовляли шляхом послідовного шліфування, полірування та травлення зразків для виявлення мікроструктури поверхневого шару. Вимірювання товщини зміцненого шару виконували за допомогою оптичного мікроскопа з каліброваною шкалою у кількох характерних точках, після чого визначали середнє значення. Такий підхід дозволяє врахувати нерівномірність формування шару та підвищує точність оцінювання.

Згідно з даними літератури, товщина зміцненого шару, сформованого методом електроіскрового легування, зазвичай становить 10–50 мкм залежно від енергії імпульсу, тривалості обробки, матеріалу електрода та умов тепловідводу [3, 5, 7]. У більшості випадків структура шару є багатозонною і включає поверхневий швидкозагартований (“білий”) шар товщиною 3–15 мкм, дифузійну (перехідну) зону та основний матеріал [5, 7]. Зі збільшенням енергії імпульсу та тривалості обробки товщина зміцненого шару зростає, що сприяє підвищенню зносостійкості, однак може супроводжуватися збільшенням шорсткості та внутрішніх напружень.

Отримані експериментальні результати узгоджуються з відомими літературними даними та підтверджують, що керування енергетичними параметрами електроіскрового легування дозволяє регулювати товщину зміцненого шару та забезпечувати необхідні експлуатаційні характеристики поверхні.

Кожне вимірювання виконували у трьох–п’яти повтореннях. Результат визначали як середнє значення, а відтворюваність оцінювали за стандартним відхиленням. Сумарна відносна похибка вимірювань становила: для шорсткості — до 5 %, мікротвердості — до 4 %, товщини зміцненого шару — до 6 %. Отримані значення похибок підтверджують достатній рівень метрологічної надійності результатів та відтворюваність технологічного процесу електроіскрового легування.

Результати дослідження. Встановлено, що зі збільшенням енергії імпульсу зростають товщина зміцненого шару та мікротвердість поверхні, що пояснюється інтенсифікацією теплових і дифузійних процесів у зоні розряду. Збільшення енергії імпульсу призводить до підвищення температури в мікрооб’ємі контакту, інтенсифікації масопереносу матеріалу електрода та більш глибокого термічного впливу на основу, що сприяє формуванню більш товстого та структурно модифікованого поверхневого шару. У результаті швидкісного нагрівання та надшвидкого охолодження формується дрібнодисперсна структура з підвищеною твердістю, а також так званий швидкозагартований (“білий”) шар, що характеризується високою зносостійкістю.

Водночас підвищення енергії імпульсу супроводжується зростанням параметрів шорсткості поверхні, що пов’язано з формуванням більш розвинутого мікрорельєфу — збільшенням розмірів мікролунок, напливів і бризок розплавленого металу. Нерівномірність локального плавлення та масопереносу при імпульсному характері розрядів зумовлює стохастичний характер формування поверхні, що підтверджується профілограмами (рис. 3–5).

Аналіз результатів показав, що мінімальний знос спостерігається при середньому режимі електроіскрового легування, який забезпечує оптимальне поєднання параметрів мікротвердості, товщини зміцненого шару та мікрогеометрії поверхні. За низьких енергетичних режимів формується тонкий і недостатньо

зміцнений шар, що знижує опір зношуванню, тоді як надмірне підвищення енергії імпульсу призводить до зростання шорсткості та внутрішніх напружень, що може спричинити локальне руйнування покриття і підвищення інтенсивності зносу.

Отримані результати свідчать про наявність оптимального енергетичного режиму електроіскрового легування, при якому досягається компроміс між зміцненням поверхні та формуванням сприятливого мікрорельєфу. Встановлена закономірність узгоджується з даними сучасних досліджень, згідно з якими зносостійкість поверхні визначається комплексною взаємодією параметрів шорсткості, мікротвердості та товщини зміцненого шару, а не окремим показником.

