

## METALLIC SURFACES AND FILMS

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.J-, 68.55.Ln, 81.15.Rs, 81.40.Pq

### **Дослідження процесів формування алітованих шарів, отриманих методом електроіскрового легування. Частина I. Структурно-фазовий стан поверхні сталі після алітування**

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова\*, О. М. Мисливченко\*\*

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

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

*\*\*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,  
вул. Кржижановського 3,  
03142 Київ, Україна*

Розглянуто особливості фазоутворення і структурних перетворень в процесі формування поверхневих алітованих шарів на вуглецевих сталях електроіскровим легуванням. Показано, що зі збільшенням енергії розряду зростають товщини та мікротвердість «білого» і перехідного шарів, шорсткість поверхні, а також змінюються хімічний і фазовий склади. При низьких енергіях розряду формується шар, що складається переважно з  $\alpha$ -Fe і оксидів алюмінію. Зі збільшенням енергії розряду шар складається з інтерметалідів заліза й алюмінію, а також вільного алюмінію, що підтверджу-

Corresponding author: Vyacheslav Borysovych Tarelnyk  
E-mail: [tarelnik@i.ua](mailto:tarelnik@i.ua)

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

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

*\*\*I. M. Frantsevich Institute for Problems in Materials Science, N.A.S. of Ukraine  
3 Krzhyzhanovsky Str., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, and O. M. Myslyvchenko, Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part I. Structural-Phase State of the Steel Surface after Aluminizing, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 10: 1377–1394 (2019) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.41.10.1377](https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1377).

ється даними рентгеноспектрального аналізу. З метою зниження шорсткості та збільшення суцільності покриттів рекомендується електроіскрове легування проводити цим же електродом (алюмінієм), але на менших режимах.

**Ключові слова:** електроіскрове легування, алітування, покриття, мікроструктура, фазовий склад, мікротвердість, шорсткість, рентгеноструктурний аналіз, рентгеноспектральний аналіз.

Peculiarities of phase formation and structural transformations at forming aluminized layers on carbon steels by electrospray alloying are considered. As shown, with increasing discharge energy the thickness and microhardness of the 'white' and transition layers, the surface roughness increase, the chemical and phase compositions change. At low discharge energies, a layer is formed; it predominantly consists of  $\alpha$ -Fe and aluminium oxides. With increasing discharge energy, the layer consists of iron and aluminium intermetallics and free aluminium, which is evidenced by the data of X-ray spectral analysis. To reduce the roughness and increase the continuity of coatings, it is recommended to carry out the electrospray alloying using the same electrode (aluminium), but at low discharge energy.

**Key words:** electrospray alloying, aluminizing, coating, microstructure, phase composition, microhardness, surface roughness, X-ray diffraction analysis, X-ray spectral analysis.

Рассмотрены особенности фазообразования и структурных превращений в процессе формирования поверхностных алитированных слоёв на углеродистых сталях электроискровым легированием. Показано, что с увеличением энергии разряда возрастают толщины и микротвёрдость «белого» и переходного слоёв, шероховатость поверхности, а также изменяются химический и фазовый составы. При низких энергиях разряда формируется слой, состоящий преимущественно из  $\alpha$ -Fe и оксидов алюминия. С увеличением энергии разряда слой состоит из интерметаллидов железа и алюминия, а также свободного алюминия, что подтверждается данными рентгеноспектрального анализа. С целью снижения шероховатости и увеличения сплошности покрытий рекомендуется электроискровое легирование проводить этим же электродом (алюминием), но на меньших режимах.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, алитирование, покрытие, микроструктура, фазовый состав, микротвёрдость, шероховатость, рентгеноструктурный анализ, рентгеноспектральный анализ.

*(Отримано 25 лютого 2019 р.; остаточн. варіант — 30 липня 2019 р.)*

## 1. ВСТУП

Відомо, що конструкційна міцність деталей залежать від фізико-механічних властивостей основного матеріалу. Однак експлуатаційні властивості (зносоустійкість, жаростійкість, корозійна стій-

кість, втомна міцність тощо) у значній мірі визначаються станом і властивостями поверхневого шару. Вони можуть бути істотно підвищені шляхом зміни рельєфу робочої поверхні [1], складу [2, 3], структури [4] і властивостей поверхневого шару [5]. Для створення поверхневих шарів з необхідними характеристиками (склад, структура, товщина та ін.) застосовують різні методи обробки — механічні [6, 7], термічні [8, 9], електрофізичні [10], електрохімічні [11, 12], плазово-електролітичні [13] та їх комбінації [14–18]. У результаті формуються поверхневі шари товщиною від кількох мікрометрів до 1 мм і більше, що мають кращі характеристики і протидіють стиранню, окисненню при підвищеній температурі, корозії, ерозії та інших процесах, які ініціюють зношування робочих поверхонь деталей при експлуатації.

Широке застосування на практиці для зміцнення і відновлення металевих поверхонь знайшли методи, засновані на використанні концентрованих потоків енергії (КПЕ). До числа сучасних методів поверхневої обробки металевих поверхонь КПЕ відносять електроіскрове легування (ЕІЛ), що дозволяє отримувати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними і трибологічними властивостями [1–3, 5, 19]. Перевагами ЕІЛ є екологічна безпека процесу, висока міцність зчеплення легованого шару і матеріалу основи, можливість нанесення на зміцнювальну поверхню будь-яких струмопровідних матеріалів, низька енергоємність процесу, простота виконання технологічної операції. Електроіскрове легування, володіючи широкими можливостями формування в поверхнях певної структури, фазового та хімічного складу, дозволяє поліпшити їх експлуатаційні властивості.

Процес ЕІЛ екологічно чистий і безпечний, тому що здійснюється при напрузі 20–100 В і тривалості імпульсних розрядів  $10^{-6}$ – $10^{-3}$  с [19]. При цьому товщина формованих шарів з твердих стопів становить ~0,01–0,15 мм, а з пластичних і більш легкоплавких матеріалів шар покриття може досягати  $\geq 0,3$ –0,5 мм. За інтенсивністю впливу на поверхневий шар ЕІЛ значно відрізняється від інших процесів (тиск ударної хвилі 0,1 Па, температура (5–40)· $10^3$  °С). Висока швидкість теплообміну призводить до того, що в межах товщини шару порядку декількох мікрометрів температура швидко підвищується до температур плавлення й відповідних фазових перетворень. У зв'язку із цим кристалізація, фазові перетворення, дифузія й хімічна взаємодія, що супроводжують процес ЕІЛ, призводять до утворення вкрай нерівноважних структур з дуже дрібним зерном, високою гетерогенністю за структурою й властивостями. Твердість такого шару, як правило, значно перевершує твердість матеріалів електродів. У ньому виникають напруження, що перевищують внутрішні напруження в електродних матеріалах анода й катода [19, 20].

