

УДК 621.9.048:621.92

ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ СТАЛІ 40Х ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ЛЕГУВАННЯМ

С. І. КРИШТОПА, Д. Ю. ПЕТРИНА, І. М. БОГАТЧУК,
І. Б. ПРУНЬКО, В. М. МЕЛЬНИК

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Обґрунтовано правомірність використання методу електроіскрового легування поверхневих шарів сталі 40Х електродами з твердих сплавів Т15К6 та ВК8 для зміцнення робочих поверхонь елементів бурового устаткування. Виявлено, що через локальні електричні розряди між катодом і анодом уможлиблюється легування поверхневих шарів Со, W та Ti на глибину 10...20 мкм. Встановлено, що для забезпечення роботоздатності поверхнево зміцнених елементів за жорстких умов експлуатації необхідно досягти високої мікротвердості поверхневого шару, оптимізувати розміри і густину оксидів у ньому, а також мінімізувати залишкові напруження розтягу, які відповідальні за розтріскування. Для досягнення найкращої комбінації цих характеристик оптимізовано технологічні параметри електроіскрового легування.

Ключові слова: електроіскрове легування, поверхнєве зміцнення, структура, мікротвердість, залишкові напруження.

Підвищити довговічність штоків бурових насосів – одне з актуальних завдань видобувної галузі. В експлуатаційних умовах на них діють знакозмінні навантаження та агресивні середовища, а їх роботоздатність залежить від опору втомі, корозії та абразивному зношуванню. Причому саме властивості поверхневих шарів металу суттєво впливають на ці характеристики.

Штоки бурових насосів виготовляють із легованих сталей 12ХН4, 20ХН3А, 34ХН1М, використовуючи для їх поверхневого зміцнення цементацию, або 40Х, 40ХН, 38ХНЮА, застосовуючи гартування за нагріву струмами високої частоти [1]. Крім того, вживають також алмазне вібровигладжування [2], хромування [3] або цементацию, пластичне деформування гідродробинструментним обробленням [4], плазмове напилення порошками [5, 6]. Недоліками цих методів є технологічна складність, екологічна небезпечність тощо.

Різні за ефективністю технології поверхневого зміцнення штоків використовують всі провідні фірми з виготовлення нафтовидобувного обладнання [7]. Зокрема, фірми “National”, “Oilwell”, “Harrisburg”, “Reed American”, “TRW Mission” газотермічно напилюють штоки хромборнікелевим сплавом (технологія Colmonoy Spray) з оплавленням покриву та подальшим шліфуванням, забезпечуючи твердість HRC 60...62, фірма “Super Service” застосовує індукційне нагрівання на глибину до 1,5 mm з гартуванням до твердості HRC 59 [8]. Таким чином, попри те, що іноземні фірми виготовляють штоки з високоякісних легованих сталей, вони додатково зміцнюють їх поверхні, щоб забезпечити високу тривкість до абразивного зношування та корозії. Але відомі підходи, по-перше, дорогі, а по-друге, передбачають використання складного устаткування.

Останнім часом повертаються до порівняно дешевого та простого в реалізації методу поверхневого зміцнення електроіскровим легуванням (ЕІЛ) [9], теоре-

Контактна особа: І. Б. ПРУНЬКО, e-mail: igorprynko@rambler.ru

тичні основи якого вже описані [10]. Зміцнення відбувається внаслідок виділення в поверхневих шарах металу карбідів, інтерметалідів, твердих розчинів на основі матеріалів катода (зміцнювана деталь) та анода (електроди з високолегованих твердих сплавів). Їх легують за локально високої температури в околі електроіскрових розрядів, що забезпечує підвищену дифузійну рухливість елементів легування і, як наслідок, необхідні передумови для виділення зміцнювальних фаз, які визначають комплекс унікальних фізико-механічних властивостей оброблених поверхонь. ЕІЛ поліпшує зносотривкість і твердість металевих поверхонь деталей машин і технологічного оснащення [11, 12], дає змогу відновлювати зношені локальні ділянки деталей машин під час ремонту, збільшити шорсткість проміжного шару під лудіння і паяння, знизити перехідний опір електричних контактів та їх знос [13], підвищити жаротривкість сталі [14], замінити спеціальні сталі дешевшими і менш дефіцитними [15]. Водночас недостатньо обґрунтована робоздатність конкретних елементів конструкцій у реальному технологічному процесі видобування нафти після такого зміцнення.

