

PACS numbers: 52.80.Mg, 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.55.Ln, 81.15.Rs, 81.65.Lp, 82.33.Xj

**Удосконалення параметрів якості поверхневих шарів деталей
з криці після алітування методом електроіскрового легування.
Ч. 1. Особливості структурного стану крицевих поверхонь після
алітування**

О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник*, Т. І. Жиленко, Н. В. Тарельник*,
О. А. Саржанов*, В. І. Мельник**, В. М. Власовець***,
С. В. Павловський*, В. О. Охріменко, А. В. Ткаченко*

*Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

**Сумський національний аграрний університет,
вул. Герасима Кондратьєва, 160,
40021 Суми, Україна*

***Державний біотехнологічний університет,
вул. Алчевських, 44,
61002 Харків, Україна*

****Львівський національний університет природокористування,
вул. Володимира Великого, 1,
30831 Дубляни, Україна*

Corresponding author: Oksana Petrivna Haponova
E-mail: gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

*Sumy State University,
2 Rymsky-Korsakov Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

**Sumy National Agrarian University,
160 Gerasym Kondratiev Str., UA-40021 Sumy, Ukraine*

***State Biotechnological University,
44 Alchevskikh Str., UA-61002 Kharkiv, Ukraine*

****Lviv National Environmental University,
1 Volodymyra Velykoho Str., UA-30831 Dublyany, Ukraine*

Citation: O. P. Haponova, V. B. Tarel'nyk, T. I. Zhylenko, N. V. Tarel'nyk, O. A. Sarzhanov, V. I. Mel'nyk, V. M. Vlasovets', S. V. Pavlovskyy, V. O. Okhrimenko, and A. V. Tkachenko, Improvement of Quality Parameters of Surface Layers of Steel Parts after Aluminizing by Electrospark Alloying. Pt. 1. Features of the Structural State of Steel Surfaces after Aluminizing, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 12: 1449–1472 (2023) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.45.12.1449](https://doi.org/10.15407/mfint.45.12.1449)

В статті проведено аналізу структуроутворення та властивостей поверхневих шарів деталей з криці після алітування традиційними технологіями та методом електроіскрового легування (ЕІЛ). В результаті дослідження продуктивності процесу ЕІЛ алюмінійовою електродою-інструментом, яка є одним з важливих параметрів технології ЕІЛ, виявлено резерви для підвищення якості поверхневих шарів деталей з криці за алітування. Досліджували два варіанти зменшення продуктивності по відношенню до традиційної: перший, коли продуктивність було зменшено \cong в два рази; другий, коли продуктивність було зменшено \cong в чотири рази. Встановлено, що в першому варіанті із зростанням енергії розряду з 0,52 до 6,8 Дж на першому етапі алітування криці 20 і криці 40 товщина «білого» шару збільшується з 20 до 75 і з 25 до 110 мкм відповідно, а дифузійної зони — з 35 до 120 і з 40 до 140 мкм відповідно; мікротвердість «білого шару» зростає з 2200 до 7400 і з 2400 до 7450 МПа відповідно; шерсткість поверхні Ra зростає з 1,1 до 9,0 і з 1,0 до 8,1 мкм відповідно, а суцільність зростає з 80 до 100% починаючи з $Wp = 4,6$ Дж і з 60 до 100% із $Wp = 6,8$ Дж. В другому варіанті із зростанням енергії розряду з 0,52 до 6,8 Дж на першому етапі оброблення криці 20 і криці 40 товщина «білого» шару збільшується для криці 20 з 25 до 60 мкм із $Wp = 4,6$ Дж, а потім не змінюється і для криці 40 з 30 до 100 мкм; товщина дифузійної зони зростає з 45 до 130 відповідно; мікротвердість «білого шару» зростає з 2250 до 7300 і з 2450 до 7300 МПа відповідно; шерсткість поверхні Ra зростає з 1,3 до 9,0 і з 1,6 до 8,1 мкм відповідно, а суцільність, як для криці 20, так і для криці 40 із $Wp = 0,52$ Дж складає 95%, а далі підвищується до 100%.

Ключові слова: електроіскрове легування, алітування, продуктивність, поверхневий шар, структура, шерсткість, мікротвердість, товщина «білого шару», суцільність покриття.

The structure formation and properties of the surface layers of steel parts after alloying by traditional technologies and the method of electrospark alloying (ESA) is analysed in the article. As a result of the study of the productivity of the ESA process by aluminium electrode-tool, which is one of the important parameters of the ESA technology, reserves are revealed for improving the quality of the surface layers of steel parts during aluminizing. Two options for reducing productivity in relation to the traditional are studied: the first one, when productivity is reduced by $\cong 2$ times; the second one, when performance is reduced by $\cong 4$ times. As established, in the first variant, when the discharge energy increases from 0.52 to 6.8 J, at the first stage of aluminizing of steel 20 and steel 40, the thickness of the 'white' layer from 20 to 75 and from 25 to 110 μm , respectively; the thickness of the diffusion zone increases from 35 to 120 and from 40 to 140 μm , respectively; the microhardness of the 'white layer' increases from 2200 to 7400 and from 2400 to 7450 MPa, respectively; the surface roughness Ra increases from 1.1 to 9.0 and from 1.0 to 8.1 μm , respectively, and the continuity increases from 80 to 100% starting with $Wp = 4.6$ J and from 60 to 100% at $Wp = 6.8$ J. In the second variant, when the discharge energy increases from 0.52 to 6.8 J, at the first stage of processing steel 20 and steel 40, the thickness of the 'white' layer increases for steel 20 from 25 to 60 μm at $Wp = 4.6$ J, and then it doesn't change for steel 40 from 30 to 100 μm ; the thickness of the diffusion

zone increases from 45 to 130, respectively; the microhardness of the 'white layer' increases from 2250 to 7300 and from 2450 to 7300 MPa, respectively; the surface roughness Ra increases from 1.3 to 9.0 and from 1.6 to 8.1 μm , respectively, and the continuity for both steel 20 and steel 40 at $Wp = 0.52 \text{ J}$ is of 95% and further increases to 100%.

Key words: electrospark alloying, aluminizing, productivity, surface layer, structure, roughness, microhardness, thickness of the 'white layer', coating continuity.

(Отримано 30 травня 2023 р.; остаточн. варіант — 25 липня 2023 р.)

1. ВСТУП

Однією з найважливіших проблем, які стоять перед конструкторами та технологами під час створення нових машин і механізмів, є знос їхніх деталей. До певного часу виготовлення відповідальних деталей, від стану поверхневого шару яких залежала працездатність усієї машини, використовували цілісні тверді зносостійкі матеріали [1, 2]. З часом, завдяки розвитку багатьох галузей машинобудування та появи сучасних, більш досконалих машин, зростають вимоги до їхніх деталей, які працюють в екстремальних умовах довілля та постійно зростаючих робочих параметрів (тиску, температури, швидкості, радіаційного впливу та ін.). Вирішення завдання підвищення їхніх надійності та довговічності шляхом вибору твердих високолегованих та важкооброблюваних матеріалів частково вичерпало себе. Триботехнологи з огляду на те, що руйнування деталі починається з поверхні, більше уваги стали приділяти поверхневим шарам деталі, де якраз і відбуваються процеси, пов'язані зі зношуванням. У літературних і патентних джерелах з'являється все більше праць, пов'язаних з дослідженням процесів, що відбуваються в поверхнях деталей [3–5], удосконаленням відомих [6, 7] та розробкою нових технологій [8–10], що уможливають керувати параметрами якості поверхневих шарів деталей у необхідному напрямі. Нові композиційні матеріали, що складаються з більш дешевого та легкооброблюваного матеріалу основи і мають поверхневий шар, сформований за рахунок застосування прогресивної, мало енергоємної й екологічно безпечної технології, не поступаються, а за окремими показниками (довговічність, вартість, витрата металорізального інструмента й оснащення, наявність легувальних елементів та ін.) перевершують деталі, виготовлені з суцільного матеріалу.

Таким чином, дослідження зі створення нових матеріалів, що мають підвищену поверхневу зносостійкість, відносно високу міцність і в'язкість, є актуальними та своєчасними [11–13].