У зоні розряду електроерозія, масоперенесення матеріалу електродів (в паровій, рідкій і твердій фазах), кристалізація та інші явища протікають у дуже нерівноважних умовах, що сприяють утворенню структур з дрібним зерном, високою густиною дислокацій, з особливим напружено-деформованим станом, певними фізико-хімічними властивостями. Змінюючи параметри і умови ЕІЛ, можна регулювати мікрометалургійні процеси в цій зоні, проводити спрямований синтез тугоплавких і інших хімічних сполук та формувати складні композиційні покриття з інтерметалідів, карбідів, нітридів, оксидів як за рахунок матеріалів електродів, так і елементів міжелектродного середовища.

Відомо [21], що з метою надання залізобуглецевим стопам підвищеної окалинотійкості, опору атмосферній корозії і ряду інших властивостей застосовують алітування. Крім того, комплексні алітовані покриття [22] характеризуються високою температурою плавлення, низькою густиною, високим модулем пружності, жароміцністю, стійкістю до окислення і займання. Крім цього, останнім часом намітилася тенденція використовувати комплексні алітовані покриття для створення захисних та зносостійких шарів.

У роботі [23] досліджувалася корозійна стійкість алюмінієвих покриттів на сталі Ст. 3. Показано, що зі збільшенням товщини покриття, отриманого методом ЕІЛ алюмінієвим електродом, опір до атмосферної корозії зростає. Автори також зазначають, що пористість електроіскрових алюмінієвих покриттів не є стримуючим фактором. У місцях пор за наявності електроліту (вологи) розвивається електрохімічна корозія. При цьому покриття служить анодом, а сталь — катодом. За умови пористого покриття основний метал захищається електрохімічно — поки шар не розчиниться, катод захищається за допомогою анодного механізму. У разі безпористих електроіскрових алюмінієвих покриттів крім описаного механізму діє ще й екранувальний механізм захисту від корозійного руйнування. Цей захист збільшується зі зростанням оксидних шарів на алюмінієвих покриттях.

Отримання доброго металевого контакту між сталлю і алюмінієвими стопами ускладняється великою спорідненістю алюмінію до кисню і значною міцністю окису алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), про що свідчить теплота утворення цієї сполуки, що дорівнює 400 ккал/моль. Однак основною перешкодою є хімічна взаємодія цих металів, що призводить до незворотного утворення інтерметалевих сполук по лінії переходу.

Попереднє судження про структури, що утворюються в залізо-алюмінієвих з'єднаннях, властивості сталей, що містять алюміній, і алюмінієві стопи, що містять залізо, може бути зроблено на підставі діаграми стану алюміній–залізо [24].

Метою роботи є проведення аналізу впливу режимів ЕІЛ на фор-

мування структури поверхневих шарів вуглецевих сталей після алітування методом електроіскрового легування; розроблення математичної моделі управління якістю поверхневих шарів деталей, що дозволяє за енергетичними параметрами обладнання прогнозувати якісні параметри сформованого поверхневого шару, а також вирішення зворотної задачі — визначати необхідні режими ЕІЛ для забезпечення необхідної якості поверхні.

## 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою дослідження особливостей формування мікроструктури і властивостей алітованих покриттів, отриманих економічним і екологічно чистим способом, проводили електроіскрове легування сталей.

Як основу використовували зразки зі сталей 20 і 40 (ГОСТ 1050-88) розміром  $15 \times 15 \times 8$  мм<sup>3</sup>, на які наносили алюмінієві покриття методом ЕІЛ на установці з ручним вібратором моделі «Елітрон-52А». Як електрод використовували стрижні діаметром 4 мм і довжиною 45 мм з алюмінієвого дроту марки СвА99 (ГОСТ 7871-75). Легування здійснювалося на різних режимах, кожному з яких відповідає своя енергія розряду і продуктивність — площа сформованого покриття за одиницю часу (табл. 1).

Варто зазначити, що при зниженні продуктивності ЕІЛ відбувається погіршення якісних параметрів поверхневого шару (з'являються підпіки, а головне, руйнування сформованого шару), що особливо позначається на більш «грубих» режимах при енергії розряду  $W_p > 1$  Дж [11]. У свою чергу, збільшення продуктивності призводить до зниження суцільності покриття.

Металографічний аналіз покриттів виконували за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-7, електронного мікроскопа JEOL JSM 7100f, дюрOMETричні дослідження проводили на приладі ПМТ-3.

Рентгенографічні дослідження проводили в  $\text{CuK}_\alpha$ -випромінюванні на дифрактометрі PROTO AXRD, який оснащений точковим кремнієвим детектором (SPD).

Для дослідження розподілу елементів по глибині шару проводився локальний мікрорентгеноспектральний аналіз, заснований на реєстрації характеристичного рентгенівського випромінювання, що збуджується електронним пучком присутніх в мікрообсягах хі-

**ТАБЛИЦЯ 1.** Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду.

**TABLE 1.** Technological parameters of the «Elitron-52A» device.

Енергія розряду $W_p$ , Дж	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Продуктивність, см <sup>2</sup> /хв	1,0–1,3	1,3–1,5	1,5–2,0	2,0–2,5	2,5–3,0

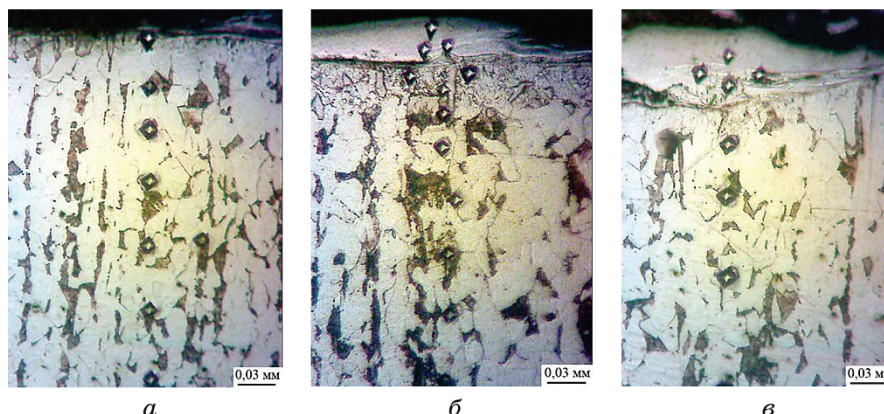
мічних елементів. Для цього використовувався електронний мікроскоп JEOL JSM 7100f, оснащений мікроаналізатором, ISIS 300 Oxford instruments. Шорсткість поверхні після ЕІЛ визначали на приладі профілограф–профілометр моделі 201 заводу «Калібр» шляхом зняття і обробки профілограм.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мікроструктури покриттів алюмінієм на сталі 20 залежно від енергії розряду ( $W_p$ ) показано на рис. 1.

