

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 II. Математична модель процесу алітування**

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова*

*Сумський національний аграрний університет,
вул. Герасима Кондратьєва, 160,
40021 Суми, Україна*
**Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

Запропоновано рівняння прогнозування товщини і мікротвердості зміцненого шару, його шорсткості і суцільності, що дозволяють за енергетичними параметрами установки електроіскрового легування визначати основні параметри якості сформованого покриття. Рекомендований алгоритм дозволяє визначити найбільш раціональний спосіб формування поверхневих шарів необхідної якості. Методику апробовано при формуванні покриттів на катоді зі сталей 20 та 40, якщо використати як анод алюміній.

Ключові слова: електроіскрове легування, алітування, покриття, мікротвердість, суцільність, шорсткість.

The equations for predicting the thickness and microhardness of the hardened coating, surface roughness and continuity are proposed. They are allowed determining the main qualitative parameters of the formed coating according to the energy parameters of the installation of electrospark alloy-

Corresponding author: Vyacheslav Borysovych Tarelnyk
E-mail: 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*

Citation: V. B. Tarelnyk and O. P. Gaponova, Investigation of the Formation Processes of Aluminized Layers Obtained by Electrospark Alloying. Part II. Mathematical Model of the Aluminizing Process, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 11: 1483–1498 (2019) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.41.11.1483](https://doi.org/10.15407/mfint.41.11.1483).

ing. The recommended algorithm allows to determine the most rational way of forming of surface layers with a required quality. The technique is tested for the formation of coatings on the cathode from steels 20 and 40 using aluminium as an anode.

Key words: electrospark alloying, aluminizing, coating, microstructure, continuity, roughness.

Предложены уравнения прогнозирования толщины и микротвёрдости упрочнённого слоя, его шероховатости и сплошности, позволяющие по энергетическим параметрам установки электроискрового легирования определять основные качественные параметры сформированного покрытия. Рекомендуемый алгоритм позволяет определить наиболее рациональный способ формирования поверхностных слоёв необходимого качества. Методика апробирована при формировании покрытий на катоде из сталей 20 и 40 при использовании в качестве анода алюминия.

Ключевые слова: электроискровое легирование, алитирование, покрытие, микротвёрдость, сплошность, шероховатость.

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

1. ВСТУП

На сьогоднішній день метод електроіскрового легування (ЕІЛ), входить до числа найперспективніших технологій, які використовують для підвищення якісних параметрів поверхневих шарів деталей машин і ріжучого інструмента [1]. Закономірності формування поверхневих шарів при ЕІЛ в достатній мірі викладено нами раніше у [2–5]. Методи розрахунку напружень, що виникають у неоднорідних за товщиною покриттях за дії локалізованих навантажень описано в працях [6–8], а в [9] наведено результати досліджень адгезії покриття до основи.

У статті [10] цієї роботи, розглянуто особливості фазоутворення і структурних перетворень в процесі формування поверхневих алітованих шарів на вуглецевих сталях електроіскровим легуванням. Показано, що зі збільшенням енергії розряду зростає товщина та микротвердість «білого» і перехідного шарів, шорсткість поверхні, а також змінюється хімічний і фазовий склад. При низьких енергіях розряду формується шар, що складається переважно з α -Fe і оксидів алюмінію. Зі збільшенням енергії розряду шар складається з інтерметалідів заліза й алюмінію, а також вільного алюмінію, що підтверджується даними рентгеноспектрального аналізу. З метою зниження шорсткості і збільшення суцільності покриттів рекомендується електроіскрове легування проводити цим же електродом (алюмінієм), але на менших режимах.

Для практичного застосування можна рекомендувати процес алі-

тування методом ЕІЛ за режимів (енергію розряду в межах $W_p = 4,6-6,8$ Дж і продуктивність $2,0-3,0$ см²/хв), які забезпечують формування «білого» шару товщиною 70–130 мкм, мікротвердістю 5000–7500 МПа, шорсткістю (Ra) 6–9 мкм і суцільністю 95–100%.

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ АЛІТУВАННЯ

Методику експериментальних досліджень докладно розглянуто в частині 1 дійсної роботи [10]. Нижче, на підставі проведених у частині 1 дійсної роботи досліджень, запропоновано новий спосіб прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при алітуванні [11].

На підставі експериментальних досліджень встановлено, що при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина зміцненого шару (h , мкм). Між величинами h і оберненою енергією розряду $(W_p)^{-1}$ до періоду, коли $\Delta h = \Delta h_{\max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. 1, б).

