

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

Удосконалення параметрів якості поверхневих шарів деталей з криці після алітування методом електроіскрового легування. Ч. 3. Математичний модель прогнозування параметрів якості покриттів із урахуванням продуктивності поверхневого оброблення

О. П. Гапонова, Н. В. Тарельник*

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

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

Запропоновано рівняння для прогнозування параметрів якості покриттів, що дають змогу за енергетичними показниками електроіскрового легування, такими як енергія розряду, а також за продуктивністю процесу прогнозувати структурні показники (товщину, суцільність), механічні властивості (мікротвердість) і геометричні параметри (шерсткість) і, отже, цілеспрямовано встановлювати алгоритм подальшого керування властивостями поверхні деталей. Рекомендований алгоритм дає змогу визначити найбільш раціональний спосіб формування поверхневих шарів необхідної якості. Методику випробувано для формування покриттів на катоді з криць 20 і 40 із використанням алюмінію як аноди.

Ключові слова: рівняння прогнозування параметрів якості покриттів,

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

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

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

Citation: O. P. Haponova and N. V. Tarel'nyk, Improvement of the Quality Parameters of the Surface Layers of Steel Parts after Alitization by the Electrospark-Alloying Method. Pt 3. Mathematical Model of Forecasting the Quality Parameters of Coatings Taking into Account the Performance of Surface Treatment, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 46, No. 8: 771–795 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.08.0771](https://doi.org/10.15407/mfint.46.08.0771)

покриття, енергія розряду, продуктивність, електроіскрове легування, криця, анода, катода.

The equations for predicting the quality parameters of the coatings is proposed, which allow predicting structural parameters (thickness, continuity), mechanical properties (microhardness) and geometric parameters (roughness) based on the energy indicators of the electrospark alloying, such as discharge energy, as well as process productivity, and, therefore, to establish purposefully an algorithm for further governing of the surface properties of parts. The recommended algorithm allows determining the most rational way of forming of surface layers with a demand quality. The technique is tested for the fabrication of coatings on the cathode of steels 20 and 40 using aluminium as an anode.

Key words: prediction equation of coating-quality parameters, coating, discharge energy, productivity, electrospark alloying, steel, anode, cathode.

(Отримано 30 травня 2023 р.; остаточн. варіант — 26 серпня 2023 р.)

1. ВСТУП

В частині 1 (стаття [1]) проведено аналізу структуроутворення та властивостей поверхневих шарів деталей з криці після алітування традиційними технологіями та методом електроіскрового легування (ЕІЛ). 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 була зменшена \cong в два рази, другий, коли продуктивність була зменшена \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 алюмінійовою електродою за енергії розряду $W_p = 0,52\text{--}6,8$ Дж і продуктивності згідно з табл. 2 [1].

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

Другу частину [2] присвячено дослідженню впливу продуктивності ЕІЛ на параметри якості алітованих покриттів, що одержані з використанням консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру або алюмінійову пудру та порошок графіту. Показано, що з додаванням порошку графіту збільшується мікротвердість «білого шару» та дифузійної зони, шерсткість поверхні зменшується, а суцільність покриття складає 100%. До практичної реалізації рекомендовано проводити процес алітування за технологією: I етап —

ЕІЛ алюмінійовою електродою за енергії розряду $W_p = 4,6-6,8$ Дж, II етап — нанесення консистентної речовини, яка містить алюмінійову пудру та порошок графіту. ЕІЛ треба виконувати за умов, коли продуктивність буде зменшена \cong у два рази.

Для керування технологічним процесом формування електроіскрових покриттів та ефективної аналізи одержаних результатів потрібно виявити взаємозв'язок чинників, що визначають хід процесу, і представити їх у вигляді математичного моделю. Математичний модель дає змогу одержати інформацію про процеси, які перебігають в об'єкті, розрахувати його характеристики та використати одержану інформацію для управління об'єктом в процесі моделювання [3].

В представленій роботі запропоновано рівняння прогнозування параметрів якості покриттів, що дають змогу за енергетичними показниками процесу ЕІЛ, такими як енергія розряду, а також за продуктивністю процесу прогнозувати структурні показники (товщину, суцільність), механічні властивості (мікротвердість) і геометричні параметри (шерсткість) і, отже, цілеспрямовано встановлювати алгоритм подальшого керування властивостями поверхні деталей.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Традиційним методом оцінювання ефективності масоперенесення речовини з аноди на катоду під час ЕІЛ є вивчення залежності зміни маси електрод від часу оброблення. У ході численних експериментів встановлено, що в більшості випадків у початковий момент ЕІЛ маса катоди зростає, а маса аноди зменшується [4, 5]. Водночас за абсолютним значенням зменшення маси аноди не збігається з приростом катоди, що пояснюється тим, що частина речовини видаляється з поверхні обох електрод у навколишнє середовище у вигляді продуктів ерозії. Після закінчення певного часу оброблення процес збільшення маси катоди сповільнюється, а потім починає спостерігатися пониження маси катоди. Така поведінка пояснюється тим, що в різний час ЕІЛ здійснюється різне співвідношення внеску в масоперенесення двох основних конкуруючих процесів: 1) збільшення маси катоди через полярне перенесення речовини, 2) руйнування покриття за рахунок накопичення в ньому дефектів, утворення крихких оксидів і нітридів [6]. Спочатку відбувається переважне перенесення речовини з аноди на катоду, а потім інтенсивніше втрачається маса покриття в результаті його руйнування.

У даний час є якісне пояснення процесу масоперенесення під час ЕІЛ; питання про теоретичний опис зміни маси електрод залишається поки що відкритим. Ця обставина викликає певні труднощі, оскільки за кожних нових електродної пари та режиму оброблення кінетичні залежності зміни маси електрод доводиться знаходити експериментально.

Для кількісного опису перенесення речовини часто використовують коефіцієнт масоперенесення KM , що визначається як відношення зміни маси катода до зміни маси анода: $KM = \Delta m_K / \Delta m_A$ [4].

З масоперенесенням пов'язаний інший показник — товщина сформованого покриття, від якої залежить якість покриття та ресурс роботи виробу. Відомо [7], що для забезпечення високої зносостійкості поверхневого шару деталю в окремих випадках достатньо 0,02 мм, наприклад, у нероз'ємних з'єднаннях типу «вал-маточина», коли поверхні деталей, що контактують, з'єднуються з натягом, тобто \varnothing валу $>$ \varnothing маточини, а іноді потрібно наносити зносостійкі покриття, товщина яких складає 2,0 мм і більше.

На покриття, що мають малу товщину, витрачається незначна кількість дорогих матеріалів, що дає високий економічний ефект за їхнього застосування у виробничій практиці. І в цьому випадку метод ЕІЛ є ефективним, застосування відпрацьованої технології нанесення покриття та раціональний вибір електродних матеріалів дають змогу збільшити довговічність деталей машин, що працюють на зношування. Для формування покриттів збільшеної товщини і підвищеної суцільності застосовуються технології квазібагатошарового легування, тобто застосовуються декілька циклів ЕІЛ, що чергуються, коли за 1 цикл приймається покриття 100% поверхні, що легується.

Значення параметрів ЕІЛ істотно впливають на інтенсивність нанесення покриттів та якість одержуваної поверхні. Найважливішими є потужність (енергія) розряду та продуктивність (час) легування — площа обробленої поверхні в одиницю часу. Вплив електричних параметрів (сила струму, напруга, енергія розряду та інші) достатньо широко вивчено під час використання різних електродних матеріалів [8–10]. Підвищення енергії розряду веде до збільшення величини кожного окремого електричного розряду i , у певних межах, сприяє підвищенню кількості перенесеного матеріалу покриття та більш глибоким перетворенням в поверхні у зоні розряду. Це саме стосується часу оброблення, тобто трудомісткості (величини, оберненої до продуктивності): із його збільшенням товщина нанесених шарів зростає.