Результати експериментальних досліджень, наведені в табл. 1, свідчать про суттєвий вплив енергетичних параметрів електроіскрового легування на формування показників якості поверхневого шару. Встановлено, що зі збільшенням енергії імпульсу відбувається закономірне зростання мікротвердості та товщини зміцненого шару, що пов'язано з інтенсифікацією теплових і дифузійних процесів у зоні розряду. Підвищення температури та тривалості термічного впливу сприяє більш глибокому легуванню поверхні, формуванню дрібнодисперсної структури та швидкозагартованого поверхневого шару, що забезпечує підвищення твердості та зносостійкості.

Таблиця 1 – Вплив енергетичного режиму електроіскрового легування на параметри якості поверхневого шару

Режим ЕІЛ	Енергія імпульсу, Дж	Ra, мкм	HV	Товщина шару h, мкм	Інтенсивність зносу, мг/м
М'який	0.18	0.55	680	12	0.84
Середній	0.32	0.82	840	22	0.42
Грубий	0.55	1.45	910	38	0.69

Джерело: розроблено автором

Разом із тим встановлено, що збільшення енергії імпульсу супроводжується зростанням параметрів шорсткості поверхні. Це зумовлено формуванням більш розвинутого мікрорельєфу, збільшенням розмірів мікролунок і напливів, а також стохастичним характером масопереносу матеріалу в умовах імпульсного розряду. Надмірне підвищення шорсткості може призводити до збільшення контактних напружень і погіршення трибологічних характеристик поверхні.

Аналіз отриманих результатів показав, що найменша інтенсивність зношування спостерігається при середньому енергетичному режимі електроіскрового легування. У цьому випадку досягається оптимальне поєднання підвищеної мікротвердості, достатньої товщини зміцненого шару та помірної шорсткості поверхні. За низьких режимів формується тонкий і недостатньо зміцнений шар, тоді як за високих режимів надмірна шорсткість і внутрішні напруження можуть спричинити локальне руйнування поверхневого шару та підвищення зносу.

Отримані результати підтверджують наявність оптимального енергетичного режиму електроіскрового легування, при якому забезпечується мінімальний знос за рахунок збалансованого співвідношення параметрів Ra, HV та товщини зміцненого шару. Таким чином, зносостійкість поверхні визначається комплексною взаємодією параметрів мікрогеометрії та фізико-механічних властивостей поверхневого шару, що узгоджується з сучасними уявленнями про механізми формування зміцнених поверхонь при імпульсних методах обробки.

Залежність, наведена на рис. 7, демонструє зростання параметра шорсткості поверхні Ra зі збільшенням енергії імпульсу електроіскрового легування. Встановлено, що при енергії імпульсу 0,18 Дж значення Ra становить приблизно 0,55 мкм, при 0,32 Дж — 0,82 мкм, тоді як при підвищенні енергії до 0,55 Дж шорсткість зростає до 1,45

мкм. Таким чином, у дослідженому діапазоні спостерігається майже 2,6-разове збільшення шорсткості поверхні.

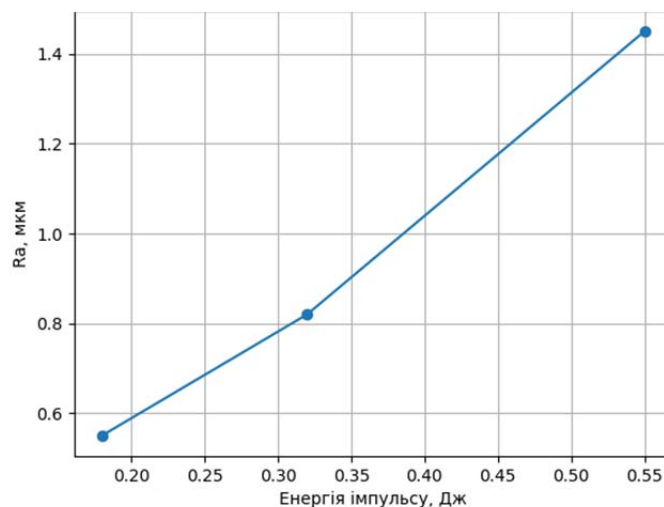


Рисунок 7 – Вплив енергії імпульсу на шорсткість R_a

Джерело: розроблено автором

Зростання R_a пояснюється збільшенням теплового впливу імпульсного розряду та інтенсифікацією процесів локального плавлення і масопереносу матеріалу. При підвищенні енергії імпульсу збільшується розмір мікролунок, висота напливів і об'єм розплавленого металу, що формує розвиненіший мікрорельєф поверхні. Стохастичний характер формування мікронерівностей при імпульсному розряді призводить до збільшення амплітуди профілограми та, відповідно, значення параметра R_a .