З ростом енергії розряду товщина зміцненого шару зростає і досягає максимальної величини (Δh_{\max}). Крім того, збільшення h зміцненого шару зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування зміцненого шару ($E_{\Delta h}$). Виходячи з експериментальної залежності Δh від $(W_p)^{-1}$ (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta h$ пропорційний $-(W_p)^{-1}$ і величині $E_{\Delta h}$, тобто

$$\ln \Delta h \sim -(W_p)^{-1}, E_{\Delta h}. \quad (1)$$

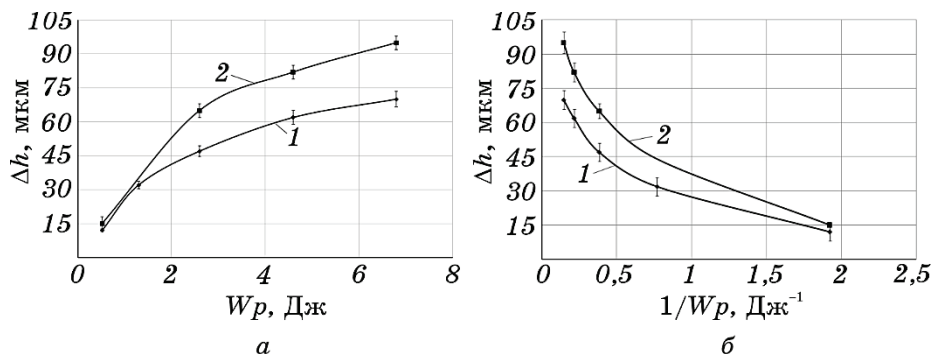


Рис. 1. Залежність величини товщини зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2): а — від енергії розряду W_p , б — від величини, оберненої до енергії розряду $(W_p)^{-1}$.

Fig. 1. Dependence of hardened coating thickness at the electrospark alloying by aluminium of steels 20 (1) and 40 (2): а—on discharge capacity W_p , б—on the inverse value of the discharge capacity $1/W_p$.

У випадку переходу від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\ln \Delta h = c_1 e^{-E_{\Delta h}/W_p}, \quad (2)$$

де $c_1 = \Delta h_{\max}$ (Δh_{\max} — найбільша товщина зміцненого шару для даної пари електродів).

Тоді

$$\Delta h = \Delta h_{\max} e^{-E_{\Delta h}/W_p}. \quad (3)$$

Залежність (3) назвемо рівнянням прогнозування товщини зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ.

Приймаючи в (3)

$$E_{\Delta h} = W_p, \quad (4)$$

маємо:

$$\Delta h / \Delta h_{\max} = e^{-1}. \quad (5)$$

Звідси $E_{\Delta h}$ — це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій Δh в e -разів менша за Δh_{\max} . Назвемо її константою рівняння (3) прогнозування товщини зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{\Delta h}] = \text{Дж}$.

На рисунку 2 показано залежність величини твердості зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 від енергії розря-

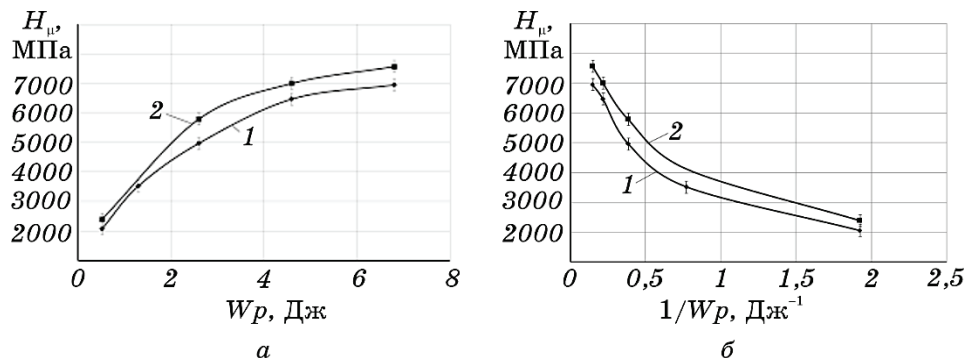


Рис. 2. Залежність мікротвердості зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2): *a* — від енергії розряду W_p , *б* — від величини, оберненої до енергії розряду $(W_p)^{-1}$.

Fig. 2. Dependence of hardened coating microhardness at the electrospark alloying by aluminum of steels 20 (1) and 40 (2): *a*—on discharge capacity W_p , *б*—on the inverse value of the discharge capacity $1/W_p$.

ду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість збільшується. Між мікротвердістю зміцненого шару H_μ і величиною, оберненою до енергії розряду $(W_p)^{-1}$, до періоду, коли $\Delta H_\mu = \Delta H_{\mu\max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. 2, б).

З ростом енергії розряду мікротвердість зміцненого шару, у період до досягнення максимальної мікротвердості ($\Delta H_{\mu\max}$), збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на формування зміцненого шару. Крім того, збільшення H_μ зміцненого шару зростає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування зміцненого шару ($E_{\Delta H_\mu}$).

Виходячи з експериментальної залежності ΔH_μ від $(W_p)^{-1}$ (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta H_\mu$ пропорційний $-(W_p)^{-1}$ і величині $E_{\Delta H_\mu}$, тобто

$$\ln \Delta H_\mu \sim -(W_p)^{-1}, E_{\Delta H_\mu}. \quad (6)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta H_\mu = c_2 e^{-E_{\Delta H_\mu}/W_p}, \quad (7)$$

де $c_2 = \Delta H_{\mu\max}$ ($\Delta H_{\mu\max}$ — найбільша мікротвердість для даної пари електродів).