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В даний час у конструкторів і технологів є дуже великий запас технологій, призначених для надання поверхневому шару деталі необхідних фізичних, хемічних, трибологічних та експлуатаційних властивостей. Для захисту поверхонь деталей від різних видів зношування та негативного впливу навколишнього середовища їх піддають різним видам зміцнення. Це — різні способи напорошення металокерамічних покриттів [14, 15], натоплення покриття з композиційних матеріалів [16, 17], армування поверхневих шарів криці частинками карбіду Вольфраму [18], покриття з шарами оксиду Алюмінію [19, 20], електрохемічне хромування в електроліті [21]. Однією з найбільш широко застосовуваних технологій підвищення якості поверхонь деталей є хеміко-термічне оброблення (ХТО) [22–24], яке поєднує в собі цементацію, азотування, нітроцементацію та ряд інших методів. Одним із затребуваних методів ХТО є алітування, яке використовують з метою надання залізовуглецевим стопам підвищеної циндростійкості, опору атмосферній корозії та ряду інших властивостей. Комплексні покриття після алітування [25] характеризуються високою температурою топлення, низькою густиною, високим модулем пружності, жароміцністю, стійкістю до окиснення та займання. Останнім часом їх використовують також для створення захисних і зносостійких покриттів.

За класичною технологією алітування полягає у насиченні поверхні деталі з криці у розтопі алюмінію. В галузі цієї технології досліджували структуру та фазовий склад покриття [26, 27], його вплив на структуру та властивості виробів після алітування конструкційних криць у розтопленому алюмінії [28]. Незважаючи на позитивні результати, класична технологія алітування у розтопах має ряд недоліків, притаманних ХТО [9].

Особливе місце серед зміцнювальних технологій займають технології, що використовують для оброблення матеріалу концентровані потоки енергії (КПЕ), за яких складаються нерівноважні умови нагріву й охолодження, що тягне за собою формування принципово інших, аніж за традиційних методів оброблення, структур поверхневого шару. Це — плазмові технології: напорошення [29–31] та плазмове оброблення [32, 33], лазерне оброблення [34–36]. Сюди слід віднести одну з найбільш перспективних сучасних технологій, застосування якої уможливило управляти параметрами якості поверхонь деталей — електроіскрове легування (ЕІЛ). Завдяки технології ЕІЛ у поверхневих шарах деталей формуються структури, що мають унікальні фізико-механічні та трибологічні властивості на нанорівні [37]. Серед основних переваг технології ЕІЛ порівняно з традиційними методами поверхневого оброблення можна відзначити: екологічну та техногенну безпеку, застосування в локальних

місцях, що не потребує захисту сусідніх поверхонь від негативного впливу процесу, високий ступінь адгезії металу, що наноситься, відсутність жолоблення та деформацій, здатність вбудовуватися в будь-який технологічний процес [38–40].

До недоліків ЕІЛ відносять: підвищення шерсткості та нерівномірності поверхні, виникнення в поверхневому шарі пор, залишкових розтягувальних напружень, пониження втомної міцності [41, 42]. Зазначимо, що в результаті подальшого оброблення поверхневим пластичним деформуванням усі ці недоліки усуваються, а втомна міцність стає вищою, ніж була до оброблення ЕІЛ [43, 44].

До недоліків методу ЕІЛ іноді відносять обмеження формування поверхневих шарів за товщиною, хоча є технології, за використання яких можна одержати зносостійкі покриття високої якості (100% суцільності та товщиною до 1,0 мм і навіть більше) [45].

Що стосується наявності в покритті пор, то це також є перевагою методу ЕІЛ. Технологи упродовж багатьох років шукають шляхи до створення такої структури поверхневого шару, в порах якого могло б утримуватися мастило в парах тертя [46], наприклад в підшипникових шийках валів [47, 48].

Як показано [49, 50], електроіскрові алюмінієві покриття надійно захищають крицю в фосфорнокислих і водно-сольових середовищах.

Аналіза відповідної літератури та патентних джерел, а також низка досліджень, проведених авторами цієї роботи [51–53], показали, що для з'ясування параметрів роботи обладнання установок ЕІЛ в широкому діапазоні досліджувалась енергія розряду W_p , а продуктивність бралася згідно з рекомендаціями табл. 1.

Слід відмітити, що параметри продуктивності, представлені в табл. 1, більш підходять за використання в якості матеріалу електроди-інструмента твердих зносостійких металів (ванадій, титан, вольфрам та ін.); тому є наукова та практична доцільність у проведенні досліджень впливу продуктивності ЕІЛ в більшому діапазоні часу легування на параметри якості сформованого поверхневого шару за використання електроди-інструмента з алюмінію.

Таким чином, метою роботи є: дослідження впливу продуктивності процесу електроіскрового легування поверхонь з криці алюмінієвою електроною-інструментом на структуроутворення та параметри якості поверхневого шару криці 20 і криці 40 після аліту-

ТАБЛИЦЯ 1. Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду.

TABLE 1. Dependence of ESA performance on discharge energy.

Енергія розряду W_p , Дж	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Продуктивність, см ² /хв.	1,0–1,3	1,3–1,5	1,5–2,0	2,0–2,5	2,5–3,0

вання; дослідження впливу спеціальних насичувальних середовищ, в склад яких входять леґувальні елементи, що поліпшують властивості поверхневих шарів деталей з криці.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

В роботі для дослідження впливу продуктивності процесу ЕІЛ зразків із криці 20 і криці 40 під час формування поверхневого шару після оброблення алюмінійовою електродою-інструментом (алітування) використовували два варіанти зменшення продуктивності по відношенню до вказаної у табл. 1. В таблиці 2 представлено дані цих варіантів: перший, коли продуктивність було зменшено \cong в два рази; другий, коли продуктивність було зменшено \cong в чотири рази.

Кожен з варіантів виконували в два етапи: 1-й етап — оброблення проводять алюмінійовою електродою за енергії розряду $W_p = 0,52\text{--}6,8$ Дж і продуктивності згідно з табл. 2; 2-й етап — на поверхню, що зазнала алітування на 1-му етапі перед подальшим ЕІЛ алюмінійовою електродою наносили консистентну речовину, яка містить алюмінійову пудру, або графітовий порошок і алюмінійову пудру, після чого, не чекаючи висихання консистентної речовини, проводили процес алітування за енергії розряду у $0,52\text{--}2,6$ Дж і продуктивності у $0,2\text{--}0,4$ см²/хв.; енергію розряду та продуктивність обирали такі, за яких шерсткість поверхні зменшується в 4 рази. Для визначення впливу енергетичних параметрів обладнання ЕІЛ на якісні параметри покриттів виготовляли зразки з криць 20 і 40 розміром $15 \times 15 \times 8$ мм, на які на першому етапі (обох варіантів) наносили покриття алюмінійовою електродою на установці моделю «Елітрон 52А» з використанням різних режимів; кожному режиму ЕІЛ відповідала своя енергія розряду та продуктивність — площа сформованого покриття в одиницю часу.

На сформоване на 1-му етапі алюмінійове покриття наносили консистентну речовину, яка складалася з вазеліну (10%) і алюмінійової пудри (90%) або алюмінійової пудри (45%) та порошку графіту (45%).

З метою пониження шерсткості поверхні після ЕІЛ алюмінієм на 1-му етапі проводили алітування тією ж алюмінійовою електродою, не чекаючи висихання консистентної речовини з вазеліну й алюмі-

ТАБЛИЦЯ 2. Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду.

TABLE 2. Dependence of ESA productivity on discharge energy.

Енергія розряду W_p , Дж	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Продуктивність, Перший варіант см ² /хв.	0,5–0,6	0,6–0,7	0,7–1,0	1,0–1,2	1,2–1,5
Другий варіант	0,2–0,3	0,3–0,4	0,4–0,5	0,5–0,6	0,6–0,7

нійової пудри, але на менших режимах. З метою пониження шерсткості поверхні та підвищення мікротвердості в поверхневому шарі після ЕІЛ алюмінієм на 1-му етапі проводили алітування тією ж електродою, не чекаючи висихання консистентної речовини з алюмінійової пудри та порошку графіту, та також на менших режимах.

Шерсткість поверхні визначали на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття й обробки профілограм. Структури поверхневого шару вивчали на оптичному мікроскопі «Неофот-2», за допомогою якого проводили оцінку якості шару, його суцільності, товщини «білого» шару та будови зон підшару. На мікротвердомірі ПМТ-3 проводили дюрOMETричну аналізу на розподіл мікротвердості в поверхневому шарі та по глибині шліфу від поверхні.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Перший варіант. На рисунку 1 зображено різні ділянки структури поверхневого шару зразка криці 20 після ЕІЛ алюмінійовою електродою з енергією розряду $Wp = 0,52$ Дж (а), 1,3 Дж (б), 2,6 Дж (в), 4,6 Дж (г), 6,8 Дж (д). В результаті аналізу структури сформованого поверхневого шару слід зазначити, що його суцільність зі збільшенням енергії розряду зростає та, починаючи з $Wp = 2,6$ Дж, прагне до 100%. Товщина «білого» шару та дифузійної зони у міру збільшення енергії розряду збільшується з 20 до 75 мкм і з 35 до 120 мкм відповідно із зміною Wp з 0,52 до 6,8 Дж.

