

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.J-, 68.55.Ln, 81.15.Rs, 81.65.Lp

Дослідження впливу продуктивності на структуроутворення поверхневих шарів крицевих деталей під час азотування методом електроіскрового легування (ЕІЛ). II. Розробка математичного моделю для управління параметрами якості поверхневих шарів крицевих деталей під час азотування методом ЕІЛ

О. П. Гапонова^{*,**}, Н. В. Тарельник^{***}, О. В. Семерня^{***}

^{*}*Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116,
40007 Суми, Україна*

^{**}*Інститут фундаментальних технологічних досліджень ПАН,
вул. Павінського, 5В,
02-016 Варшава, Польща*

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

В статті обґрунтовано важливість і актуальність проблеми керування якістю поверхневих шарів деталей. Представлено аналізу залежностей тов-

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

^{*}*Sumy State University,
116 Kharkivska Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

^{**}*Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences,
5B Pawińskiego Str., 02-016 Warsaw, Poland*

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

Citation: O. P. Haponova, N. V. Tarellyk, and O. V. Semernya, Research on the Influence of Productivity on the Structure Formation of Surface Layers of Steel Parts during Nitriding by the Electrospark Alloying (ESA) Method. II. Development of a Mathematical Model for Controlling the Quality Parameters of Steel-Parts' Surface Layers during Nitriding by the ESA Method, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **48**, No. 2: 185–203 (2026) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.48.02.0185](https://doi.org/10.15407/mfint.48.02.0185)

© Publisher PH 'Akademperiodyka' of the NAS of Ukraine, 2026. This is an open access article under the CC BY-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>)

щини зміцненого шару криці 20 і криці 40 та їхньої мікротвердості від технологічних параметрів електроіскрового легування (ЕІЛ) за азотування з використанням спеціальних технологічних насичувальних середовищ (СТНС). Встановлено, що за наявної технології зі збільшенням енергії розряду підвищується товщина зміцненого шару, яка складається з «білого» шару та дифузійної зони, а також мікротвердість поверхні. Ці параметри також зростають зі збільшенням часу оброблення певної площини (трудомісткості ЕІЛ) і зменшенням її оберненої величини, тобто кількості обробленої площини за одиницю часу (продуктивності легування). В результаті проведених досліджень розроблено математичні моделі залежності параметрів якості поверхонь за азотування методом ЕІЛ з використанням СТНС (рівняння товщини зміцненого шару та рівняння мікротвердості поверхні) від енергетичних і технологічних параметрів обладнання ЕІЛ, а саме, енергії розряду та трудомісткості, що уможливило визначати основні технологічні параметри сформованого шару: товщину зміцненого шару та мікротвердість поверхні.

Ключові слова: електроіскрове легування, покриття, азотування, криця, товщина шару, мікротвердість, математичний модель.

The article discusses the importance and relevance of the problem of controlling the quality of surface layers of parts. An analysis of the dependences of the thickness of the hardened layer of steel 20 and steel 40 and their microhardness on the technological parameters of electric-spark alloying (ESA) during nitriding using special technological saturating media (STSM) is presented. As established, with the existing technology, the thickness of the hardened layer consisting of the 'white' layer and the diffusion zone, as well as the microhardness of the surface, increase with increasing discharge energy. These parameters also increase with an increase in the processing time of a certain plane (ESA labour intensity) and a decrease in its reciprocal value, *i.e.*, the area treated per unit time (alloying productivity). As a result of the research, mathematical models of the dependence of surface quality parameters during ESA nitriding using STSM (equation of hardened layer thickness and equation of surface microhardness) on the energy and technological parameters of ESA equipment, namely, discharge energy and labour intensity are developed that allows determining the main technological parameters of the formed layer: hardened layer thickness and surface microhardness.

Key words: electrospark alloying, coating, nitridation, steel, layer thickness, microhardness, mathematical model.

(Отримано 28 лютого 2024 р.; остаточн. варіант — 20 червня 2024 р.)

1. ВСТУП

В [1] обґрунтовано важливість і актуальність проблеми підвищення параметрів якості [2–6] поверхневих шарів відповідальних деталей динамічного обладнання: насосних і компресорних агрегатів, турбін, центрифуг, відцентрових розсіювальних апаратів [3, 4], граві-

таційного або самопливного транспорту [5], ущільнень [6] і таке інше, які лімітують їхню надійність і довговічність. Також зазначено, що нині є велика кількість технологій, які здатні поліпшити параметри якості поверхонь: підвищити твердість і зносостійкість шляхом нанесення металокерамічних покриттів [7–9], натопленням покриттів з композиційних матеріалів [10, 11]. Відмічено, що перспективним шляхом підвищення зносостійкості поверхонь партертя можуть бути багат шарові покриття, які поєднують у собі змащувальні й антизношувальні властивості [12–14], комбіновані покриття, сформовані методом електроіскрового легування (ЕІЛ), що складаються з твердих зносостійких і м'яких антифрикційних матеріалів [15–18]. З появою нових технологій підвищення параметрів якості поверхонь деталей машин методом ЕІЛ із застосуванням спеціальних технологічних насичувальних середовищ (СТНС) з'явилася можливість формувати поверхневі шари не тільки з одноконтентних покриттів (алітуванням [19], цементацією [20], азотуванням [21]), а й багатоконтентних [22–24].

В [1] підкреслено, що під час дослідження параметрів якості поверхневих шарів, сформованих технологіями ЕІЛ, для визначенні впливу енергетичних параметрів обладнання на їхнє структуроутворення, основну увагу приділяли енергії розряду W_p , а величину продуктивності оброблення Q , тобто кількість 100% обробленої площини за одиницю часу [$\text{см}^2/\text{хв.}$] практично не враховували.

Щоб оцінити вплив продуктивності на параметри якості одержаних покриттів, в дослідженнях використовували продуктивність, \cong в два, три та чотири рази меншу за традиційну, тобто час оброблення τ одиниці площини (трудомісткість процесу ЕІЛ) збільшувався в два, три та чотири рази.

В результаті мікроструктурної аналізи поверхневих шарів після азотування криці 20 і криці 40 методом ЕІЛ з використанням азотвмісного СТНС встановлено, що для всіх варіантів τ структура покриття складається з трьох ділянок: «білого шару», дифузійної зони, основного металу. Водночас, зі збільшенням W_p і τ збільшується товщина «білого» шару та дифузійної (перехідної) зони, зростають мікротвердість, шерсткість і суцільність поверхні. Із заміною криці 20 на крицю 40 незначно збільшуються товщини «білого» шару й дифузійної зони та мікротвердість поверхні.

Проведені в [1] дослідження дають змогу нам встановити кореляційні залежності між енергетичними та технологічними параметрами обладнання ЕІЛ, а саме, енергією розряду W_p і трудомісткістю τ й основними параметрами якості поверхневих шарів: товщиною зміцненого шару $h_{\text{з.ш.}}$ і мікротвердістю поверхні H_{μ} . Наявність цих залежностей уможливить нам значною мірою реалізувати методику керування якістю поверхневих шарів деталей і таким чином поліпшити технології виготовлення та ремонту динамічного обладнання

залежно від вимог, що до них висуваються.