Нижче обґрунтовано відповідність вимогам характеристик поверхневого зміцнення (твердість і залишкові напруження) за використання ЕІЛ для відновлення поверхні зношених штоків нафтовидобувних насосів.

Матеріали та методика досліджень. Поверхнєве зміцнення за технологією ЕІЛ реалізували на сталевих підкладках (сталь 40Х), використовуючи промислове устаткування “Елітрон-24А” та електроди з твердосплавних пластинок ВК8 (82% WC та 8% Co) та Т15К6 (79% WC, 15% TiC та 6% Co). Продуктивність поверхневого зміцнення 5 mm²/s. Стабільність горіння іскрових розрядів підтримували високочастотним вібратором, внаслідок чого катод і анод періодично (що 10⁻²...10⁻⁷ s⁻¹) зближувалися до виникнення між ними іскрових розрядів з мінімальним часом горіння. Інтенсивність розрядів та якість обробленої поверхні регулювали параметрами ЕІЛ (табл. 1). Обробляли поверхню штоків нафтовидобувних насосів за технологією ЕІЛ у повітрі. Глибину зміцненого шару нарощували в чотири проходи, застосовуючи різні за потужністю розряди. Так відбулося комплексне легування зміцнюваного шару елементами (Ti, Co та W), що входили до складу матеріалів анода. Через електричну ерозію поверхня анода руйнувалася, а поверхневі шари підкладки зміцнювались внаслідок легування Ti, Co та W. Крім того, через локальні температурні спалахи під час електроіскрових розрядів поверхневий шар гартувався на глибину до 50 μm, що додатково зміцнювало поверхню. Перепад висот між виступами і впадинами обробленої поверхні не перевищував 20 μm (5–6 клас чистоти поверхні).

Таблиця 1. Матеріали та параметри режимів для нарощування глибини обробленого шару на поверхні штока насоса

Режим	Матеріал електрода	Ємність блока накопичення, μF	Амплітуда імпульсів напруги, V	Частота вібрації інструменту, Hz	Енергія одиничного імпульсу, J	Середня глибина зміцненого шару, μm
T1	Т15К6	60±8	75±15	390±70	0,22	10
T2		150±15	75±16	250±50	0,42	15
T3		300±30	71±15	125±25	0,75	15
B1	ВК8	60±8	75±15	390±70	0,22	10
B2		150±15	75±16	250±50	0,42	20
B3		300±30	71±15	125±25	0,75	20

Внутрішні залишкові напруження у зміцненому шарі визначали на плоско-паралельних зразках завдовжки 100, товщиною 3 і шириною 10 mm, використовуючи формули для вільної (незащемленої) пластини [16]:

$$\sigma_{\max} = [E \cdot h_1 \cdot (h_1 - h_2)] / 6 \cdot \rho_k \cdot h_2, \quad \rho_k = L^2 / 8 \cdot \delta_{\max},$$

де σ_{\max} – максимальні внутрішні напруження у зміцненому шарі; E – модуль пружності металу підкладки; L , h_1 , ρ_k , δ_{\max} – довжина, товщина, радіус викривлення і максимальний прогин пластини; h_2 – глибина зміцненого шару.

Після зміцнення поверхневого шару зі штоків виготовляли косі шліфи, які травили 3%-им спиртовим розчином HNO_3 . Їх структуру аналізували на сканівному електронному EVO 40XVP. Мікротвердість за Віккерсом визначали приладом ПМТ-3 за навантаження 200 г як середнє значення 10–15 замірів.

