

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.55.Ln, 81.15.Rs, 81.40.Pq, 81.65.Lp

**Поліпшення показників якості поверхневих шарів крицевих деталей після алюмініювання електроіскровим легуванням. Ч. 2. Результати впливу продуктивності алюмініювання електроіскровим легуванням на структурний стан крицевих поверхонь**

О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник\*, Т. І. Жиленко, Н. В. Тарельник\*,  
О. А. Василенко\*, С. В. Павловский\*

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

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

В статті проводили дослідження другого етапу алюмініювання, коли на поверхню, що зазнала алюмініювання на першому етапі, перед подальшим електроіскровим легуванням алюмінійовою електродою наносять консистентну речовину, яка містить алюмінійову пудру (перший варіант) або графітовий порошок і алюмінійову пудру (другий варіант), після чого, не чекаючи висихання консистентної речовини, проводять процес алюмініювання за енергії розряду у 0,52–2,6 Дж і продуктивності у 1,0–2,0 см<sup>2</sup>/хв.; енергію розряду і продуктивність обирають такими, що шерсткість поверхні зменшується у  $\cong 3$ –4 рази. За алюмініювання на другому етапі для обох варіантів із

---

Corresponding author: Oksana Petrivna Haponova  
E-mail: [gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua](mailto: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*

Citation: O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, T. I. Zhylenko, N. V. Tarelnyk, O. O. Vasilenko, S. V. Pavlovskiy, Improvement of the Quality Parameters of the Surface Layers of Steel Parts after Aluminizing by Electrospark Alloying. Pt. 2. Results of the Influence of the Productivity of Aluminizing by Electrospark Alloying on the Structural State of Steel Surfaces, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **46**, No. 4: 313–324 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.04.0313](https://doi.org/10.15407/mfint.46.04.0313)

використанням консистентної речовини, яка містить алюмінієву пудру або алюмінієву пудру та порошок графіту, збільшується мікротвердість «білого шару» та дифузійної зони (в більшому ступені за наявності у консистентній речовині графіту), шерсткість поверхні зменшується, а суцільність покриття становить 100%. До практичної реалізації рекомендується проводити процес алюмініювання за першим варіантом з енергією розряду  $W_p = 4,6-6,8$  Дж із використанням на другому етапі консистентної речовини, яка містить алюмінієву пудру та порошок графіту.

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

In the article, investigation is carried out at the second stage of aluminizing, when a consistent substance containing aluminium powder (the first option) or graphite powder and aluminium powder (the second option) is applied to the surface that has undergone aluminizing at the first stage, before further electrospark alloying with an aluminium electrode, and, regardless of the drying of the consistent substance, the aluminizing process is carried out at a discharge energy of 0.52–2.6 J and a productivity of 1.0–2.0 cm<sup>2</sup>/min, while the discharge energy and productivity are chosen such that the surface roughness decreases by  $\cong 3-4$  times. At the second stage aluminizing for both options, when using a consistent substance that contains aluminium powder or aluminium powder and graphite powder, the microhardness of the ‘white layer’ and the diffusion zone are increased (to a greater degree when graphite is present in the consistent substance), the surface roughness is decreased, and the integrity of the coating is of 100%. Before practical implementation, it is recommended to carry out the aluminizing process according to the first option at the discharge energy  $W_p = 4.6-6.8$  J, using a consistent substance containing aluminium powder and graphite powder at the second stage.

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

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

## 1. ВСТУП

В першій частині статті [1] було проведено аналізу структуроутворення та властивостей поверхневих шарів деталей з криці після алюмініювання традиційними технологіями [2–5] і методом електроіскрового легування (ЕІЛ) [6–8]. Із розглядом проблеми підвищення технології алюмініювання методом ЕІЛ показано, що якість поверхневих шарів за ЕІЛ має ряд переваг перед іншими технологіями [9, 10], але має й недоліки [11], які можна усунути за рахунок подальшої поверхневої деформації (ППД) [12, 13] або через нанесення металополімерних матеріалів [14, 15]. Водночас виявлено

резерви для підвищення параметрів якості поверхневих шарів деталей з криці за алюмінування за рахунок зміни продуктивності процесу ЕІЛ алюмініювою електродою-інструментом, яка є одним із важливих режимних параметрів технології алюмінування.