Металографічний аналіз отриманих покриттів показав, що мікроструктура складається з 3-х зон: 1) «білий шар» — шар, що не піддається травленню звичайними травниками, 2) перехідна зона або дифузійна зона, 3) основний метал, що має феритно-перлітну структуру.

У таблиці 2 представлені розміри зон мікроструктури залежно від енергії розряду. При низьких режимах ЕІЛ ( $W_p = 0,52$  Дж) формується тонкий шар перехідної зони товщиною 20–30 мкм, суцільність якої прагне до 100%. Зустрічаються окремі ділянки «білого» шару (до 60%) товщиною 10–12 мкм. Зі збільшенням енергії розряду товщина «білого шару» і перехідної зони збільшується. При  $W_p = 1,30$  і 4,60 Дж товщина «білого шару» і перехідної зони відповідно дорівнюють 30–50 мкм, 30–40 мкм і 50–70 мкм, 40–60 мкм (табл. 2). З посиленням режиму ЕІЛ збільшується суцільність поверхневого шару. Так, при  $W_p = 2,6$  Дж суцільність дифузійного шару



**Рис. 1.** Мікроструктури поперечних перерізів зразків зі сталі 20 з алюмінієвим покриттям, отриманим методом ЕІЛ: *а* —  $W_p = 0,52$  Дж, *б* —  $W_p = 1,30$  Дж, *в* —  $W_p = 2,6$  Дж.

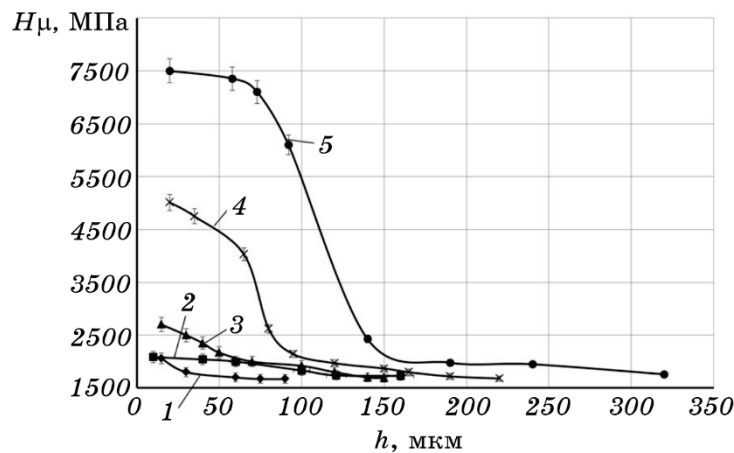
**Fig. 1.** Microstructure of the cross sections of the samples from steel 20 with an aluminium coating obtained by the ESA method: *a*— $W_p = 0.52$  J, *б*— $W_p = 1.30$  J, *в*— $W_p = 2.6$  J.

**ТАБЛИЦЯ 2.** Якісні параметри алітованих електроіскрових покриттів на сталях 20 і 40.**TABLE 2.** Qualitative parameters of aluminized coatings obtained by the ESA method on steels 20 and 40.

Енергія розряду, Дж	Товщина, мкм		Мікротвердість, МПа		Шорсткість, мкм			Супільність «білого» шару, %
	«Білий» шар	Перехідна зона	«Білий» шар	Перехідна зона	$R_a$	$R_z$	$R_{\max}$	
Сталь 20								
0,52	10–12	20–30	2000±70	1900±50	1,3	2,3	9,3	60
1,30	30–50	30–40	2050±70	1850±80	1,9	6,2	21,6	80
2,60	40–50	30–50	2700±70	2000±200	3,3	9,3	23,2	85
4,60	50–70	40–60	5010±90	2250±200	6,2	16,3	40,6	95
6,8	до 70	110–130	7270±50	2370±70	9,0	18,1	58,3	100
Сталь 40								
0,52	10–15	10–20	2000±70	2000±50	1,6	3,0	8,1	50
2,60	30–70	30–70	2050±70	4500±50	1,9	4,1	11,6	70
6,80	60–130	130–150	2700±70	2390±70	8,1	17,3	49,0	100

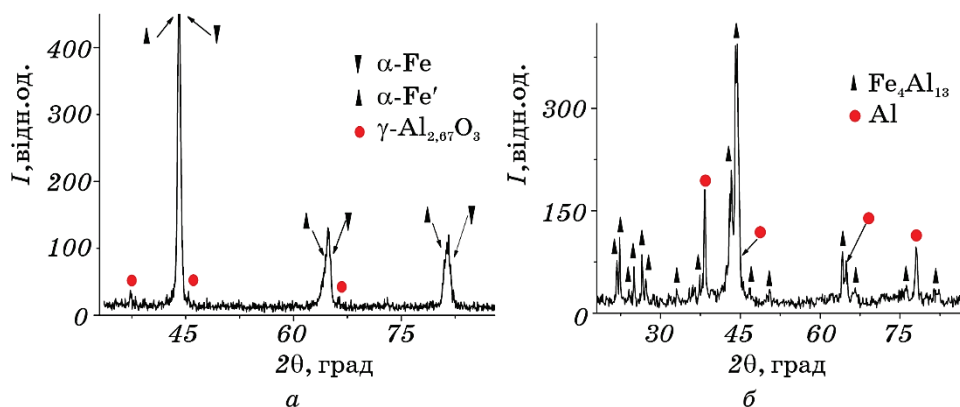
прагне до 100%, а «білого» шару до 85%.

На рисунку 2 представлено результати дюрOMETричного аналізу



**Рис. 2.** Залежність мікротвердості від глибини шару для різних режимів обробки сталі 20: 1 —  $W_p = 0,52$  Дж, 2 —  $W_p = 1,30$  Дж, 3 —  $W_p = 2,6$  Дж, 4 —  $W_p = 4,6$  Дж, 5 —  $W_p = 6,8$  Дж.

**Fig. 2.** Dependence of microhardness on the depth of the layer for different regimes of steel 20 treatment: 1— $W_p = 0.52$  J, 2— $W_p = 1.30$  J, 3— $W_p = 2.6$  J, 4— $W_p = 4.6$  J, 5— $W_p = 6.8$  J.



**Рис. 3.** Дифрактограми з поверхні сталі 20 після ЕІЛ алюмінієм на різних режимах обробки: *a* —  $W_p = 0,52$  Дж, *б* —  $W_p = 1,30$  Дж.

**Fig. 3.** Diffractograms from the surface of steel 20 after ESA aluminium at different regimes of treatment: *a*— $W_p = 0.52$  J, *б*— $W_p = 1.30$  J.

розподілу мікротвердості алітованих покриттів. Максимальна твердість досягається на поверхні і плавно знижується до мікротвердості основи 1600–1700 МПа. Мікротвердість зон покриття визначається енергетичними параметрами процесу ЕІЛ: чим більша енергія розряду, тим вищу твердість має «білий шар» і, відповідно, перехідна зона. Така зміна мікротвердості обумовлюється дифузією алюмінію в підкладинку, зміною структурно-фазового складу шару.