Результати досліджень. Аналіз мікроструктури поверхневих шарів сталі 40X, зміцнених за технологією ЕІЛ з використанням електродів з твердих сплавів Т15К6 та ВК8, засвідчив, що мікротріщини поширилися на всю їх глибину після всіх режимів ЕІЛ (рис. 1).

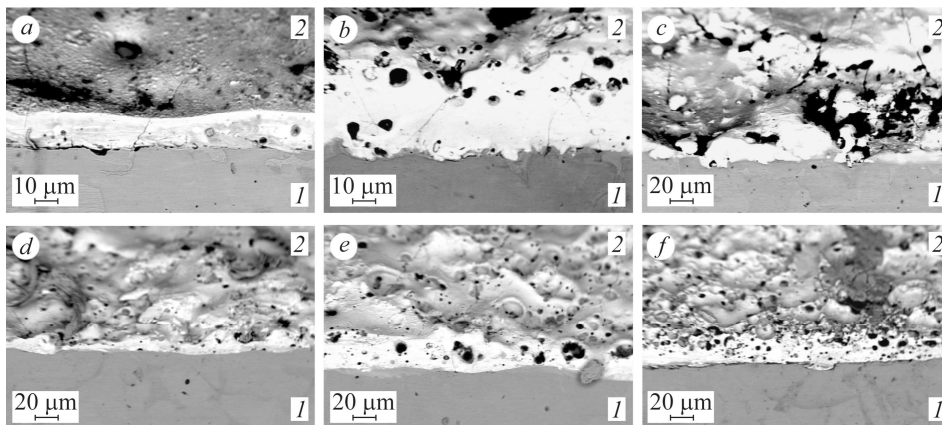


Рис. 1. Типова структура поверхневого шару сталі 40X, зміцненого за технологією ЕІЛ з використанням електродів з твердих сплавів Т15К6 (а–с) за режимів Т1 (а), Т2 (б) і Т3 (с) та ВК8 (d–f) за режимів В1 (d), В2 (e) та В3 (f) (див. табл. 1):
1 – підкладка; 2 – зміцнений шар.

Fig. 1. Typical structure of 40X steel surface layer of reinforced by electro-spark doping (ESD) technology and use of the T15K6 carbide electrodes (a–c) under T1 (a), T2 (b), T3 (c) regimes, and VK8 one (d–f) under B1 (d), B2 (e) and B3 (f) (see Table 1) regimes:
1 – base metal; 2 – hardened layer.

Як правило, тріщини орієнтовані під кутом $\sim 45^\circ$ до зміцнюваної поверхні, що могло бути наслідком полегшеного зсуву. Спричинити їх могли високі залишкові напруження в зміцненому шарі, які мали змогу релаксувати через появу таких тріщин. Найвищу мікротвердість зміцненого шару отримали після ЕІЛ за режимом Т2 (рис. 2), за якого досягли також найбільшої його глибини (до 15 μm) (рис. 1b).

Аналіз елементного складу поверхневих шарів, зміцнених твердосплавними пластинками Т15К6, виявив, що після ЕІЛ за режимом Т1 в шарі практично вдвічі менше карбідтвірних елементів (W, Ti), ніж за режимів Т2 і Т3 (табл. 2). Адже саме карбіди типу TiC , WC , W_2C забезпечують його твердість після ЕІЛ. Кобальт з твердосплавного електрода виконує роль високоміцного наповнювача-зв'язки для карбідів і, як свідчить спектральний аналіз, достатньо рівномірно розподілився по товщині зміцнених шарів. Водночас Fe, Ti і W розподілились нерівномірно

(максимуми на розподілі Fe відповідали мінімумам на розподілах Ti і W). Одне з найнижчих значень мікротвердості поверхневого шару (рис. 2), обробленого за режимом T1, спричинене найвищим вмістом у ньому Fe (табл. 2). А мікротвердість поверхні після режиму T3 (з максимальною кількістю W, Ti та Co) є найнижчою (можливо, через недостатню концентрацію вуглецю для формування карбідів). Адаже після режиму T2, коли мікротвердість зміцненого шару максимальна, вміст вуглецю у ньому суттєво вищий. Отримані результати про застосування технології ЕІЛ для відновлення зношених елементів узгоджуються з літературними [17, 18].