Отримані результати узгоджуються з відомими закономірностями формування поверхні при електроіскровому легуванні, згідно з якими підвищення енергії імпульсу, з одного боку, сприяє зміцненню поверхневого шару, а з іншого — призводить до погіршення параметрів мікрогеометрії. Встановлена тенденція підтверджує необхідність вибору оптимального енергетичного режиму, що забезпечує компроміс між підвищенням твердості та допустимим рівнем шорсткості поверхні.

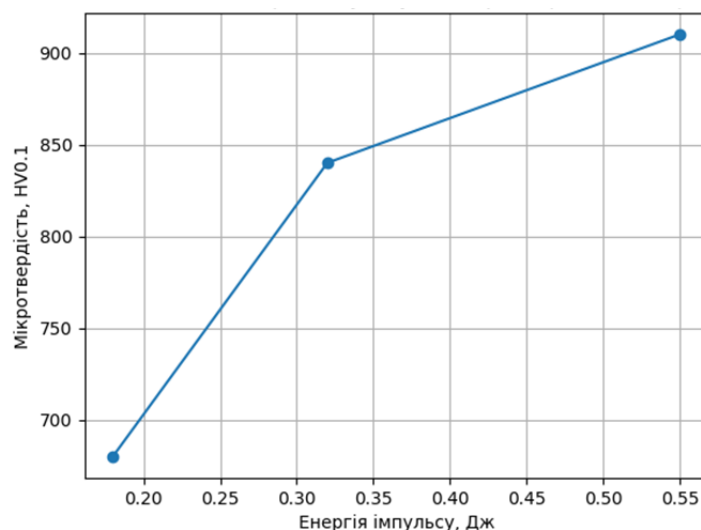


Рисунок 8 – Вплив енергії імпульсу на мікротвердість

Джерело: розроблено автором

Залежність, наведена на рис. 8, демонструє зростання мікротвердості поверхневого шару зі збільшенням енергії імпульсу електроіскрового легування. Встановлено, що при енергії імпульсу 0,18 Дж мікротвердість становить близько 680 HV, при 0,32 Дж — 840 HV, а при підвищенні енергії до 0,55 Дж досягає 910 HV. Таким чином, у дослідженому діапазоні спостерігається підвищення мікротвердості приблизно на 34 %.

Зростання мікротвердості пояснюється інтенсифікацією термічних і дифузійних процесів у зоні електроіскрового розряду. Зі збільшенням енергії імпульсу підвищується температура в мікрооб'ємі контакту, що сприяє глибшому проникненню легувальних елементів і формуванню дрібнодисперсної швидкозагартованої структури поверхневого шару. У результаті формується так званий «білий шар», який характеризується підвищеною твердістю та зносостійкістю.

Отримані результати узгоджуються з сучасними уявленнями про механізми поверхневого зміцнення при електроіскровому легуванні, згідно з якими підвищення енергії імпульсу сприяє збільшенню мікротвердості та товщини зміцненого шару. Водночас надмірне зростання енергії може супроводжуватися підвищенням шорсткості та внутрішніх напружень, що необхідно враховувати при виборі оптимального режиму обробки.