Аналіз діаграми стану залізо–алюміній [24] свідчить про те, що в ЕІЛ-шарі ймовірне формування інтерметалідів, що підтверджуєть-

**ТАБЛИЦЯ 3.** Параметри кристалічних ґратниць фаз і кількісний фазовий аналіз після алітування.

**TABLE 3.** Parameters of crystalline lattices phases and quantitative phase analysis after aluminizing.

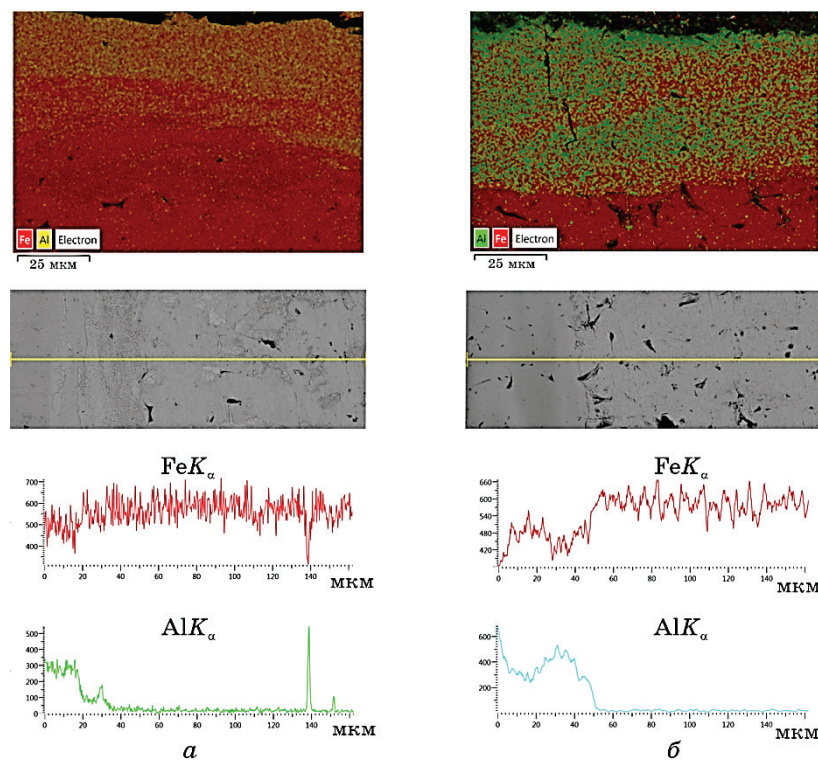
Режим ЕІЛ	Фаза	Параметри кристалічних ґратниць, Å	Вміст фаз, % за масою
$W_p = 0,52$ Дж	$\alpha$ -Fe	$a = 2,887$	36
	$\alpha$ -Fe'	$a = 2,907$	47
	$\gamma$ -Al <sub>2,67</sub> O <sub>4</sub>	$a = 7,980$	17
	Al	$a = 4,056$	19
$W_p = 1,30$ Дж	Fe <sub>4</sub> Al <sub>13</sub>	$a = 15,403$	81
		$b = 8,134$	
		$c = 12,473$	
		$\beta = 107,933$	



ся високою твердістю покриття. Також не можна виключати формування нітридів і оксидів [25], оскільки електроіскрове легування здійснювалося на повітрі. Дуже ймовірні невеликі об'єми чистого матеріалу електрода.

Для визначення фазового складу ЕІЛ покриттів проводили рентгеноструктурний аналіз. Дифрактограми, зняті з поверхні зразка після алітування при  $W_p = 0,52$  Дж, тобто при «м'якому» режимі, вказують на наявність дифракційних максимумів двох твердих розчинів на основі фази з ОЦК-структурою —  $\alpha$ -Fe і  $\alpha$ -Fe' (229 просторова група) й оксиду алюмінію  $\gamma$ -Al<sub>2,67</sub>O<sub>4</sub> (227 просторова група) (рис. 3).  $\alpha$ -Fe і  $\alpha$ -Fe' відрізняються тільки періодом ґратниці, що є наслідком макронапружень, що виникають у результаті прискореного охолодження після процесу електроіскрової обробки (табл. 3).

З ростом енергії розряду з'являються нові фазові складові. Якщо при  $W_p = 0,52$  Дж виникають тільки твердий розчин алюмінію в за-

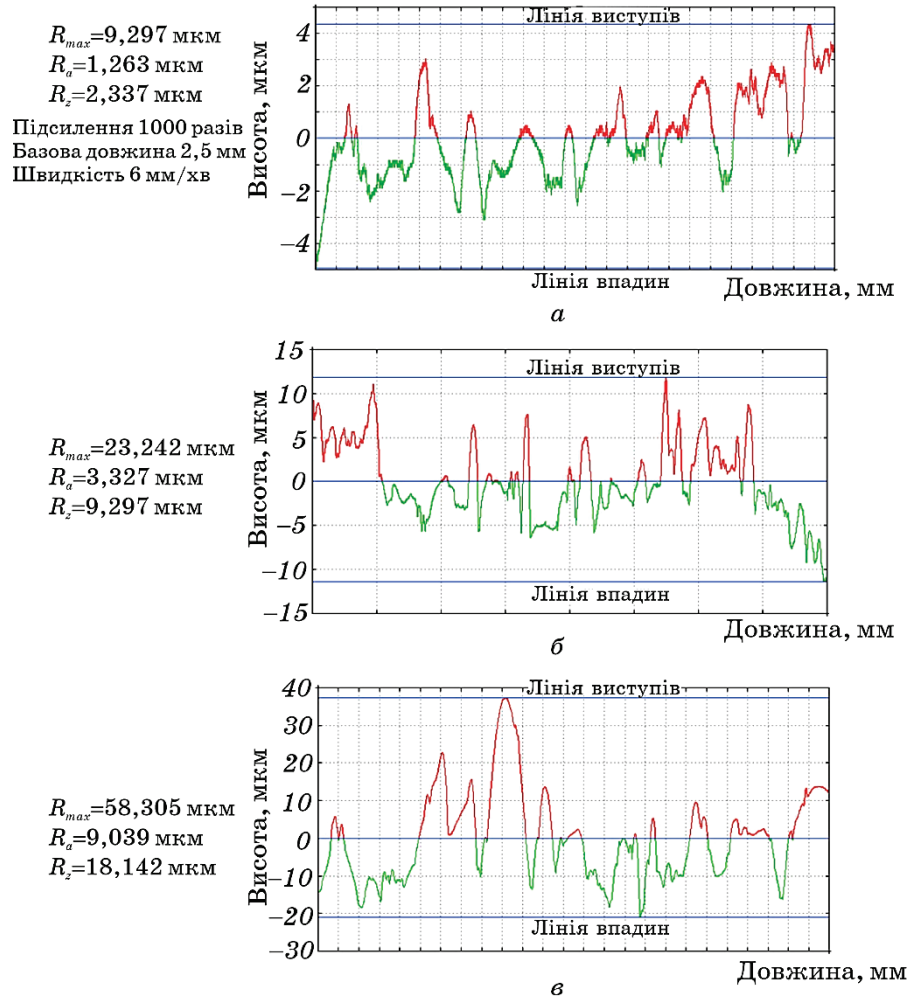


**Рис. 4.** Концентраційні криві розподілу заліза і алюмінію в покритті після ЕІЛ з енергією розряду: *a* —  $W_p = 0,52$  Дж, *б* —  $W_p = 1,30$  Дж.