Тоді

$$\Delta H_\mu = \Delta H_{\mu\max} e^{-E_{\Delta H_\mu}/W_p}. \quad (8)$$

Залежність (8) назвемо рівнянням прогнозування мікротвердості зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ.

Приймаючи в (8)

$$E_{\Delta H_\mu} = W_p, \quad (9)$$

маємо:

$$\Delta H_\mu / \Delta H_{\mu\max} = e^{-1}. \quad (10)$$

Звідси $E_{\Delta H_\mu}$ — це критична величина, що рівна такій енергії розряду, при якій ΔH_μ в e разів менше $\Delta H_{\mu\max}$. Назвемо її константою рівняння (8) прогнозування мікротвердості зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{\Delta H_\mu}] = \text{Дж}$.

Режими ЕІЛ при алітуванні впливають не тільки на товщину і мікротвердість зміцненого шару, а також на шорсткість сформованого поверхневого шару та його суцільність.

Між шорсткістю поверхневого шару Ra і величиною, оберненою до енергії розряду $(W_p)^{-1}$, при алітуванні методом ЕІЛ до періоду,

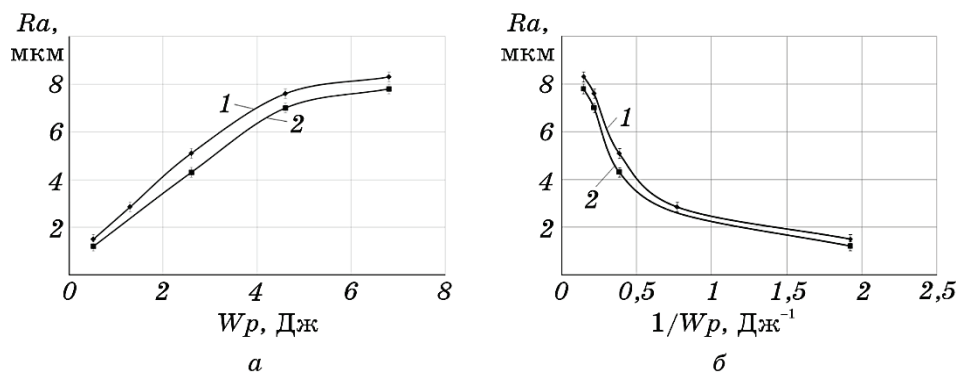


Рис. 3. Залежність шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2): *a* — від енергії розряду W_p , *б* — від величини, оберненої до енергії розряду $(W_p)^{-1}$.

Fig. 3. Dependence of surface roughness at the electrospark alloying by aluminium of steels 20 (1) and 40 (2): *a*—on discharge capacity W_p , *б*—on the inverse value of the discharge capacity $1/W_p$.

коли $\Delta Ra = \Delta Ra_{\max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. 3).

З ростом енергії розряду шорсткість поверхні збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування шорсткості поверхні $E_{\Delta Ra}$.

Виходячи з експериментальної залежності ΔRa від $(W_p)^{-1}$ (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta Ra$ пропорційний $-(W_p)^{-1}$ і величині $E_{\Delta Ra}$, тобто

$$\ln \Delta Ra \sim -(W_p)^{-1}, E_{\Delta Ra}. \quad (11)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta Ra = c_3 e^{-E_{\Delta Ra}/W_p}, \quad (12)$$

де $c_3 = \Delta Ra_{\max}$ (ΔRa_{\max} — найбільша шорсткість поверхневого шару для даної пари електродів). Тоді

$$\Delta Ra = \Delta Ra_{\max} e^{-E_{\Delta Ra}/W_p}. \quad (13)$$

Залежність (13) назвемо рівнянням прогнозування шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ.

Приймаючи в (13)

$$E_{\Delta H_{\mu}} = W_p, \quad (14)$$

маємо:

$$\Delta Ra / \Delta Ra_{\max} = e^{-1}. \quad (15)$$

Звідси $E_{\Delta Ra}$ — це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій ΔRa в e разів менше ΔRa_{\max} . Назвемо її константою рівняння прогнозування шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{\Delta Ra}] = \text{Дж}$.

Між суцільністю шару S й величиною, оберненою до енергії розряду $(W_p)^{-1}$, до періоду, коли $\Delta S = \Delta S_{\max}$, існує експоненціальна убутна залежність (рис. 4).

З ростом енергії розряду суцільність шару збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації, витрачена на формування суцільності шару $E_{\Delta S}$.

Виходячи з експериментальної залежності ΔS від $(W_p)^{-1}$ (убутна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta S$ пропорційний $-(W_p)^{-1}$ і величині $E_{\Delta S}$, тобто

$$\ln \Delta S \sim -(W_p)^{-1}, E_{\Delta S}. \quad (16)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta S = c_4 e^{-E_{\Delta S}/W_p}, \quad (17)$$

де $c_4 = \Delta S_{\max}$ (ΔS_{\max} — найбільша суцільність шару для даної пари електродів).