Найбільшу складність під час використання ЕІЛ на практиці представляє підбір оптимального питомого часу легування. Це пов'язане з нелінійною зміною сумарного приросту ваги зразка у процесі ЕІЛ. Як видно з рис. 1, починаючи зі значення порога критичного руйнування зміненого поверхневого шару t_x , сумарний приріст ваги катода стає від'ємним. З підвищенням питомого часу легування ($t > t_x$) маса зразка може набути значення, менше за початкове. У загальному випадку збільшення маси зразка зі зміною t спостерігається тільки для $t < t_x$. Цю нерівність можна віднести здебільшого до процесу відновлення деталей, а тому домагатися напе-

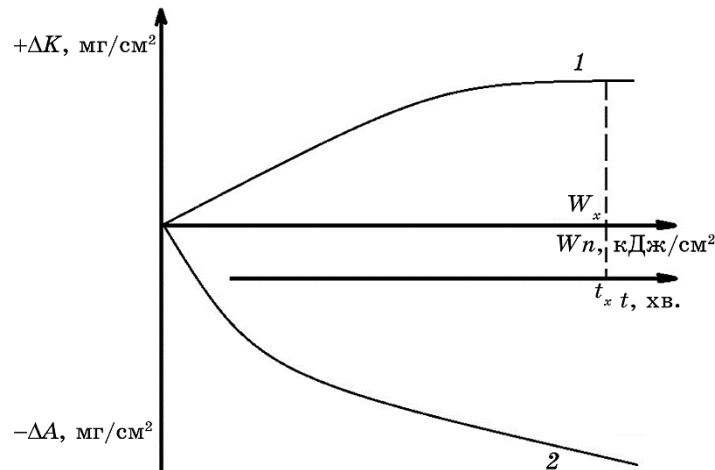


Рис. 1. Залежність зміни ваги катоди (1) та аноди (2) від наведеної енергії та часу оброблення: ΔA — питома ерозія аноди, ΔK — приріст катоди, Wn — наведена величина енергії іскрових розрядів під час легування підкладки площею у 1 см^2 .

Fig. 1. Dependence of the change in the weight of the cathode (1) and anode (2) on the given energy and processing time: ΔA is the specific erosion of the anode, ΔK is the growth of the cathode, Wn is the specified value of the energy of spark discharges, when doping a substrate with an area of 1 cm^2 .

ред визначеного збільшення лінійного розміру катоди. Однак стосовно процесу зміцнення поверхневого шару під час виготовлення деталю, де приріст ваги катоди не має бути великим, а в деяких випадках взагалі не допускається, потрібні нові методики визначення t_x . Водночас вибір t_x за різних енергій розряду, міжелектродних середовищ, матеріалів легувальних електрод по суті становить основу технології ЕІЛ [11].

В роботі [12] експериментальним шляхом встановлено, що за ЕІЛ необхідно обрати оптимальний час легування $\tau_{\text{опт}}$. Він має бути дещо меншим чи рівним часу τ_{max} , за який досягається максимальний приріст ваги на катоді, і меншим за час $\tau_{\text{руйн.}}$, за якого починає руйнуватися зміцнений шар, тобто

$$\tau_{\text{опт}} \leq \tau_{\text{max}} \Delta P_K < \tau_{\text{руйн.}}$$

Крім того, тривалість легування на обраному режимі легування практично не впливає на показник шерсткості, а визначає кількість перенесеного матеріалу з аноди на катоду, суцільність і товщину покриття. Зі збільшенням тривалості ЕІЛ до часу $\tau_{\text{max}} \Delta P_K$, що забезпечує максимальний приріст маси на катоді, зі збільшенням

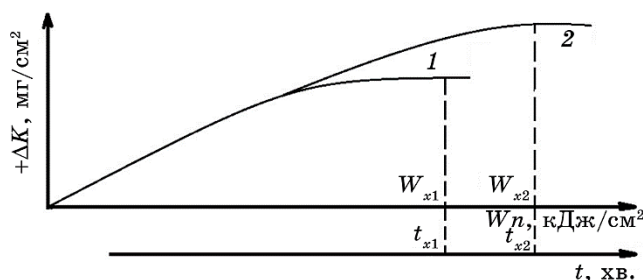


Рис. 2. Залежність зміни ваги катода від наведеної енергії та часу оброблення: ΔK — приріст катода, Wn — наведена величина енергії іскрових розрядів за легування підкладинки площею в 1 см^2 , t — час легування.

Fig. 2. Dependence of the cathode weight change on the applied energy and processing time: ΔK is cathode gain; Wn is specified value of spark-discharge energy, when doping a substrate with an area of 1 cm^2 ; t is doping time.

кількості перенесеного матеріалу збільшуються суцільність і товщина покриття.

Для формування покриттів збільшеної товщини та підвищеної суцільності застосовуються технології квазибагат шарового легування, тобто застосовуються цикли ЕІЛ, що чергуються, нанесення грубих покриттів з високою нерівністю профілю поверхні та цикли отоплення до вирівнювання профілю поверхні зі зменшенням висоти цих нерівностей не менше, ніж на 50%. Водночас отоплення нерівностей профілю здійснюється з використанням електродних матеріалів з підвищеною теплопровідністю й ерозійною стійкістю по відношенню до електродного матеріалу, що формує покриття [13].

Але сумарний приріст маси $\sum_{n=1}^x \Delta K_n$ за декілька циклів (де x — їхня кількість) не можна вважати таким, що складається із суми всіх приростів за x циклів (рис. 2). Очевидно, це можна пов'язати з процесами руйнування попереднього шару, випаровування, зменшення нерівностей профілю поверхні, фізико-хімічними перетвореннями в оброблених шарах, а також із величиною та тривалістю імпульсного теплового поля, створеного іскровим розрядом. Подібний підхід можна застосувати до аналізу зміни товщини зміцненого шару (чи/або дифузійної зони), суцільності шару, його мікротвердості (рис. 3).

Аналізу зміни мікротвердості зміцненого шару за циклового легування треба проводити з позицій впливу режимів ЕІЛ на структурно-фазовий стан покриттів. Як відомо, під час ЕІЛ у поверхневому шарі відбуваються наступні процеси [14]:

перенесення матеріалу на поверхню деталю з легувальної електроди з утворенням механічних сумішей, твердих розчинів, хеміч-

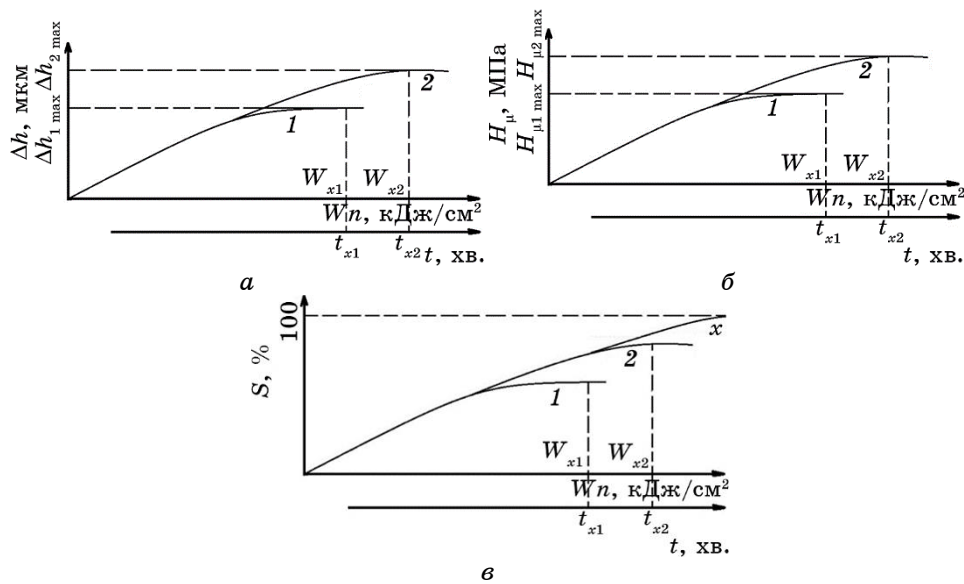


Рис. 3. Залежності зміни товщини зміцненого шару (а), його твердості (б) та суцільності (в) від наведеної енергії та часу оброблення.

Fig. 3. Dependences of the change in the thickness of the strengthened layer (а), its hardness (б) and integrity (в) on the applied energy and processing time.

них сполук;

збагачення елементами легувальної електроди; водночас має місце аномально висока дифузія перенесеного матеріялу під дією висококонцентрованих потоків енергії;

надшвидкісне гартування за короткочасного нагрівання розрядом електричного струму до високої температури, а потім миттєвого охолодження;

пластичне деформування під час локальної дії на матеріял імпульсного тиску;

утворення нерівноважних структур з дрібним зерном, високою гетерогенністю за складом, структурою, що відбувається під час локальної дії на матеріял імпульсних тисків і температур, термічних напружень;

азотування, цементація, оксидування, що відбуваються через взаємодію з навколишнім середовищем.

Таким чином, під час зміни енергетичних умов легування чи часу легування (продуктивності) вкрай складно спрогнозувати напрямки зміни структурно-фазового стану покриття. Збільшення сумарного часу легування через застосування 1, 2, ..., x циклів легування, приведе до збільшення тривалості дії теплового поля, активації дифузійних процесів, можливості фазових перетворень у покритті

тощо. Крім того, змінюються умови кристалізації й охолодження сформованого шару. Тому можна припустити, що зі збільшенням циклів і зміною режимів легування під час повторних циклів твердість буде змінюватися до певного значення.

