

PACS numbers: 06.60.Vz, 62.20.me, 62.20.Qp, 81.40.Gh, 81.40.Np, 81.40.Pq, 81.65.Lp

Критерії експрес-оцінки зносостійкості та втоми деталей з криці з електроіскровими покриттями

Н. В. Зайцева, Д. С. Герцрикен, С. М. Кедровський, О. В. Філатов

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 36,
03142 Київ, Україна*

Запропоновано критерії експрес-оцінки зносостійкості та втоми деталей з криці з електроіскровими покриттями, яких було розроблено із застосуванням методу дослідження мікротвердості, що характеризують опір пластичній деформації та руйнуванню локальних об'ємів матеріалу та уможливають робити висновки про структурні зміни в досліджених ділянках.

Ключові слова: криця, покриття, електроіскрове легування, мікротвердість, зносостійкість, втома, експрес-оцінка.

Here, there are proposed criteria for express-evaluation of wear resistance and fatigue of steel parts with electric-spark coatings, which are developed using the microhardness method, that characterize the resistance to plastic deformation and destruction of local volumes of material and allow drawing conclusions about structural changes in the studied areas.

Key words: steel, coating, electrospark alloying, microhardness, wear resistance, fatigue, express-evaluation.

(Отримано 4 квітня 2024 р.; остаточн. варіант — 2 липня 2025 р.)

Corresponding author: Nataliya Vasylivna Zaytseva
E-mail: nataliza@gmail.com

*G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics, N.A.S. of Ukraine,
36 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: N. V. Zaytseva, D. S. Hertsryken, S. M. Kedrovskiy, and O. V. Filatov, Criteria for Express-Evaluation of Wear Resistance and Fatigue of Steel Parts with Electric-Spark Coatings, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **47**, No. 7: 819–826 (2025) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.47.08.0819](https://doi.org/10.15407/mfint.47.08.0819)

© Publisher PH 'Akademperiodyka' of the NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>)

1. ВСТУП

Різноманітні методи поверхневого оброблення, що були розвинуті останнім часом, дають змогу створювати нові матеріали з підвищеними експлуатаційними властивостями. Експлуатація деталей машин та інструментів в умовах важких навантажень висуває високі вимоги до якості поверхневого шару, зокрема до його зносостійкості та втомної міцності. Останніми роками прагнуть забезпечити ці характеристики не об'ємними, а поверхневими властивостями металу, що розширює спектр застосування конструкційних матеріалів.

Основні переваги електроіскрового способу нанесення металевих покриттів полягають у наступному. Покриття мають велику міцність зчеплення з матеріалом основи; поверхні, що покриваються, не потребують попередньої підготовки; можливе нанесення покриттів не тільки з металів та їхніх сплавів, а й з композиційних матеріалів. Слід додати, що за електроіскрового легування (ЕІЛ) поверхонь навіть низькоцупких деталей немає помітної деформації. Обладнання для ЕІЛ є простим за конструкцією та зручним в обслуговуванні.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Оскільки електроіскрові покриття створюються шляхом багаторазового локального впливу, формування структури та фазового складу електроіскрових покриттів перебігає неоднорідно.

Дослідження властивостей поверхні проводили методом вимірювання мікротвердості за допомогою устаткування ПМТ-3, що описує опір пластичній деформації та руйнуванню поверхневих частин матеріалу й уможливорює робити висновки про структурні зміни в них.

Знакозмінне навантаження зразків з електроіскровими покриттями проводили на вібраційному електродинамічному стенді ЗЕДС-200 з базою випробування у 10^7 циклів. Зношування поверхні зразків визначали експрес-методом за допомогою подряпування.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Нанесення електроіскрових покриттів на поверхню деталей з криці приводить до підвищення твердості поверхневих шарів внаслідок утворення в них шаруватої структури (рис. 1), що містить велику кількість твердих дисперсних фаз [1].