В першій частині роботи досліджували два варіанти зменшення продуктивності по відношенню до вказаної в табл. 1 роботи [1]. В таблиці 2 роботи [1] представлено дані цих варіантів: перший, коли продуктивність було зменшено  $\cong$  в два рази; другий, коли продуктивність було зменшено  $\cong$  в чотири рази. Кожний з варіантів виконували в два етапи.

В першій частині роботи досліджували перший етап обох варіантів, коли оброблення поверхневого шару зразків криці 20 і криці 40 проводять алюмініювою електродою за енергії розряду  $Wp = 0,52-6,8$  Дж і продуктивності згідно з табл. 2 [1].

В результаті проведених досліджень впливу продуктивності процесу ЕІЛ алюмініювою електродою-інструментом на параметри якості поверхневих шарів деталей з криці удосконалено технологію їхнього алюмінування. Воднораз встановлено:

у варіанті 1 із зростанням енергії розряду з 0,52 до 6,8 Дж на першому етапі алюмінування криці 20 і криці 40: товщина «білого» шару збільшується, відповідно, з 20 до 75 і з 25 до 110 мкм, а товщина 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  $Ra$  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% за  $Wp = 6,8$  Дж;

у варіанті 2 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 за  $Wp = 4,6$  Дж, а потім не змінюється, а для криці 40 — з 30 до 100 мкм; товщина дифузійної зони змінюється з 45 до 130 відповідно; мікротвердість «білого шару» зростає з 2250 до 7300 і з 2450 до 7300 МПа; 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% і далі підвищується до 100%.

Таким чином, зменшення продуктивності в другому варіанті сприяє погіршенню параметрів якості покриттів.

З метою забезпечення високих параметрів якості покриттів нами запропоновано нову технологію алюмінування, яка полягає у наступному. На другому етапі алюмінування на поверхню, що зазнала алюмінування на першому етапі (обох варіантів), перед подальшим ЕІЛ алюмініювою електродою наносять консистентну речовину, яка містить алюмініюву пудру або графітовий порошок і алюмініюву пудру, після чого, не чекаючи висихання консистентної речовини, проводять процес алюмінування за енергії розряду у 0,52–

2,6 Дж і продуктивності у 0,5–0,7 см<sup>2</sup>/хв.; водночас енергію розряду та продуктивність обирають такими, за яких шерсткість поверхні зменшується в  $\cong 3$ –4 рази.

Цей етап можна реалізувати двома варіантами.

**1-й варіант другого етапу.** На другому етапі на поверхню, що зазнала алюмініювання на першому етапі, після нанесення консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру проводили подальше ЕІЛ алюмінійовою електродою за енергії розряду у 0,52–2,6 Дж і продуктивності у 0,5–0,7 см<sup>2</sup>/хв. Як показали попередні дослідження [6–8], алюмінійова пудра заповнює всі мікронерівності шерсткості поверхні, яку було одержано після алюмініювання на першому етапі. На другому етапі алюмініювання процес ЕІЛ відбувався між торцевою поверхнею алюмінійової електроди-інструменту (анодом) та виступами шерсткості поверхні, залишеними після першого етапу алюмініювання (катодом), а також алюмінійовою пудрою, що знаходилася між цими виступами. Водночас виступи шерсткості деформувалися, розтоплялися разом з алюмінійовою пудрою та частково розтікалися, заповнюючи западини, мікропори й інші недосконалості поверхні, що піддаються обробленню. В результаті шерсткість поверхні знижується.