Що стосується суцільності (рис. 3, *в*), то, якщо 100% не досягається за перший цикл легування, вона наблизатиметься до цього значення на наступних. Це, скорше, відбувається в зв'язку з тим, що на наступному циклі оброблення збільшується час оброблення 1 см² площини поверхні. Кількість «проходів» електроди-інструменту, а отже, і ступінь зменшення нерівностей профілю поверхні за рахунок розтоплення їх і заповнення несучільностей будуть залежати від часу оброблення на кожному циклі ЕІЛ, тобто від продуктивності процесу.

Таким чином, дослідження впливу енергетичних параметрів ЕІЛ, а також часу легування (продуктивності) процесу мають важливе значення для розроблення технології зміцнення. Для того, щоб зменшити кількість експериментальних досліджень впливу різних чинників на параметри якості ЕІЛ покриттів для однієї пари електрод необхідний математичний модель прогнозування цих параметрів з урахуванням часу оброблення певної площини, що підлягає легуванню, тобто трудомісткості процесу ЕІЛ (величини, оберненої продуктивності). Такий модель дасть змогу керувати властивостями поверхні деталей.

Метою даної роботи є підвищення надійності та довговічності виробів шляхом удосконалення математичного моделю, який уможливорює прогнозувати параметри якості їхніх поверхневих шарів (структуру, мікротвердість, шерсткість, суцільність та інші) в залежності не тільки від енергетичних параметрів ЕІЛ (енергії розряду), а й від технологічних параметрів (продуктивності процесу) і, отже, цілеспрямовано встановлювати алгоритм подальшого керування властивостями поверхні деталей.

3. МАТЕМАТИЧНИЙ МОДЕЛЬ

Відомо [4], що високий адгезійний зв'язок покриттів, одержаних методом ЕІЛ, з основою пояснюється як інтенсивним перемішуванням матеріалів електрод у рідкій фазі, так і дифузійною матеріалу аноди в катоду у твердій фазі.

Підтвердженням проходження дифузійних процесів є наявність дифузійної зони між білим шаром і основою. Ця зона не нагрівається вище температури солідусу і не взаємодіє безпосередньо з навколишнім середовищем. Тому причиною її утворення може бути термічний вплив імпульсного розряду та дифузійне проникнення елементів аноди та катоди.

Коефіцієнт дифузії D є характеристикою, чутливою до температу-

ри T . Цей коефіцієнт підпорядковується Арреніусовому виразу [15]

$$D = D_0 \exp\{-E_a / (RT)\},$$

де E_a — енергія активації дифузійного процесу, R — універсальна газова стала, T — температура. Така залежність коефіцієнта дифузії від температури експериментально підтверджується для багатьох систем з високим значенням D : для дифузії у стопах втілення (наприклад, Карбону в α -Fe) і стопах заміщення (наприклад, Ауруму у сріблі). Експоненційна залежність D від температури є виразом того, що дифузія відбувається внаслідок термічно активованого руху атомів, який завжди описується експонентою $\exp\{-q/(kT)\}$, де q — енергія активації елементарного акту переміщення атома. У загальному випадку вона буде істотно відрізнятися для різних хемічних елементів і кристалічних структур. Енергію активації можна оцінити за нахилом лінії, яка описує залежність у координатах $\ln D$ —обернена температура T^{-1} .

Дослідження дифузійних процесів за електроіскрового легування показали, що глибина проникнення елементів аноди в катоду під час масоперенесення в твердій фазі може становити від декількох до ста мікрометрів і більше, що неодноразово підтверджувалося металографічними та мікрорентгеноспектральними дослідженнями [16–18]. Характер взаємного розподілу елементів у поверхневих шарах, одержаних ЕІЛ, свідчить про високу рухливість атомів у кристалічній ґратниці металів, підданих впливу іскрових розрядів. Висока рухливість атомів у кристалічній ґратниці металів, підданих впливу імпульсних розрядів, пов'язується з істотним внеском у перенесення речовини міжвузлових атомів, що генеруються в екстремальних умовах. Однією з причин високої рухливості атомів у твердій фазі може також бути локальна деформація кристалічної ґратниці під впливом високих градієнтів температури й ударних хвиль, які можуть бути причиною перенесення елементів на значну глибину в твердій фазі.

В результаті ЕІЛ відбувається опромінення, нагрівання поверхневого шару тіла та його пластична деформація, що спотворюють ґратницю за рахунок утворення точкових (вакантних вузлів і атомів втілення), лінійних і поверхневих дефектів. У правильних бездефектних структурах атоми розташовуються в ґратниці, утворюючи систему з мінімальною вільною енергією. Зсув атомів із рівноважного положення порушує порядок в ґратниці. Для одержання таких порушень витрачається енергія, яка запасується в утворених дефектах. Величина повної енергії системи буде більшою за мінімальну, характерну для впорядкованої системи атомів, на величину збереженої енергії, яка визначається числом дефектів у ґратниці, їхнім видом і є своєрідною мірою дефектності ґратниці.

На перехід атома з вузла ґратниці в сусідній вузол або міжвузля потрібно витратити енергію, яку називають енергією активації процесу переходу атомів. В результаті одночасного переміщення в тілі великого числа вакансій і утворення атомів втілення відбувається пониження внутрішнього тертя й полегшення дифузії в матеріалі. Таким чином, під час ЕІЛ відбувається взаємочин потоків частинок з речовиною (через опромінення тіла). Наявність цього взаємочину є необхідною умовою для передачі енергії з потоку тілу. Величина увібраної енергії визначає ефективність ЕІЛ. Якщо взаємочин, а, отже, й увібрана енергія малі, то і зміна властивостей тіла, тобто технологічний ефект, буде також незначним.

Необхідно відзначити, що температура нагрівання катоди (оброблюваної поверхні) залежить від енергії розряду (W_p), за якої відбувається процес ЕІЛ. Наявність прямо пропорційної залежності $T \propto W_p$ свідчить про те, що з підвищенням енергії розряду збільшуються коефіцієнти дифузії елементів матеріалу аноди в основу, а, отже, й ефективність процесу. У зв'язку з цим, товщини «білого» шару та дифузійної зони, так само, як і коефіцієнти дифузії, підкоряються експоненційній залежності (за Арреніусовим виразом).

На підставі експериментальних досліджень, результати яких було представлено у частині 1 даної роботи [1], встановлено, що за алітування методом ЕІЛ криці 20 (рис. 4) зі збільшенням енергії розряду збільшується товщина зміцненого шару (h_a , мкм). Показник h_a є комплексним і складається з приросту на першому циклі легування за стандартної продуктивності (табл. 1 [1]) і другому циклі за зменшення продуктивності ЕІЛ (табл. 2 [1]).

Показано, що між величинами h_a і оберненою енергією розряду $1/W_p$ до періоду, коли $\Delta h_a = \Delta h_{a \max}$, тобто до періоду, коли приріст за даної технології легування наближається до максимального значення, є експоненційна спадна залежність (рис. 4, б).

З ростом енергії розряду товщина зміцненого шару за алітування зростає та сягає максимальної величини ($\Delta h_{a \max}$). Крім того, збільшення h_a зміцненого шару стає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування зміцненого шару під час ЕІЛ ($E_{a \Delta h}$).