Після ЕІЛ за режимом T2 у структурі поверхневого шару виявили дрібнодисперсну евтектику TiC–WC карбідів розміром 0,05...0,1 μm (рис. 3). Оскільки вони відсутні в структурі поверхневих шарів, оброблених за режимами T1 і T3, то саме з ними пов'язали найвищу мікротвердість шару після режиму T2 (рис. 2).

Структура поверхневих шарів сталі 40X після ЕІЛ із використанням електродів з твердих сплавів BK8 і T15K6 візуально майже не відрізнялася (див. рис. 1). Проте їх мікротвердість змінилася суттєво (рис. 2). Зокрема, очевидна подібність мікроструктур у шарах з максимальною мікротвердістю, отриманих з використанням сплавів T15K6 (за режиму T2) та BK8 (за режиму B3). В обох випадках на поверхнях косих шліфів виявили круглі ямки, на дні яких здебільш були включення оксидів (рис. 1b, f). Найбільші за розмірами були ямки після режиму B2, а найменшу їх кількість виявили після режиму B1. Після режиму B3 спостерігали значну кількість дрібних оксидів, що зумовлено інтегрально високим вмістом кисню в поверхневому шарі.

Вміст вольфраму у поверхневих шарах, зміцнених електродами зі сплаву BK8 практично не залежить від режиму оброблення (табл. 2). Після режиму B1 тут зафіксували найвищий вміст заліза, а кобальту взагалі не ідентифікували. Цим пояснили найнижчу мікротвердість зміцненого за режимом B1 шару. Оскільки вміст вуглецю у шарі після режиму B3 вищий, ніж після B1, то дещо більшу мікротвердість пов'язали зі сприятливішими передумовами для формування більшої кількості карбідів вольфраму.

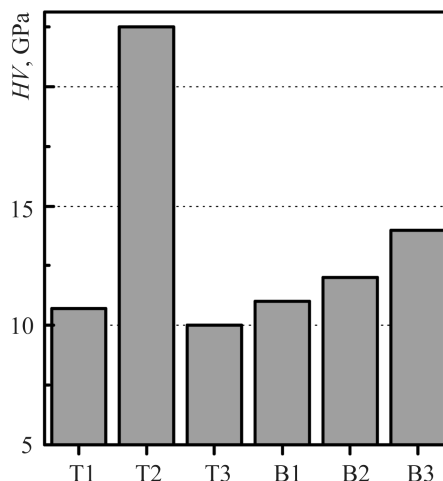


Рис. 2. Мікротвердість HV поверхневих шарів сталі 40X після оброблення за різними режимами ЕІЛ (див табл. 1) електродами з твердих сплавів T15K6 та BK8.

Fig. 2. Vickers's microhardness of 40X steel surface layers after treatment under different ESD technology regimes (see Table 1) using T15K6 and BK8 carbide electrodes.

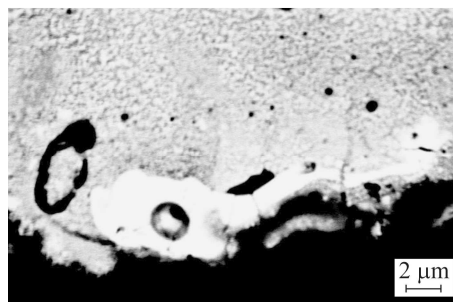


Рис. 3. Мікроструктура поверхневого шару сталі 40X після оброблення за технологією ЕІЛ за режимом T2 електродами з твердого сплаву T15K6.

Fig. 3. Microstructure of 40X steel surface layer after ESD technology under T2 regime using T15K6 carbide electrodes.