**2-й варіант другого етапу.** На другому етапі на поверхню, що зазнала алюмініювання на першому етапі, після нанесення консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру та порошок графіту, проводили подальше ЕІЛ алюмінійовою електродою за енергії розряду у 0,52–2,6 Дж і продуктивності у 0,5–0,7 см<sup>2</sup>/хв. Алюмінійова пудра та порошок графіту заповнювали всі мікронерівності шерсткості поверхні, яку було одержано після алюмініювання на першому етапі. На другому етапі алюмініювання процес ЕІЛ відбувався між торцевою поверхнею алюмінійової електроди-інструменту (анодом) та виступами шерсткості поверхні, залишеними після першого етапу алюмініювання (катодом), а також алюмінійовою пудрою та порошком графіту, що знаходилися між цими виступами. Водночас виступи шерсткості деформувалися, розтоплялися разом із алюмінійовою пудрою та частково розтікалися, заповнюючи западини, мікропори й інші недосконалості поверхні, що алюмініують. Водночас шерсткість поверхні знижується. В результаті контактування торцю алюміні-

**ТАБЛИЦЯ 1.** Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду на другому етапі алюмініювання.

**TABLE 1.** The dependence of the ESA productivity from the energy to the discharge at the second stage of aluminizing.

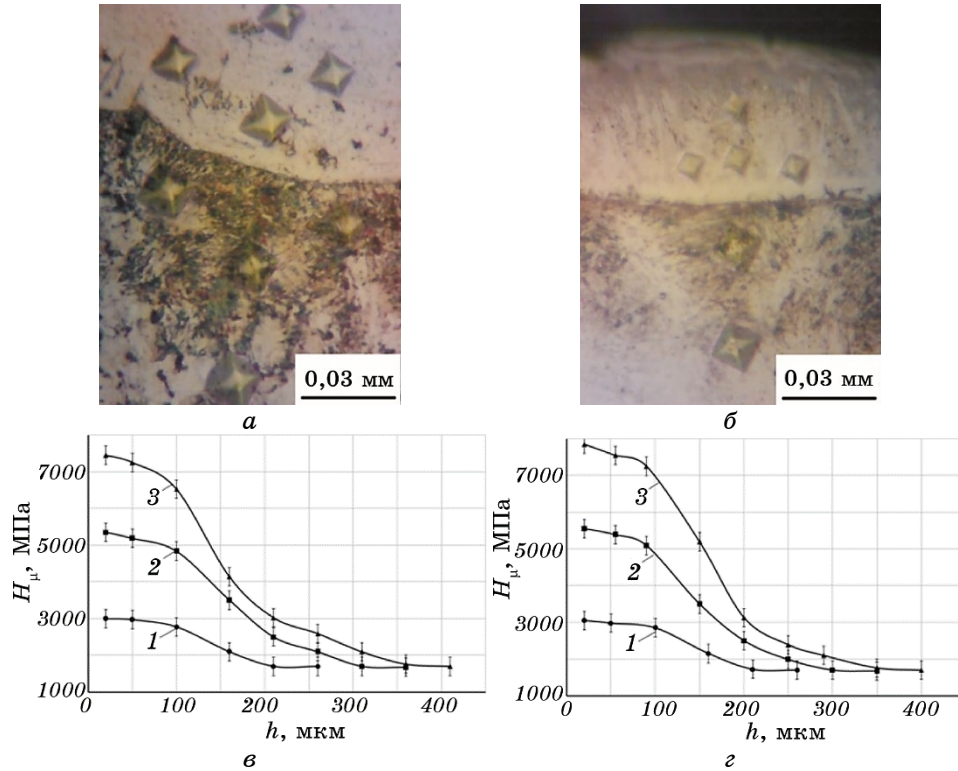
Енергія розряду $W_p$ , Дж	0,52	1,3	2,6
Продуктивність, см <sup>2</sup> /хв.	0,5–0,6	0,6–0,7	0,8–1,0

йової електроди-інструменту з порошком графіту в поверхневому шарі підвищується мікротвердість «білого» шару, що є результатом процесів, пов'язаних із гартівними процесами та фазоутворенням.

В таблиці 1 представлено енергію розряду та продуктивність на другому етапі алюмінівання.