Виходячи з експериментальної залежності h_a від $1/W_p$ (що наближається до спадної експоненти), можна зробити висновок, що $\ln(\Delta h_a)$ пропорційний $-1/W_p$ і величині $E_{a \Delta h}$, тобто

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

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta h_a = \Delta h_{a \max} \exp(-E_{a \Delta h} / W_p). \quad (2)$$

Залежність (2) назвемо рівнянням прогнозування товщини зміцне-

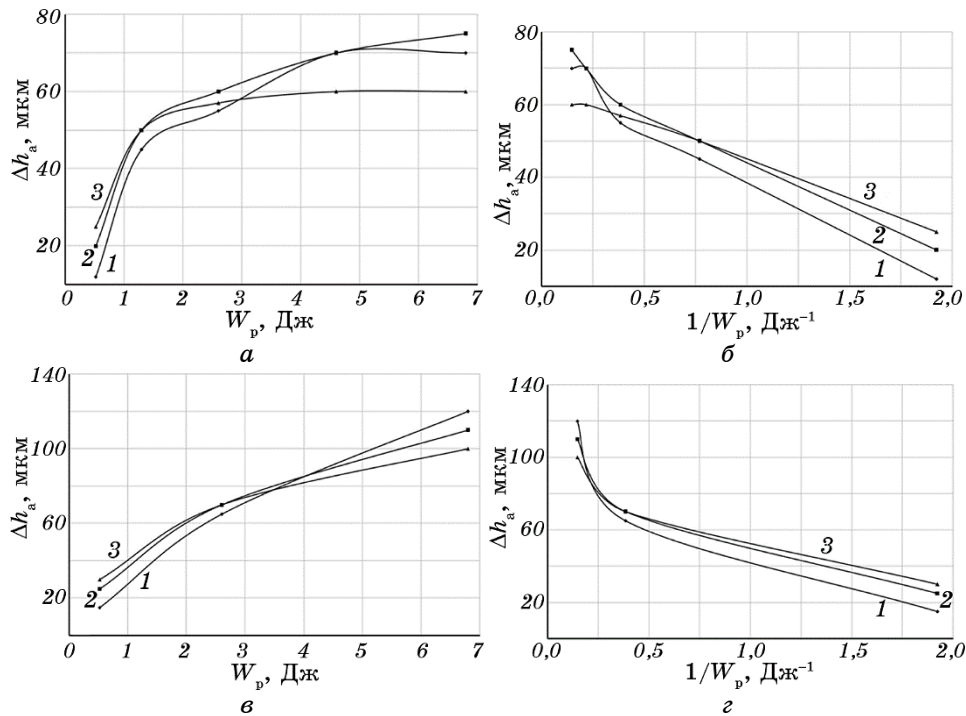


Рис. 4. Залежність величини товщини зміцненого шару за алітування методом ЕІЛ криці 20 (а, б) і криці 40 (в, з) від енергії розряду W_p (а, в) та від величини оберненої енергії розряду $1/W_p$ (б, з): 1 — класична технологія ЕІЛ, 2 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази), 3 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази).

Fig. 4. Dependence of the thickness of the hardened layer during alitizing by the ESA method of steel 20 (a, б) and steel 40 (в, з) on the discharge energy W_p (a, в) and on the value of the reciprocal energy of the discharge $1/W_p$ (б, з): 1 is classic ESA technology, 2 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong two times), 3 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong four times).

ного шару за алітування методом ЕІЛ. Припускаючи в (2)

$$E_{a \Delta h} = W_p, \tag{3}$$

маємо:

$$\Delta h_a / \Delta h_{a \max} = e^{-1}. \tag{4}$$

Звідси $E_{a \Delta h}$ — це критична величина, що дорівнює такій енергії розряду, за якої Δh_a в e раз менше, аніж $\Delta h_{a \max}$. Назвемо її константою

рівняння (2) прогнозування товщини зміцненого шару за алітування методом ЕІЛ. Розмірність $E_{a \Delta h}$ — [Дж].

На рисунку 5 показано залежність величини мікротвердості зміцненого шару за алітування методом ЕІЛ криці 20 від енергії розряду: зі збільшенням енергії розряду мікротвердість збільшується. Між мікротвердістю зміцненого шару $H_{\mu a}$ і величиною оберненої енергії розряду $1/W_p$ до періоду, коли $\Delta H_{\mu a} = \Delta H_{\mu a \max}$, є експоненціальна спадна залежність (рис. 5, б).

Слід зазначити, що використання енергії розряду менше 2,6 Дж, коли суцільність покриття менше 100%, а мікротвердість не пере-

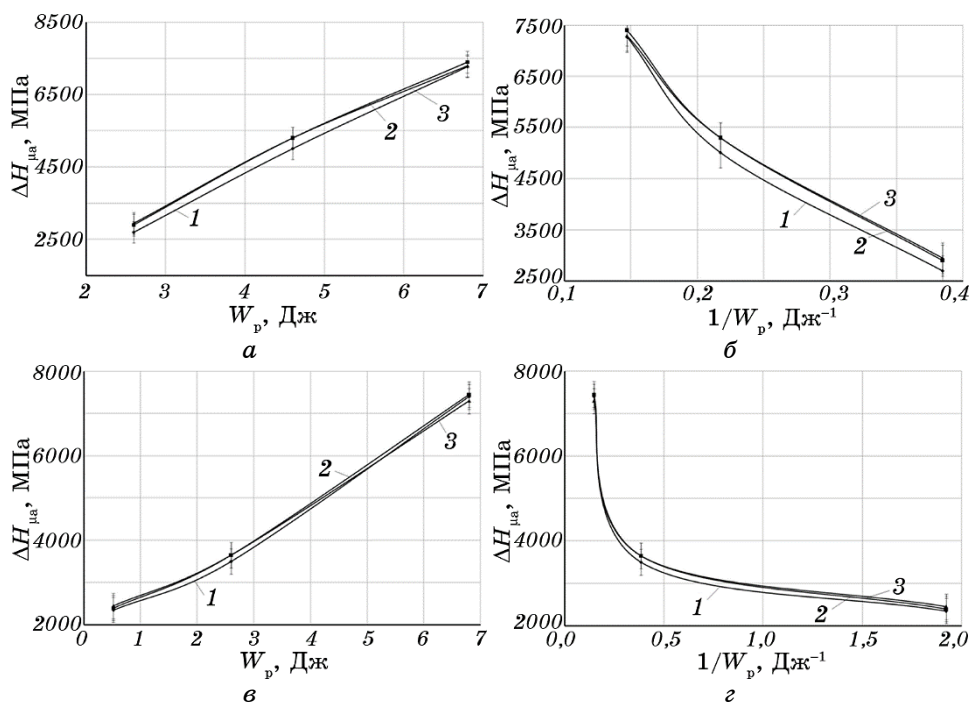


Рис. 5. Залежність мікротвердості зміцненого шару за алітування методом ЕІЛ криці 20 (а, б) і криці 40 (в, г) від енергії розряду W_p (а, в) та від величини оберненої енергії розряду $1/W_p$ (б, г): 1 — класична технологія ЕІЛ, 2 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази), 3 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази).

Fig. 5. Dependence of the microhardness of the hardened layer during alitizing by the ESA method of steel 20 (a, б) and steel 40 (в, г) on the discharge energy W_p (а, в) and on the value of the reciprocal energy of the discharge $1/W_p$ (б, г): 1 is classic ESA technology, 2 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong two times), 3 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong four times).

вищує 2300 МПа (див. табл. 5 в [1]), не рекомендується для промислового застосування. Більш істотні перетворення відбуваються в поверхневому шарі за енергії розряду більше 2,6 Дж (рис. 5, а).

Зі зростанням енергії розряду мікротвердість зміцненого шару у період до досягнення максимальної мікротвердості $\Delta H_{\mu a \max}$, збільшується тим сильніше, чим більше енергія розряду, витрачена на формування зміцненого шару. Крім того, збільшення $\Delta H_{\mu a}$ зміцненого шару стає тим сильніше, чим більше енергія активації процесу формування зміцненого шару $E_{a \Delta H_{\mu}}$.

Виходячи з експериментальної залежності $\Delta H_{\mu a}$ від $1/W_p$ (спадної експоненти), можна зробити висновок, що $\ln \Delta H_{\mu a}$ пропорційний $-1/W_p$ і величині $E_{a \Delta H_{\mu}}$, тобто

$$\ln(\Delta H_{\mu a}) \propto -W_p^{-1}, E_{a \Delta H_{\mu}}. \quad (5)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta H_{\mu a} = \Delta H_{\mu a \max} \exp(-E_{a \Delta H_{\mu}} / W_p). \quad (6)$$

Залежність (6) назвемо рівнянням прогнозування мікротвердості зміцненого шару за алітування методом ЕІЛ. Припускаючи в (6)

$$E_{a \Delta H_{\mu}} = W_p, \quad (7)$$

маємо:

$$\Delta H_{\mu a} / \Delta H_{\mu a \max} = e^{-1}. \quad (8)$$

Звідси $E_{a \Delta H_{\mu}}$ — це критична величина, що дорівнює такій енергії розряду, за якої $\Delta H_{\mu a}$ в e раз менше, аніж $\Delta H_{\mu a \max}$. Назвемо її константою рівняння (6) прогнозування мікротвердості зміцненого шару за алітування методом ЕІЛ. Розмірність $E_{a \Delta H_{\mu}}$ — [Дж].

Режими ЕІЛ (енергія розряду та продуктивність процесу) за алітування впливають не тільки на товщину та мікротвердість зміцненого шару, а також і на шерсткість сформованого поверхневого шару та його суцільність.

Водночас шерсткість поверхні значно змінюється зі змінюванням енергії розряду, коли кожний окремих імпульс енергії впливає на різні об'єми поверхневого шару як аноди (електроди, що леґує), так і катода (деталю).