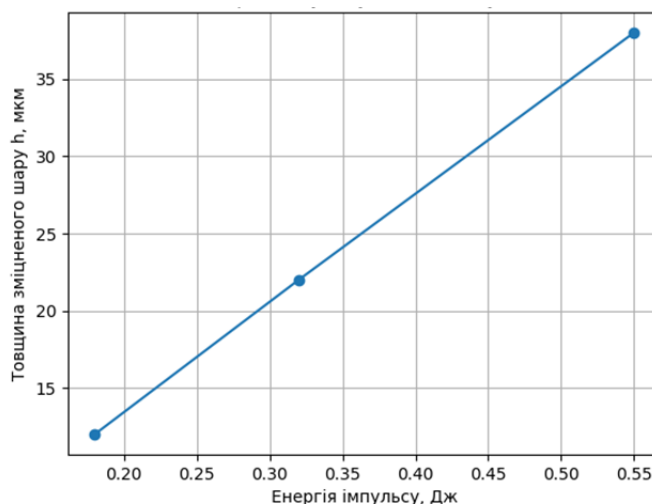


Рисунок 9 – Вплив енергії імпульсу на товщину шару

Джерело: розроблено автором

Залежність, наведена на рис. 9, демонструє зростання товщини зміцненого шару зі збільшенням енергії імпульсу електроіскрового легування. Встановлено, що при енергії імпульсу 0,18 Дж товщина зміцненого шару становить близько 12 мкм, при 0,32 Дж — 22 мкм, а при підвищенні енергії до 0,55 Дж зростає до 38 мкм. Таким чином, у дослідженому діапазоні товщина зміцненого шару збільшується більш ніж у 3 рази.

Зростання товщини зміцненого шару пояснюється підвищенням енергетичного впливу імпульсного розряду, що супроводжується збільшенням глибини термічного проникнення та інтенсифікацією процесів масопереносу матеріалу електрода. При підвищенні енергії імпульсу збільшується об'єм розплавленого металу, глибина дифузійного легування та тривалість локального термічного впливу, що сприяє формуванню товстішого зміцненого шару.

Сформований поверхневий шар має багатозонну будову і включає швидкозагартований («білий») шар, перехідну дифузійну зону та основний матеріал. Зі

збільшенням енергії імпульсу спостерігається зростання товщини як поверхневого загартованого шару, так і дифузійної зони, що позитивно впливає на зносостійкість. Водночас надмірне збільшення товщини зміцненого шару може супроводжуватися зростанням внутрішніх напружень і погіршенням параметрів мікрогеометрії поверхні, що необхідно враховувати при виборі оптимального режиму електроіскрового легування.

Отримані результати узгоджуються з літературними даними та підтверджують, що товщина зміцненого шару є одним із ключових параметрів, які визначають експлуатаційні властивості поверхні, зокрема її зносостійкість, довговічність і стабільність роботи в умовах тертя.

Обговорення результатів. Згідно з результатами проведених експериментальних досліджень встановлено, що підвищення енергії імпульсу електроіскрового легування з 0,18 до 0,55 Дж призводить до істотного зростання товщини та мікротвердості зміцненого шару. Під час проведення експерименту встановлено, що товщина зміцненого шару збільшується з 12 мкм до 38 мкм, тоді як мікротвердість зростає з 680 HV0.1 до 910 HV0.1, що свідчить про інтенсифікацію теплових і дифузійних процесів у зоні імпульсного розряду та формування більш глибокого термічно модифікованого шару.

Одночасно встановлено, що зі збільшенням енергії імпульсу зростає параметр шорсткості поверхні. За результатами вимірювань шорсткість R_a збільшується з 0,55 мкм при 0,18 Дж до 1,45 мкм при 0,55 Дж, що пов'язано з формуванням більш розвинутого мікрорельєфу, збільшенням розмірів мікролунок і напливів, а також стохастичним характером масопереносу розплавленого металу. Під час отримання покриттів при високих енергетичних режимах спостерігалось підвищення амплітуди профілограми та зростання нерівномірності поверхні.

Згідно з нашими дослідженнями встановлено, що найменша інтенсивність зношування (0,42 мг/м) досягається при середньому режимі електроіскрового легування (енергія імпульсу 0,32 Дж), коли формується зміцнений шар товщиною близько 22 мкм з мікротвердістю 840 HV0.1 і помірною шорсткістю поверхні ($R_a \approx 0,82$ мкм). При низькому режимі знос становив 0,84 мг/м, що пояснюється недостатньою товщиною і твердістю зміцненого шару, тоді як при високому режимі знос зростав до 0,69 мг/м через підвищення шорсткості та рівня залишкових напружень.