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На рисунку 1 показано структури (а і б) і розподіл мікротвердості



**Рис. 1.** Структури (а і б) і розподіл мікротвердості в поверхневому шарі криці 20 (в і г) після алітування на другому етапі з використанням консистентної речовини, яка містить алюмінієву пудру (а, в) й алюмінієву пудру та порошок графіту (б, г) за алітування на першому етапі й енергії розряду  $W_p = 2,6, 4,6$  і  $6,8$  Дж.

**Fig. 1.** Structures (a and б) and the difference in microhardness in the surface ball of steel 20 (в and г) after aluminizing at another stage from victorious consistency speech, so, as to brush aluminium powder (a, в) or aluminium powder and graphite powder (б, г) with aluminizing at the first stage and energy category  $W_p = 2.6, 4.6$  and  $6.8$  J.

( $\epsilon$ ,  $\varepsilon$ ) в поверхневому шарі криці 20 після алюмініювання на другому етапі з використанням консистентної речовини, яка містить алюмінієву пудру ( $a$ ,  $\epsilon$ ) й алюмінієву пудру та порошок графіту ( $b$ ,  $\varepsilon$ ) за енергій розряду  $Wp = 2,6, 4,6$  і  $6,8$  Дж.

Електроіскрове покриття складається із зовнішнього «білого» шару, дифузійної зони й основи з ферито-перлітною структурою криці 20. Як показали дослідження, застосування нової технології уможливило одержати покриття із суцільністю у 100% і товщиною до 85 мкм. З використанням порошку графіту на другому етапі алю-

**ТАБЛИЦЯ 2.** Якісні параметри поверхневих шарів зразків криці 20 після ЕІЛ алюмінієвою електродою з використанням консистентної речовини, яка містить алюмінієву пудру (перший варіант) і алюмінієву пудру та порошок графіту (другий варіант), за умов, коли продуктивність було зменшено  $\cong$  в два рази.

**TABLE 2.** Qualitative parameters of the surface layers of steel 20 samples after ESA with an aluminium electrode using a consistent substance that contains aluminium powder (the first option) or aluminium powder and graphite powder (the second option) under the conditions, when the performance was reduced by  $\cong$  two times.

Режим	Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв.}$	Товщина, мкм		Максимальна мікротвердість, МПа		Шерсткість, мкм			Суцільність «білого» шару, %
		«білого» шару	перехідної зони	«білого» шару	перехідної зони	$Ra$	$Rz$	$R_{\max}$	
Криця 20 (перший варіант)									
I. ЕІЛ Al $Wp = 2,60$ Дж,	0,8								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $Wp = 0,52$ Дж	0,5	До 65	До 65	3000 ( $\pm 20$ )	2100 ( $\pm 200$ )	1,2	2,3	5,6	100
I. ЕІЛ Al $Wp = 4,60$ Дж,	1,0								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $Wp = 0,52$ Дж	0,6	До 75	До 80	5350 ( $\pm 20$ )	2100 ( $\pm 200$ )	1,7	2,8	6,9	100
I. ЕІЛ Al $Wp = 6,8$ Дж,	1,5								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $Wp = 1,30$ Дж	0,8	До 85	До 130	7450 ( $\pm 20$ )	2450 ( $\pm 70$ )	2,5	6,9	9,4	100
Криця 20 (другий варіант)									
I. ЕІЛ Al $Wp = 2,60$ Дж,	0,8								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $Wp = 0,52$ Дж	0,5	До 70	До 60	3050 ( $\pm 20$ )	2050 ( $\pm 50$ )	1,3	2,3	5,3	100
I. ЕІЛ Al $Wp = 4,60$ Дж,	1,0								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $Wp = 0,52$ Дж	0,6	До 75	До 80	5550 ( $\pm 20$ )	2100 ( $\pm 50$ )	1,7	2,7	6,2	100
I. ЕІЛ Al $Wp = 6,8$ Дж,	1,5								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $Wp = 1,3$ Дж	0,8	До 75	До 100	7850 ( $\pm 20$ )	2250 ( $\pm 50$ )	2,7	6,7	9,1	100

мінування, очевидно, відбуваються процеси насичення поверхні Карбоном, і мікротвердість поверхневих шарів і дифузійної зони зростає (табл. 2).