Шерсткість поверхні зі зменшенням продуктивності ЕІЛ (з використанням 1-го варіанту досліджень) зменшилася по відношенню до величини шерсткості, яка відповідає продуктивності, вказаній у табл. 1. Це, скоріше за все, відбувається в зв'язку з тим, що зі зменшенням продуктивності процесу ЕІЛ збільшується час оброблення 1 см^2 площі поверхні. Водночас по одній ділянці поверхні перебігає декілька «проходів» електроди-інструмента з алюмінію та чим більше цих «проходів», тим менше матеріалу основи (криці) знаходиться в поверхневому шарі. В результаті, зі збільшенням часу оброблення 1 см^2 площі поверхні (зменшенням продуктивності), леґувальна алюмінійова електрода-інструмент контактує з більшою кількістю алюмінію, що знаходиться в поверхневому шарі.

Даний порядок формування шарів за нанесення декількох наступних шарів сприяє розтопленню спочатку нанесеного покриття з більш легкоплавкого металу (алюмінію), заповненню ним шерсткості та пор покриття, що формується. Кристалізація кожного наступного шару відбувається повільніше за рахунок акумулювання тепла розтопом легкоплавкого металу (алюмінію), якого з кожним наступним «проходом» електроди-інструмента з алюмінію стає більше в покритті, ніж криці.

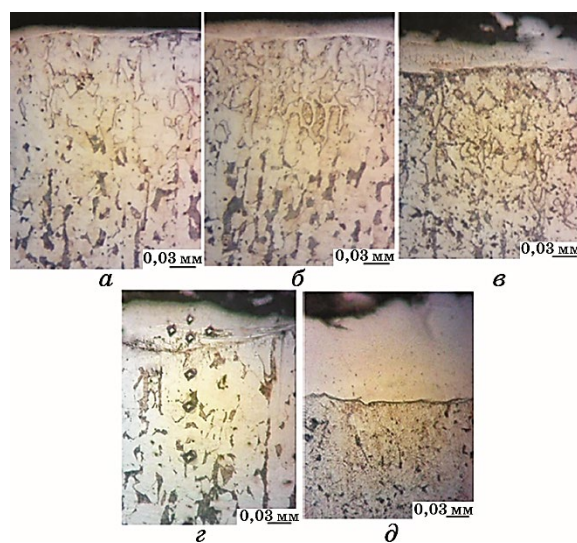


Рис. 1. Ділянки структури поверхневого шару криці 20 після ЕІЛ алюмінійовою електродою за $Wp = 0,52$ Дж (а), 1,3 Дж (б), 2,6 Дж (в), 4,6 Дж (г) і 6,8 Дж (д).

Fig. 1. Areas of the structure of the surface layer of steel 20 after ESA with an aluminium electrode at $Wp = 0.52$ J (a), 1.3 J (б), 2.6 J (в), 4.6 J (г), and 6.8 J (д).

ТАБЛИЦЯ 3. Результати дюрOMETричної аналізи поверхневих шарів криці 20 і криці 40.

TABLE 3. Results of durometric analysis of the surface layers of steel 20 and steel 40.

Енергія розряду, Дж	Розподіл мікротвердості H_{μ} в поверхневому шарі у міру поглиблення із кроком міряння у 30 мкм							
	30	60	90	120	150	180	210	240
Криця 20								
0,52	2200±20	1800±50	1700±50					
1,30	2250±20	1900±50	1800±50	1700±50				
2,60	2900±20	2570±50	2250±50	2000±70	1700±50			
4,60	5300±20	4800±50	4100±50	3100±70	2550±90	1800±90	1700±80	
6,8	7400±20	5700±50	4800±50	3550±70	2790±90	2530±90	1950±80	1700±70
Криця 40								
0,52	2400±20	2100±50	1700±50					
2,60	3650±20	2620±50	2350±50	1900±70	1700±50			
6,8	7450±20	5750±50	4870±50	3600±70	2890±90	2550±90	2000±80	1700±70

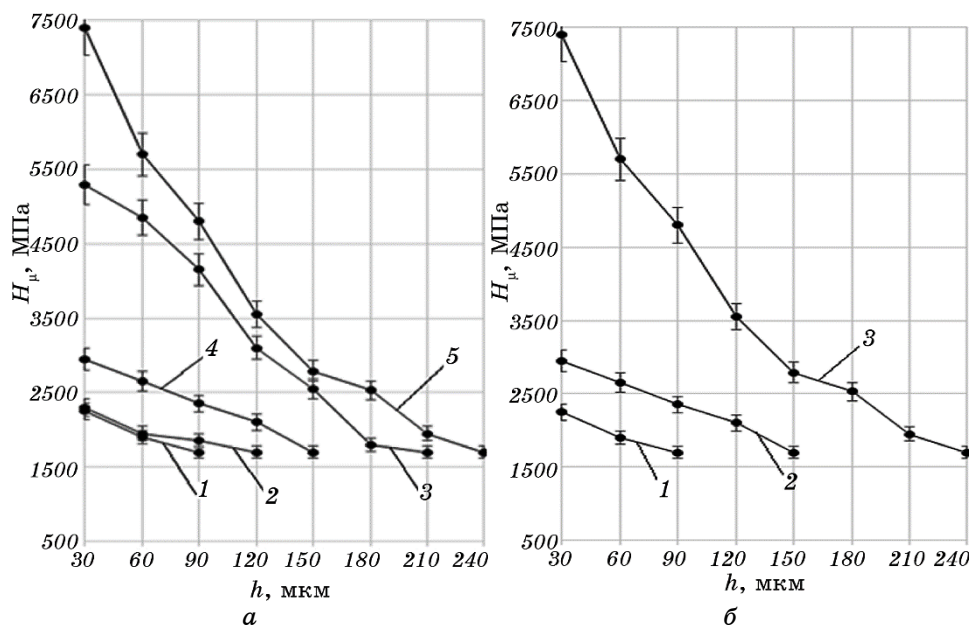


Рис. 2. Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі криці 20 (а) і криці 40 (б) за ЕІЛ алюмінійовою електродою відповідно до першого варіанта: залежності 1–5 відповідають енергіям розряду $Wp = 0,52$ Дж, 1,3 Дж, 2,6 Дж, 4,6 Дж і 6,8 Дж відповідно.

Fig. 2. Distribution of microhardness in the surface layer of steel 20 (a) and steel 40 (б) during ESA with an aluminium electrode according to the first option: dependences 1–5 correspond to discharge energies $Wp = 0.52$ J, 1.3 J, 2.6 J, 4.6 J, 6.8 J, respectively.

Результати дюрOMETричної аналізи поверхневих шарів, структури яких представлено на рис. 1, зведено в табл. 3 і представлено на рис. 2. В результаті аналізу табл. 3 та рис. 2 встановлено, що зі збільшенням енергії розряду збільшується мікротвердість поверхневого шару, як в «білому» шарі, так і в перехідній (дифузійній) зоні. Таким чином, зі збільшенням енергії розряду зростає зона підвищеної мікротвердості. Максимальна мікротвердість знаходиться на поверхні сформованих шарів і у міру поглиблення плавно знижується до мікротвердості основи.

Із заміною криці 20 на крицю 40 відбуваються незначні зміни з боку підвищення мікротвердості, як в білому шарі, так і в перехідній (дифузійній) зоні (див. табл. 3).

Другий варіант. На рисунку 3 зображено різні ділянки структури поверхневого шару зразка криці 20 після ЕІЛ алюмінійовою електродою з енергією розряду $Wp = 0,52$ Дж (а), 1,3 Дж (б), 2,6 Дж (в), 4,6 Дж (г), 6,8 Дж (д).

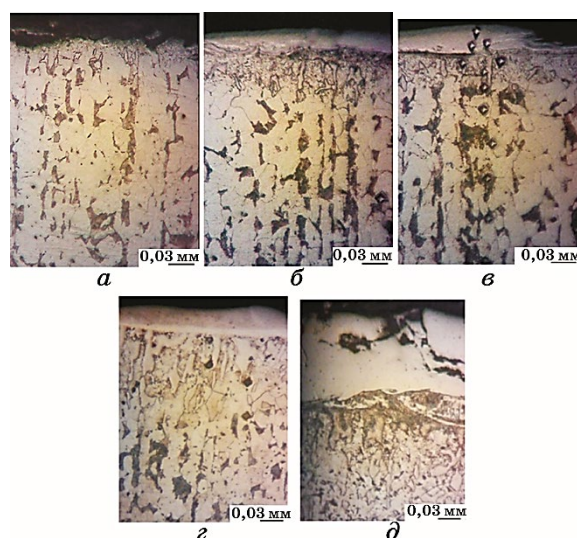


Рис. 3. Ділянки структури поверхневого шару криці 20 після ЕІЛ алюмінійовою електродою-інструментом за $Wp = 0,52$ Дж (а), 1,3 Дж (б), 2,6 Дж (в), 4,6 Дж (г) і 6,8 Дж (д).