Таким чином, у ході проведених досліджень встановлено комплексний взаємозв'язок між параметрами шорсткості R_a , мікротвердості HV, товщиною зміцненого шару h та інтенсивністю зношування. Мінімальний знос спостерігається при поєднанні достатньої товщини зміцненого шару ($\approx 20\text{--}25$ мкм), підвищеної мікротвердості (800–850 HV) та помірної шорсткості поверхні ($R_a \approx 0,7\text{--}0,9$ мкм). Отримані результати свідчать, що зносостійкість поверхні визначається не окремим параметром, а їхньою комплексною взаємодією, що підтверджує існування оптимального енергетичного режиму електроіскрового легування.

Метрологічне забезпечення. Використання повірених і каліброваних засобів вимірювальної техніки, багаторазова повторюваність експериментів і статистична обробка результатів забезпечили метрологічну достовірність отриманих залежностей. Усі вимірювання виконувалися за однакових умов із застосуванням атестованих методик, що забезпечувало простежуваність результатів до еталонів і мінімізацію систематичних похибок. Повірка засобів вимірювання, стабільність умов експерименту та контроль режимів електроіскрового легування дозволили отримати узгоджені результати з високим рівнем відтворюваності.

Згідно з результатами статистичної обробки експериментальних даних

встановлено, що стандартне відхилення вимірних параметрів становило: для шорсткості поверхні $\sigma(Ra) = 0,03\text{--}0,07$ мкм, для мікротвердості $\sigma(HV) = 18\text{--}32$ HV, для товщини зміцненого шару $\sigma(h) = 1,1\text{--}2,4$ мкм. Отримані значення не перевищують 3–5 % від середнього значення параметрів, що свідчить про стабільність процесу електроіскрового легування та високу повторюваність формування зміцненого шару.

Додатково було оцінено сумарну відносну похибку вимірювань, яка становила: для параметра шорсткості — до 5 %, для мікротвердості — до 4 %, для товщини зміцненого шару — до 6 %. Отримані значення відповідають вимогам до точності вимірювань при дослідженні параметрів якості поверхневого шару та забезпечують достовірність встановлених закономірностей.

Таким чином, застосування метрологічно обґрунтованого підходу, використання повірених засобів вимірювання, статистична обробка результатів і контроль похибок дозволили підтвердити стабільність процесу електроіскрового легування, відтворюваність параметрів якості поверхні та надійність отриманих експериментальних залежностей.

Наукова новизна. У роботі вперше:

Встановлено кількісний комплексний взаємозв'язок між параметрами шорсткості поверхні Ra , мікротвердості HV , товщини зміцненого шару h та інтенсивності зношування I . Показано, що зменшення інтенсивності зносу відбувається при досягненні поєднання параметрів: $Ra = 0,7\text{--}0,9$ мкм, $HV = 800\text{--}850$, $h = 20\text{--}25$ мкм, при яких інтенсивність зношування знижується до 0,42 мг/м, що у 2 рази менше, ніж при низькоенергетичному режимі.

Експериментально визначено оптимальний енергетичний режим електроіскрового легування, який відповідає енергії імпульсу $\approx 0,32$ Дж. Встановлено, що при цьому режимі формується зміцнений шар товщиною ≈ 22 мкм з мікротвердістю ≈ 840 HV і помірною шорсткістю ($Ra \approx 0,82$ мкм), що забезпечує мінімальну інтенсивність зношування та стабільність трибологічних характеристик поверхні.