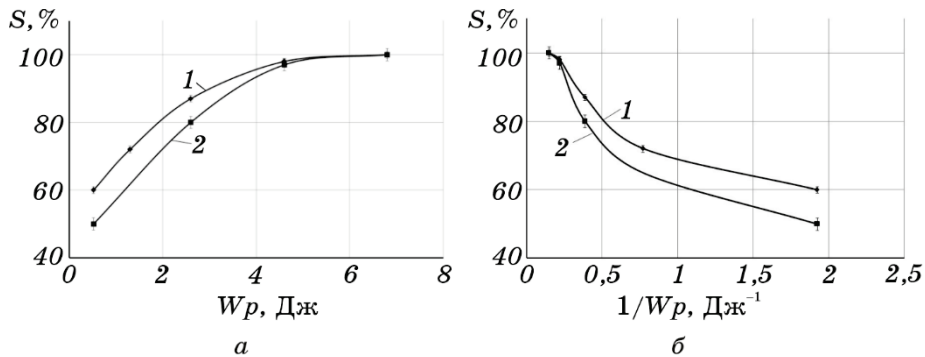


Рис. 4. Залежність суцільності шару при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 (1) та 40 (2): a — від енергії розряду W_p , b — від величини, оберненої до енергії розряду $(W_p)^{-1}$.

Fig. 4. The dependence of continuity coating at the electrospark alloying by aluminium of steels 20 (1) and 40 (2): a —on discharge capacity W_p , b —on the inverse value of the discharge capacity $1/W_p$.

Тоді

$$\Delta S = \Delta S_{\max} e^{-E_{\Delta S}/W_p}. \quad (18)$$

Залежність (18) назвемо рівнянням прогнозування суцільності шару при алітуванні методом ЕІЛ.

Приймаючи в (18)

$$E_{\Delta S} = W_p, \quad (19)$$

маємо:

$$\Delta S / \Delta S_{\max} = e^{-1}. \quad (20)$$

Звідси $E_{\Delta S}$ — це критична величина, рівна такій енергії розряду, при якій ΔS в e разів менше ΔS_{\max} . Назвемо її константою рівняння прогнозування суцільності шару при алітуванні методом ЕІЛ. Розмірність $[E_{\Delta S}] = \text{Дж}$.

Режим ЕІЛ, необхідний для отримання потрібної товщини та мікротвердості зміцненого шару, шорсткості або суцільності поверхневого шару при алітуванні методом ЕІЛ, можна визначити відповідно до рівнянь (3), (8), (13) та (18). Тоді, відповідно:

$$\begin{aligned} W_p &= \frac{E_{\Delta h}}{\ln(\Delta h_{\max}/\Delta h_x)}, & W_p &= \frac{E_{\Delta H_{\mu}}}{\ln(\Delta H_{\mu \max}/\Delta H_{\mu x})}, \\ W_p &= \frac{E_{\Delta Ra}}{\ln(\Delta Ra_{\max}/\Delta Ra_x)}, & W_p &= \frac{E_{\Delta S}}{\ln(\Delta S_{\max}/\Delta S_x)}. \end{aligned} \quad (21)$$

Відповідно до рівняння (3) між логарифмом значень товщини

ТАБЛИЦЯ 1. Усереднені значення логарифмів товщини зміцненого шару від величини, оберненої до енергії розряду, при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40.

TABLE 1. Averaged values of the hardened coating thickness logarithm on the inverse value of the discharge capacity $1/W_p$ at the electrospark alloying by aluminium of steels 20 and 40.

$(W_p)^{-1}, \text{Дж}^{-1}$	$\ln \Delta h$	
	Сталь 20	Сталь 40
1,92	2,45	2,7
0,77	3,56	—
0,38	3,93	4,25
0,22	4,09	4,41
0,15	4,16	4,48

зміцненого шару і величиною, оберненою до енергії розряду, повинен бути лінійний зв'язок. Для побудови графіка залежності $\ln \Delta h$ від $(W_p)^{-1}$ дані зведено до табл. 1.

Як випливає з графіка (рис. 5), залежність $\ln \Delta h$ від $(W_p)^{-1}$ при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40 прагне до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненціально спадної залежності занесено до табл. 2.

Предекспоненціальний фактор (табл. 2) знаходимо по відрітку, який відсікається на осі ординат прямої експоненціально спадної залежності $\ln \Delta h$ від $(W_p)^{-1}$ (рис. 5), продовженої до значення абсциси $(W_p)^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h = \ln \Delta h_{\max}$ при $(W_p)^{-1} \rightarrow 0$).

Результати розрахунку енергії активації $E_{\Delta h}$ (константи рівняння (3) прогнозування товщини зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{\Delta h} = W_p$, другий — при $E_{\Delta h} = |\operatorname{tg} \alpha|$, занесено в табл. 2.

Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{\Delta h}$ (до 0,03%), визна-

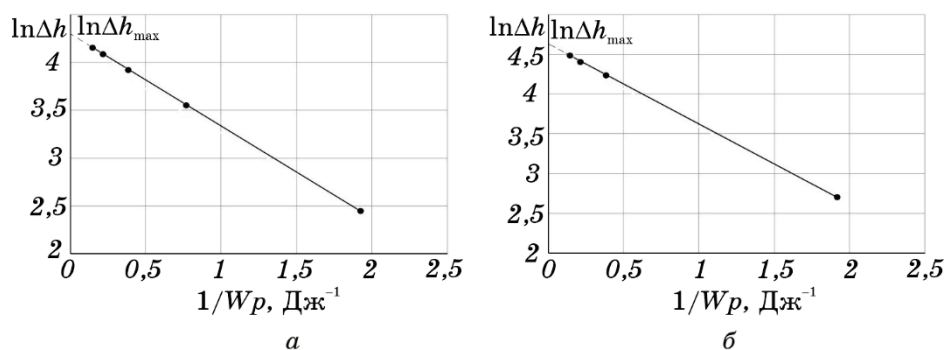


Рис. 5. Залежність $\ln \Delta h$ від $(W_p)^{-1}$ при алітуванні методом ЕІЛ: а — сталь 20, б — сталь 40.

Fig. 5. Dependence of the $\ln \Delta h$ on $1/W_p$ at the electrospark alloying by aluminium: а—steel 20, б—steel 40.

ТАБЛИЦЯ 2. Розрахунок константи енергії активації ($E_{\Delta h}$) і константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40.

TABLE 2. Calculation of the activation energy constant ($E_{\Delta h}$) and the prediction equation constant of the hardened coating thickness at the electrospark alloying by aluminium of steels 20 and 40.

Основа	$E_{\Delta h} = \operatorname{tg} \alpha $, Дж	$E_{\Delta h} = W_p$, Дж	%	Δh_{\max} , мкм
Сталь 20	0,964	0,9637	0,03	73,6
Сталь 40	1,006	1,0061	0,01	102,7

чених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. В цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння (8) між логарифмом значень мікротвердості і величиною, оберненою до енергії розряду, повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta H_\mu$ від $(W_p)^{-1}$ (рис. 6), всі необхідні дані зведено до табл. 3.

Результати розрахунку енергії активації ΔH_μ (константи рівняння (8) прогнозування мікротвердості зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{\Delta H_\mu} = W_p$, другий — при $E_{\Delta H_\mu} = |\operatorname{tg} \alpha|$, занесено до табл. 4.

Деяку несумісність значень констант ЕІЛ $E_{\Delta H_\mu}$ (до 0,3%), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похи-

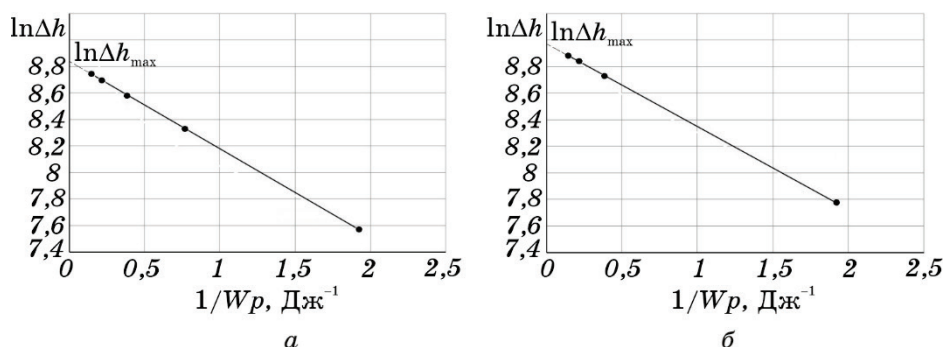


Рис. 6. Залежність $\ln \Delta H_\mu$ від $(W_p)^{-1}$ при алітуванні методом ЕІЛ: *а* — сталь 20, *б* — сталь 40.

Fig. 6. Dependence of the $\ln \Delta H_\mu$ on $1/W_p$ at the electrospark alloying by aluminium: *a*—steel 20, *b*—steel 40.

ТАБЛИЦЯ 3. Усереднені значення логарифмів мікротвердості шару від величини, оберненої до енергії розряду, при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40.

TABLE 3. Averaged values of the hardened coating microhardness logarithm on the inverse value of the discharge capacity at the electrospark alloying by aluminium of steels 20 and 40.

$(W_p)^{-1}$, Дж ⁻¹	$\ln \Delta H_\mu$	
	Сталь 20	Сталь 40
1,92	7,57	7,77
0,77	8,33	—
0,38	8,59	8,73
0,22	8,69	8,84
0,15	8,74	8,88

ТАБЛИЦЯ 4. Розрахунок константи енергії активації ($E_{\Delta H_{\mu}}$) і константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40.

TABLE 4. Calculation of the activation energy constant ($E_{\Delta H_{\mu}}$) and the prediction equation constant of the hardened coating microhardness at the electro-spark alloying by aluminium of steels 20 and 40.