Формування фазового складу поверхневих шарів відбувається у жорстких умовах електроіскрового впливу. Високі швидкості нагрівання–охолодження (до 1000 К/с) і малий час впливу (10^{-3} с) зумовлюють аномальне масоперенесення елементів атмосфери та ма-

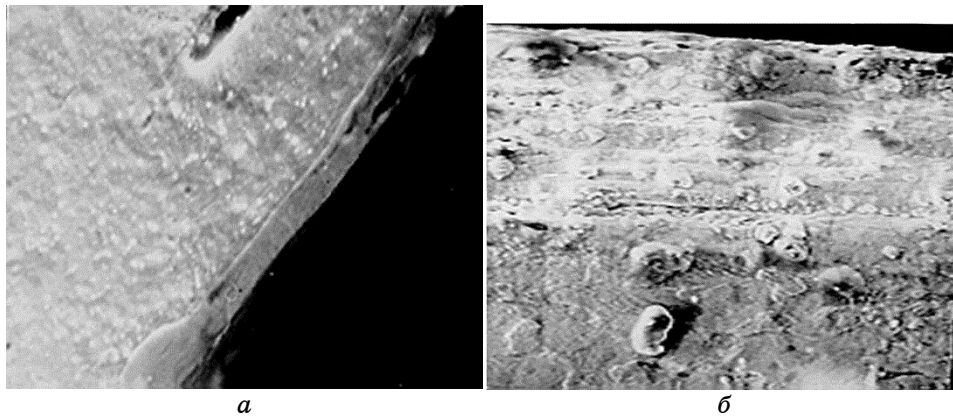


Рис. 1. Структура електроіскрових хромових покриттів за глибиною на криці 30ХГСА: після хемічного щавлення ($\times 70$) (а), після йонно-плазмового щавлення ($\times 70$) (б).

Fig. 1. The structure of the chrome-doped layer according to the depth of the electrospark chrome coatings on 30XGSA steel: after chemical etching ($\times 70$) (a), after ion-plasma etching ($\times 70$) (b).

теріялу легувальної електроди в глибину поверхневих шарів, а елементів, що складають підкладку, — з об'єму на її поверхню [1, 2].

Як зазначалося, оскільки електроіскрові покриття створюються шляхом багаторазового локального впливу, формування структури та фазового складу електроіскрових покриттів перебігає неоднорідно. У зв'язку з цим для вивчення зміни властивостей поверхневих шарів криць в результаті ЕІЛ та подальшої експлуатації потрібні характеристики, що уможливають експресно судити про процеси, що відбуваються в локальних об'ємах матеріялу. У цьому відношенні дуже цінним є метод дослідження мікротвердості, що характеризує опір пластичній деформації та руйнуванню локальних об'ємів матеріялу та дає змогу робити висновки про структурні зміни [3].

Проведені дослідження електроіскрових покриттів з різними складами легувальних електрод на крицях різних класів показали, що в процесі ЕІЛ відбувається істотне (від 50% до 180%) зміцнення поверхні деталей з криці (табл. 1 і 2), за винятком деяких мідьвмісних електрод, покриття з яких мають низький (10–20%) рівень зміцнення.

У загальному випадку зміцнення за електроіскрового оброблення пов'язане, в основному, з утворенням великої кількості твердих фаз. Як було представлено в [1], покриття на основі хрому, нітриду та карбіду Титану, а також повторно леговані Купрумом та Алюмінієм хромові покриття утворюють на поверхні деталей з криці неод-

ТАБЛИЦЯ 1. Мікротвердість електроіскрових покриттів на підкладниках із криці.**TABLE 1.** Microhardness of electrospark coatings on steel substrates.