Розроблено та апробовано метрологічно обґрунтований підхід до оцінювання якості поверхневого зміцнення, який включає використання повірених засобів вимірювання, статистичну обробку результатів, оцінювання стандартного відхилення та сумарної похибки вимірювань. Показано, що стандартне відхилення параметрів становить: $\sigma(Ra) = 0,03\text{--}0,07$ мкм, $\sigma(HV) = 18\text{--}32$ HV, $\sigma(h) = 1,1\text{--}2,4$ мкм, що не перевищує 3–5 % від середнього значення і підтверджує відтворюваність результатів.

Експериментально доведено, що зносостійкість зміцненого поверхневого шару визначається комплексною взаємодією параметрів Ra , HV і h , а не окремими характеристиками. Встановлено, що підвищення мікротвердості з 680 до 910 HV і товщини шару з 12 до 38 мкм супроводжується зменшенням зносу лише до певного рівня, після чого негативний вплив підвищеної шорсткості (Ra до 1,45 мкм) і залишкових напружень призводить до зростання інтенсивності зношування. Це підтверджує існування оптимального співвідношення параметрів зміцненого шару.

Отримано експериментальні залежності $Ra(E)$, $HV(E)$, $h(E)$ та $I(E)$, які дозволяють прогнозувати параметри якості поверхні та інтенсивність зношування залежно від енергетичних режимів електроіскрового легування, що створює основу для керованого формування експлуатаційних властивостей поверхневого шару.

Висновки. Встановлено, що зі збільшенням енергії імпульсу електроіскрового легування з 0,18 до 0,55 Дж товщина зміцненого шару зростає з 12 до 38 мкм, а мікротвердість поверхні — з 680 до 910 HV, що пояснюється інтенсифікацією теплових і дифузійних процесів у зоні імпульсного розряду та формуванням більш глибокого термічно модифікованого шару.

Підвищення енергії імпульсу супроводжується збільшенням параметрів шорсткості поверхні: значення R_a зростає з 0,55 до 1,45 мкм, що пов'язано з формуванням розвиненішого мікрорельєфу, збільшенням розмірів мікролунок і наплівів, а також стохастичним характером переносу розплавленого металу.

Експериментально встановлено, що найменша інтенсивність зношування (0,42 мг/м) досягається при середньому режимі електроіскрового легування (енергія імпульсу $\approx 0,32$ Дж), коли формується зміцнений шар товщиною ≈ 22 мкм з мікротвердістю ≈ 840 HV0.1 і помірною шорсткістю ($R_a \approx 0,82$ мкм), що забезпечує оптимальні умови контактної взаємодії.

Доведено, що зносостійкість поверхні визначається комплексною взаємодією параметрів шорсткості R_a , мікротвердості HV та товщини зміцненого шару h . Показано, що підвищення мікротвердості та товщини шару сприяє зменшенню інтенсивності зношування лише до певного рівня, після чого негативний вплив підвищеної шорсткості та залишкових напружень може призводити до погіршення трибологічних характеристик.

Застосування метрологічно обґрунтованого підходу, використання повірених засобів вимірювальної техніки та статистична обробка результатів забезпечили достовірність і відтворюваність експериментальних даних. Стандартне відхилення параметрів не перевищувало 3–5 %, що підтверджує стабільність процесу електроіскрового легування та надійність встановлених закономірностей.

Список літератури

1. Polischuk Ye. S., Dorozhovets M. M., Yatsuk V. O. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / за ред. Є. С. Поліщука. Львів: Бескид Біт, 2003. 544 с.
2. ДСТУ-Н РМГ 63:2013. Метрологія. Забезпечення ефективності вимірювань під час керування технологічними процесами. Метрологічна експертиза технічної документації (RMG 63-2003, IDT). Київ, 2013.
3. Лазаренко Б. Р. Електроіскрове легування металевих поверхонь. Київ: Наукова думка, 1986. 276 с.
4. Dorozhovets M., Stadnyk B., Motalo V., Vasyliuk V., Kovalchuk A., Borek R. Основи метрології та вимірювальної техніки. Т. 1. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2005. 532 с.
5. Wang J., Zhang M., Dai S., Zhu L. Research progress in electrospark deposition coatings on titanium alloy surfaces: a short review. *Coatings*. 2023. Vol. 13, № 8. P. 1473.
6. Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Renna G. Advancements in electrospark deposition (ESD) technique: a short review. *Coatings*. 2022. Vol. 12, № 10. P. 1536.
7. Yang S., Gao S., Xue W., Wu B., Duan D. Investigations on microstructure, oxidation and tribological behavior of NiCoCrAlYTa/Y₂O₃ blade tip protective coating produced by electro spark deposition. *Tribology International*. 2023. Vol. 180. P. 108274.
8. ISO 4287:1997. Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization, 1997.
9. ISO 6507-1:2018. Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method. International Organization for Standardization, 2018.
10. Mitutoyo Corporation. Surftest SJ-201P Portable Surface Roughness Tester. Bulletin No. 1795. Technical brochure.