В таблиці 2 зведено результати дослідження згідно з першим варіантом алюмініювання криці 20 (продуктивність було зменшено  $\cong$  в два рази) із використанням на другому етапі консистентної речовини, яка містить алюмінієву пудру (перший варіант) і алюмінієву пудру та порошок графіту (другий варіант), за енергії розряду  $W_p = 2,6, 4,6$  і  $6,8$  Дж на першому етапі легування.

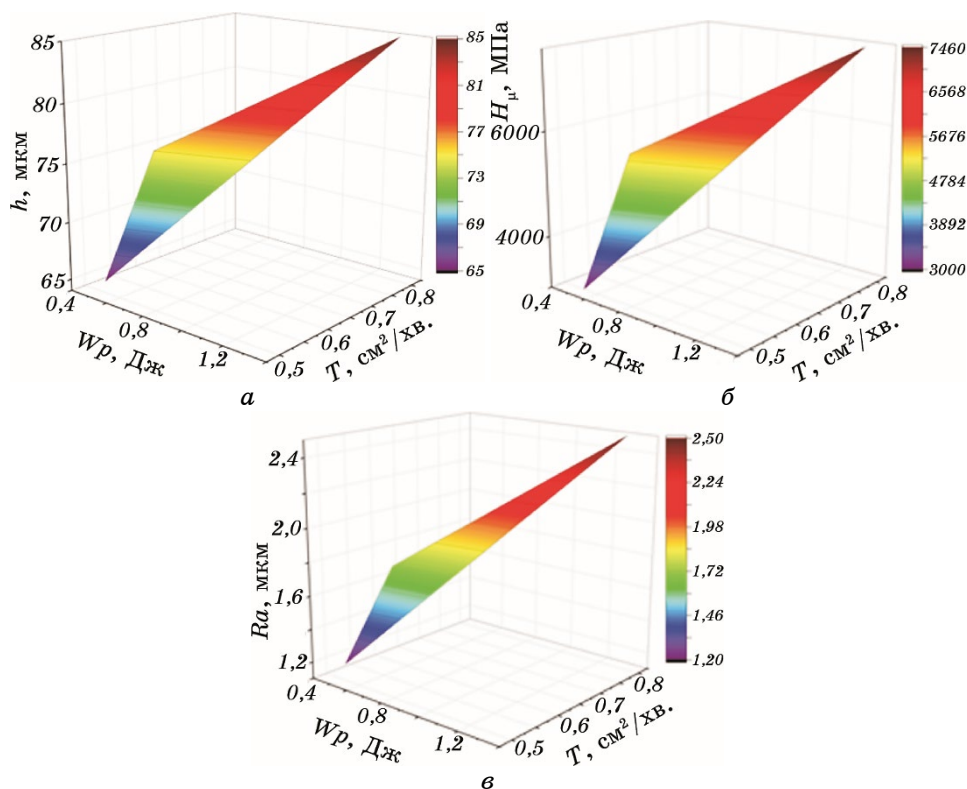
**ТАБЛИЦЯ 3.** Якісні параметри поверхневих шарів зразків криці 20 після ЕІЛ алюмінієвою електродою з використанням консистентної речовини, яка містить алюмінієву пудру (перший варіант) і алюмінієву пудру та порошок графіту (другий варіант), за умов, коли продуктивність було зменшено  $\cong$  в чотири рази.

**TABLE 3.** Qualitative parameters of the surface layers of steel 20 samples after ESA with an aluminium electrode using a consistent substance containing aluminium powder (the first option) and aluminium powder and graphite powder (the second option) under conditions, where the performance was reduced by  $\cong$  four times.