Склад електроди	Значення мікротвердості, ГПа		
	середні	максимальні	мінімальні
Криця 30ХГСА, вихідна мікротвердість — 4,10 ГПа			
Хром	6,99	9,63	5,66
Хром + ППД	7,75	8,80	5,94
Хром + Алюміній	6,87	9,34	5,63
Хром + Алюміній + ППД	6,60	9,16	5,51
Хром + Купрум	4,53	5,74	2,66
Хром + Купрум + ППД	4,58	5,56	3,76
Хром + БрОС 10 (режим 1)	5,00	11,10	1,70
Хром + БрОС 10 (режим 2)	6,40	18,30	1,70
нітрид Титану	6,66	18,00	2,60
карбід Титану	4,65	10,20	2,72
карбонітрид Титану	9,43	18,80	5,80
TiC + 20% Ni	8,80	14,05	5,15
TiC + 20% Ni + Cr ₃ C ₂	6,51	14,38	5,38
Тантал	8,72	14,26	5,34
Тантал + Купрум	6,32	20,10	3,38
стоп Ti15K6	11,76	27,91	6,68
стоп Ti15K6 + Купрум	7,16	15,60	3,28
Криця 45, вихідна мікротвердість — 4,10 ГПа			
Хром	8,67	12,30	5,35
стоп ВК6	8,40	11,80	5,20
Криця Р9М4К8, вихідна мікротвердість — 5,30 ГПа			
нітрид Титану (режим 1)	6,68	17,90	3,60
нітрид Титану (режим 2)	8,10	18,70	5,90
карбід Титану	8,10	12,80	5,10

норідну структуру зі своєрідним рельєфом. Різниця в рівні мікротвердості електроерозійних кратерів і гладких ділянок між ними [1] зумовлює специфіку поведінки деталей під час експлуатації.

У процесі тертя поверхонь відбувається часткове руйнування контактувальних шарів, і продукти зношування, в основному тверді частинки стінок електроерозійних кратерів, заповнюють нерівності електроіскрового покриття, вдавлюючись у більш «м'які» ділянки та зміцнюючи їх. Проблема видалення продуктів зношення часто піднімають у літературі у зв'язку з вирішенням різних технологічних завдань. Так, у роботі [4] пропонується наносити борозенки-насічки на поверхні деталей, що труться, в тому випадку, коли застосування мастил або рідин небажане. В електроіскрових покриттях рельєф поверхні сам передбачає наявність місць скидання про-

ТАБЛИЦЯ 2. Мікротвердість і зміцнення зразків із криці після електроіскрового легування.**TABLE 2.** Microhardness and strengthening of steel samples after electro-spark alloying.

Матеріал катоди	Середні значення мікротвердості, ГПа	Зміцнення поверхні криці, %
Криця 30ХГСА, вихідна мікротвердість — 4,10 ГПа		
Хром	6,99	70,00
Хром + ППД	7,75	89,00
Хром + Алюміній	6,87	67,56
Хром + Алюміній + ППД	6,60	60,00
Хром + Купрум	4,53	10,50
Хром + Купрум + ППД	4,58	11,70
Хром + БрОС 10-10 (режим 1)	5,00	21,95
Хром + БрОС 10-10 (режим 2)	6,40	56,10
нітрид Титану	6,66	60,24
карбід Титану	4,65	13,40
карбонітрид Титану	9,43	130,00
TiC + 20% Ni	8,80	114,60
TiC + 20% Ni + Cr ₃ C ₂	6,51	107,50
Тантал	8,72	112,70
Тантал + Купрум	6,32	54,14
стоп Ti15K6	11,76	186,80
стоп Ti15K6 + Купрум	7,16	74,70
Криця 45, вихідна мікротвердість — 4,10 ГПа		
Хром	8,67	111,46
стоп ВК6	8,40	109,50
Криця Р9М4К8, вихідна мікротвердість — 5,30 ГПа		
нітрид Титану (режим 1)	6,68	26,00
нітрид Титану (режим 2)	8,10	52,83
карбід Титану	8,10	52,83

дуктів зношення під час тертя, що приводить до поліпшення міцності поверхні деталей.

Якщо нанести значення середньої мікротвердості $H_{\text{ср.}}$ (вісь абсцис) та відносної різниці середньої мікротвердості й величини розкиду $(H_{\text{ср.}} - \Delta H)/H_{\text{ср.}}$ (вісь ординат), то покриття з гарним (малим) зносом (табл. 3, 4) розташовуються в області під віссю абсцис (рис. 2). На основі наявних даних було пораховано межі значень середньої мікротвердості залежно від величини розкиду значень мікротвердості. Показано, що матеріали, у яких виконується співвідношення

$$1,4 < \Delta H/H_{\text{ср.}} < 4,4, \quad (1)$$

ТАБЛИЦЯ 3. Мікротвердість різних областей електроіскрових покриттів на криці 30ХГСА.**TABLE 3.** Microhardness of different areas of electrospark coatings on 30XGSA steel.