Таблиця 2. Поелементний склад поверхневого шару сталі 40X, зміцненого за різними режимами ЕЛТ твердими сплавами Т15К6 та ВК8 (результати спектрального мікроаналізу поверхонь зміцнених шарів площею $\sim 500 \mu\text{m}^2$)

Режим ЕЛТ згідно з табл. 1	Вміст елементів у зміцненому шарі, mass%					
	W	Co	Ti	Fe	O	C
T1	27,2	2,1	4,3	48,4	9,7	8,3
T2	57,4	4,1	9,8	10,2	5,5	13,0
T3	67,8	5,2	9,4	9,0	-	8,6
B1	55,5	-	-	31,1	2,3	11,1
B3	54,5	4,2		17,9	6,6	16,8

У зміцнених шарах незалежно від режиму оброблення виникають залишкові напруження першого роду [19]. Їх вплив на технологічні параметри ЕЛТ оцінили методом планування багатофакторного експерименту [20]. Використавши повнофакторний експеримент 2^3 , за функцію відгуку взяли залежність залишкових напружень від ємності накопичувача, амплітуди імпульсів, режиму легування. Математичну модель дії цих чинників на залишкові напруження прийняли у вигляді полінома першого ступеня, що враховує основні ефекти сумісної дії [20]: $y = b_0 + \sum_i b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_{ij}$, де b_0 , b_i , b_{ij} – коефіцієнти рівняння регресії, яке пов’я-

зує ємність батареї конденсаторів та амплітуду напруги імпульсу зі залишковими напруженнями. Цей розрахунковий експеримент дав можливість оцінити вплив перелічених вище технологічних чинників на залишкові напруження. Зокрема, зі збільшенням ємності накопичувача X_1 вони підвищувалися, а з ростом амплітуди імпульсів X_2 – зменшувалися [21]. Причому вплив ємності X_1 суттєвіший, ніж X_2 , а режиму легування – найслабший. Попри лінійним ефект дії цих чинників, ще істотнішим виявився ефект їх сумісного впливу, тобто за сумісної зміни ємності накопичувача і амплітуди імпульсів залишкові напруження можна зменшити ще відчутніше [21].

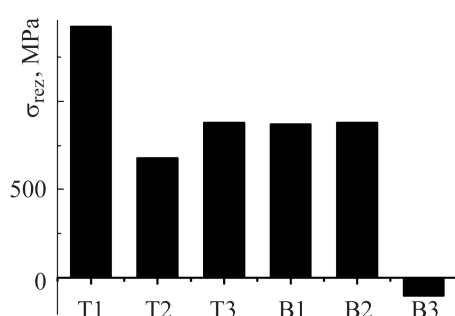


Рис. 4. Залишкові напруження першого роду у поверхневому шарі сталі 40X після зміцнення ЕЛТ за різних режимів електродами з твердих сплавів Т15К6 та ВК8.

Fig. 4. Residual stresses in the 40X steel hardened surface layer under various regimes of ESD technology using T15K6 and BK8 carbide electrodes.

Встановили, що за використання електродів з твердого сплаву Т15К6 за всіх режимів зміцнення у поверхневому шарі з’являються напруження розтягу першого роду (рис. 4), які під час ЕЛТ залежать від температури нагрівання, швидкості остигання, зменшення об’єму металу в часі кристалізації та схильності зміцненого шару релаксувати їх внаслідок формування у ньому мережі мікротріщин. Зокрема, за максимальних напружень розтягу (після режиму Т1) спостерігали мінімальне, а за суттєво нижчих (після режиму Т3) максимальне розтріскування зміцнених шарів. Оптимальним було поєднання мікротвердості та залишкових напружень після режиму Т2 зі середніми значеннями енергії одиничного імпульсу та частоти

вібрації електрода (табл. 1). За використання електрода із сплаву ВК8 напруження розтягу у зміцненому шарі виникали лише за режимів В1 і В2, а за режиму В3 – напруження стиску (рис. 4). Тріщин у зміцненому за режимом В3 шарі практично не виявили, що могло бути наслідком виникнення у ньому стискальних залишкових напружень. Крім того, за цього режиму перемішування розплавленого металу в зонах електроіскрових спалахів на підкладці було мінімальне через найнижчу частоту вібрації електрода (табл. 1). Це сприяло появі у зміцненому шарі значної кількості карбідів WC і, як наслідок, забезпечило йому максимальну (з поміж отриманих за використання електродів ВК8) мікротвердість.