Таким чином, метою роботи є розроблення математичних моделей залежності якості поверхневих шарів від енергетичних і технологічних параметрів обладнання ЕІЛ, а саме, енергії розряду W_p і трудомісткості τ , що дасть змогу визначати основні технологічні параметри якості сформованого шару: товщину зміцненого шару $h_{з.ш.}$ і його мікротвердість H_{μ} .

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті аналізу таблиць 4 і 6 [1] встановлено, що за наявної технології як для криці 20, так і для криці 40 зі збільшенням енергії розряду W_p підвищується товщина зміцненого шару $h_{з.ш.}$, яка складається з «білого» шару та дифузійної зони, а також мікротвердість H_{μ} поверхні (табл. 1).

Крім цього, в табл. 1 показано, що ці параметри також збільшу-

ТАБЛИЦЯ 1. Залежність товщини зміцненого шару криць 20 і 40 та їхньої мікротвердості від параметрів ЕІЛ за азотування з використанням СТНС.

TABLE 1. Dependence of the thickness of the strengthened layer of steel 20 and steel 40 and their microhardness on the parameters of ESA during nitriding using STSM.

| Енергія розряду W_p , Дж | Продуктивність Q , см ² /хв. | Трудомісткість τ , хв./см ² | Товщина зміцненого шару $h_{з.ш.}$, мкм | | Мікротвердість зміцненого шару $H_{\mu з.ш.}$, МПа | |
|----------------------------|---|---|--|----------|---|----------|
| | | | криця 20 | криця 40 | криця 20 | криця 40 |
| Наявна технологія | | | | | | |
| 0,13 | 0,6 | 1,7 | 150,0 | 155 | 6350 | 6650 |
| 0,52 | 1,2 | 0,8 | 160,0 | 165 | 9421 | 9850 |
| 3,40 | 2,0 | 0,5 | 225,0 | 230 | 9721 | 9910 |
| Перший варіант | | | | | | |
| 0,13 | 0,3 | 3,3 | 165,0 | 170 | 6490 | 7100 |
| 0,52 | 0,6 | 1,7 | 175,0 | 180 | 9530 | 9980 |
| 3,40 | 1,0 | 1,0 | 240,0 | 245 | 9850 | 10080 |
| Другий варіант | | | | | | |
| 0,13 | 0,2 | 5,0 | 172,5 | 180 | 6520 | 720 |
| 0,52 | 0,3 | 3,3 | 185,0 | 190 | 9590 | 9990 |
| 3,40 | 0,5 | 2,0 | 250,0 | 255 | 9896 | 10100 |
| Третій варіант | | | | | | |
| 0,13 | 0,1 | 10,0 | 177,5 | 185 | 6560 | 7140 |
| 0,52 | 0,2 | 5,0 | 190,0 | 195 | 9610 | 10010 |
| 3,40 | 0,3 | 3,3 | 255,0 | 260 | 9920 | 10110 |

ються за тривалості оброблення певної площини (трудомісткості ЕІЛ) і зменшення її оберненої величини, тобто кількості обробленої площини за одиницю часу (продуктивності легування).

Розглянемо вплив енергії розряду на товщину зміцненого шару, тобто $h_{з.ш.} = f(W_p)$.

На рисунках 1 і 2 представлено залежності товщини зміцненого шару $h_{з.ш. W_p}$ криці 20 і криці 40, відповідно, від енергії розряду $W_p = 0,13, 0,52, 3,4$ Дж і величини оберненої енергії розряду $W_p^{-1} = 7,7, 1,9, 0,3$ Дж⁻¹ за наявної технології азотування.

На рисунку 3 представлено залежності логаритму товщини зміцненого шару $\ln h_{з.ш. W_p}$ криці 20 і криці 40 від величини оберненої енергії розряду W_p^{-1} .

Аналіза рисунку 1 дає можливість зробити висновок, що між збільшенням товщини зміцненого шару й енергією розряду W_p є експоненційний зв'язок. Так, відмічено, що збільшення товщини зміцненого шару зростає зі збільшенням енергії активації процесу азотування E .

З кореляційної залежності збільшення товщини зміцненого шару від величини оберненої енергії розряду (див. рис. 2) слідує, що логаритм товщини зміцненого шару $\ln h_{з.ш. W_p} \propto W_p^{-1}$ й енергії активації E (рис. 3):

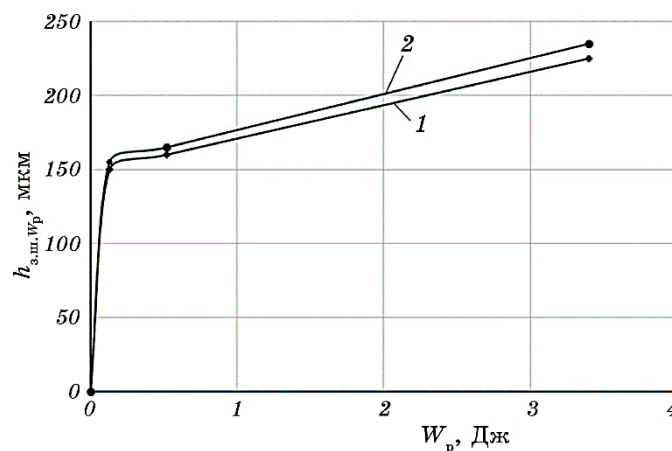


Рис. 1. Залежність товщини зміцненого шару криці 20 (1) і криці 40 (2) від енергії розряду W_p .

Fig. 1. The dependence of the thickness of the hardened layer of steel 20 (1) and steel 40 (2) on the discharge energy W_p .

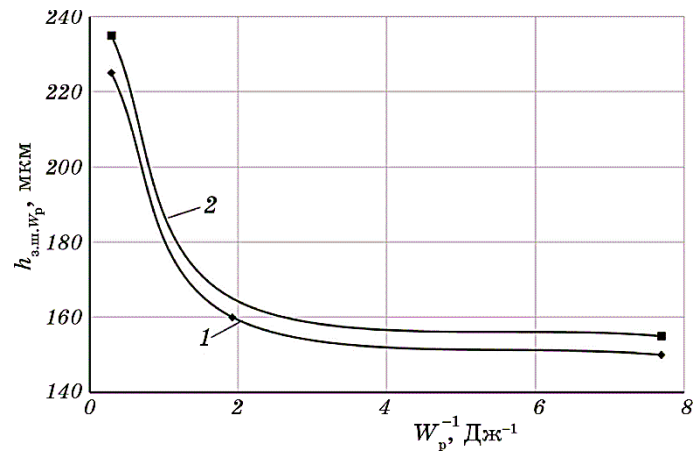


Рис. 2. Залежність товщини зміцненого шару криці 20 (1) і криці 40 (2) від величини оберненої енергії розряду W_p^{-1} .