Основа	$E_{\Delta H_{\mu}} = \operatorname{tg} \alpha $, Дж	$E_{\Delta H_{\mu}} = W_p$, Дж	%	$\Delta H_{\mu \max}$, МПа
Сталь 20	0,661	0,660	0,15	6921,58
Сталь 40	0,627	0,629	0,30	7906,97

бок вимірювань. У цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння шорсткості (13) між логарифмом значень шорсткості і величиною, оберненою до енергії розряду, повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta Ra$ від $(W_p)^{-1}$ при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 (рис. 7). Всі необхідні для цього дані зведено до табл. 5.

Результати розрахунку константи ΔRa_{\max} та енергії активації $E_{\Delta Ra}$ (константи рівняння (13) прогнозування шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{\Delta Ra} = W_p$, другий — при $E_{\Delta Ra} = |\operatorname{tg} \alpha|$ занесено до табл. 6.

Деяку несумісність (біля 6%) значень констант ЕІЛ ($E_{\Delta Ra}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. У цілому збіжність результатів задовільна.

Відповідно до рівняння суцільності (18) між логарифмом значень суцільності і величиною, оберненою до енергії розряду, повинен бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta S$ від $(W_p)^{-1}$

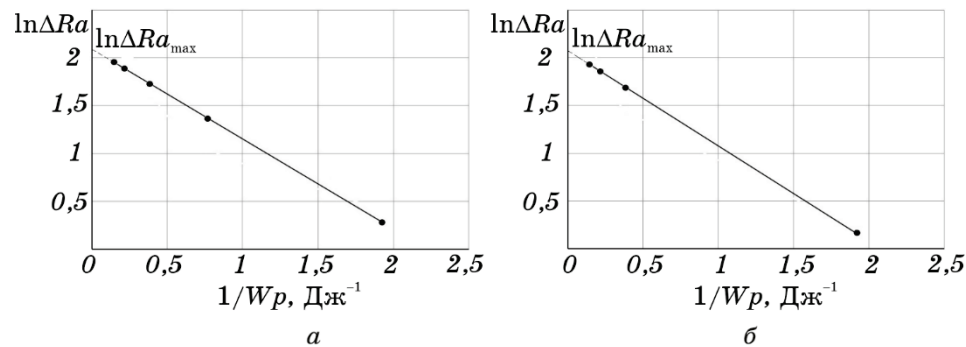


Рис. 7. Залежність $\ln \Delta Ra$ від $(W_p)^{-1}$ при алітуванні методом ЕІЛ: а — сталь 20, б — сталь 40.

Fig. 7. Dependence of the $\ln \Delta Ra$ on $1/W_p$ at the electrospark alloying by aluminium: а—steel 20, б—steel 40.

ТАБЛИЦЯ 5. Усереднені значення логарифмів шорсткості шару від величини, оберненої до енергії розряду, при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40.

TABLE 5. Averaged values of the surface roughness logarithm on the inverse value of the discharge capacity at the electrospark alloying by aluminium of steels 20 and 40.

$(W_p)^{-1}, \text{Дж}^{-1}$	$\ln \Delta Ra$	
	Сталь 20	Сталь 40
1,92	0,15	0,28
0,77	1,31	—
0,38	1,69	1,73
0,22	1,86	1,89
0,15	1,93	1,95

ТАБЛИЦЯ 6. Розрахунок константи енергії активації ($E_{\Delta Ra}$) і константи рівняння прогнозування шорсткості поверхні при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40.

TABLE 6. Calculation of the activation energy constant ($E_{\Delta Ra}$) and the prediction equation constant of the surface roughness at the electrospark alloying by aluminium of steels 20 and 40.

Основа	$E_{\Delta Ra} = \text{tg} \alpha , \text{Дж}$	$E_{\Delta Ra} = W_p, \text{Дж}$	%	$\Delta Ra_{\max}, \text{мкм}$
Сталь 20	1,00	0,94	6,0	8,08
Сталь 40	1,06	0,99	6,6	7,92

при алітуванні методом ЕІЛ сталі 20 та 40 (рис. 8). Всі необхідні для цього дані зведено до табл. 7.

Результати розрахунку константи ΔS_{\max} та енергії активації $E_{\Delta S}$ (константи рівняння (18) прогнозування суцільності поверхні при алітуванні методом ЕІЛ), визначені двома способами, перший, коли $E_{\Delta S} = W_p$, другий — при $E_{\Delta S} = |\text{tg} \alpha|$ занесено до табл. 8.

Деяку несумісність (до 1,6%) значень констант ЕІЛ ($E_{\Delta S}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком різних похибок вимірювань. У цілому збіжність результатів задовільна.

Зведені дані констант ЕІЛ, необхідних для розрахунку параметрів якості поверхневого шару, наведено в табл. 9.