ВИСНОВКИ

За результатами комплексного дослідження структури, мікротвердості, вмісту карбідтвірних елементів та залишкових напружень у зміцнених шарах на поверхні сталі 40X, отриманих за різними режимами електроіскрового легування твердими сплавами Т15К6 та ВК8, оптимізували технологічні параметри поверхневого зміцнення карбідом вольфраму на глибину 15 та 20 μm . За енергії одиничного імпульсу 0,42 та 0,75 J, а також частоти вібрації електрода 250 ± 50 та 125 ± 25 Hz мікротвердість зміцненого шару, сформованого електродами з твердих сплавів Т15К6 та ВК8, становила 22,5 та 14,0 GPa, а залишкові напруження – +680 і –100 МПа відповідно.

Виділено три чинники впливу на роботоздатність поверхнево зміцнених елементів конструкцій за жорстких умов їх експлуатації в нафтовидобувній галузі. По-перше, технологія електроіскрового легування має забезпечити високу мікротвердість поверхневого шару через його насичення карбідтвірними елементами. По-друге, розміри і густина оксидів у зміцненому шарі повинні бути оптимальними, бо саме вони визначають його поруватість і здатність матриці релаксувати залишкові напруження. І, по-третє, мінімізація розтягальних залишкових напружень у ньому, які відповідають за розтріскування зміцненого шару. Оптимізація впливу всіх цих чинників – необхідна передумова використання цього методу поверхневого зміцнення для відновлення штоків промислових насосів нафтовидобувної галузі.

РЕЗЮМЕ. Обоснована правомірність використання метода електроіскрового легирования поверхностных слоев стали 40X электродами из твердых сплавов Т15К6 и ВК8 для упрочнения рабочих поверхностей элементов бурового оборудования. Выявлено, что в результате локальных электрических разрядов между катодом и анодом происходит легирование поверхностных слоев Co, W и Ti на глубину 10...20 μm . Установлено, что для обеспечения работоспособности поверхностно упрочненных элементов в жестких условиях эксплуатации необходимо обеспечить высокую микротвердость упрочненного слоя, оптимизировать размеры и плотность оксидов в нем, а также минимизировать остаточные напряжения растяжения, ответственные за растрескивание. Для достижения наилучшей комбинации этих характеристик оптимизированы технологические параметры электроіскрового легирования.

SUMMARY. The usefulness of the electric spark doping method by T15K6 and BK8 carbide electrodes for hardening of 40X steel surface layers of the drilling equipment elements is substantiated. It is shown that as a result of local electric sparks between the cathode and the anode the surface layers can be alloyed by Co, W and Ti to a depth of 10... 20 μm . Three factors of influence on the workability of surface-hardened elements under severe operating conditions of the oil-extracting industry equipment are singled out. It is stated that to ensure operating capacity of surface hardened elements under severe operating conditions it is necessary to ensure the high values of hardened surface layers microhardness and to optimize the oxide parameters and density in this layer. To achieve the best combination of these characteristics the technological parameters of electric spark alloying are optimized.

1. Ильский А. Л., Миронов Ю. В., Чернобыльский А. Г. Расчет и конструирование бурового оборудования. – М.: Недра, 1985. – 452 с.