Матеріал електроди	H_{μ} поверхні, ГПа			H_{μ} перехідної зони, ГПа		
	серед.	макс.	мін.	серед.	макс.	мін.
Хром	6,99	9,63	5,66	7,30	13,70	3,67
Хром + Алюміній	6,87	9,34	5,63	7,12	9,83	4,21
Хром + Купрум	4,53	5,74	2,66	3,85	4,11	3,60
нітрид Титану	6,66	32,10	2,60	7,63	14,20	5,38
карбід Титану	4,65	10,20	2,72	5,46	12,90	3,35

виявляють задовільні характеристики ступеня зношення (табл. 4).

На рисунку 3 представлено графік залежності ступеня зношення R від відносної різниці середньої мікротвердості та розкиду значень мікротвердості. Одержана залежність

$$R = \exp(-2,65\Delta H/H_{\text{ср.}}) \cdot 10^9 \quad (2)$$

дає можливість ще до проведення випробувань на зношення, оцінити зносостійкість того чи іншого покриття на криці 30ХГСА, вимірявши мікротвердість покриття, визначивши її середнє значення та розкид значень, застосовуючи статистичне оброблення даних. Під час технологічного пошуку зносостійких покриттів цей метод має безперечні переваги.

Проведення втомних випробувань пов'язане з матеріальними, енергетичними та часовими витратами: підготовкою для кожного покриття партії зразків спеціальної форми (не менше 15 штук) і відпрацюванням їх на вібродинамічному стенді. Тому наявність

ТАБЛИЦЯ 4. Ступінь зношення поверхні деталей із криці з електроіскровими покриттями.**TABLE 4.** Degree of wear of the surface of steel parts with electrospark coatings.

№	Матеріал електроди	Товщина покриття, мкм	Ступінь зношення, кг/м ³
1	Хром	10–15	$9,0 \cdot 10^{-8}$
2	нітрид титану	10–15	$9,9 \cdot 10^{-10}$
3	карбід титану	10–15	$3,4 \cdot 10^{-10}$
4	карбонітрид титану	10–15	$7,4 \cdot 10^{-9}$
5	нелегована Ст30ХГСА	—	$1,5 \cdot 10^{-8}$

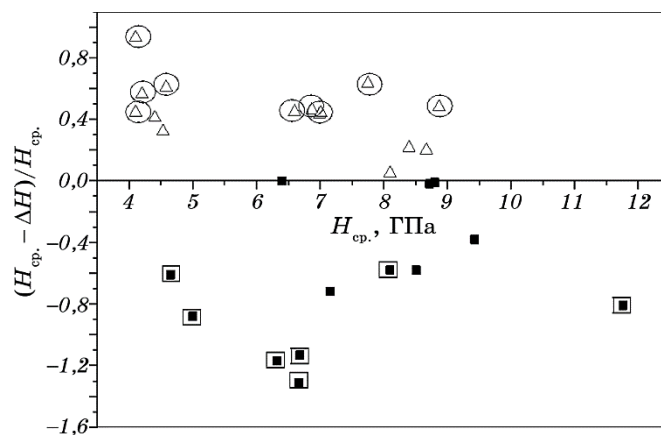


Рис. 2. Номограма значень середньої мікротвердості зразків з електроіскровими покриттями від відносної різниці середньої мікротвердості та величини розкиду значень мікротвердості; квадратиками обведено значення зразків з низькими характеристиками зношення, кружками — з високою межею втоми.

Fig. 2. Nomogram of the average microhardness of samples with electrosark coatings on the relative difference of the average microhardness and the amount of dispersion of the microhardness values; the values for the samples with good wear characteristics are circled by squares; in circles, there are the values for the samples with a high fatigue limit.