**Fig. 4.** Concentration curves of the distribution of iron and aluminium in coating after ESA at different energy of discharge: *a*— $W_p = 0.52$  J, *б*— $W_p = 1.30$  J.

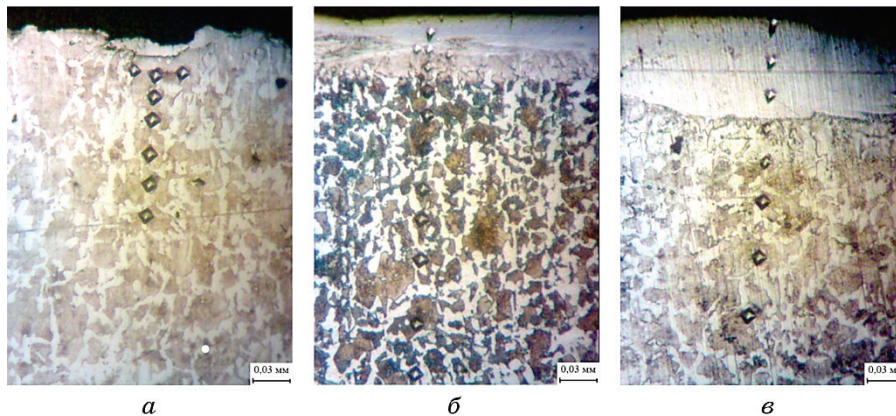
лізі і невелика кількість оксиду алюмінію, тому що процес ЕІЛ здійснювався на повітрі, то при  $W_p = 1,30$  Дж створюються умови для утворення фази з моноклінної структурою —  $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$  (12 просторова група) і чистого алюмінію (225 просторова група). Очевидно, поява інтерметалідних фаз і сприяє збільшенню твердості покриття зі збільшенням енергії розряду (рис. 2).

Нами, як і авторами робіт [26, 27] на парах Мо–Fe, Cu–Fe, показано, що збільшення енергії розряду сприяє зростанню товщини



**Рис. 5.** Профілограми шорсткості поверхні зразків сталі 20 після ЕІЛ алюмінієм з енергією розряду: *а* —  $W_p = 0,52$  Дж, *б* —  $W_p = 2,6$  Дж, *в* —  $W_p = 6,8$  Дж.

**Fig. 5.** Profilograms of surface roughness of steel 20 samples after ESA by aluminium with energy of discharge: *a* —  $W_p = 0.52$  J, *б* —  $W_p = 2.6$  J, *в* —  $W_p = 6.8$  J.



**Рис. 6.** Мікроструктури поперечних перерізів зразків зі сталі 40 з алюмінієвим покриттям: *a* —  $W_p = 0,52$  Дж, *б* —  $W_p = 2,6$  Дж, *в* —  $W_p = 6,8$  Дж.

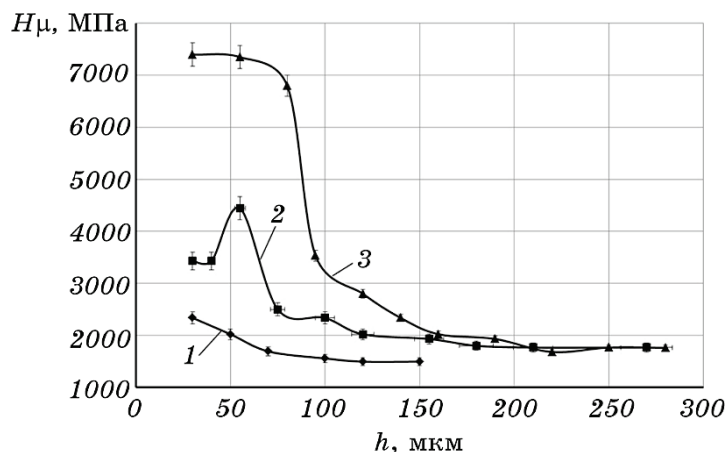
**Fig. 6.** Microstructures of the cross sections of samples from steel 40 with aluminium coating: *a* —  $W_p = 0.52$  J, *б* —  $W_p = 2.6$  J, *в* —  $W_p = 6.8$  J.

покриття і дифузійної зони між покриттям і підкладкою. При значеннях  $W_p = 0,52$  Дж і  $W_p = 1,30$  Дж розміри дифузійної зони алюмінію в залізі становлять відповідно 34 і 50 мкм, зростає вміст алюмінію в залізі (рис. 4). Так, при  $W_p = 1,30$  Дж на поверхні формується тонкий шар до 4 мкм, вміст алюмінію в якому приблизно у 1,5–2 рази більше. Наявність вільного алюмінію в шарі підтверджують дані рентгеноструктурного аналізу (табл. 3).

Аналіз вимірювання шорсткості поверхневого шару зразка сталі 20 після ЕІЛ алюмінієм показав, що з посиленням режиму збільшується шорсткість поверхні (табл. 2): при  $W_p = 0,52$  Дж шорсткість становить  $R_a = 1,3$ , при  $W_p = 2,60$  Дж —  $R_a = 3,3$ . Подальше збільшення енергії розряду до 6,8 Дж супроводжується значним збільшенням шорсткості поверхні:  $R_{\max} = 58,305$  мкм,  $R_a = 9,039$  мкм і  $R_z = 18,142$  мкм (рис. 5).

Металографічний аналіз алітованих покриттів на сталі 40 показав, що, так само як і на сталі 20 спостерігається формування трьох зон (рис. 6). Необхідно відзначити, що при однакових умовах ЕІЛ на сталі 40 формуються зони більші за товщиною (табл. 2), що мають підвищену мікротвердість (рис. 7). Так, при ЕІЛ сталі 40 при  $W_p = 2,60$  Дж товщина «білого шару» становить 30–70 мкм з твердістю  $3500 \pm 50$  МПа, сталь 20 — 40–50 мкм з  $H_{\mu} = 2700 \pm 70$  МПа. При збільшенні енергії розряду суцільність «білого» шару підвищується, а перехідного шару — прагне до 100% (табл. 2).