Fig. 2. The dependence of the thickness of the hardened layer of steel 20 (1) and steel 40 (2) on the reciprocal discharge energy W_p^{-1} .

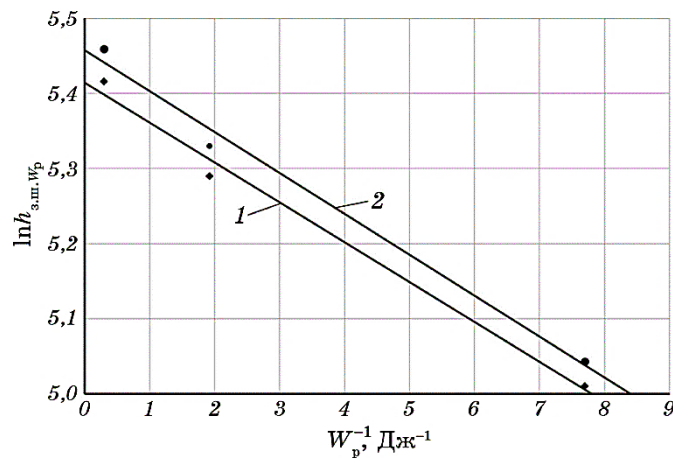


Рис. 3. Залежність логаритму товщини зміцненого шару криці 20 (1) і криці 40 (2) від величини оберненої енергії розряду W_p^{-1} .

Fig. 3. The dependence of the thickness logarithm of the hardened layer of steel 20 (1) and steel 40 (2) on the reciprocal discharge energy W_p^{-1} .

$$\ln h_{\text{з.ш.в.р.}} \propto W_p^{-1}, E. \quad (1)$$

Переходячи від наближеної рівності до точної, маємо

$$\Delta h_{3.ш.W_p} = C e^{-E/W_p}, \quad (2)$$

де $C = \Delta h_{3.ш.W_p \max}$, а $\Delta h_{3.ш.W_p \max}$ — найбільша товщина зміцненого шару. Тоді

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

Залежність (3) можна враховувати як вираз для товщини зміцненого шару залежно від енергії розряду. Якщо в (3)

$$E = W_p, \quad (4)$$

маємо

$$\Delta h_{3.ш.W_p} = \Delta h_{3.ш.W_p \max} e^{-1}. \quad (5)$$

Таким чином, енергія активації E — це фізична величина, яка дорівнює такій енергії розряду W_p , за якої товщина зміцненого шару у e разів менша за максимальну її величину.

Величину E можна визначити константою рівняння для товщини зміцненого шару залежно від енергії розряду. Її розмірністю є [Дж]. Другою константою цього рівняння є $\Delta h_{3.ш.W_p \max}$ — найбільша товщина зміцненого шару.

Найбільшу товщину зміцненого шару $\Delta h_{3.ш.W_p \max}$, — константу рівняння товщини зміцненого шару, — можна визначити за величиною відрізка, що відтинається на осі ординат точкою перетину продовженої прямої графіка залежності логаритму товщини зміцненого шару $\ln h_{3.ш.W_p}$ криці 20 і криці 40 від величини оберненої енергії розряду W_p (рис. 3).

Друга константа рівняння товщини зміцненого шару, — енергія активації E , — визначається, як $E = \operatorname{tg} \alpha$, де α — кут нахилу прямих залежностей $\ln h_{3.ш.W_p}$ від W_p^{-1} .

Розглянемо вплив трудомісткості τ на зміну товщини зміцненого шару за традиційної трудомісткості ЕІЛ і досліджуваної, тобто $\Delta h_{3.ш.} = f(\tau)$.

В таблиці 2 і на рисунку 4 представлено залежності приросту товщини зміцненого шару $\Delta h_{3.ш.\tau}$ криці 20 і криці 40 від трудомісткості τ за наявної технології та першого, другого та третього варіантів ЕІЛ.

В таблиці 3 і на рисунку 5 представлено залежності приросту товщини зміцненого шару $\Delta h_{3.ш.\tau}$ криці 20 і криці 40 від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} за наявної технології та першого, другого

та третього варіантів ЕІЛ для $W_p = 0,13, 0,52$ і $3,4$ Дж.

В таблиці 4 і на рисунку 6 представлено залежності логаритму приросту товщини зміцненого шару $\ln \Delta h_{з.ш.т}$ криці 20 і криці 40 від

ТАБЛИЦЯ 2. Залежність приросту товщини зміцненого шару криці 20 і криці 40 від трудомісткості τ за наявної технології та першого, другого й третього варіантів ЕІЛ для $W_p = 0,13, 0,52$ і $3,4$ Дж.

TABLE 2. The dependence of the increase in the thickness of the hardened layer of steel 20 and steel 40 on the labour intensity τ with the existing technology and the first, second and third ESA-variants for $W_p = 0.13, 0.52$ and 3.4 J.

| Трудомісткість τ , хв./см ² | $\Delta h_{з.ш.т}$, МКМ | Трудомісткість τ , хв./см ² | $\Delta h_{з.ш.т}$, МКМ | Трудомісткість τ , хв./см ² | $\Delta h_{з.ш.т}$, МКМ |
|--|-----------------------------|--|-----------------------------|--|-----------------------------|
| $W_p = 0,13$ Дж | | $W_p = 0,52$ Дж | | $W_p = 3,4$ Дж | |
| Криця 20 | | | | | |
| 1,7 | 0 | 0,8 | 0 | 0,5 | 0 |
| 3,3 | 15,0 | 1,7 | 15,0 | 1,0 | 15,0 |
| 5,0 | 22,5 | 3,3 | 25,0 | 2,0 | 25,0 |
| 10 | 27,5 | 5,0 | 30,0 | 3,3 | 30,0 |
| Криця 40 | | | | | |
| 1,7 | 0 | 0,8 | 0 | 0,5 | 0 |
| 3,3 | 15 | 1,7 | 15 | 1,0 | 15 |
| 5,0 | 25 | 3,3 | 25 | 2,0 | 25 |
| 10 | 30 | 5,0 | 30 | 3,3 | 30 |

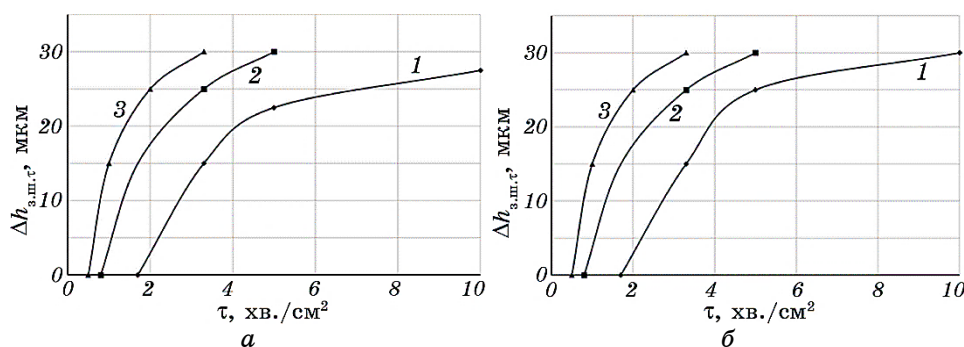


Рис. 4. Залежність приросту товщини зміцненого шару для криці 20 (а) і криці 40 (б) від трудомісткості τ за наявної технології та першого, другого й третього варіантів ЕІЛ для W_p : 1 — 0,13, 2 — 0,52 і 3 — 3,4 Дж.