експресного методу оцінки істотно полегшує пошук і розробку складу електроди та режимів нанесення електроіскрових покриттів.

4. ВИСНОВКИ

1. У зразках, для яких виконується нерівність $1,4 < \Delta H/H_{ср.} < 4,4$, де $H_{ср.}$ — середня мікротвердість, а її розкид — ΔH , спостерігаються високі показники межі втоми. Метод є простим, доступним у будь-якій металознавчій лабораторії та не вимагає виготовлення великих партій зразків; достатньо нанести $1,5\text{--}2 \text{ см}^2$ електроіскрового покриття та провести статистичне оброблення дюрOMETричних вимірювань.

2. Співвідношення $R = \exp(-2,65\Delta H/H_{ср.}) \cdot 10^9$ дає можливість ще до проведення випробувань на зношення оцінити зносостійкість того чи іншого покриття на криці 30ХГСА, застосовуючи статистичне оброблення даних. Під час технологічного пошуку зносостійких покриттів цей метод має безперечні переваги.

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи з № держреєстрації 0122U002366 та відомчої теми № 111-13 (№ держреєстрації

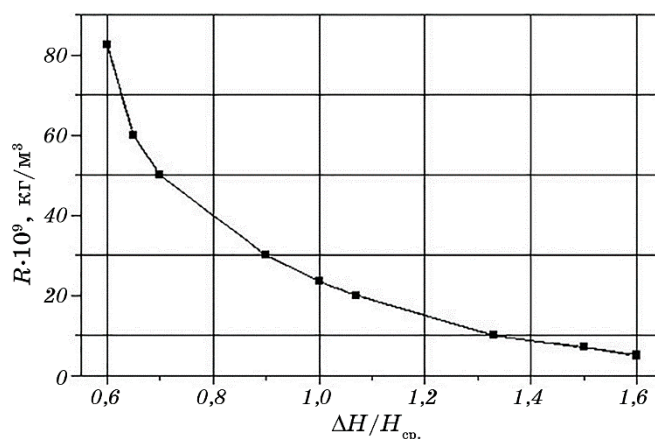


Рис. 3. Залежність ступеня зношення R деталей з криці з електроіскровими покриттями від відносного розкиду мікротвердості.

Fig. 3. Dependence of the degree of wear R of steel parts with electrospark coatings on the relative spread of microhardness.

0119U001168).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ю. О. Вронська, Н. В. Зайцева, С. М. Захаров, О. А. Шматко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **35**, № 5: 659 (2013).
2. N. V. Zaitseva, S. M. Zakharov, S. M. Kedrovskiy, O. A. Shmatko, and I. O. Shmatko, *Sci. Works XI Int. Sci. Conf. 'Functional Basis of Nanoelectronics' (Nov. 24–26, 2020, Kharkiv)*, p. 62.
3. N. V. Zaitseva, S. M. Zakharov, and O. A. Shmatko, *Tekhnolohichnyy Visnyk Podillya*, **2**, No. 1: 88 (2003).
4. Г. М. Сорокин, П. Н. Васкул, *Заводская лаборатория*, **62**, № 12: 49 (1996).

REFERENCES

1. Yu. O. Vrons'ka, N. V. Zaytseva, S. M. Zakharov, and O. A. Shmatko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **35**, No. 5: 659 (2013) (in Ukrainian).
2. N. V. Zaitseva, S. M. Zakharov, S. M. Kedrovskiy, O. A. Shmatko, and I. O. Shmatko, *Sci. Works XI Int. Sci. Conf. 'Functional Basis of Nanoelectronics' (Nov. 24–26, 2020, Kharkiv)*, p. 62.
3. N. V. Zaitseva, S. M. Zakharov, and O. A. Shmatko, *Tekhnolohichnyy Visnyk Podillya*, **2**, No. 1: 88 (2003).
4. G. M. Sorokin and P. N. Vaskul, *Zavodskaya Laboratoriya*, **62**, No. 12: 49 (1996) (in Russian).