Fig. 3. Areas of the structure of the surface layer of steel 20 after ESA with an aluminium electrode at $Wp = 0.52$ J (a), 1.3 J (б), 2.6 J (в), 4.6 J (г), and 6.8 J (д).

ТАБЛИЦЯ 4. Результати дюриметричної аналізи поверхневих шарів криці 20 і криці 40, структури яких представлено на рис. 3.

TABLE 4. Results of durometric analysis of the surface layers of steel 20 and steel 40, the structures of which are presented in Fig. 3.

Енергія розряду, Дж	Розподіл мікротвердості H_μ в поверхневому шарі у міру поглиблення із кроком мірвання у 30 мкм							
	30	60	90	120	150	180	210	240
Криця 20								
0,52	2250 ± 20	1900 ± 50	1700 ± 50					
1,30	2300 ± 20	1950 ± 50	1850 ± 50	1700 ± 50				
2,60	2950 ± 20	2650 ± 50	2350 ± 50	2100 ± 70	1700 ± 50			
4,60	5300 ± 20	4850 ± 50	4150 ± 50	3100 ± 70	2550 ± 90	1800 ± 90	1700 ± 80	
6,8	7300 ± 20	5700 ± 50	4850 ± 50	3600 ± 70	2820 ± 90	2550 ± 90	1950 ± 80	1700 ± 70
Криця 40								
0,52	2450 ± 20	2150 ± 50	1700 ± 50					
2,60	3650 ± 20	2750 ± 50	2400 ± 50	1950 ± 70	1700 ± 50			
6,8	7300 ± 20	5600 ± 50	4500 ± 50	3500 ± 70	2900 ± 90	2650 ± 90	1950 ± 80	1700 ± 70

В результаті аналізу структури сформованого поверхневого шару, структура якого змінилася, слід зазначити, що його суцільність практично за кожної енергії розряду зростає до 100%, за винятком $W_p = 0,52$ Дж, для якої суцільність переважно складає до 95%.

Товщини «білого» шару та дифузійної зони у міру збільшення енергії розряду збільшується з 25 до 60 і з 40 до 60 мкм відповідно зі збільшенням W_p з 0,52 до 2,6 Дж, а потім практично не змінюються за $W_p = 4,6$ Дж і навіть зменшується для $W_p = 6,8$ Дж.

Шерсткість поверхні зі зменшенням продуктивності ЕІЛ (за використання 2-го варіанту досліджень) незначно зменшилася по відношенню до величини шерсткості, яка відповідає продуктивності, вказаній у табл. 2 по 1-му варіанту. Тут також, як і в 1-му варіанті, зі зменшенням продуктивності процесу ЕІЛ збільшується час оброблення 1 см² площі поверхні. Водночас, як і в 1-му варіанті, кристалізація кожного наступного шару відбувається повільніше за рахунок акумулювання тепла розтопом легкоплавкого металу (алюмінію), але процес зменшення шерсткості не такий інтенсивний. Це пояснюється тим, що з кожним наступним «проходом» електродо-інструмента з алюмінію різниця між кількостям алюмінію та криці в покритті все менше відрізняється від попереднього варіанту.

Результати дюрOMETричної аналізу поверхневих шарів, структури яких представлено на рис. 3, зведено в табл. 4 та представлено на рис. 4. Із заміною криці 20 на крицю 40 відбуваються незначні зміни з боку підвищення мікротвердості, як в білому шарі, так і в перехідній (дифузійній) зоні (див. табл. 4).

В таблицях 5 і 6 представлено зведені дані результатів стосовно параметрів якості поверхневих шарів криці 20 і криці 40 після ЕІЛ алюмінійовою електродою-інструментом із зміною енергії розряду з 0,52 до 6,8 Дж і продуктивності з 0,2–1,3 см²/хв. за $W_p = 0,52$ Дж до 0,6–3,0 см²/хв. за $W_p = 6,8$ Дж.

На рисунках 5 і 6 представлено залежності параметрів якості поверхневих шарів криці 20 в залежності від енергії розряду та продуктивності ЕІЛ за першим і другим варіантами відповідно.

На рисунках 7 і 8 представлено залежності параметрів якості поверхневих шарів криці 40 в залежності від енергії розряду та продуктивності ЕІЛ за першим і другим варіантами відповідно.

5. ВИСНОВКИ

1. Проведено аналізу структуроутворення та властивостей поверхневих шарів деталей з криці після алітування традиційними технологіями та методом ЕІЛ.
2. Виявлено резерви для підвищення параметрів якості поверхневих шарів деталей з криці через алітування за рахунок більш досконалого дослідження продуктивності процесу ЕІЛ алюмінійо-

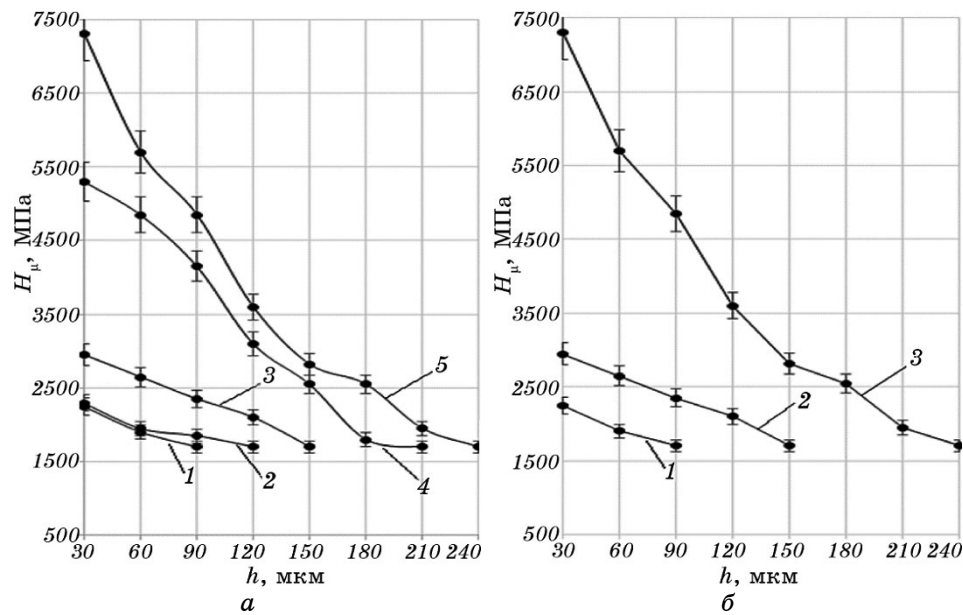


Рис. 4. Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі криці 20 (а) і криці 40 (б) за ЕІЛ алюмінійовою електродою по другому варіанту.

Fig. 4. Distribution of microhardness in the surface layer of steel 20 (a) and steel 40 (б) during ESA with an Al-electrode according to the second option.

вою електродою-інструментом, що є одним з важливих режимів технології алітування.

3. В 1-му варіанті зі зростанням енергії розряду з 0,52 до 6,8 Дж на 1-му етапі алітування криці 20 і криці 40, відповідно: товщина «білого» шару збільшується з 20 до 75 і з 25 до 110 мкм, а дифузійної зони з 35 до 120 і з 40 до 140 мкм; мікротвердість «білого шару» зростає з 2200 до 7400 і з 2400 до 7450 МПа; шерсткість поверхні зростає з 1,1 до 9,0 і з 1,0 до 8,1 мкм, а суцільність зростає з 80 до 100%, починаючи з $Wp = 4,6$ Дж, і з 60 до 100% за $Wp = 6,8$ Дж.

4. В 2-му варіанті зі зростанням енергії розряду з 0,52 до 6,8 Дж на 1-му етапі оброблення криці 20 і криці 40: товщина «білого» шару збільшується для криці 20 з 25 до 60 мкм за $Wp = 4,6$ Дж і потім не змінюється, а для криці 40 — з 30 до 100 мкм; товщина дифузійної зони збільшується з 45 до 130; мікротвердість «білого шару» зростає з 2250 до 7300 і з 2450 до 7300 МПа відповідно; шерсткість поверхні Ra зростає з 1,3 до 9,0 і з 1,6 до 8,1 мкм відповідно, а суцільність, як для криці 20, так і для криці 40, за $Wp = 0,52$ Дж складає 95%, а далі підвищується до 100%.