Fig. 4. The dependence of the increase in the thickness of the hardened layer for steel 20 (a) and steel 40 (b) on the labour intensity τ under the existing technology and the first, second, and third ESA-variants for W_p : 1—0.13, 2—0.52 and 3—3.4 J.

ТАБЛИЦЯ 3. Залежність приросту товщини зміцненого шару криці 20 і криці 40 від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} за наявної технології та першого, другого й третього варіантів ЕІЛ для $W_p = 0,13, 0,52$ і $3,4$ Дж.

TABLE 3. The dependence of the growth of the thickness of the hardened layer of steel 20 and steel 40 on the value of the reciprocal labour intensity τ^{-1} with the existing technology and the first, second and third variants of ESA for $W_p = 0.13, 0.52$ and 3.4 J.

| Обернена трудомісткість τ^{-1} , см ² /хв. | $\Delta h_{з.ш.т}$, мкм | Обернена трудомісткість τ^{-1} , см ² /хв. | $\Delta h_{з.ш.т}$, мкм | Обернена трудомісткість τ^{-1} , см ² /хв. | $\Delta h_{з.ш.т}$, мкм |
|--|--------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|
| $W_p = 0,13$ Дж | | $W_p = 0,52$ Дж | | $W_p = 3,4$ Дж | |
| Криця 20 | | | | | |
| 0,6 | 0 | 1,2 | 0 | 2,0 | 0 |
| 0,3 | 15,0 | 0,6 | 15,0 | 1,0 | 15,0 |
| 0,2 | 22,5 | 0,3 | 25,0 | 0,5 | 25,0 |
| 0,1 | 27,5 | 0,2 | 30,0 | 0,3 | 30,0 |
| Криця 40 | | | | | |
| 0,6 | 0 | 1,2 | 0 | 2,0 | 0 |
| 0,3 | 15 | 0,6 | 15 | 1,0 | 15 |
| 0,2 | 25 | 0,3 | 25 | 0,5 | 25 |
| 0,1 | 30 | 0,2 | 30 | 0,3 | 30 |

величини оберненої трудомісткості τ^{-1} .

Аналіза рисунку 4 уможливило зробити висновок, що між збільшенням приросту товщини зміцненого шару та трудомісткістю τ відбувається експоненційний зв'язок. Так, відмічено, що приріст товщини зміцненого шару зростає зі збільшенням трудомісткості.

З кореляційної залежності приросту товщини зміцненого шару від величини оберненої трудомісткості (див. рис. 5) слідує, що логаритм приросту товщини зміцненого шару (рис. 6) —

$$\ln \Delta h_{з.ш.т} \propto (-\tau)^{-1}. \quad (6)$$

Переходячи від наближеної рівності до точної, маємо

$$\Delta h_{з.ш.т} = C e^{-1/\tau}, \quad (7)$$

де $C = \Delta h_{з.ш.т \max}$ ($\Delta h_{з.ш.т \max}$ — найбільший приріст товщини зміцненого шару). Тоді

$$\Delta h_{з.ш.т} = \Delta h_{з.ш.т \max} e^{-1/\tau}. \quad (8)$$

Залежність (8) можна розглядати як рівняння приросту товщини

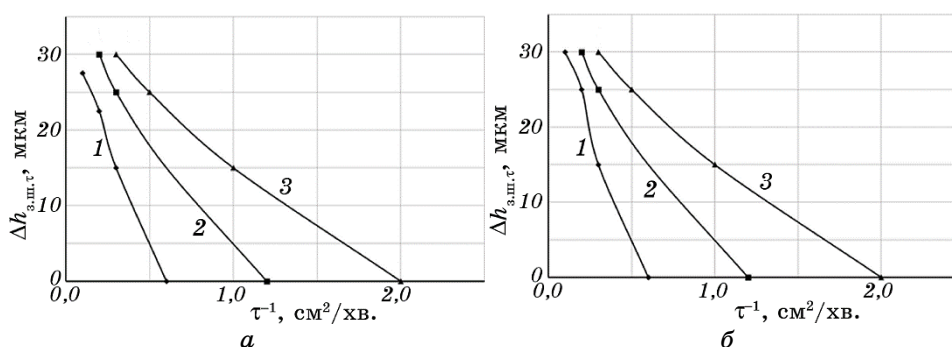


Рис. 5. Залежність приросту товщини зміцненого шару для криці 20 (а) і криці 40 (б) від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} за наявної технології та варіантів ЕІЛ для W_p : 1 — 0,13, 2 — 0,52 і 3 — 3,4 Дж.

Fig. 5. The dependence of the growth in the thickness of the hardened layer for steel 20 (a) and steel 40 (б) on the value of the reciprocal labour intensity τ^{-1} with the existing technology and ESA variants for W_p : 1—0.13, 2—0.52 and 3—3.4 J.

зміцненого шару залежно від трудомісткості. Найбільшу товщину зміцненого шару $\Delta h_{з.ш.τ \max}$, — константу рівняння приросту товщини зміцненого шару, — залежну від трудомісткості, можна визначити за величиною відрізка, що відтинається на осі ординат точкою перетину продовженої прямої графіка залежності логаритму приросту товщини зміцненого шару ($\ln \Delta h_{з.ш.τ}$) криці 20 і криці 40 від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} (рис. 6).

Враховуючи, що загальний приріст товщини зміцненого шару залежить від енергії розряду та трудомісткості, тобто

$$\sum \Delta h_{з.ш.} = f(W_p, \tau),$$

після проведених вище досліджень можна зробити висновок, що

$$\sum \Delta h_{з.ш.} = \Delta h_{з.ш. W_p \max} e^{-E/W_p} + \Delta h_{з.ш.τ \max} e^{-1/\tau}. \quad (9)$$

Залежність (9) можна розглядати як рівняння загального приросту товщини зміцненого шару.

Розглянемо вплив енергії розряду на мікротвердість зміцненого шару, тобто $H_{\mu з.ш. W_p} \cong f(W_p)$.

На рисунках 7 і 8 представлено залежності мікротвердості зміцненого шару $H_{\mu з.ш. W_p}$ криці 20 і криці 40, відповідно, від енергії розряду $W_p = 0,13, 0,52, 3,4$ Дж (а) та величини оберненої енергії розряду $W_p^{-1} = 7,7, 1,9, 0,3$ Дж⁻¹ за наявної технології азотування.