References

1. Polischuk, Ye. S., Dorozhovets, M. M., Yatsuk, V. O., et al. (2003). *Metrology and measuring technology*. Lviv: Beskyd Bit [in Ukrainian].
2. DSTU-N RMG 63:2013. (2013). *Metrology. Ensuring measurement effectiveness during technological process control*. Kyiv [in Ukrainian].
3. Lazarenko, B. R. (1986). *Electrospark alloying of metal surfaces*. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
4. Dorozhovets, M., Stadnyk, B., Motalo, V., Vasyliuk, V., Kovalchuk, A., & Borek, R. (2005). *Fundamentals of metrology and measuring technology*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House [in Ukrainian].
5. Wang, J., Zhang, M., Dai, S., & Zhu, L. (2023). Research progress in electrospark deposition coatings on

- titanium alloy surfaces: A short review. *Coatings*, 13(8), 1473.
6. Barile, C., Casavola, C., Pappalettera, G., & Renna, G. (2022). Advancements in electrospark deposition (ESD) technique: A short review. *Coatings*, 12(10), 1536.
 7. Yang, S., Gao, S., Xue, W., Wu, B., & Duan, D. (2023). Investigations on microstructure, oxidation and tribological behavior of NiCoCrAlYTa/Y₂O₃ blade tip protective coating produced by electro spark deposition. *Tribology International*, 180, 108274.
 8. ISO 4287:1997. (1997). *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters*. ISO.
 9. ISO 6507-1:2018. (2018). *Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method*. ISO.
 10. Mitutoyo Corporation. (n.d.). *Surftest SJ-201P Portable Surface Roughness Tester*. Technical brochure.

Oleg Makovkin, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Igor Valchuk**

Khmelnitskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

Metrological and Technological Quality Assurance in Electrospark Alloying of Automotive Engine Parts Surfaces

The article is devoted to the study of the influence of electrospark alloying energy parameters on the formation of surface layer quality indicators of machine parts. The technological scheme of forming a strengthened surface layer by electrospark alloying is substantiated taking into account the physical mechanisms of electrode material transfer, thermal processes in the discharge zone, and the stochastic nature of surface microrelief formation.

It is established that the energy parameters of the process significantly influence the formation of surface microgeometry, microhardness, thickness of the strengthened layer, and wear intensity. With increasing discharge energy, the thickness of the strengthened layer and surface microhardness increase due to intensification of thermal and diffusion processes, while surface roughness also grows as a result of a more developed microrelief formation.

The analysis of experimental results showed that the minimum wear rate is achieved at a medium electrospark alloying режим, which provides an optimal combination of microhardness, strengthened layer thickness, and surface microgeometry. It is proved that wear resistance is determined by the complex interaction of surface roughness, microhardness, and strengthened layer thickness rather than by a single parameter.

A metrologically substantiated approach to quality evaluation is proposed, which includes the use of calibrated measuring instruments, statistical processing of results, and estimation of measurement uncertainty. The obtained analytical relationships make it possible to predict surface quality parameters and wear intensity depending on the energy режим of electrospark alloying and to ensure controlled formation of эксплуатационных свойств strengthened surfaces.

electrospark alloying, surface layer, microhardness, roughness, wear resistance, energy режимs, technology, equipment

Одержано (Received) 26.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 27.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026