5. Зменшення продуктивності процесу ЕІЛ сприяє погіршенню параметрів якості покриттів.

ТАБЛИЦЯ 5. Якісні параметри поверхневих шарів криці 20 зразків після ЕІЛ алюмінійовою електродою.**TABLE 5.** Qualitative parameters of the surface layers of steel of 20 samples after ESA with an aluminium electrode.

Енергія розряду, Дж	Продуктивність, см ² /хв.	Товщина, мкм		Максимальна мікротвердість, МПа		Шерсткість, мкм			Суцільність, %
		«білого» шару	перехідної зони	«білого» шару	перехідної зони	Ra	Rz	R _{max}	
Криця 20 (за продуктивністю згідно з табл. 1)									
0,52	1,0–1,3	до 12	до 30	2000 ± 20	1900 ± 50	1,3	2,3	9,3	60
1,30	1,3–1,5	до 45	до 40	2050 ± 20	1850 ± 80	2,1	6,2	21,6	80
2,60	1,5–2,0	до 55	до 50	2700 ± 20	2000 ± 200	3,9	9,3	23,2	87
4,60	2,0–2,5	до 70	до 60	5010 ± 20	2250 ± 200	6,2	16,3	40,6	95
6,8	2,5–3,0	до 70	до 130	7270 ± 20	2370 ± 70	9,0	18,1	58,3	100
Криця 20 (перший варіант)									
0,52	0,5–0,6	до 20	до 35	2200 ± 20	1950 ± 50	1,1	2,1	8,7	80
1,30	0,6–0,7	до 50	до 50	2250 ± 20	1950 ± 80	2	5,1	16,3	90
2,60	0,7–1,0	до 60	до 55	2900 ± 20	2100 ± 200	3,8	6,3	19,6	95
4,60	1,0–1,2	до 70	до 70	5300 ± 20	2350 ± 200	6,2	12,1	33,1	100
6,8	1,2–1,5	до 75	до 120	7400 ± 20	2400 ± 70	9,0	15,4	45,2	100
Криця 20 (другий варіант)									
0,52	0,2–0,3	до 25	до 40	2250 ± 20	1980 ± 50	1,3	2,0	8,5	до 95
1,30	0,3–0,4	до 50	до 55	2300 ± 20	2000 ± 80	2	6,1	15,6	100
2,60	0,4–0,5	до 57	до 60	2950 ± 20	2050 ± 50	3,8	9,1	18,1	100
4,60	0,5–0,6	до 60	до 80	5300 ± 20	2000 ± 50	6,2	16,0	31,2	100
6,8	0,6–0,7	до 60	до 100	7300 ± 20	2150 ± 50	9,0	18,1	43,3	100

ТАБЛИЦЯ 6. Якісні параметри поверхневих шарів криці 40 зразків після ЕІЛ алюмінійовою електродою.

TABLE 6. Qualitative parameters of the surface layers of steel of 40 samples after ESA with an aluminium electrode.

Енергія розряду, Дж	Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв.}$	Товщина, мкм		Максимальна мікротвердість, МПа		Шерсткість, мкм			Суцільність, %
		«білого» шару	перехідної зони	«білого» шару	перехідної зони	Ra	Rz	R_{max}	
Криця 40 (за продуктивністю згідно з табл. 1)									
0,52	1,0–1,3	до 15	до 35	2350 ± 20	2000 ± 50	1,2	3,0	8,1	50
2,60	1,5–2,0	до 60	до 70	3500 ± 20	4500 ± 50	1,9	4,1	11,6	70
6,8	2,5–3,0	до 130	до 150	7400 ± 20	2390 ± 70	8,1	17,3	49,0	100
Криця 40 (перший варіант)									
0,52	0,5–0,6	до 25	до 40	2400 ± 20	2100 ± 50	1,0	3,0	6,2	60
2,60	0,7–1,0	до 70	до 80	3650 ± 20	4600 ± 50	1,9	4,1	8,6	90
6,8	1,2–1,5	до 110	до 140	7450 ± 20	2490 ± 70	8,1	17,3	42,1	100
Криця 40 (другий варіант)									
0,52	0,2–0,3	до 30	до 45	2450 ± 20	2130 ± 50	1,6	3,0	6,1	95
2,60	0,4–0,5	до 70	до 80	3650 ± 20	4650 ± 50	1,9	4,1	7,7	100
6,8	0,6–0,7	до 100	до 130	7300 ± 20	2030 ± 70	8,1	17,3	39,1	100

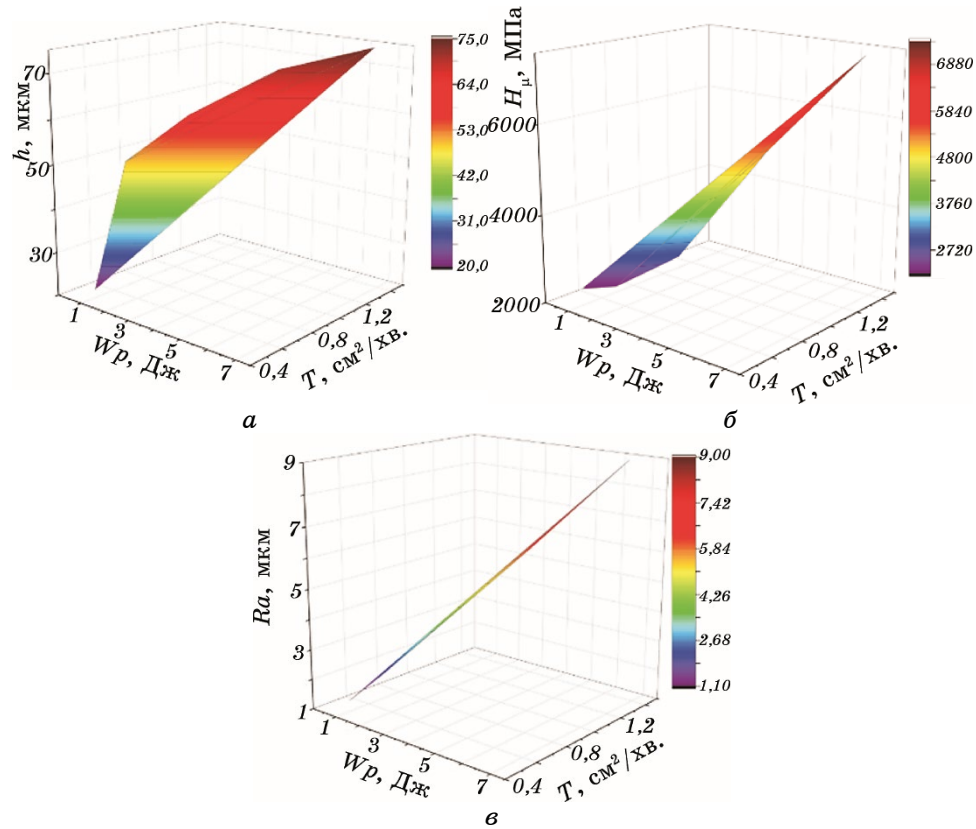


Рис. 5. Зміна параметрів якості: товщини «білого шару» (а), мікротвердості (б) та шерсткості (в) поверхневих шарів криці 20 в залежності від енергії розряду та продуктивності ЕІЛ (за першим варіантом).

Fig. 5. Change in quality parameters: thickness of the 'white layer' (а), microhardness (б), and roughness (в) of the surface layers of steel 20 depending on the discharge energy and ESA productivity (according to the first option).