На рисунку 9 представлено залежності логаритму мікротвердос-

ти зміцненого шару $\ln H_{\mu \text{ з.ш.}, W_p}$ криці 20 і криці 40 від величини, оберненої енергії розряду W_p^{-1} .

Розглянемо вплив трудомісткості τ на приріст мікротвердості зміцненого шару, тобто $\Delta H_{\mu \text{ з.ш.}} = f(\tau)$.

ТАБЛИЦЯ 4. Залежність логаритму приросту товщини зміцненого шару криці 20 і криці 40 від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} за наявної технології та першого, другого й третього варіантів ЕІЛ для $W_p = 0,13, 0,52$ і $3,4$ Дж.

TABLE 4. The dependence of the logarithm of the growth of the thickness of the hardened layer of steel 20 and steel 40 on the value of the reciprocal labour intensity τ^{-1} with the existing technology and the first, second and third variants of ESA for $W_p = 0.13, 0.52$ and 3.4 J.

| Обернена трудомісткість $\tau^{-1}, \text{см}^2/\text{хв.}$ | $\ln \Delta h_{\text{з.ш.}, \tau}$ | Обернена трудомісткість $\tau^{-1}, \text{см}^2/\text{хв.}$ | $\ln \Delta h_{\text{з.ш.}, \tau}$ | Обернена трудомісткість $\tau^{-1}, \text{см}^2/\text{хв.}$ | $\ln \Delta h_{\text{з.ш.}, \tau}$ |
|---|------------------------------------|---|------------------------------------|---|------------------------------------|
| $W_p = 0,13$ Дж | | $W_p = 0,52$ Дж | | $W_p = 3,4$ Дж | |
| Криця 20 | | | | | |
| 0,3 | 2,7 | 0,6 | 2,7 | 2 | 2,7 |
| 0,2 | 3,1 | 0,3 | 3,2 | 1 | 3,2 |
| 0,1 | 3,3 | 0,2 | 3,4 | 0,5 | 3,4 |
| Криця 40 | | | | | |
| 0,3 | 2,7 | 0,6 | 2,7 | 2 | 2,7 |
| 0,2 | 3,2 | 0,3 | 3,2 | 1 | 3,2 |
| 0,1 | 3,4 | 0,2 | 3,4 | 0,5 | 3,4 |

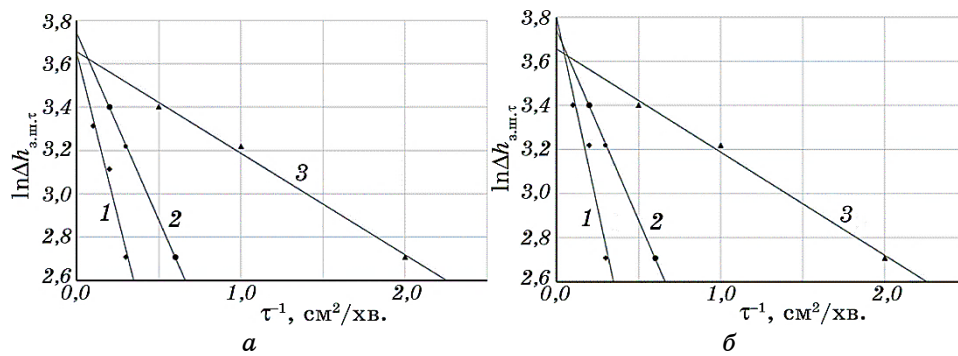


Рис. 6. Залежність $\ln \Delta h_{\text{з.ш.}, \tau}$ для криці 20 (а) і криці 40 (б) від τ^{-1} за наявної технології та варіантів ЕІЛ для W_p : 1 — 0,13, 2 — 0,52 і 3 — 3,4 Дж.

Fig. 6. The dependence $\ln \Delta h_{\text{з.ш.}, \tau}$ of steel 20 (a) and steel 40 (b) on τ^{-1} with the existing technology and ESA variants for W_p : 1—0.13, 2—0.52 and 3—3.4 J.

В таблиці 5 і на рисунку 10 представлено залежності приросту мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu\text{з.ш.}\tau}$ для криці 20 і криці 40 від трудомісткості τ за наявної технології та першого, другого й третього варіантів ЕІЛ для $W_p = 0,13, 0,52, 3,4$ Дж.

В таблиці 6 і на рисунку 11 представлено залежності приросту

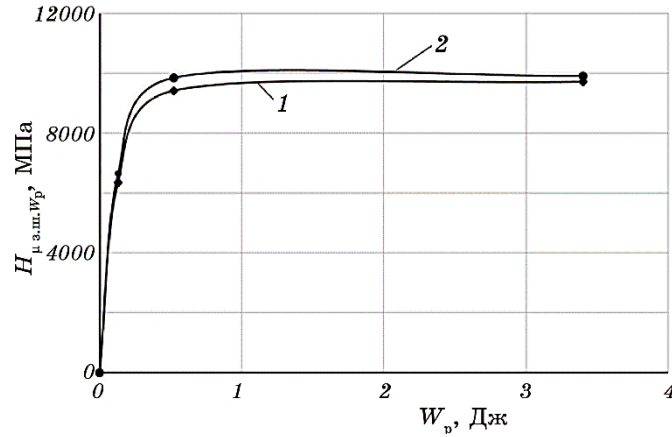


Рис. 7. Залежність мікротвердості зміцненого шару криці 20 (1) і криці 40 (2) від енергії розряду W_p .

Fig. 7. The dependence of the microhardness of the hardened layer of steel 20 (1) and steel 40 (2) on the discharge energy W_p .

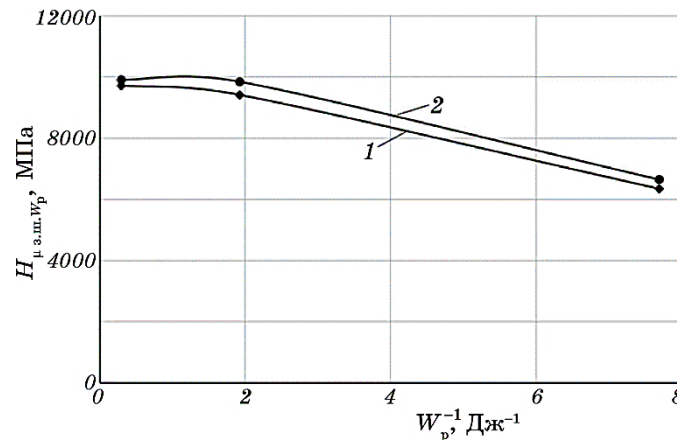


Рис. 8. Залежність мікротвердості зміцненого шару криці 20 (1) і криці 40 (2) від величини оберненої енергії розряду W_p^{-1} .

Fig. 8. The dependence of the hardened layer microhardness of steel 20 (1) and steel 40 (2) on the reciprocal discharge energy W_p^{-1} .