З посиленням режиму ЕІЛ збільшується глибина перехідної зони. При  $W_p = 0,52$  Дж вона не виражена, тоді як при  $W_p = 2,6$  Дж — становить близько 30–40 мкм і характеризується підвищеною твер-



**Рис. 7.** Залежність мікротвердості від глибини шару для різних режимів обробки сталі 40: *a* —  $W_p = 0,52$  Дж, *б* —  $W_p = 2,6$  Дж, *в* —  $W_p = 6,8$  Дж.

**Fig. 7.** Dependence of microhardness on the depth of the layer for different ESA regimes for steel 40: *a* —  $W_p = 0.52$  J, *б* —  $W_p = 2.6$  J, *в* —  $W_p = 6.8$  J.

дістю близько 4500 МПа.

Причиною підвищення твердості перехідної зони можуть служити фазові перетворення, що відбуваються при нагріванні сталі вище критичних температур і прискореного охолодження на повітрі. На мікроструктурі чітко простежується ділянка неповної перекристалізації, яка для сталі 40 визначається нагріванням до температурного діапазону 730–755°C. Метал на цій ділянці піддається частковій перекристалізації. Так, поряд з зернами, що утворилися в результаті перекристалізації, присутні зерна вихідного металу. Крім того, як і на сталі 20, в поверхневому шарі можливе утворення інтерметалідів, нітридів і оксидів, тому що процес ЕІЛ здійснювався на повітрі, що призводить до значного підвищення мікротвердості

**ТАБЛИЦЯ 4.** Залежність продуктивності ЕІЛ сталевих зразків вуглецем і алюмінієм.

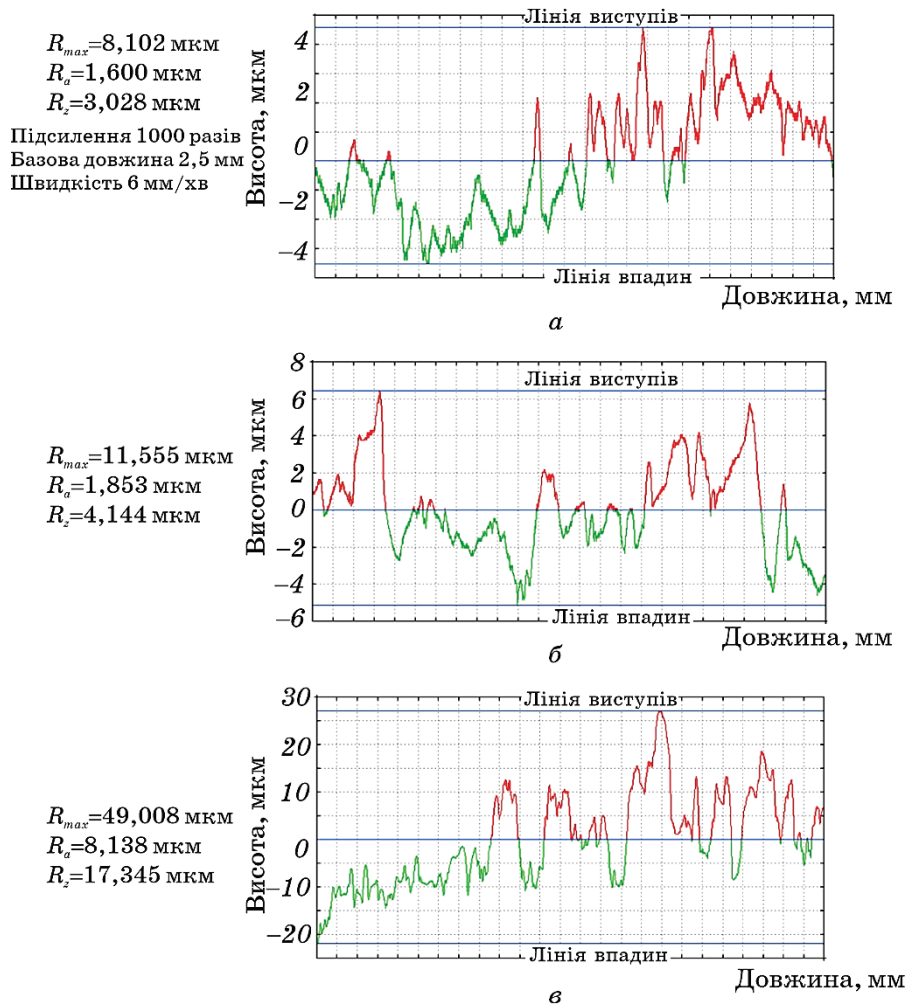
**TABLE 4.** Dependence of ESA performance of steel's samples by carbon and aluminium.

Енергія розряду $W_p$ , Дж	Продуктивність, см <sup>2</sup> /хв	
	ЕІЛ алюмінієм	ЕІЛ графітовим електродом
0,52	0,8–1,0	0,5–0,7
1,3	1,0–1,2	0,7–1,0
2,6	1,3–1,5	1,0–1,2
4,8	1,6–1,8	1,2–1,5

покриття і перехідної зони.

Аналіз вимірювання шорсткості поверхневого шару зразків сталі 40 після ЕІЛ алюмінієм показав, що з посиленням режиму ЕІЛ шорсткість поверхні збільшується. При  $W_p = 0,52$  Дж максимальна шорсткість поверхні складає  $R_{max} = 11,555$  мкм, а середня арифметична  $R_a$  і  $R_z$  відповідно, 1,853 і 4,144 мкм (рис. 8).

Таким чином, при ЕІЛ алюмінієвим електродом сталі 20 і 40 зі



**Рис. 8.** Профілограми шорсткості поверхні зразків сталі 40 після ЕІЛ алюмінієм з енергією розряду:  $a$  —  $W_p = 0,52$  Дж,  $б$  —  $W_p = 2,6$  Дж,  $в$  —  $W_p = 6,8$  Дж.

**Fig. 8.** Profilograms of surface roughness of steel 40 samples after ESA by aluminum at different discharge energy:  $a$ — $W_p = 0.52$  J,  $б$ — $W_p = 2.6$  J,  $в$ — $W_p = 6.8$  J.