На підставі вище запропонованої математичної моделі (рівняння 1–21) і методики визначення констант рівнянь прогнозування товщини зміцненого шару (Δh_{\max} та енергії активації $E_{\Delta h}$ при алітуванні методом ЕІЛ), максимальної мікротвердості поверхневого шару ($\Delta H_{\mu\max}$ та енергії активації $E_{\Delta H_{\mu}}$ при алітуванні методом ЕІЛ), максимальної шорсткості (ΔRa_{\max} і енергії $E_{\Delta Ra}$), а також рівнянь прогнозування суцільності ЕІЛ шару (максимальної суцільності ΔS_{\max}

та енергії $E_{\Delta S}$) при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40, можна скласти алгоритм, що дозволяє прогнозувати основні технологічні параметри ЕІЛ шару для будь-яких матеріалів катоду і аноду.

Сутність алгоритму полягає в наступному:

1. Експериментально вимірюють товщину і мікротвердість зміцненого шару, його шорсткість і суцільність, відповідно Δh і ΔH_{μ} , ΔRa і ΔS при різних енергіях розряду W_p .
2. Будують графіки залежності $\ln \Delta h$, $\ln \Delta H_{\mu}$, $\ln \Delta Ra$ і $\ln \Delta S$ від W_p .
3. Визначають критичні енергії розряду (енергії активації) $E_{\Delta h}$, $E_{\Delta H_{\mu}}$, $E_{\Delta Ra}$, $E_{\Delta S}$, як $|\operatorname{tg} \alpha|$, де α — кут нахилу прямих залежностей $\ln \Delta h$, $\ln \Delta H_{\mu}$, $\ln \Delta Ra$ і $\ln \Delta S$ від $(W_p)^{-1}$.
4. За відрізком, який відсікається на осі ординат прямої, екстрапольованої до значення абсциси $(W_p)^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h = \ln \Delta h_{\max}$, $\ln \Delta Ra = \ln \Delta Ra_{\max}$ і $\ln \Delta S = \ln \Delta S_{\max}$).
5. Згідно рівняння (21):

$$W_p = \frac{E_{\Delta h}}{\ln(\Delta h_{\max} / \Delta h_x)},$$

$$W_p = \frac{E_{\Delta H_{\mu}}}{\ln(\Delta H_{\mu \max} / \Delta H_{\mu x})},$$

$$W_p = \frac{E_{\Delta Ra}}{\ln(\Delta Ra_{\max} / \Delta Ra_x)},$$

$$W_p = \frac{E_{\Delta S}}{\ln(\Delta S_{\max} / \Delta S_x)}.$$

визначають режим ЕІЛ, необхідний для отримання заданої товщи-

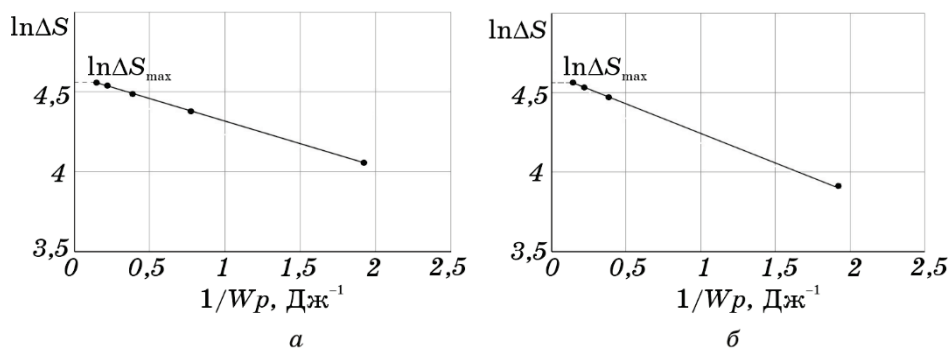


Рис. 8. Залежність $\ln \Delta S$ від $(W_p)^{-1}$ при ЕІЛ алітуванні: *a* — сталь 20, *б* — сталь 40.

Fig. 8. Dependence of the $\ln \Delta S$ on $1/W_p$ at the electrospark alloying by aluminum: *a*—steel 20, *б*—steel 40.

ТАБЛИЦЯ 7. Усереднені значення логарифмів суцільності шару від величини, оберненої до енергії розряду, при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40.

TABLE 7. Averaged values of the continuity coating logarithm on the inverse value of the discharge capacity at the electrosark alloying by aluminium of steels 20 and 40.

$(W_p)^{-1}, \text{Дж}^{-1}$	$\ln \Delta S$	
	Сталь 20	Сталь 40
1,92	4,056	3,90
0,77	4,38	—
0,38	4,49	4,47
0,22	4,54	4,54
0,15	4,56	4,56

ТАБЛИЦЯ 8. Розрахунок константи ЕІЛ ($E_{\Delta S}$) і константи суцільності шару при алітуванні методом ЕІЛ сталей 20 та 40.

TABLE 8. Calculation of the ESA constant ($E_{\Delta S}$) and the continuity coating constant at the electrosark alloying by aluminium of steels 20 and 40.