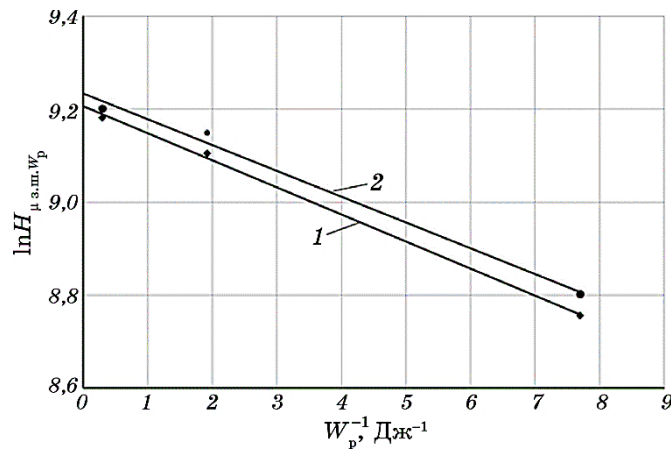


Рис. 9. Залежність логаритму мікротвердості зміцненого шару криці 20 (1) і криці 40 (2) від величини оберненої енергії розряду W_p^{-1} .

Fig. 9. The dependence of the logarithm of microhardness of the strengthened layer for steel 20 (1) and steel 40 (2) on the value of reciprocal discharge energy W_p^{-1} .

мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu з. ш. \tau}$ криці 20 і криці 40 від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} за наявної технології та першого, другого й третього варіантів ЕІЛ для $W_p = 0,13, 0,52, 3,4$ Дж.

В таблиці 7 і на рисунку 12 представлено залежності логаритму приросту мікротвердості зміцненого шару $\ln \Delta H_{\mu з. ш. \tau}$ криці 20 і криці 40 від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} .

Аналіза рисунку 10 дає можливість зробити висновок, що між збільшенням приросту мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu з. ш. \tau}$ і трудомісткістю τ є експоненційний зв'язок. Так, відмічено, що збільшення приросту мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu з. ш. \tau}$ зростає зі збільшенням трудомісткості.

З кореляційної залежності збільшення приросту мікротвердості зміцненого шару від величини оберненої трудомісткості (див. рис. 11) слідує, що логаритм приросту мікротвердості зміцненого шару $\ln \Delta H_{\mu з. ш. \tau}$ (рис. 12) —

$$\ln \Delta H_{\mu з. ш. \tau} \propto \tau^{-1}. \quad (10)$$

Переходячи від наближеної рівності до точної, маємо

$$\Delta H_{\mu з. ш. \tau} = C e^{-1/\tau}, \quad (11)$$

де $C = \Delta H_{\mu з. ш. \tau \max}$ ($\Delta H_{\mu з. ш. \tau \max}$ — найбільший приріст мікротвердос-

ти зміцненого шару). Тоді

$$\Delta H_{\mu \text{ з.ш.}\tau} = \Delta H_{\mu \text{ з.ш.}\tau \text{ max}} e^{-1/\tau}, \quad (12)$$

ТАБЛИЦЯ 5. Залежність приросту мікротвердості зміцненого шару криці 20 і криці 40 від трудомісткості τ за наявної технології та першого, другого й третього варіантів ЕІЛ для $W_p = 0,13, 0,52$ і $3,4$ Дж.

TABLE 5. The dependence of the growth of the microhardness of the hardened layer of steel 20 and steel 40 on the labour intensity τ with the existing technology and the first, second and third variants of ESA for $W_p = 0.13, 0.52$ and 3.4 J.

| Трудомісткість τ , хв./см ² | $\Delta H_{\mu \text{ з.ш.}\tau}$, МПа | Трудомісткість τ , хв./см ² | $\Delta H_{\mu \text{ з.ш.}\tau}$, МПа | Трудомісткість τ , хв./см ² | $\Delta H_{\mu \text{ з.ш.}\tau}$, МПа |
|--|--|--|--|--|--|
| $W_p = 0,13$ Дж | | $W_p = 0,52$ Дж | | $W_p = 3,4$ Дж | |
| Криця 20 | | | | | |
| 1,7 | 0 | 0,8 | 0 | 0,5 | 0 |
| 3,3 | 140 | 1,7 | 109 | 1,0 | 149 |
| 5,0 | 190 | 3,3 | 169 | 2,0 | 189 |
| 10 | 210 | 5,0 | 189 | 3,3 | 199 |
| Криця 40 | | | | | |
| 1,7 | 0 | 0,8 | 0 | 0,5 | 0 |
| 3,3 | 450 | 1,7 | 130 | 1,0 | 170 |
| 5,0 | 480 | 3,3 | 140 | 2,0 | 190 |
| 10 | 490 | 5,0 | 160 | 3,3 | 200 |

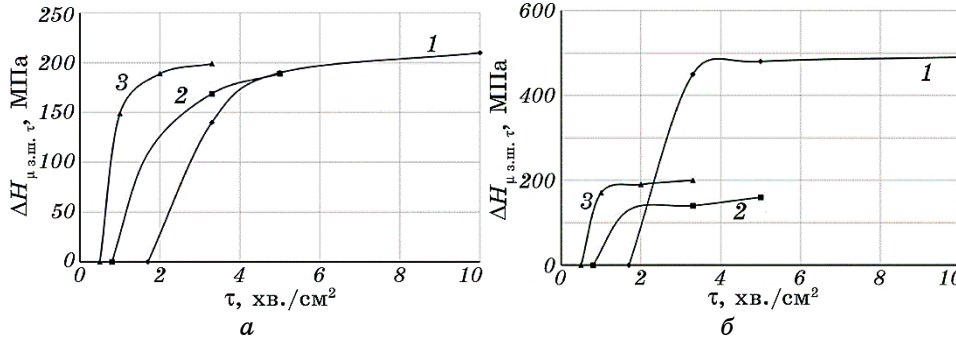


Рис. 10. Залежність приросту мікротвердості зміцненого шару для криці 20 (а) і криці 40 (б) від трудомісткості τ за наявної технології та варіантів ЕІЛ для W_p : 1 — 0,13, 2 — 0,52 і 3 — 3,4 Дж.

Fig. 10. The dependence of the increase in the hardened layer microhardness for steel 20 (a) and steel 40 (b) on the labour intensity τ under the existing technology and ESA variants for W_p : 1—0.13, 2—0.52, 3—3.4 J.

ТАБЛИЦЯ 6. Залежність приросту мікротвердості зміцненого шару криці 20 і криці 40 від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} за наявної технології та першого, другого й третього варіантів ЕІЛ для $W_p = 0,13, 0,52$ і $3,4$ Дж.