В результаті за різних величин енергії розряду на поверхні деталю формується сукупність різних за розміром більш-менш регулярно розташованих виступів і западин з відносно малими кроками на

базовій довжині. Зі зміною продуктивності ЕІЛ, тобто часу оброблення одиниці поверхні, коли енергія розряду не змінюється, і вплив одиничних імпульсів енергії залишається незмінним, тобто величина виступів шерсткості та западин залишаються незмінними. Підтвердженням цього може служити рис. 6, коли за різної продуктивності процесу усі результати мірювання шерсткості укладаються на одну лінію.

Між шерсткістю поверхневого шару Ra_a і величиною оберненої енергії розряду $1/W_p$ за алітування методом ЕІЛ до періоду, коли $\Delta Ra_a = \Delta Ra_{a \max}$, є експоненційна спадна залежність (див. рис. 6).

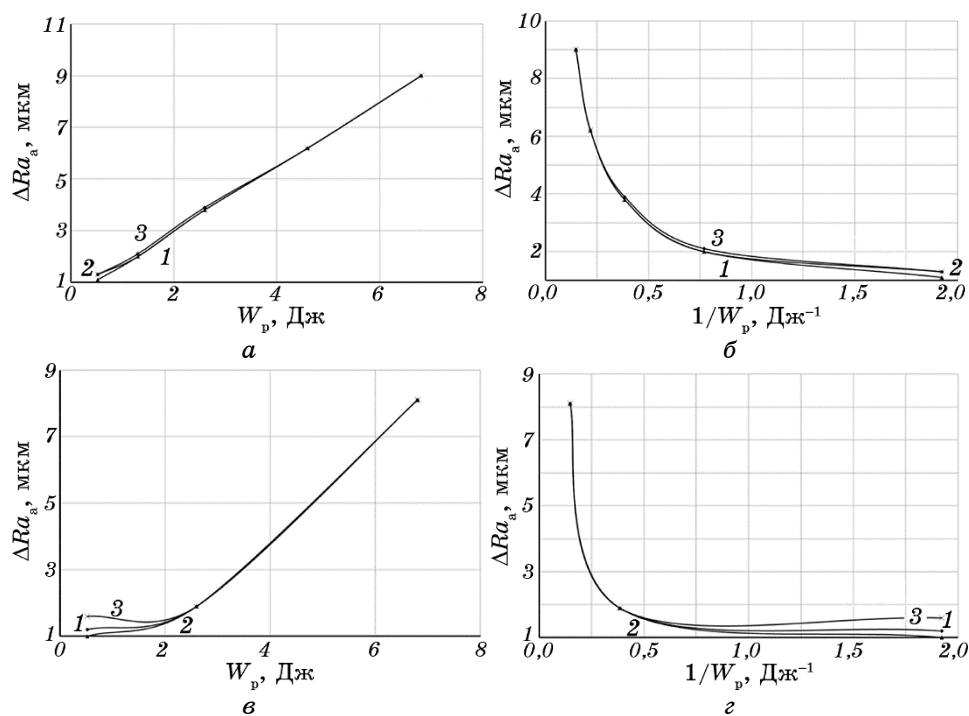


Рис. 6. Залежність шерсткості поверхні за алітування методом ЕІЛ криці 20 (а, б) і криці 40 (в, г) від енергії розряду W_p (а, в) і від величини оберненої енергії розряду $1/W_p$ (б, г): 1 — класична технологія ЕІЛ, 2 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази), 3 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази).

Fig. 6. Dependence of the roughness of the hardened layer during alitizing by the ESA method of steel 20 (а, б) and steel 40 (в, г) on the discharge energy W_p (а, в) and on the value of the reciprocal energy of the discharge $1/W_p$ (б, г): 1 is classic ESA technology, 2 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong two times), 3 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong four times).

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

Виходячи з експериментальної залежності ΔRa_a від $1/W_p$ (спадної експоненти), можна зробити висновок, що $\ln(\Delta Ra_a)$ пропорційний $-1/W_p$ і величині $E_{a \Delta Ra}$, тобто

$$\ln(\Delta Ra_a) \propto -W_p^{-1}, E_{a \Delta Ra}. \quad (9)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta Ra_a = \Delta Ra_{a \max} \exp(-E_{a \Delta Ra} / W_p). \quad (10)$$

Залежність (10) назвемо рівнянням прогнозування шерсткості поверхні за алітування методом ЕІЛ. Припускаючи в (10)

$$E_{a \Delta Ra} = W_p, \quad (11)$$

маємо:

$$\Delta Ra_a / \Delta Ra_{a \max} = e^{-1}. \quad (12)$$

Звідси $E_{a \Delta Ra}$ — це критична величина, що дорівнює такій енергії розряду, за якої ΔRa_a в e раз менше за $\Delta Ra_{a \max}$. Назвемо її константою рівняння прогнозування шерсткості поверхні за алітування методом ЕІЛ. Розмірність $E_{a \Delta Ra}$ — [Дж].

Між суцільністю шару S_a та величиною оберненої енергії розряду $1/W_p$ до періоду, коли $\Delta S_a = \Delta S_{a \max}$, є експоненційна спадна залежність (див. рис. 7).

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

Виходячи з експериментальної залежності ΔS_a від $1/W_p$ (спадної експоненти), можна зробити висновок, що $\ln \Delta S_a$ пропорційний $-1/W_p$ і величині $E_{a \Delta S}$, тобто

$$\ln(\Delta S_a) \propto -W_p^{-1}, E_{a \Delta S}. \quad (13)$$

Переходячи від наближеного рівняння до точного, маємо:

$$\Delta S_a = \Delta S_{a \max} \exp(-E_{a \Delta S} / W_p). \quad (14)$$

Залежність (14) назвемо рівнянням прогнозування суцільності шару за алітування методом ЕІЛ. Припускаючи в (14)

$$E_{a \Delta S} = W_p, \quad (15)$$

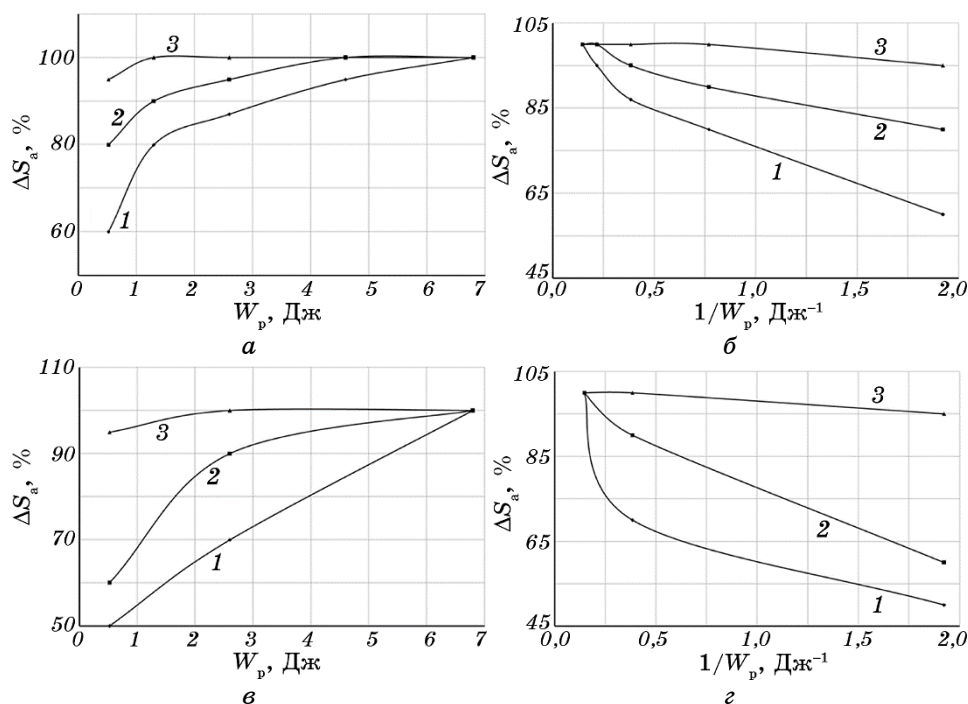


Рис. 7. Залежність суцільності шару за алітування методом ЕІЛ криці 20 (а, б) і криці 40 (в, з) від енергії розряду W_p (а, в) і від величини оберненої енергії розряду $1/W_p$ (б, з): 1 — класична технологія ЕІЛ, 2 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази), 3 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази).