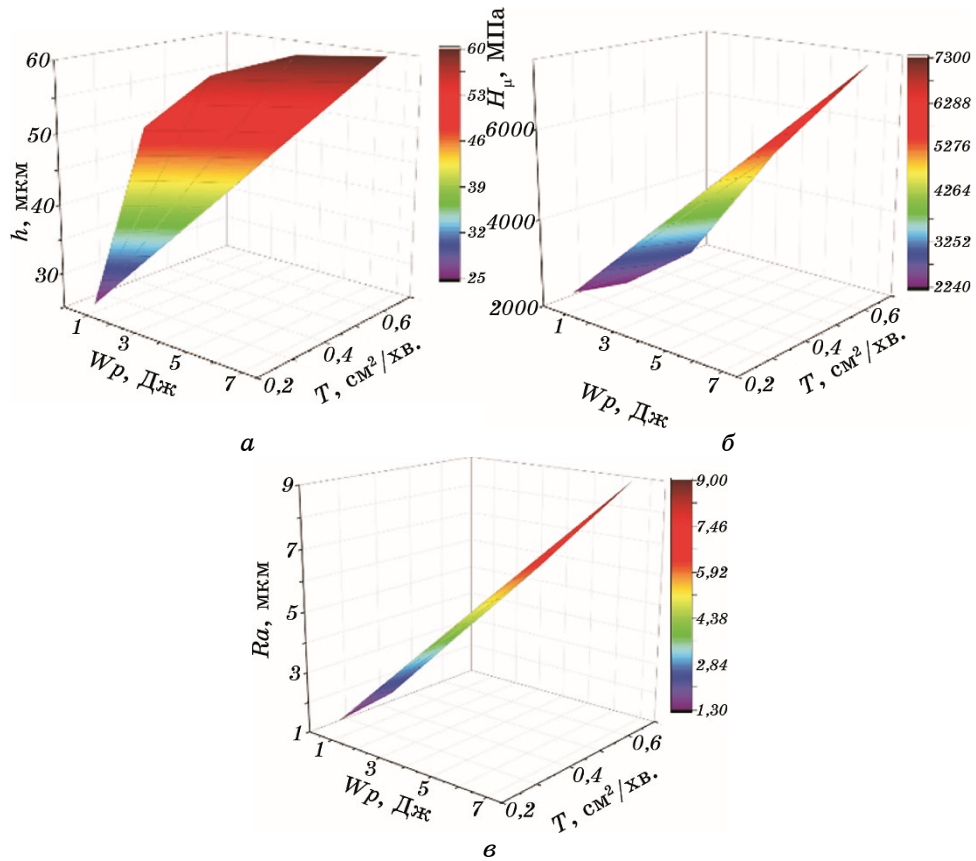


Рис. 6. Зміна параметрів якості: товщини «білого шару» (а), мікротвердості (б) та шерсткості (в, з) поверхневих шарів криці 20 в залежності від енергії розряду та продуктивності ЕІЛ (за другим варіантом).

Fig. 6. Change in quality parameters: thickness of the 'white layer' (a), microhardness (б), and roughness (в, з) of the surface layers of steel 20 depending on the discharge energy and ESA productivity (according to the second option).

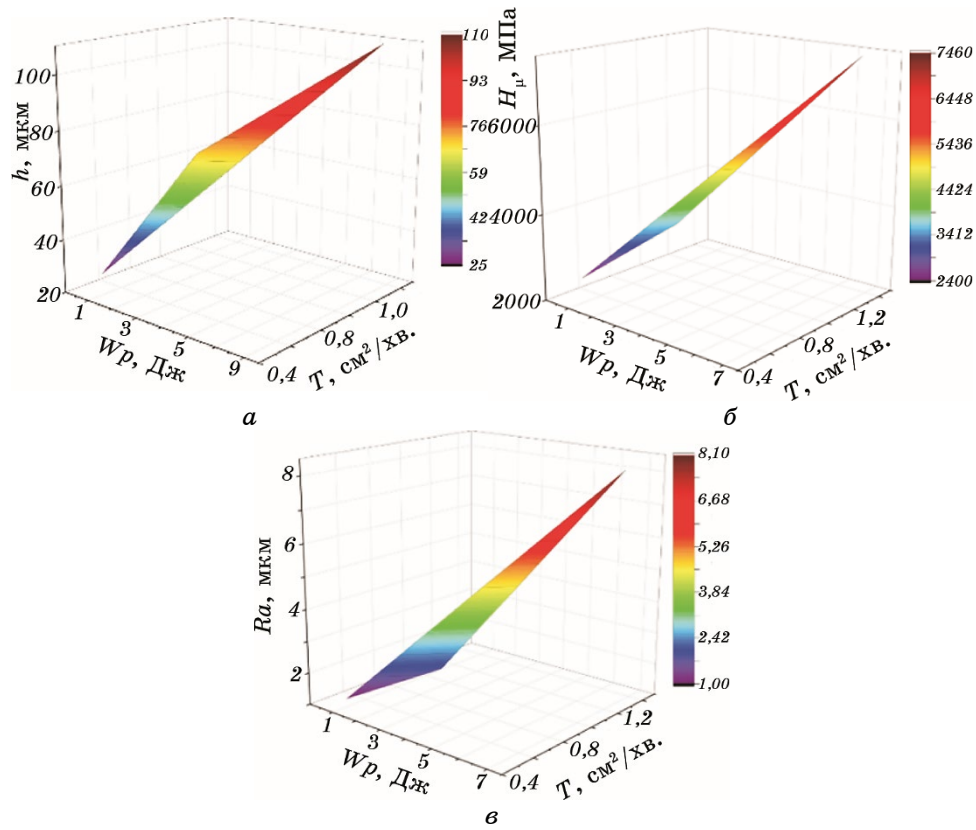


Рис. 7. Зміна параметрів якості: товщини «білого шару» (а), мікротвердості (б) та шерсткості (в, з) поверхневих шарів криці 40 в залежності від енергії розряду та продуктивності ЕІЛ (за першим варіантом).

Fig. 7. Change in quality parameters: thickness of the 'white layer' (а), microhardness (б), and roughness (в, з) of the surface layers of steel 40 depending on the discharge energy and ESA productivity (according to the first option).

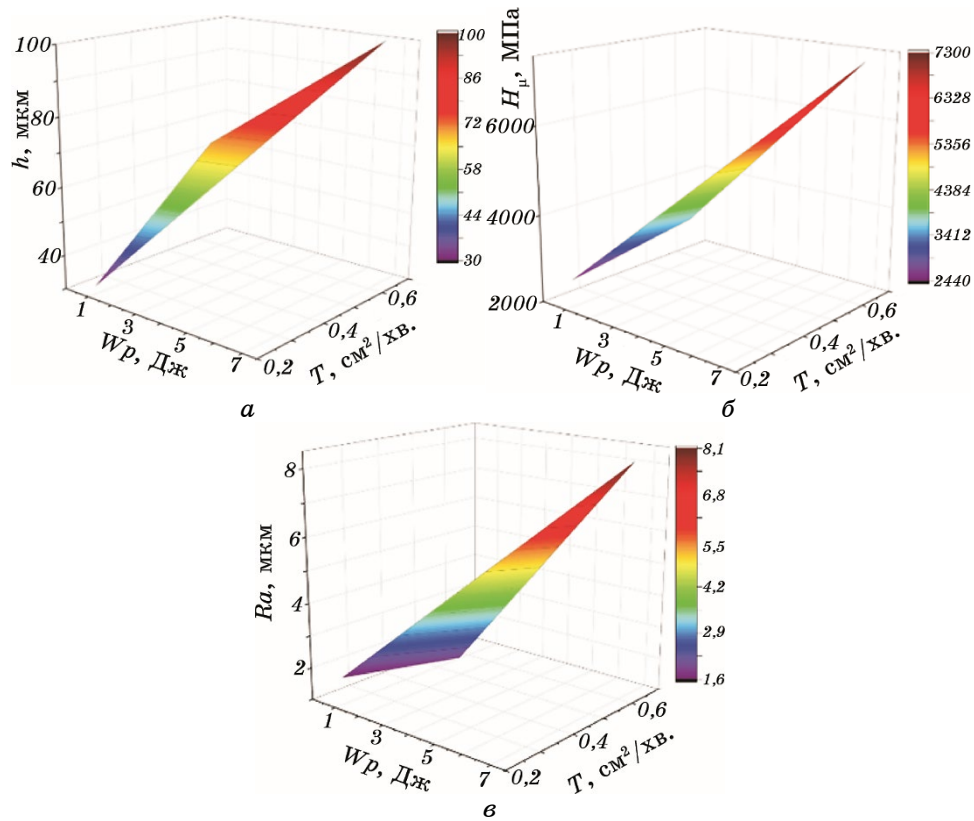


Рис. 8. Зміна параметрів якості: товщини «білого шару» (*a*), мікротвердості (*б*) та шерсткості (*в*, *г*) поверхневих шарів криці 40 в залежності від енергії розряду та продуктивності ЕІЛ (за другим варіантом).