Режим	Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв.}$	Товщина, мкм		Максимальна мікротвердість, МПа		Шерсткість, мкм			Суттєвість «білого» шару, %
		«білого» шару	перехідної зони	«білого» шару	перехідної зони	$Ra$	$Rz$	$R_{\max}$	
Криця 20 (перший варіант)									
I. ЕІЛ Al $W_p = 2,60$ Дж,	0,4								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $W_p = 0,52$ Дж	0,2	До 55	До 55	3300 ( $\pm 20$ )	2150 ( $\pm 200$ )	1,2	2,1	5,2	100
I. ЕІЛ Al $W_p = 4,60$ Дж,	0,5								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $W_p = 0,52$ Дж	0,2	До 65	До 90	5600 ( $\pm 50$ )	2400 ( $\pm 100$ )	1,4	2,3	5,9	100
I. ЕІЛ Al $W_p = 6,8$ Дж,	0,6								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $W_p = 1,30$ Дж	0,3	До 75	До 130	7500 ( $\pm 20$ )	2550 ( $\pm 70$ )	2,3	6,1	8,4	100
Криця 20 (другий варіант)									
I. ЕІЛ Al $W_p = 2,60$ Дж,	0,4								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $W_p = 0,52$ Дж	0,2	До 65	До 60	3050 ( $\pm 20$ )	2050 ( $\pm 50$ )	1,3	2,3	5,3	100
I. ЕІЛ Al $W_p = 4,60$ Дж,	0,5								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $W_p = 0,52$ Дж	0,2	До 65	До 95	5600 ( $\pm 20$ )	2400 ( $\pm 100$ )	1,3	2,2	5,7	100
I. ЕІЛ Al $W_p = 6,8$ Дж,	0,6								
II. Нанесення консистентної речовини, ЕІЛ Al $W_p = 1,3$ Дж	0,3	До 70	До 100	7550 ( $\pm 20$ )	2650 ( $\pm 50$ )	2,2	5,8	8,1	100

В таблиці 3 зведено результати дослідження за умов, коли продуктивність було зменшено  $\cong$  в чотири рази згідно з першим і другим варіантами алюмініювання криці 20 з використанням на другому етапі консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру (перший варіант) і алюмінійову пудру та порошок графіту (другий варіант), за енергії розряду  $Wp = 2,6, 4,6$  і  $6,8$  Дж на першому етапі легування.

Зі збільшенням енергії розряду на першому етапі легування алю-



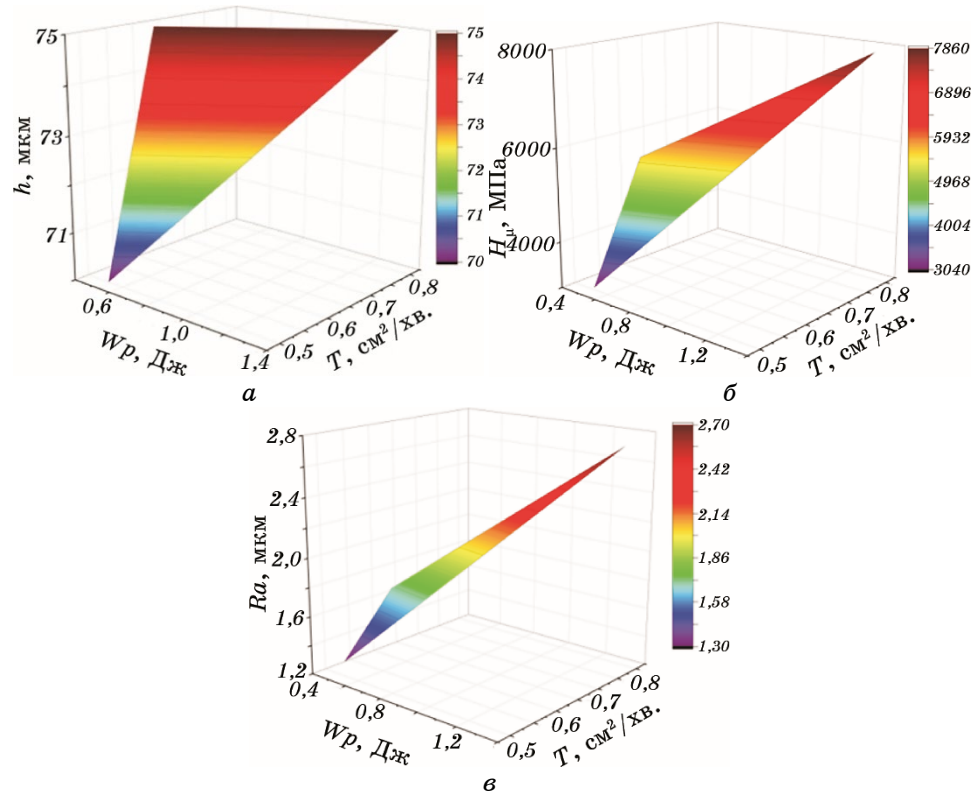
**Рис. 2.** Зміна параметрів якості: товщини «білого шару» (а), мікротвердості (б) і шерсткості (в) поверхневих шарів криці 20 після ЕІЛ алюмінійовою електродою з використанням консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру (перший варіант) за умов, коли продуктивність була зменшена  $\cong$  у два рази, в залежності від енергії розряду і продуктивності ЕІЛ на першому етапі.