Fig. 7. Dependence of the continuity of the hardened layer during alitizing by the ESA method of steel 20 (а, б) and steel 40 (в, з) on the discharge energy W_p (а, в) and on the value of the reciprocal energy of the discharge $1/W_p$ (б, з): 1 is classic ESA technology, 2 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong two times), 3 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong four times).

маємо:

$$\Delta S_a / \Delta S_{a \max} = e^{-1}. \quad (16)$$

Звідси $E_{a \Delta S}$ — це критична величина, що дорівнює такій енергії розряду, за якої ΔS_a в e раз менше за $\Delta S_{a \max}$. Назвемо її константою рівняння прогнозування суцільності шару за алітування методом ЕІЛ. Розмірність $E_{a \Delta S}$ — [Дж].

Режим ЕІЛ, необхідний для одержання потрібної товщини та мікротвердості зміцненого шару, шерсткості та суцільності поверхневого шару за алітування методом ЕІЛ, можна визначити відпові-

дно до рівнянь (2), (6), (10) та (14). Тоді, відповідно:

$$N_p = \frac{E_{a \Delta h}}{\ln \frac{\Delta h_{a \max}}{\Delta h_x}}, N_p = \frac{E_{a \Delta H_{\mu}}}{\ln \frac{\Delta H_{\mu a \max}}{\Delta H_{\mu x}}}, N_p = \frac{E_{a \Delta Ra}}{\ln \frac{\Delta Ra_{a \max}}{\Delta Ra_x}}, N_p = \frac{E_{a \Delta S}}{\ln \frac{\Delta S_{a \max}}{\Delta S_x}}. \quad (17)$$

Відповідно до рівняння (2) між логаритмом значень товщини зміцненого шару та величиною оберненої енергії розряду має бути лінійний зв'язок. Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta h_a$ від $1/W_p$.

Як впливає з графіка (рис. 8), залежність $\ln \Delta h_a$ від $1/W_p$ за алітування методом ЕІЛ криці 20 наближається до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненційно спадної залежності занесено до табл. 1. Передекспоненційний фактор (табл. 1) знаходимо за відрізком, який відсікається на осі ординат прямої експоненційно спадної залежності $\ln \Delta h_a$ від $1/W_p$ (рис. 8), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta h_a = \ln \Delta h_{a \max}$, якщо $W_p^{-1} \rightarrow 0$). Розраховані енергії активації $E_{a \Delta h}$ (константи рівняння (2) прогнозування товщини зміцненого шару за алітування методом ЕІЛ), визначені двома способами, за першим, якщо $E_{a \Delta h} = W_p$, за другим, коли $E_{a \Delta h} = |\operatorname{tg} \alpha|$, занесено до табл. 1.

Деяку невідповідність (до 7%) значень констант ЕІЛ $E_{a \Delta h}$, визна-

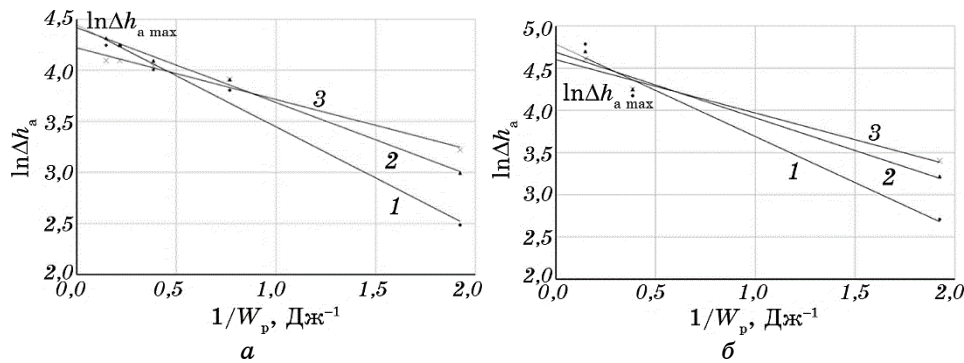


Рис. 8. Залежність $\ln(\Delta h_a)$ від $1/W_p$ за алітування методом ЕІЛ криць 20 (а) і 40 (б). На графіках: 1 — класична технологія ЕІЛ, 2 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази), 3 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази).

Fig. 8. Dependence of $\ln(\Delta h_a)$ on $1/W_p$, when alitizing by ESA method of steels 20 (a) and 40 (b). On graphs, 1 is classic ESA technology, 2 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong two times), 3 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong four times).

ТАБЛИЦЯ 1. Розраховані константи енергії активації ($E_{a \Delta h}$) і константи рівняння прогнозування товщини зміцненого шару за алітування методом ЕІЛ криць 20 (у чисельнику) і 40 (у знаменнику) за різних продуктивностей процесу.

TABLE 1. Calculated activation-energy constants ($E_{a \Delta h}$) and the constants of the equation for predicting the thickness of the hardened layer during alitizing by the ESA method of steels 20 (in the numerator) and 40 (in the denominator) for different process productivities.

Режим ЕІЛ	$E_{a \Delta h} = \operatorname{tg} \alpha $, Дж	$E_{a \Delta h} = W_p$, Дж	%	$\Delta h_{a \max}$, мкм
Класична технологія ЕІЛ	1,001	0,99	1	85
	1,09	1,17	7	119
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази	0,731	0,74	1	82
	0,775	0,83	7	108
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази	0,505	0,49	3	68
	0,632	0,68	7	99

чених різними способами, можна пояснити наслідком похибок різних мірянь. В цілому збіжність результатів є задовільною.

Згідно з рівнянням (6), між логаритмом значень мікротвердості та величиною оберненої енергії розряду має бути лінійний зв'язок.

Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta H_{\mu a}$ від $1/W_p$ (рис. 9). Як впливає з графіка (рис. 9), залежність $\ln \Delta H_{\mu a}$ від $1/W_p$ за алітування методом ЕІЛ криці 20 наближається до прямої лінії. Значення тангенсів кутів нахилу прямих до осі абсцис на ділянці експоненційно спадної залежності занесено до табл. 2. Передекспоненційний фактор (табл. 2) знаходимо за відрізком, що відсікається на осі ординат прямої експоненційно спадної залежності $\ln \Delta H_{\mu a}$ від $1/W_p$ (рис. 9), продовженої до значення абсциси $W_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta H_{\mu a} = \ln \Delta H_{\mu a \max}$, якщо $W_p^{-1} \rightarrow 0$). Результати розрахунку енергії активації $E_{a \Delta H_{\mu}}$ (константи рівняння (6) прогнозування мікротвердості зміцненого шару за алітування методом ЕІЛ), визначені двома способами, за першим, якщо $E_{a \Delta H_{\mu}} = W_p$, за другим, коли $E_{a \Delta H_{\mu}} = |\operatorname{tg} \alpha|$, занесено до табл. 2.

Деяку невідповідність (до 9%) значень констант ЕІЛ $E_{a \Delta H_{\mu}}$, визначених різними способами, можна пояснити наслідком похибок різних мірянь. В цілому збіжність результатів є задовільною.

За рівнянням шерсткості (10) між логаритмом значень шерсткості й величиною оберненої енергії розряду є лінійний зв'язок.

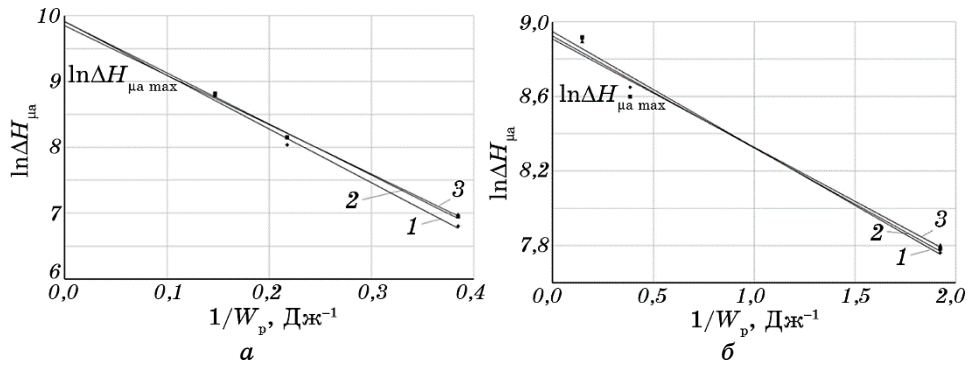


Рис. 9. Залежність $\ln(\Delta H_{\mu a})$ від $1/W_p$ за алітування методом ЕІЛ криць 20 (а) і 40 (б). На графіках: 1 — класична технологія ЕІЛ, 2 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази), 3 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази).

Fig. 9. Dependence $\ln(\Delta H_{\mu a})$ on $1/W_p$, when alitizing by ESA method of steels 20 (a) and 40 (б). On graphs: 1 is classic ESA technology, 2 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong two times), 3 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong four times).