Fig. 8. Change of quality parameters: thickness of the 'white layer' (*a*), microhardness (*б*), and roughness (*в*, *г*) of the surface layers of steel 40 depending on the discharge energy and ESA productivity (according to the second option).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. V. Martsynkovskyy, V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, I. Konoplianchenko, A. Zhukov, P. Kurp, P. Furmańczyk, and N. Tarel'nyk, *AIP Conf. Proc.*, **2017**: 020017 (2018).
2. V. Tarel'nyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy, A. Zhukov, and P. Kurp, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing* (Eds. V. Ivanov, Y. Rong, J. Trojanowska, J. Venus, O. Liaposhchenko, J. Zajac, I. Pavlenko, M. Edl, and D. Perakovic) (Springer: 2019), p. 382.
3. T. Kresan, S. Pylypaka, T. Volina, I. Rybenko, and O. Tatsenko, *Advanced Manufacturing Processes IV* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, and I. Pavlenko) (Springer: 2023), p. 44.
4. T. Volina, S. Pylypaka, V. Babka, O. Zalevska, and A. Rebrii, *Advanced Manufacturing Processes IV* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, and I. Pavlenko) (Springer: 2023), p. 506 (2023).
5. S. Pylypaka, T. Volina, I. Hryshchenko, S. Dieniezhnikov, and I. Rybenko, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V* (Eds. V. Ivanov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, J. Machado, and M. Edl) (Springer: 2022), p. 112.
6. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**, Nos. 3–4: 266 (2017).
7. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**, Nos. 5–6: 385 (2017).
8. O. P. Umanskyi, M. S. Storozhenko, V. B. Tarel'nyk, O. Y. Koval, Y. V. Gubin, N. V. Tarel'nyk, and T. V. Kurinna, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, Nos. 1–2: 57 (2020).
9. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskii, Yu. I. Semirnenko, N. V. Tarel'nyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **57**: 173 (2021).
10. О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, Є. В. Конопляченко, В. І. Мельник, В. М. Власовець, О. А. Саржанов, Н. В. Тарельник, М. О. Мікуліна, А. Д. Поливаний, Г. В. Кирик, А. Б. Баталова, *Металофіз. новітні технол.*, **43**, № 8: 1121 (2021).
11. Т. В. Мосина, *Новые огнеупоры*, **9**: 61 (2013).
12. A. Zahorulko, C. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012039 (2017).
13. І. П. Шацький, В. В. Перепічка, Л. Я. Роп'як, *Металофіз. новітні технол.*, **42**, № 1: 69 (2020).
14. M. S. Storozhenko, A. P. Umanskii, A. E. Terentiev, and I. M. Zakiev, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, No. 2: 60 (2017).
15. O. Umanskyi, M. Storozhenko, G. Baglyuk, O. Melnyk, V. Brazhevsky, O. Chernyshov, O. Terentiev, Yu. Gubin, and O. Kostenko, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, Nos. 7–8: 434 (2020).
16. M. Bembenek, P. Prysyzhnyuk, T. Shihab, R. Machnik, O. Ivanov, and L. Ropyak, *Materials*, **15**, No. 14: 5074 (2022).
17. B. O. Trembach, M. G. Sukov, V. A. Vynar, I. O. Trembach, V. V. Subbotina, O. Yu. Rebrov, O. M. Rebrova, and V. I. Zakiev, *Металофіз. новітні технол.*, **44**, № 4: 493 (2022).
18. L. Ropyak, I. Schuliar, and O. Bohachenko, *Eastern-European J. Enterprise*

- Technologies*, **1**, No. 5: 53 (2016).
19. I. Ivasenko, V. Posuvailo, H. Veselivska, and V. Vynar, *15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) (Sept. 23–26, 2020, Zbarazh)* (IEEE: 2021), p. 50.
 20. M. Bembenek, M. Makoviichuk, I. Shatskyi, L. Ropyak, I. Pritula, L. Gryn, and V. Belyakovskiy, *Sensors*, **22**, No. 21: 8105 (2022).
 21. O. Bazaluk, O. Dubei, L. Ropyak, M. Shovkoplias, T. Pryhorovska, and V. Lozynskiy, *Energies*, **15**, No. 1: 83 (2022).
 22. F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, R. G. Pereira, and A. Lombardi-Neto, *J. Achievements Mater. Manufacturing Eng.*, **40**: 175 (2010).
 23. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, and Heng Chang, *Engineering*, **3**, No. 9: 942 (2011).
 24. S. Ben Slima, *Mater. Sci. Applications*, **3**, No. 9: 640 (2012).
 25. M. Brochu, J. G. Portillo, J. Milligan, and D. W. Heard, *Open Surf. Sci. J.*, No. 3: 105 (2011).
 26. И. Г. Бродова, И. Г. Ширинкина, Ю. П. Зайков, *Физ. мет. металловед.*, **116**, № 9: 928 (2015).
 27. В. Ф. Даненко, Л. М. Гуревич, Г. В. Понкратова, *Известия ВолгГТУ*, **9**, № 10: 30 (2014).
 28. В. И. Муравьев, П. В. Бахматов, Н. Г. Лончаков, С. З. Чинилов, *Упрочняющие технологии и покрытия*, **11**: 25 (2013).
 29. V. I. Kuzmin, A. A. Mikhal'chenko, O. B. Kovalev, and E. V. Kartaev, *J. Thermal Spray Technology*, **21**, No. 1: 159 (2012).
 30. A. D. Pogrebnjak, V. I. Ivashchenko, P. L. Skrynskiy, O. V. Bondar, P. Konarski, K. Zaleski, S. Jurga, and E. Coy, *Composites Part B: Eng.*, **142**: 85 (2018).
 31. A. D. Pogrebnjak, A. A. Bagdasaryan, P. Horodek, V. B. Tarelnyk, V. V. Buranich, H. Amekura, N. Okubo, N. Ishikawa, and V. M. Beresnev, *Mater. Lett.*, **303**: 130548 (2021).
 32. G. Morand, P. Chevallier, L. Bonilla-Gameros, S. Turgeon, M. Cloutier, M. Da Silva Pires, A. Sarkissian, M. Tatoulian, L. Houssiau, and D. Mantovani, *Surf. Interface Analysis*, **53**, No. 7: 658 (2021).
 33. G. Maistro, S. Kante, L. Nyborg, and Y. Cao, *Surf. Interfaces*, **24**: 101093 (2021).
 34. V. G. Smelov, A. V. Sotov, and S. A. Kosirev, *ARN J. Eng. Appl. Sci.*, **9**, No. 10: 1854 (2014).
 35. B. Antoszewski, S. Tofil, M. Scendo, and V. Tarelnik, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012036 (2017).
 36. I. Pliszka and N. Radek, *Proc. Eng.*, **192**: 707 (2017).
 37. B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, P. Kurp, T. I. Zhylenko, and I. Konoplianchenko, *Materials*, **14**: 739 (2021).
 38. Д. Н. Коротаев, *Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием* (Омск: СибАДИ: 2009).
 39. А. Д. Верхотуров, *Формирование поверхностного слоя металла при электроискровом легировании* (Владивосток: Дальнаука: 1995).
 40. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskiy, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **55**: 585 (2017).
 41. V. Martsynkovskiy, V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and

- M. Dumanchuk, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II* (Eds. V. Ivanov, J. Trojanowska, J. Machado, O. Liaposhchenko, J. Zajac, I. Pavlenko, M. Edl, and D. Perakovic) (Springer: 2020), p. 216.
42. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **53**: 285 (2017).
 43. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 2: 173 (2019).
 44. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 3: 313 (2019).
 45. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**, Nos. 7–8: 540 (2017).
 46. В. С. Марцинковский, *Способ обработки вкладышей подшипников ковзання*, Патент України № 77906 (Опубліковано 2007 р.).
 47. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Proc. Eng.*, **39**: 148 (2012).
 48. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Proc. Eng.*, **39**: 157 (2012).
 49. С. Ф. Вдовин, Е. С. Махнев, Н. Л. Минеева, В. В. Тарасов, А. П. Андреев, *Электронная обработка материалов*, **6**: 15 (1988).
 50. С. М. Решетников, С. Ф. Вдовин, *Электронная обработка материалов*, **3**: 33 (1977).
 51. O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnjak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
 52. G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, Nos. 11–12: 688 (2018).
 53. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, О. М. Мисливченко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **41**, № 10: 1377 (2019).