2. Шишов В. В., Леснин А. С. Повышение качества бурового и нефтепромыслового оборудования с помощью технологических методов формирования поверхностного слоя деталей // Технология химического и нефтехимического машиностроения и новые материалы. Сер. ХМ-9. – М.: ЦИНТИ и техн.-экон. исслед. по хим. и нефт. машиностр., 1981. – 62 с.
3. Roryak L. and Ostarovych V. Optimization of process parameters of chrome plating for providing quality indicators of reciprocating pumps parts // Eastern-European J. Enterprise Techn. – 2016. – 2, № 5(80). – P. 50–62.
4. Дячук В. В., Гордійчук М. В. Устаткування технологічного транспорту. Конспект лекцій. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2000. – 98 с.
5. Нефтепромысловое оборудование: Справ. / Под. ред. Е. И. Бухаленко. – М.: Недра, 1990. – 560 с.
6. Литвинов В. М. Повышение надежности нефтепромышленных насосов. – М.: Недра, 1978. – 192 с.
7. Романов А. З., Малкин И. Б., Рудаковский И. Е. Зарубежные буровые насосы и сменные детали их гидравлической части // Нефтепромысловое машиностроение. Сер. ХМ-3. – М.: ЦИНТИ, 1985. – 44 с.
8. Петрина Ю. Д., Квас М. І., Яким Р. С. Підвищення довговічності штоків бурових насосів // Наук. вісник ІФНТУНГ. – 2010. – № 4(26). – С. 52–56.
9. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Г. В. Самсонов, А. Д. Верховуров, Г. А. Бовкун, В. С. Сычев. – К.: Наук. думка, 1976. – 220 с.
10. Завойко О. С. Теоретичні основи електротехнології зміцнення металів. – Чернівці: Рута, 2003. – С. 8–24.
11. Examining the effect of triboelectric phenomena on wear-friction properties of metal-polymeric frictional couples / S. Kryshchtopa, L. Kryshchtopa, I. Bogatchuk, I. Prunko, and V. Melnyk // Eastern-European J. Enterprise Technol. – 2017. – 85, № 1/5. – P. 40–45.
12. Dykha A. V. and Kuzmenko A. G. Solution to the problem of contact wear for four-ball wear-testing scheme // J. Friction and Wear. – 2015. – 36, № 2. – P. 138–143.
13. Завойко О. С., Новіков С. М. Механізація процесу електроіскрового легування із застосуванням реакційних властивостей газів // Фізика і хімія твердого тіла. – 2013. – 14, № 4. – С. 897–903.
14. Optimization of the composition, structure, and properties of electrode materials and electrospray coatings for strengthening and reconditioning of metal surfaces / A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, R. A. Alfintseva, S. N. Kirilenko, and D. Z. Yurchenko // Surf. Eng. and Appl. Electrochem. – 2013. – 49, № 1. – P. 4–12.
15. Завойко О. С., Новіков С. М. Механізм процесу електроіскрового легування із газовим осадженням // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 3(48). – С. 119–126.
16. Напряжения и деформации в элементах микросхем / В. С. Сергеев, О. А. Кузнецов, Н. П. Захаров, В. А. Летяги. – М.: Радиосвязь, 1987. – 88 с.
17. Прунько І. Б., Богатчук Ю. І., Марков А. Д. Відновлення зношених поверхонь штоків нафтопромислових насосів електроіскровим нарощуванням і зміцненням // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2009. – С. 569–574.
18. Богатчук Ю. І., Прунько І. Б. Відновлення розмірних параметрів зношених зовнішніх поверхонь штовхачів ЗИЛ-130 електроіскровим нарощуванням і зміцненням // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 29(1002). – С. 34–41.
19. Прунько І. Б., Богатчук Ю. І., Студент М. М. Структура і залишкові напруження в поверхневому шарі сталі 45 після електроіскрового оброблення електродами зі сплавів Т15К6 та ВК8 // Наук. нотатки. – 2009. – Вип. 26. – С. 255–260.
20. Оптимізація технологічних параметрів електроіскрового зміцнення деталей нафтогазового технологічного транспорту / І. Б. Прунько, І. М. Богатчук, С. І. Криштопа, Б. В. Додішній // Проблеми трибології. – 2012. – № 4. – С. 43–48.
21. Евдокимов Ю. А., Колесников В. И., Тетерин А. И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980. – 228 с.

Одержано 13.04.2017