ТАБЛИЦЯ 2. Розраховані константи енергії активації ($E_{a \Delta H_{\mu}}$) і константи рівняння прогнозування мікротвердості зміцненого шару за алітування методом ЕІЛ криць 20 (у чисельнику) і 40 (у знаменнику) за різних продуктивностей процесу.

TABLE 2. Calculated activation energy constants ($E_{a \Delta H_{\mu}}$) and the constants of the equation for predicting the microhardness of the hardened layer during alitizing by the ESA method of steels 20 (in the numerator) and 40 (in the denominator) for different process productivities.

Режим ЕІЛ	$E_{a \Delta H_{\mu}} = \operatorname{tg} \alpha , \text{Дж}$	$E_{a \Delta H_{\mu}} = W_p, \text{Дж} \%$	$\Delta H_{\mu a \text{ max}}, \text{МПа}$
Класична технологія ЕІЛ	0,74	0,73	1 9394
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази	0,58	0,64	9 7432
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази	0,69	0,68	1 9770
	0,59	0,63	4 7480
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази	0,68	0,66	3 9784
	0,62	0,61	2 7631

Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta Ra_a$ від $1/W_p$ за алітування методом ЕІЛ криці 20 (рис. 10).

Результати розрахунку константи $\Delta Ra_{a \max}$ та енергії активації $E_{a \Delta Ra}$ (константи рівняння (10) прогнозування шерсткості поверхні

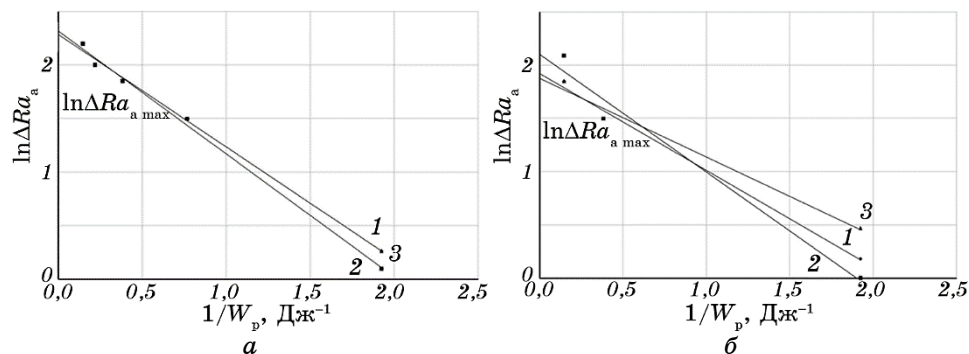


Рис. 10. Залежність $\ln(\Delta Ra_a)$ від $1/W_p$ за алітування методом ЕІЛ криць 20 (а) і 40 (б). На графіках: 1 — класична технологія ЕІЛ, 2 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази), 3 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази).

Fig. 10. Dependence $\ln(\Delta Ra_a)$ on $1/W_p$, when alitizing by ESA method of steels 20 (a) and 40 (b). On graphs: 1 is classic ESA technology, 2 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong two times), 3 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong four times).

ТАБЛИЦЯ 3. Розраховані константи енергії активації ($E_{a \Delta Ra}$) і константи рівняння прогнозування шерсткості поверхні за алітування методом ЕІЛ криць 20 (у чисельнику) і 40 (у знаменнику) за різних продуктивностей процесу.

TABLE 3. Calculated activation energy constants ($E_{a \Delta Ra}$) and the constants of the equation for predicting the surface roughness during alitizing by the ESA method of steels 20 (in the numerator) and 40 (in the denominator) for different process performances.

Режим ЕІЛ	$E_{a \Delta Ra} = \operatorname{tg} \alpha , \text{Дж}$	$E_{a \Delta Ra} = W_p, \text{Дж}$	%	$\Delta Ra_{a \max}, \text{мкм}$
Класична технологія	1,147	1,09	5	10
ЕІЛ	0,909	0,939	3	6,83
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази	1,151 1,105	1,18 1,17	3 6	9,8 8,17
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази	1,147 0,738	1,09 0,77	5 4	10 6,53

за алітування методом ЕІЛ), визначені двома способами, за першим, якщо $E_{a \Delta Ra} = W_p$, за другим, коли $E_{a \Delta Ra} = |\operatorname{tg} \alpha|$, занесено до табл. 3.

Деяку невідповідність (до 5%) значень констант ЕІЛ ($E_{a \Delta Ra}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком похибок різних мірянь. В цілому збіжність результатів є задовільною.

Відповідно до рівняння суцільності (14) між логаритмом значень суцільності шару й оберненою величиною енергії розряду має бути лінійний зв'язок.

Побудуємо графіки залежності $\ln \Delta S_a$ від $1/W_p$ за алітування методом ЕІЛ криці 20 (рис. 11).

Результати розрахунку константи $\Delta S_{a \max}$ та енергії активації $E_{a \Delta S}$ (константи рівняння (14) прогнозування суцільності поверхні за алітування методом ЕІЛ), визначені двома способами, за першим, якщо $E_{a \Delta S} = W_p$, за другим, коли $E_{a \Delta S} = |\operatorname{tg} \alpha|$, занесено до табл. 4.

Деяку невідповідність (до 7%) значень констант ЕІЛ ($E_{a \Delta S}$), визначених різними способами, можна пояснити наслідком похибок різних мірянь. В цілому збіжність результатів є задовільною.

Зведені дані констант ЕІЛ, необхідні для розрахунку параметрів якості поверхневого шару, наведено в табл. 5.

Аналіза таблиці 5 показала, що зі зменшенням продуктивності, тобто збільшенням часу оброблення одиниці поверхні деталю (трудомісткості процесу ЕІЛ), зменшуються величини констант ЕІЛ за алітування криць 20 і 40.

Це можна пояснити тим, що з кожним наступним циклом зменшується кількість перенесеної речовини з аноди на катоду, тобто процес алітування нібито «угамовується» та відбувається насичення, що характерне для експоненційних залежностей. Водночас зменшується і результат впливу процесу алітування на параметри якості поверхневих шарів деталей (товщину «білого» шару та дифузійної зони, мікротвердість, суцільність, шерсткість).

4. ВИСНОВКИ

На підставі вищезапропонованого математичного моделю (рівняння (1)–(17)) і методики визначення констант рівнянь прогнозування товщини алітованого шару ($\Delta h_{a \max}$ та енергії активації $E_{a \Delta h}$ за алітування методом ЕІЛ), максимальної мікротвердості поверхневого шару ($\Delta H_{\mu a \max}$ та енергії активації $E_{a \Delta H_{\mu}}$), максимальної шерсткості поверхні ($\Delta Ra_{a \max}$ й енергії $E_{a \Delta Ra}$) та максимальної суцільності шару ($\Delta S_{a \max}$ й енергії $E_{a \Delta S}$) за алітування методом ЕІЛ криць 20 і 40 можна скласти алгоритм, що уможливило прогнозувати основні технологічні параметри ЕІЛ шару для будь-яких матеріалів катоди.

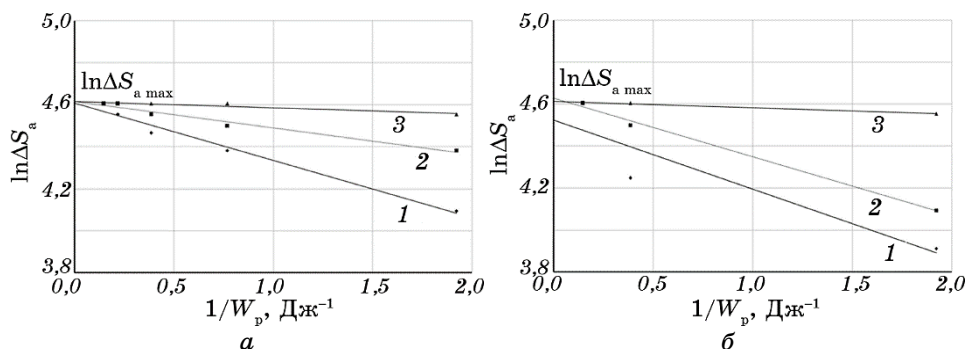


Рис. 11. Залежність $\ln(\Delta S_a)$ від $1/W_p$ за алітування методом ЕІЛ криць 20 (а) і 40 (б). На графіках: 1 — класична технологія ЕІЛ, 2 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази), 3 — ЕІЛ у два етапи (на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази).