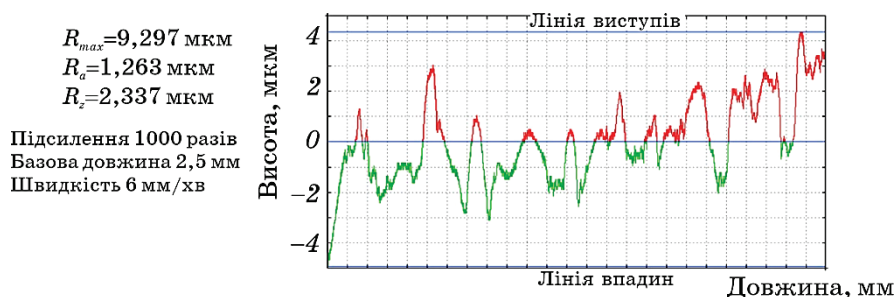
збільшенням енергії розряду зростають такі якісні параметри поверхневого шару, як шорсткість, товщина, мікротвердість «білого» шару і перехідної зони (табл. 2). Суцільність «білого» шару при  $W_p = 0,52$  Дж низька (50–60%), при подальшому збільшенні енергії розряду вона зростає і при  $W_p = 6,8$  Дж становить 100%.

У [28] для зменшення шорсткості електроерозійних покриттів пропонується проводити як заключну операцію після основного процесу легування «м'яке» легування графітом. У цьому випадку утворюється не шар графіту, а деякий дифузний шар, причому відбувається викид металу катода в місцях прикладання імпульсів, тобто розпорошення найбільш виступаючих частин поверхні. У результаті відбувається згладжування гребінців, і, отже, знижується шорсткість поверхні.

Нами для зниження шорсткості поверхні після ЕІЛ алюмінієвим електродом запропоновано проводити подальшу обробку цим же електродом (алюмінієм), але на менших режимах [29]. При цьому електричний розряд протікає між вершиною виступу шорсткості і алюмінієвим електродом, в результаті чого вершина виступу руйнується і знижується величина шорсткості поверхні. Нами раніше показано, що така технологія ЕІЛ є ефективною.

У таблиці 4 наведено відомості про продуктивність процесу при ЕІЛ вуглецем (графітовим електродом) і алюмінієм сталевих зразків, попередньо легованих алюмінієм, залежно від енергії розряду.

На рисунку 9 подано результати вимірювання шорсткості поверхні зразка зі сталі 20, який піддавався алітуванню методом ЕІЛ спочатку з енергією розряду  $W_p = 2,6$  Дж і продуктивності  $1,8 \text{ см}^2/\text{хв}$ , а потім, з  $W_p = 1,3$  Дж і продуктивністю  $0,8 \text{ см}^2/\text{хв}$ . У результаті шорсткість поверхні знизилася і склала:  $R_{max} = 9,297$ ,  $R_a = 1,263$  і  $R_z = 2,337$  мкм.



**Рис. 9.** Профілограма шорсткості поверхні зразка зі сталі 20 при послідовному алітуванні методом ЕІЛ алюмінієм з енергіями розряду  $W_p = 2,6$  Дж і  $W_p = 1,3$  Дж.

**Fig. 9.** Profilogram of roughness of the steel 20 sample surface with successive aluminizing by ESA with energies of discharge  $W_p = 2.6$  J and  $W_p = 1.3$  J.

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Розглянуто можливості застосування економічного й екологічно чистого процесу електроіскрового легування поверхневих шарів деталей машин з метою зміни фізико-хімічних властивостей поверхневого шару.
2. Проведено аналіз особливостей структуро- та фазоутворення поверхневих шарів вуглецевих сталей після алітування методом ЕІЛ. Показано, що структура шару складається з трьох ділянок: «білого» шару, дифузійної зони і основного металу. Зі збільшенням енергії розряду зростають такі якісні параметри поверхневого шару, як товщина, мікротвердість «білого» шару і перехідної зони, шорсткість. Суцільність «білого» шару при  $W_p = 0,52$  Дж низька (50–60%), при подальшому збільшенні енергії розряду вона зростає і при  $W_p = 6,8$  Дж становить 100%. При збільшенні енергетичних параметрів процесу ЕІЛ відбувається зміна хімічного і фазового складу шару: при низьких енергіях розряду формується шар, що складається переважно з  $\alpha$ -Fe і оксидів алюмінію. Зі збільшенням  $W_p$  шар складається з інтерметалідів заліза і алюмінію, а також вільного алюмінію, що підтверджується даними локального мікрорентгеноспектрального аналізу.
3. Порівняльний аналіз впливу підкладинки на якісні параметри поверхневого шару при алітуванні методом ЕІЛ показав, що при заміні сталі 20 на сталь 40 збільшується товщина «білого» шару і перехідної зони, тобто глибина зони підвищеної твердості, а також величина її мікротвердості. Шорсткість поверхні практично не змінюється.
4. Для практичного застосування можна рекомендувати процес алітування методом ЕІЛ, використовуючи режими, які забезпечують формування «білого» шару товщиною 70–130 мкм, мікротвердістю 5000–7500 МПа, шорсткістю 6–9 мкм і суцільністю 95–100%: енергія розряду в межах  $W_p = 4,6$ –6,8 Дж і продуктивність 2,0–3,0 см<sup>2</sup>/хв.
5. З метою зниження шорсткості поверхневого шару і отримання суцільних покриттів рекомендується проводити ЕІЛ цим же електродом (алюмінієм), але на менших режимах.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, М. Я. Довжик, *Металлофиз. новейшие технол.*, **38**, № 12: 1611 (2016).
2. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, М. Я. Довжик, *Металлофиз. новейшие технол.*, **39**, № 3: 363 (2017).
3. Л. Я. Роп'як, І. О. Шуляр, О. М. Богаченко, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, **1**, № 5: 53 (2016).

4. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 2: 235 (2018).
5. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 6: 795 (2018).
6. I. Pavlenko, J. Trojanowska, V. Ivanov, and O. Liaposhchenko, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, **505**: 299 (2019).
7. V. Kukhar, A. Prysiashnyi, E. Balalayeva, and O. Anishchenko, *2017 Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) (Nov. 15–17, 2017)* (Kremenchuk: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University: 2017), p. 404.
8. V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. G. Tolstolutskiy, V. V. Uvarov, and V. T. Uvarov, *Problems of Atomic Sci. Technol.*, No. 1: 119 (2009).
9. N. A. Dolgov, I. V. Smirnov, and A. V. Besov, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **54**, No. 1–2: 40 (2015).
10. A. G. Kobets, P. R. Horodek, Yu. F. Lonin, V. V. Lytvynenko, A. G. Ponomarev, O. A. Startsev, and V. T. Uvarov, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, **51**, No. 5: 478 (2015).
11. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, Ie. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012048-1 (2017).
12. Л. Я. Роп'як, В. В. Остапович, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, **2**, № 5: 50 (2016).
13. M. D. Klapkiv, O. S. Chuchmarev, P. Ya. Sydor, and V. M. Posuvailo, *Mater. Sci.*, **36**, No. 1: 66 (2000).
14. B. Antoszewski and V. Tarelnyk, *Appl. Mechan. Mater.*, **630**: 301 (2014).
15. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, and A. Dziuba, *Appl. Mechan. Mater.*, **630**: 388 (2014).
16. I. P. Shatskyi, L. Ya. Ropyak, and M. V. Makoviichuk, *Strength Mater.*, **48**, No. 5: 726 (2016).
17. I. Shatskyi, M. Makoviichuk, and L. Ropyak, *Transactions of the VŠB–TU Ostrava, Civ. Eng. Ser.*, **17**, Iss. 2: 109 (2017).
18. Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький, М. В. Маковійчук, *Металлофиз. новейшие технол.*, **39**, № 4: 517 (2017).
19. А. Д. Верхотуров, И. М. Муха, *Технология электроискрового легирования металлических поверхностей* (Київ: Техніка: 1982).
20. В. Ф. Коробейник, С. И. Рудюк, С. В. Коробейник, *Электронная обработка материалов*, № 1: 15 (1989).
21. В. Р. Рябов, *Алирование стали* (Москва: Металлургия: 1973).
22. M. Brochu, J. G. Portillo, J. Milligan, and D. W. Heard, *The Open Surf. Sci. J.*, **3**: 105 (2011).
23. С. Ф. Вдовин, Е. С. Махнев, Н. Л. Минеева, *Электронная обработка материалов*, № 6: 15 (1986).
24. P. Matysik, S. Jyżwiak, and T. Czujko, *Materials*, No. 8: 914 (2015).
25. Ю. И. Мулин, А. Д. Верхотуров, *Электроискровое легирование рабочих поверхностей инструментов и деталей машин электродными материалами, полученными из минерального сырья* (Владивосток: Дальнаука: 1999).
26. Д. С. Герцрикен, В. Ф. Мазанко, Чао Шенжу, Чжан Цженю, Д. В. Миронов, В. М. Миронов, *50 Междунар. науч. симпозиум «Актуальные проблемы прочности» (27 сент. – 1 окт., 2010)* (Витебск: 2010), ч. 1, с. 164.



27. В. Ф. Мазанко, Д. С. Герцрикен, В. М. Миронов, Д. В. Миронов, П. В. Перетятку, *11-я Междунар. конф. «Взаимодействие излучений с твердым телом» (23–25 сент., 2015)* (Минск: 2015), с. 240.
28. V. B. Tarel'nyk, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, **54**, No. 2: 147 (2018).
29. G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarel'nyk, O. M. Myslyvchenko, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **56**: 11: 688 (2018).

## REFERENCES

1. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and M. Ya. Dovzhyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1611 (2016) (in Russian).
2. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, and M. Ya. Dovzhyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 3: 363 (2017) (in Russian).
3. L. Ya. Ropyak, I. O. Schuliar, and O. M. Bohachenko, *Eastern-European J. Enterprise Technol.*, **1**, No. 5: 53 (2016) (in Ukrainian).
4. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, N. S. Evtushenko, and V. A. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 2: 235 (2018) (in Russian).
5. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, N. S. Yevtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
6. I. Pavlenko, J. Trojanowska, V. Ivanov, and O. Liaposhchenko, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, **505**: 299 (2019).
7. V. Kukhar, A. Prysiashnyi, E. Balalayeva, and O. Anishchenko, *2017 Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES) (Nov. 15–17, 2017)* (Kremenchuk: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University: 2017), p. 404.
8. V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. G. Tolstolutskiy, V. V. Uvarov, and V. T. Uvarov, *Problems of Atomic Sci. Technol.*, No. 1: 119 (2009).
9. N. A. Dolgov, I. V. Smirnov, and A. V. Besov, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **54**, No. 1–2: 40 (2015).
10. A. G. Kobets, P. R. Horodek, Yu. F. Lonin, V. V. Lytvynenko, A. G. Ponomarev, O. A. Startsev, and V. T. Uvarov, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, **51**, No. 5: 478 (2015).
11. V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, Ie. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012048-1 (2017).
12. L. Ropyak and V. Ostapovych, *Eastern-European J. Enterprise Technol.*, **2**, No. 5: 50 (2016) (in Ukrainian).
13. M. D. Klapkiv, O. S. Chuchmarev, P. Ya. Sydor, and V. M. Posuvailo, *Mater. Sci.*, **36**, No. 1: 66 (2000).
14. B. Antoszewski and V. Tarel'nyk, *Appl. Mechan. Mater.*, **630**: 301 (2014).
15. V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, and A. Dziuba, *Appl. Mechan. Mater.*, **630**: 388 (2014).

16. I. P. Shatskyi, L. Ya. Ropyak, and M. V. Makoviichuk, *Strength Mater.*, **48**, No. 5: 726 (2016).
17. I. Shatskyi, M. Makoviichuk, and L. Ropyak, *Transactions of the VŠB–TU Ostrava, Civ. Eng. Ser.*, **17**, Iss. 2: 109 (2017).
18. L. Ya. Ropyak, I. P. Shatskyi, and M. V. Makoviichuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 4: 517 (2017) (in Ukrainian).
19. A. D. Verkhoturov and I. M. Mukha, *Tekhnologiya Elektroiskrovogo Legirovaniya Metallicheskih Poverkhnostey* (Kyiv: Tekhnika: 1982) (in Russian).
20. V. F. Korobeynik, S. I. Rudyuk, and S. V. Korobeynik, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 1: 15 (1989) (in Russian).
21. V. R. Ryabov, *Alitirovaniye Stali* (Moscow: Metallurgiya: 1973) (in Russian).
22. M. Brochu, J. G. Portillo, J. Milligan, and D. W. Heard, *The Open Surf. Sci. J.*, **3**: 105 (2011).
23. S. F. Vdovin, Ye. S. Makhnev, and N. L. Mineyeva, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 6: 15 (1986) (in Russian).
24. P. Matysik, S. Jyżwiak, and T. Czujko, *Materials*, No. 8: 914 (2015).
25. Yu. I. Mulin and A. D. Verkhoturov, *Elektroiskrovoye Legirovaniye Rabochikh Poverkhnostey Instrumentov i Detaley Mashin Elektrodnymi Materialami, Poluchennymi iz Mineralnogo Syrya* (Vladivostok: Dalnauka: 1999) (in Russian).
26. D. S. Gertsriken, V. F. Mazanko, Chao Shenzhu, Chzhan Tszheniu, D. V. Mironov, and V. M. Mironov, *50-th Int. Sci. Symp. «Aktualnyye Problemy Prochnosti» (Sep. 27 – Oct. 1, 2010)* (Vitebsk: 2010), part 1, p. 164 (in Russian).
27. V. F. Mazanko, D. S. Gertsriken, V. M. Mironov, D. V. Mironov, and P. V. Peretyatku, *11-th Int. Conf. «Vzaimodeystviye Izlucheniye s Tverdym Telom» (Sep. 23–25, 2015)* (Minsk: 2015), p. 240 (in Russian).
28. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, **54**, No. 2: 147 (2018).
29. G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **56**: 11: 688 (2018).