TABLE 6. The dependence of the increase in hardened layer microhardness of steel 20 and steel 40 on the value of the reciprocal labour intensity τ^{-1} with the existing technology and the first, second and third variants of ESA for $W_p = 0.13, 0.52, 3.4$ J.

| Обернена трудомісткість τ^{-1} , см ² /хв. | $\Delta H_{\mu з. ш. \tau}$, МПа | Обернена трудомісткість τ^{-1} , см ² /хв. | $\Delta H_{\mu з. ш. \tau}$, МПа | Обернена трудомісткість τ^{-1} , см ² /хв. | $\Delta H_{\mu з. ш. \tau}$, МПа |
|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|--|-----------------------------------|
| $W_p = 0,13$ Дж | | $W_p = 0,52$ Дж | | $W_p = 3,4$ Дж | |
| Криця 20 | | | | | |
| 0,6 | 0 | 1,2 | 0 | 2,0 | 0 |
| 0,3 | 140 | 0,6 | 109 | 1,0 | 129 |
| 0,2 | 170 | 0,3 | 169 | 0,5 | 175 |
| 0,1 | 210 | 0,2 | 189 | 0,3 | 199 |
| Криця 40 | | | | | |
| 0,6 | 0 | 1,2 | 0 | 2,0 | 0 |
| 0,3 | 150 | 0,6 | 130 | 1,0 | 170 |
| 0,2 | 170 | 0,3 | 140 | 0,5 | 190 |
| 0,1 | 190 | 0,2 | 160 | 0,3 | 200 |

Залежність (12) можна розглядати як рівняння приросту мікротвердості зміцненого шару залежно від трудомісткості.

Найбільший приріст мікротвердості зміцненого шару $\Delta H_{\mu з. ш. \tau \max}$ (константу рівняння приросту мікротвердості зміцненого шару) залежно від трудомісткості можна визначити за величиною відрізка, що відтинається на осі ординат точкою перетину продовженої прямої графіка залежності логаритму приросту мікротвердості зміцненого шару $\ln \Delta H_{\mu з. ш. \tau}$ криці 20 і криці 40 від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} (рис. 12).

Враховуючи, що загальний приріст мікротвердості зміцненого шару залежить від енергії розряду та трудомісткості, тобто

$$\sum \Delta H_{\mu з. ш.} = f(W_p, \tau),$$

після проведених вище досліджень можна зробити висновок, що

$$\sum \Delta H_{\mu з. ш.} = \Delta H_{\mu з. ш. W_p \max} e^{-E/W_p} + \Delta H_{\mu з. ш. \tau \max} e^{-1/\tau}. \quad (13)$$

Залежність (13) можна розглядати як рівняння приросту мікротвердості зміцненого шару залежно від параметрів ЕІЛ.

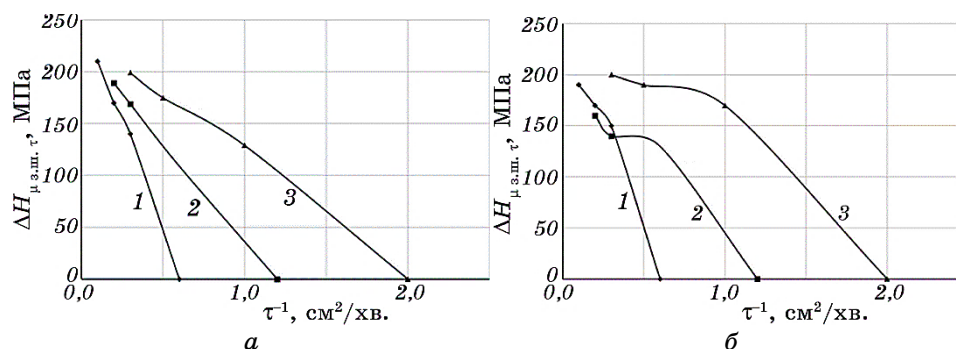


Рис. 11. Залежність приросту мікротвердості зміцненого шару для криці 20 (а) і криці 40 (б) від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} за наявної технології та варіантів ЕІЛ для W_p : 1 — 0,13, 2 — 0,52 і 3 — 3,4 Дж.

Fig. 11. The dependence of the growth of the microhardness of the hardened layer for steel 20 (a) and steel 40 (b) on the value of the reciprocal labour intensity τ^{-1} with the existing technology and ESA variants for W_p : 1—0.13, 2—0.52, 3—3.4 J.

3. ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичні моделі залежності якості поверхонь за азотування методом ЕІЛ з використанням СТНС (рівняння приросту товщини зміцненого шару та рівняння приросту мікротвердості поверхні) від енергетичних і технологічних параметрів обладнання ЕІЛ, а саме, енергії розряду W_p і трудомісткості τ , що уможливує визначати основні технологічні параметри сформованого шару: товщину зміцненого шару $h_{\text{з.ш.}}$ і його мікротвердість $H_{\mu\text{з.ш.}}$.

2. Встановлено методику визначення констант рівняння приросту товщини зміцненого шару (найбільший приріст товщини зміцненого шару в залежності від енергії розряду $\Delta h_{\text{з.ш.}, W_p \text{ max}}$, енергію активації E та найбільший приріст товщини зміцненого шару залежно від трудомісткості оброблення ЕІЛ $\Delta h_{\text{з.ш.}, \tau \text{ max}}$), а також рівняння приросту мікротвердості поверхні (найбільший приріст мікротвердості зміцненого шару залежно від енергії розряду $\Delta H_{\mu\text{з.ш.}, W_p}$, енергію активації E та найбільший приріст мікротвердості зміцненого шару залежно від трудомісткості оброблення ЕІЛ $\Delta H_{\mu\text{з.ш.}, \tau}$).

Результати одержано за підтримки Міністерства освіти і науки України (номери державної реєстрації НДР: №0124U000539, №0125U001429), а також Національного фонду досліджень України (проект №2025.07/0115).

ТАБЛИЦЯ 7. Залежність логаритму приросту мікротвердості зміцненого шару криці 20 і криці 40 від величини оберненої трудомісткості τ^{-1} за наявної технології та першого, другого й третього варіантів ЕІЛ для $W_p = 0,13, 0,52, 3,4$ Дж.