Fig. 11. Dependence $\ln(\Delta S_a)$ on $1/W_p$, when alitizing by ESA method of steels 20 (a) and 40 (b). On graphs: 1 is classic ESA technology, 2 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong two times), 3 is ESA in two stages (at the second stage, the productivity was reduced by \cong four times).

ТАБЛИЦЯ 4. Розраховані константи ЕІЛ ($E_{a \Delta S}$) і константи суцільності шару за алітування методом ЕІЛ криць 20 (у чисельнику) і 40 (у знаменнику) за різних продуктивностей процесу.

TABLE 4. Calculated ESA constants ($E_{a \Delta S}$) and the layer-continuity constants during alitizing by the ESA method of steels 20 (in the numerator) and 40 (in the denominator) for different process productivities.

Режим ЕІЛ	$E_{a \Delta S} = \text{tg} \alpha $, Дж	$E_{a \Delta S} = W_p$, Дж	%	$\Delta S_{a \text{ max}}$, %
Класична технологія ЕІЛ	0,29 0,364	0,28 0,39	3 7	100 100
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази	0,125 0,279	0,126 0,288	5 3	100 100
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази	0,272 0,03	0,28 0,028	6 7	100 100

Результати частково було одержано в рамках науково-дослідних проєктів МОН України «Розробка нових методів поверхневого наноструктурування сталених поверхонь з прогнозованими параметрами якості, заснованих на методі електроіскрового легування» (держ. реєстр. № 0122U000771) та Erasmus+ Jean Monnet Chair

ТАБЛИЦЯ 5. Зведені дані констант ЕІЛ за алітування методом ЕІЛ криць 20 (у чисельнику) і 40 (у знаменнику) за різних продуктивностей процесу.**TABLE 5.** Summary data of ESA constants during alitizing by the ESA method of steels 20 (in the numerator) and 40 (in the denominator) according to different process productivities.

Режим ЕІЛ	$E_{a\gamma} = \operatorname{tg}\alpha $ Дж	$\Delta h_{a\max}$ мкм	$E_{a\Delta H_{\mu}} = W_p$ Дж	$\Delta H_{\mu a\max}$ МПа	$E_{a\Delta Ra} = \operatorname{tg}\alpha $ Дж	$\Delta Ra_{a\max}$ мкм	$E_{a\Delta S} = \operatorname{tg}\alpha $ Дж	$\Delta S_{a\max}$ %
Класична технологія ЕІЛ	1,001	85	0,74	9394	1,147	10	0,29	100
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у два рази	1,09	119	0,58	7432	0,909	6,83	0,364	100
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази	0,731	82	0,69	9770	1,151	9,8	0,125	100
	0,775	108	0,59	7480	1,105	8,17	0,279	100
ЕІЛ у два етапи, на другому етапі продуктивність була зменшена \cong у чотири рази	0,505	68	0,68	9784	1,147	10	0,272	100
	0,632	99	0,62	7631	0,738	6,53	0,03	100

(проєкт 101085451 CircuMed).

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. О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник, Т. І. Жиленко, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, С. В. Павловский, *Металофіз. новітні технол.*, **46**, № 4: 313 (2024).
3. С. Л. Ахтизарова, В. В. Кафаров, *Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии* (Москва: Высшая школа: 1978).
4. А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревуцкий, *Электроискровое легирование металлических поверхностей* (Кишинев: Штиинца: 1985).
5. А. Д. Верхотуров, *Формирование поверхностного слоя при ЭИЛ* (Владивосток: Дальнаука: 1995).
6. Н. Я. Парканский, М. С. Кац, М. Г. Гольдинер, А. Е. Гитлевич, *Электронная обработка материалов*, № 3: 20 (1982).
7. В. Б. Тарельник, *Управление качеством поверхностных слоев комбинированным электроэрозионным легированием* (Сумы: МакДен: 2002).
8. N. Radek, J. Pietraszek, and A. Szczotok, *Proc. 26th Int. Conf. Metallurgy and Materials (May 24–26, 2017, Brno)*, p. 1432.
9. М. S. Storozhenko, О. P. Umanskyi, V. B. Tarel'nyk, О. Yu. Koval, Yu. V. Gubin, М. O. Mikulina, I. S. Martsenyuk, О. D. Kostenko, and

- T. V. Kurinna, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**: 330 (2020).
10. O. Gaponova, Cz. 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).
 11. О. В. Казанников, *Автомобильный транспорт Дальнего Востока*, **1**: 110 (2018).
 12. В. Б. Тарельник, *Комбинированные технологии электроэрозионного легирования* (Київ: Техніка: 1997).
 13. Н. М. Чигринова, С. И. Ловыгин, *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*, № 2 (57): 83 (2017).
 14. C. Barile, C. Casavola, G. Pappalettera, and G. Renna, *Coatings*, **12**, Iss. 10: 1536 (2022).
 15. R. J. Borg and G. J. Dienes, *An Introduction to Solid State Diffusion* (Elsevier: 2012).
 16. 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. Appl. Electrochem.*, **57**: 173 (2021).
 17. Y. Lian, M. Cui, A. Han, Z. Liu, and J. Zhang, *Coatings*, **13**, Iss. 1: 214 (2023).
 18. 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).

REFERENCES

1. О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник, Т. І. Зхиленко, Н. В. Тарельник, О. А. Саржанов, В. І. Мельник, В. М. Власович, С. В. Павловський, В. О. Окхрименко, and А. В. Ткаченко, *Металлофіз. Новітні Технол.*, **45**, No. 12: 1449 (2023) (in Ukrainian).
2. О. П. Гапонова, В. Б. Тарельник, Т. І. Зхиленко, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, and С. В. Павловський, *Металлофіз. Новітні Технол.*, **46**, No. 4: 313 (2024) (in Ukrainian).
3. S. L. Akhtizarova and V. V. Kafarov, *Optimizatsiya Eksperimenta v Khimii i Khimicheskoy Tekhnologii* [Optimization of Experiments in Chemistry and Chemical Technology] (Moskva: Vysshaya Shkola: 1978) (in Russian).
4. A. E. Gitlevich, V. V. Mikhailov, N. Ya. Parkanskiy, and V. M. Revutskiy, *Ehlektriskrovoye Legirovanie Metallicheskih Poverkhnostey* [Electric Spark Alloying of Metal Surfaces] (Chişinău: Shtiintsa: 1985) (in Russian).
5. A. D. Verkhoturov, *Formirovanie Poverkhnostnogo Sloya pri EIL* [Formation of the Surface Layer during ESA] (Vladivostok: Dal'nauka: 1995) (in Russian).
6. N. Ya. Parkanskiy, M. S. Kats, M. G. Gol'diner, and A. E. Gitlevich, *Ehlektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 3: 20 (1982) (in Russian).
7. V. B. Tarelnik, *Upravlenie Kachestvom Poverkhnostnykh Sloev Kombinirovannym Ehlektroerozionnym Legirovaniem* [Quality Control of Surface Layers using Combined Electroerosive Alloying] (Sumy: MakDen: 2002) (in Russian).
8. N. Radek, J. Pietraszek, and A. Szczotok, *Proc. 26th Int. Conf. Metallurgy and Materials (May 24–26, 2017, Brno)*, p. 1432.
9. M. S. Storozhenko, O. P. Umanskyi, V. B. Tarelnyk, O. Yu. Koval,

- Yu. V. Gubin, M. O. Mikulina, I. S. Martsenyuk, O. D. Kostenko, and T. V. Kurinna, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**: 330 (2020).
10. O. Gaponova, Cz. Kundera, G. Kirik, V. Tarel'nyk, 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).
 11. O. V. Kazannikov, *Avtomobil'nyy Transport Dal'nego Vostoka*, **1**: 110 (2018) (in Russian).
 12. V. B. Tarel'nik, *Kombinirovannyye Tekhnologii Ehlektroehroziionnogo Legirovaniya* [Combined Technologies of Electroerosive Alloying] (Kyiv: Tekhnika: 1997) (in Russian).
 13. N. M. Chigrinova and S. I. Lovygin, *Progressivnyye Tekhnologii i Sistemy Mashinostroeniya*, No. 2 (57): 83 (2017) (in Russian).
 14. C. Barile, C. Casavola, G. Pappalettera, and G. Renna, *Coatings*, **12**, Iss. 10: 1536 (2022).
 15. R. J. Borg and G. J. Dienes, *An Introduction to Solid State Diffusion* (Elsevier: 2012).
 16. 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. Appl. Electrochem.*, **57**: 173 (2021).
 17. Y. Lian, M. Cui, A. Han, Z. Liu, and J. Zhang, *Coatings*, **13**, Iss. 1: 214 (2023).
 18. 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).