REFERENCES

1. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, I. Konoplianchenko, A. Zhukov, P. Kurp, P. Furmańczyk, and N. Tarelnyk, *AIP Conf. Proc.*, **2017**: 020017 (2018).
2. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy, A. Zhukov, and P. Kurp, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing* (Eds. V. Ivanov, Y. Rong, J. Trojanowska, J. Venus, O. Liaposhchenko, J. Zajac, I. Pavlenko, M. Edl, and D. Perakovic) (Springer: 2019), p. 382.
3. T. Kresan, S. Pylypaka, T. Volina, I. Rybenko, and O. Tatsenko, *Advanced Manufacturing Processes IV* (Eds. V. Tonkonogiyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, and I. Pavlenko) (Springer: 2023), p. 44.
4. T. Volina, S. Pylypaka, V. Babka, O. Zalevska, and A. Rebrii, *Advanced Manufacturing Processes IV* (Eds. V. Tonkonogiyi, V. Ivanov, J. Trojanowska,

- G. Oborskyi, and I. Pavlenko) (Springer: 2023), p. 506 (2023).
5. S. Pylypaka, T. Volina, I. Hryshchenko, S. Dieniezhnikov, and I. Rybenko, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V* (Eds. V. Ivanov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, J. Machado, and M. Edl) (Springer: 2022), p. 112.
 6. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**, Nos. 3–4: 266 (2017).
 7. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**, Nos. 5–6: 385 (2017).
 8. O. P. Umanskyi, M. S. Storozhenko, V. B. Tarelnyk, O. Y. Koval, Y. V. Gubin, N. V. Tarelnyk, and T. V. Kurinna, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, Nos. 1–2: 57 (2020).
 9. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskii, Yu. I. Semirnenko, N. V. Tarelnyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **57**: 173 (2021).
 10. O. P. Haponova, V. B. Tarel'nyk, V. S. Martsynkovskyy, Ye. V. Konoplyanchenko, V. I. Mel'nyk, V. M. Vlasovets', O. A. Sarzhanov, N. V. Tarel'nyk, M. O. Mikulina, A. D. Polyvanyy, H. V. Kyryk, and A. B. Batalova, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 8: 1121 (2021) (in Ukrainian).
 11. T. V. Mosina, *Novyye Ogneupory*, **9**: 61 (2013) (in Russian).
 12. A. Zahorulko, C. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conference Series: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012039 (2017).
 13. I. P. Shats'kyi, V. V. Perepichka, and L. Ya. Rop'yak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 1: 69 (2020) (in Ukrainian).
 14. M. S. Storozhenko, A. P. Umanskii, A. E. Terentiev, and I. M. Zakiev, *Powder metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, No. 2: 60 (2017).
 15. O. Umanskyi, M. Storozhenko, G. Baglyuk, O. Melnyk, V. Brazhevsky, O. Chernyshov, O. Terentiev, Yu. Gubin, and O Kostenko, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, Nos. 7–8: 434 (2020).
 16. M. Bembenek, P. Prysyazhnyuk, T. Shihab, R. Machnik, O. Ivanov, and L. Ropyak, *Materials*, **15**, No. 14: 5074 (2022).
 17. B. O. Trembach, M. G. Sukov, V. A. Vynar, I. O. Trembach, V. V. Subbotina, O. Yu. Rebrov, O. M. Rebrova, and V. I. Zakiev, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 4: 493 (2022).
 18. L. Ropyak, I. Schuliar, and O. Bohachenko, *Eastern-European J. Enterprise Technologies*, **1**, No. 5: 53 (2016).
 19. I. Ivasenko, V. Posuvailo, H. Veselivska, and V. Vynar, *15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) (Sept. 23–26, 2020, Zbarazh)* (IEEE: 2021), p. 50.
 20. M. Bembenek, M. Makoviichuk, I. Shatskyi, L. Ropyak, I. Pritula, L. Gryn, and V. Belyakovskiy, *Sensors*, **22**, No. 21: 8105 (2022).
 21. O. Bazaluk, O. Dubei, L. Ropyak, M. Shovkoplias, T. Pryhorovska, and V. Lozynskiy, *Energies*, **15**, No. 1: 83 (2022).
 22. F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, R. G. Pereira, and A. Lombardi-Neto, *J. Achievements Mater. Manufacturing Eng.*, **40**: 175 (2010).
 23. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, and Heng Chang, *Engineering*, **3**, No. 9: 942 (2011).
 24. S. Ben Slima, *Mater. Sci. Applications*, **3**, No. 9: 640 (2012).
 25. M. Brochu, J. G. Portillo, J. Milligan, and D. W. Heard, *Open Surf. Sci. J.*,

- No. 3: 105 (2011).
26. I. G. Brodova, I. G. Shirinkina, and Yu. P. Zaikov, *Fiz. Met. Metalloved.*, **116**, No. 9: 928 (2015) (in Russian).
 27. V. F. Danenko, L. M. Gurevich, and G. V. Ponkratova, *Izvestiya VolgGTU*, **9**, No. 10: 30 (2014) (in Russian).
 28. V. I. Murav'ev, P. V. Bahmatov, N. G. Lonchakov, and S. Z. Chinilov, *Upr-rochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya*, **11**: 25 (2013) (in Russian).
 29. V. I. Kuzmin, A. A. Mikhal'chenko, O. B. Kovalev, and E. V. Kartaev, *J. Thermal Spray Technology*, **21**, No. 1: 159 (2012).
 30. A. D. Pogrebnjak, V. I. Ivashchenko, P. L. Skrynsky, O. V. Bondar, P. Konarski, K. Zaleski, S. Jurga, and E. Coy, *Composites Part B: Eng.*, **142**: 85 (2018).
 31. A. D. Pogrebnjak, A. A. Bagdasaryan, P. Horodek, V. B. Tarelnyk, V. V. Buranich, H. Amekura, N. Okubo, N. Ishikawa, and V. M. Beresnev, *Ma-ter. Lett.*, **303**: 130548 (2021).
 32. G. Morand, P. Chevallier, L. Bonilla-Gameros, S. Turgeon, M. Cloutier, M. Da Silva Pires, A. Sarkissian, M. Tatouliau, L. Houssiau, and D. Mantovani, *Surf. Interface Analysis*, **53**, No. 7: 658 (2021).
 33. G. Maistro, S. Kante, L. Nyborg, and Y. Cao, *Surf. Interfaces*, **24**: 101093 (2021).
 34. V. G. Smelov, A. V. Sotov, and S. A. Kosirev, *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, **9**, No. 10: 1854 (2014).
 35. B. Antoszewski, S. Tofil, M. Scendo, and V. Tarelnik, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012036 (2017).
 36. I. Pliszka and N. Radek, *Proc. Eng.*, **192**: 707 (2017).
 37. B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, P. Kurp, T. I. Zhylenko, and I. Konoplianchenko, *Materials*, **14**: 739 (2021).
 38. D. N. Korotaev, *Tekhnologicheskie Vozmozhnosti Formirovaniya Iznosostoi-kikh Nanostruktur Ehlektroiskrovym Legirovaniem* [Technological Possibilities of Wear-Resistant Nanostructure Formation by Electric-Spark Alloying] (Omsk: SibADI: 2009) (in Russian).
 39. A. D. Verhoturov, *Formirovanie Poverkhnostnogo Sloya Metalla pri Ehlek-troiskrovom Legirovanii* [Formation of the Metal Surface Layer by Electrospark Alloying] (Vladivostok: Dal'nauka: 1995) (in Russian).
 40. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskiy, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ce-ramics*, **55**: 585 (2017).
 41. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and M. Dumanchuk, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II* (Eds. V. Ivanov, J. Trojanowska, J. Machado, O. Liaposhchenko, J. Zajac, I. Pavlenko, M. Edl, and D. Perakovic) (Springer: 2020), p. 216.
 42. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsynkovskii, E. V. Konoplianchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **53**: 285 (2017).
 43. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 2: 173 (2019) (in Russian).
 44. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz.*

- Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 3: 313 (2019) (in Russian).
45. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**, Nos. 7–8: 540 (2017).
 46. V. S. Martsynkovskyy, *Sposib Obrobky Vkladyshiv Pidshypnykiv Kovzannya* [The Method of Processing the Liners of Sliding Bearings], Patent of Ukraine No. 77906 (Published 2007) (in Ukrainian).
 47. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Proc. Eng.*, **39**: 148 (2012).
 48. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Proc. Eng.*, **39**: 157 (2012).
 49. S. F. Vdovin, E. S. Mahnev, N. L. Mineeva, V. V. Tarasov, and A. P. Andreev, *Ehlektronnaya Obrabotka Materialov*, **6**: 15 (1988) (in Russian).
 50. S. M. Reshetnikov and S. F. Vdovin, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **3**: 33 (1977) (in Russian).
 51. O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnjak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
 52. G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, Nos. 11–12: 688 (2018).
 53. V. B. Tarel'nyk, O. P. Haponova, and O. M. Myslyvchenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 10: 1377 (2019) (in Ukrainian).