Основа	$E_{\Delta S} = \operatorname{tg} \alpha , \text{Дж}$	$E_{\Delta S} = W_p, \text{Дж}$	%	$\Delta S_{\max}, \%$
Сталь 20	0,285	0,284	0,35	100
Сталь 40	0,373	0,367	1,60	100

ТАБЛИЦЯ 9. Зведені дані констант ЕІЛ при алітуванні сталей 20 та 40.

TABLE 9. Summary data of constants electrosark alloying by aluminium of steels 20 and 40.

Підкладка	$E_{\Delta h} = \operatorname{tg} \alpha $	$E_{\Delta H_{\mu}}$	$E_{\Delta Ra}$	$E_{\Delta S}$	Δh_{\max}	ΔRa_{\max}	$\Delta H_{\mu \max}$	ΔS_{\max}
	Дж				мкм		МПа	%
Сталь 20	0,964	0,661	1,00	0,285	73,6	8,08	6921,58	100
Сталь 40	1,006	0,627	1,06	0,373	102,7	7,92	7906,97	100

ни зміцненого шару, його твердості, шорсткості та суцільності при алітуванні методом ЕІЛ.

4. ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу результатів експериментальних досліджень алітування методом ЕІЛ запропоновано математичні моделі (рівняння прогнозування товщини і мікротвердості зміцненого шару,

його шорсткості і суцільності), що дозволяють за енергетичними параметрами установки ЕІЛ визначати основні параметри якості сформованого покриття.

2. Розроблено методику визначення констант рівнянь прогнозування товщини і мікротвердості зміцненого шару, його шорсткості і суцільності при алітуванні методом ЕІЛ.

3. Запропоновано алгоритм, що дозволяє встановлювати критерії оцінки альтернативних варіантів способів формування методом ЕІЛ поверхневих шарів необхідної якості і вибору найбільш раціонального варіанту. Методика апробована при формуванні покриттів на катоді зі сталей 20 та 40 при використанні алюмінію як анод.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. П. Уманский, М. С. Стороженко, В. В. Акопян, И. С. Марценюк, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 9: 214 (2012).
2. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, М. Я. Довжик, *Металлофиз. новейшие технол.*, **38**, № 12: 1611 (2016).
3. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, М. Я. Довжик, *Металлофиз. новейшие технол.*, **39**, № 3: 363 (2017).
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. P. Shatskyi, L. Ya. Ropyak, and M. V. Makoviichuk, *Strength Mater.*, **48**, No. 5: 726 (2016).
7. I. Shatskyi, M. Makoviichuk, and L. Ropyak, *Transactions of the VŠB–TU Ostrava, Civ. Eng. Ser.*, **17**, Iss. 2: 109 (2017).
8. Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький, М. В. Маковійчук, *Металлофиз. новейшие технол.*, **39**, № 4: 517 (2017).
9. N. A. Dolgov, S. N. Romashin, L. Yu. Frolenkova, and V. S. Shorkin, *Nanoscience Technol.: An Int. J.*, **6**, No. 2: 117 (2015).
10. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, О. М. Мисливченко, *Металлофиз. новітні технол.*, **41**, № 10: 1377 (2019).
11. В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, О. П. Гапонова, А. Д. Лазаренко, *Спосіб прогнозування якісних параметрів поверхневого шару при зміцненні сталевих деталей методом електроерозійного легування*: Патент UA 130574 U, МПК (2018.01), 10/48, № 23 (2018).

REFERENCES

1. A. P. Umanskiy, M. S. Storozhenko, V. V. Akopyan, and I. S. Martsenyuk, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 9: 214 (2012) (in Russian).
2. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and M. Ya. Dovzhyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1611 (2016) (in Russian).

3. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, and M. Ya. Dovzhyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 3: 363 (2017) (in Russian).
4. V. B. Tarelnyk, 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. Tarelnyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, N. S. Evtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
6. I. P. Shatskyi, L. Ya. Ropyak, and M. V. Makoviichuk, *Strength Mater.*, **48**, No. 5: 726 (2016).
7. I. Shatskyi, M. Makoviichuk, and L. Ropyak, *Transactions of the VŠB–TU Ostrava, Civ. Eng. Ser.*, **17**, Iss. 2: 109 (2017).
8. L. Ya. Ropyak, I. P. Shatskyi, and M. V. Makoviichuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 4: 517 (2017) (in Ukrainian).
9. N. A. Dolgov, S. N. Romashin, L. Yu. Frolenkova, and V. S. Shorkin, *Nanoscience Technol.: An Int. J.*, **6**, No. 2: 117 (2015).
10. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, and O. M. Myslyvchenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 10: 1377 (2019) (in Ukrainian).
11. V. B. Tarel'nyk, V. S. Martsynkovs'kyi, O. P. Gaponova, and A. D. Lazarenko, *Sposib Prohnozuvannya Yakisnykh Parametriv Poverkhnevoho Sharu pry Zmitsnenni Stalevykh Detaley Metodom Elektroeroziynoho Lehuвання*: Patent UA 130574 U, MPK (2018.01), 10/48, No. 23: (2018).