**Fig. 2.** Change in quality parameters: the thickness of the 'white layer' (a), microhardness (б) and roughness (в) of the surface layers of steel 20 after ESA with an aluminium electrode using a consistent substance that contains aluminium powder (the first option) under conditions where productivity was reduced  $\cong$  twice, depending on the energy of the discharge and the performance of the ESA at the first stage.



мінійовою електродою спостерігається підвищення мікротвердості та товщини «білого» шару і дифузійної зони. Як і в попередньому варіанті легування за використання консистентної речовини, що містить графіт, відмічається незначне збільшення мікротвердості.

На рисунках 2, 3 представлено залежності параметрів якості поверхневих шарів криці 20 після алюмінування по першому та другому варіантах з використанням консистентної речовини, яка міс-



**Рис. 3.** Зміна параметрів якості: товщини «білого шару» (а), мікротвердості (б) та шерсткості (в) поверхневих шарів криці 20 після ЕІЛ алюмінійовою електродою з використанням консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру та порошок графіту (другий варіант), за умов, коли продуктивність було зменшено  $\cong$  у два рази, в залежності від енергії розряду та продуктивності ЕІЛ на першому етапі.

**Fig. 3.** Change in quality parameters: thickness of the 'white layer' (a), microhardness (б) and roughness (в) of the surface layers of steel 20 after ESA with an aluminium electrode using a consistent substance containing aluminium powder and graphite powder (second option) according to conditions, when the performance was reduced by  $\cong$  two times, depending on the discharge energy and the performance of the ESA at the first stage.

тять алюмінійову пудру (рис. 2) і алюмінійову пудру та порошок графіту (рис. 3) відповідно до табл. 2 за умов, коли продуктивність було зменшено  $\cong$  у два рази.

Аналіза рисунків 1–3 і таблиць 2 і 3 показала, що після використання другого етапу алюмініювання, причому, як після першого варіанту (зменшенні продуктивності в 2 рази), так і після другого (зменшенні продуктивності в 4 рази), зменшується шерсткість поверхневого шару, з використанням консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру та порошок графіту в більшому ступені.

З використанням консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру, незначно збільшується товщина «білого шару» і його мікротвердість, а з додаванням в алюмінійову пудру порошку графіту товщина білого шару майже не змінюється, але мікротвердість, як в «білому шарі», так і в перехідній зоні, збільшується. Суцільність за обох варіантах другого етапу складає 100%.

### 3. ВИСНОВКИ

1. В результаті проведених досліджень впливу продуктивності процесу ЕІЛ алюмінійовою електродою-інструментом на параметри якості поверхневих шарів деталей з криці удосконалено технологію алюмініювання.

2. За алюмініювання у два етапи для обох варіантів із використанням консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру або алюмінійову пудру та порошок графіту, збільшується мікротвердість «білого шару» та дифузійної зони (в більшому ступені за наявності в консистентній речовині графіту), шерсткість поверхні зменшується, а суцільність покриття складає 100%.