TABLE 7. The dependence of the logarithm of the growth of the hardened layer microhardness of steel 20 and steel 40 on the value of the reciprocal labour intensity τ^{-1} with the existing technology and the first, second and third variants of ESA for $W_p = 0.13, 0.52, 3.4$ J.

| Обернена трудомісткість τ^{-1} , см ² /хв. | $\ln \Delta H_{\mu\text{з.ш.}\tau}$ | Обернена трудомісткість τ^{-1} , см ² /хв. | $\ln \Delta H_{\mu\text{з.ш.}\tau}$ | Обернена трудомісткість τ^{-1} , см ² /хв. | $\ln \Delta H_{\mu\text{з.ш.}\tau}$ |
|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| $W_p = 0,13$ Дж | | $W_p = 0,52$ Дж | | $W_p = 3,4$ Дж | |
| Криця 20 | | | | | |
| 0,3 | 4,94 | 0,6 | 5,34 | 1 | 4,86 |
| 0,2 | 5,25 | 0,3 | 5,59 | 0,5 | 5,16 |
| 0,1 | 5,35 | 0,2 | 5,67 | 0,3 | 5,29 |
| Криця 40 | | | | | |
| 0,3 | 6,11 | 0,6 | 4,87 | 1 | 5,14 |
| 0,2 | 6,17 | 0,3 | 4,94 | 0,5 | 5,25 |
| 0,1 | 6,19 | 0,2 | 5,08 | 0,3 | 5,3 |

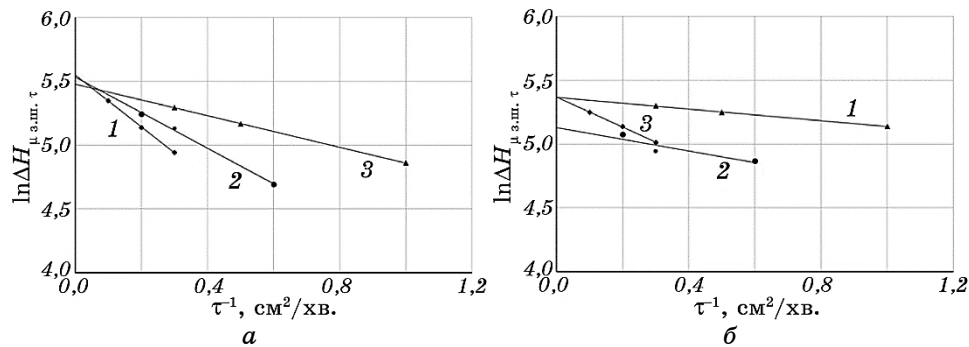


Рис. 12. Залежність $\ln \Delta H_{\mu\text{з.ш.}\tau}$ для криці 20 (а) і криці 40 (б) від τ^{-1} за наявної технології та варіантів ЕІЛ для W_p : 1 — 0,13, 2 — 0,52 і 3 — 3,4 Дж.

Fig. 12. The dependence $\ln \Delta H_{\mu\text{з.ш.}\tau}$ of steel 20 (а) and steel 40 (б) on τ^{-1} with the existing technology and ESA variants for W_p : 1—0.13, 2—0.52, 3—3.4 J.

ВНЕСОК АВТОРІВ

О. П. Гапонова розробила концепцію дослідження, розробила методологію, проаналізувала результати та підготувала рукопис. Н. В. Тарельник провела дослідження, обробила дані та зробила

свій внесок у написання рукопису. О. В. Семерня виконала візуалізацію та брала участь у проведенні дослідження. Усі автори схвалили остаточну версію рукопису.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, N. V. Tarelnyk, T. M. Volina, V. M. Zubko, M. Y. Dumanchuk, O. M. Lavrenko, M. A. Mikulina, A. O. Dotsenko, O. Ye. Bilyi, S. S. Shevchenko, S. G. Bondarev, and O. V. Semernya, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **47**, No. 10: 1061 (2025) (in Ukrainian).
2. T. M. Radchenko, V. A. Tatarenko, and H. Zapolsky, *Solid State Phenomena*, **138**: 283 (2008).
3. S. Pylypaka, V. Nesvidomin, T. Volina, L. Sirykh, and L. Ivashyna, *Agricultural Eng.*, **62**, No. 3: 79 (2020).
4. T. Volina, S. Pylypaka, A. Rebrii, O. Pavlenko, and Ya. Kremets, *Advanced Manufacturing Processes II* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, A. Grabchenko, I. Pavlenko, M. Edl, I. Kuric, and P. Dasic) (Springer: 2021), p. 237.
5. S. Pylypaka, T. Volina, M. Mukvich, G. Efremova, and O. Kozlova, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III* (Eds. V. Ivanov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, J. Machado, and M. Edl) (Springer: 2021), p. 63.
6. B. Antoszewski, S. Tofil, M. Scendo, and W. Tarelnik, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012036 (2017).
7. I. P. Shatskyi, V. V. Perepichka, and L. Ya. Ropyak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 1: 69 (2020) (in Ukrainian).
8. M. S. Storozhenko, A. P. Umanskii, A. E. Terentiev, and I. M. Zakiev, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, Nos. 1–2: 60 (2017).
9. O. Umanskyi, M. Storozhenko, G. Baglyuk, O. Melnyk, V. Brazhevsky, O. Chernyshov, O. Terentiev, Yu. Gubin, O. Kostenko, and I. Martsenyuk, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **59**, Nos. 7–8: 434 (2020).
10. M. Bembenek, P. Prysyzhnyuk, T. Shihab, R. Machnik, O. Ivanov, and L. Ropyak, *Mater.*, **15**, No. 14: 5074 (2022).
11. B. O. Trembach, M. G. Sukov, V. A. Vynar, I. O. Trembach, V. V. Subbotina, O. Yu. Rebrov, O. M. Rebrova, and V. I. Zakiev, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 4: 493 (2022).
12. A. D. Pogrebnyak, A. A. Bagdasaryan, P. Horodek, V. Tarelnyk, V. V. Buranich, H. Amekura, N. Okubo, N. Ishikawa, and V. M. Beresnev, *Mater. Lett.*, **303**: 130548 (2021).
13. O. P. Gaponova, B. Antoszewski, V. B. Tarelnyk, P. Kurp, O. M. Myslyvchenko, and N. V. Tarelnyk, *Materials*, **14**: 6332 (2021).
14. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**, Nos. 5–6: 385 (2017).
15. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Proc. Eng.*, **39**: 157 (2012).
16. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, N. S. Yevtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018).
17. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Proc. Eng.*, **39**: 148 (2012).

18. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, N. Tarelnyk, and A. Kozachenko, *Mater. Sci. Forum*, **968**: 131 (2019).
19. O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik, V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, M. Dovzhyk, A. Belous, and O. Vasilenko, *Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings* (Eds. A. D. Pogrebnyak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.
20. V. Tarelnyk and V. Martsynkovskyy, *Appl. Mech. Mater.*, **630**: 397 (2014).
21. V. Tarelnyk, O. Gaponova, V. Martsynkovskyy, A. Kutakh, and G. Golovchenko, *Proc. of the 2021 IEEE 11th Int. Conf. 'Nanomaterials: Applications and Properties' (NAP) (Sept. 5–11, 2021)* (Odessa: 2021), p. 1.
22. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and M. Dumanchuk, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II* (Eds. V. Ivanov, J. Trojanowska, J. Machado, O. Liaposhchenko, J. Zajac, I. Pavlenko, M. Edl, D. Perakovic) (Springer: 2020), p. 216.
23. O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, B. Antoszewski, O. M. Myslyvchenko, and J. Hoffman, *Mater.*, **15**, Iss. 17: 6085 (2022).
24. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskii, Yu. I. Semirnenko, N. V. Tarelnyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surf. Eng. Applied Electrochem.*, **57**: 173 (2021).