3. До практичної реалізації рекомендується проводити процес алюмініювання по першому варіанту: I етап — ЕІЛ алюмінійовою електродою за енергії розряду  $Wp = 4,6-6,8$  Дж, II етап — нанесення консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру та порошок графіту; ЕІЛ виконувати за умов, коли продуктивність буде зменшено  $\cong$  у два рази.

### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник, Т. І. Жиленко, Н. В. Тарельник, О. А. Саржанов, В. І. Мельник, В. М. Власовець, С. В. Павловский, В. О. Охріменко, А. В. Ткаченко, *Металофіз. новітні технол.*, **45**, № 12: 1449 (2023).
2. M. Brochu, J. G. Portillo, J. Milligan, and D. W. Heard, *The Open Surf. Sci. J.*, No. 3: 105 (2011).
3. V. Goncharuk, A. Paramonov, F. Grosu, A. Polikarpov, and A. Kovali, *Mater. Sci. Cond. Matter Phys. Editia*, **8**: 314 (2016).

4. A. I. Komarov, L. Kyzioł, D. V. Orda, D. O. Iskandarova, I. A. Sosnovskiy, A. A. Kurilyonok, and D. Žuk, *Mater.*, **14**: 3555 (2021).
5. S. Sheikh, L. Gan, X. Montero, H. Murakami, and S. Guo, *Intermetallics*, **123**: 106838 (2020).
6. 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. Pogrebnyak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
7. 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).
8. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, О. М. Мисливченко, *Металлофіз. новітні технол.*, **41**, № 10: 1377 (2019).
9. 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.
10. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, N. Tarelnyk, and A. Kozachenko, *Mater. Sci. Forum*, **968**: 131 (2019).
11. 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 Electrochem.*, **57**: 173 (2021).
12. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Металлофіз. новітні технол.*, **41**, № 2: 173 (2019).
13. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Металлофіз. новітні технол.*, **41**, № 3: 313 (2019).
14. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**, Nos. 7–8: 540 (2017).

## REFERENCES

1. 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, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **45**, No. 12: 1449 (2023) (in Ukrainian).
2. M. Brochu, J. G. Portillo, J. Milligan, and D. W. Heard, *The Open Surf. Sci. J.*, No. 3: 105 (2011).
3. V. Goncharuk, A. Paramonov, F. Grosu, A. Polikarpov, and A. Kovali, *Mater. Sci. Cond. Matter Phys. Editia*, **8**: 314 (2016).
4. A. I. Komarov, L. Kyzioł, D. V. Orda, D. O. Iskandarova, I. A. Sosnovskiy, A. A. Kurilyonok, and D. Žuk, *Mater.*, **14**: 3555 (2021).
5. S. Sheikh, L. Gan, X. Montero, H. Murakami, and S. Guo, *Intermetallics*, **123**: 106838 (2020).
6. 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. Pogrebnyak

- and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
7. G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarel'nyk, O. M. Myslyvchenko, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, Nos. 11–12: 688 (2018).
  8. V. B. Tarel'nik, O. P. Gaponova, and O. M. Mislivchenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 10: 1377 (2019) (in Russian).
  9. V. Martsynkovskyy, V. Tarel'nyk, 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.
  10. V. Tarel'nyk, I. Konoplianchenko, N. Tarel'nyk, and A. Kozachenko, *Mater. Sci. Forum*, **968**: 131 (2019).
  11. 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 Electrochem.*, **57**: 173 (2021).
  12. V. B. Tarel'nik, O. P. Gaponova, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskiy, N. V. Tarel'nik, and O. A. Vasilenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 2: 173 (2019) (in Russian).
  13. V. B. Tarel'nik, O. P. Gaponova, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskiy, N. V. Tarel'nik, and O. A. Vasilenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 3: 313 (2019) (in Russian).
  14. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**, Nos. 7–8: 540 (2017).