

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 формування структури поверхневих шарів крицевих деталей під час азотування методом електроіскрового легування (ЕІЛ). І. Оцінка впливу продуктивності на параметри якості поверхневих шарів крицевих деталей під час азотування методом ЕІЛ

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова^{1,2}, Н. В. Тарельник, Т. М. Воліна³,
В. М. Зубко, М. Ю. Думанчук, О. М. Лавренко, М. О. Мікуліна,
А. О. Доценко, О. Є. Білий, С. С. Шевченко⁴, С. Г. Бондарев,
О. В. Семерня

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

¹*Сумський державний університет,
вул. Харківська, 116; 40007 Суми, Україна*

²*Інститут фундаментальних технологічних досліджень ПАН,*

Corresponding author: Vyacheslav Borysovych Tarelnyk
E-mail: tarelnik@i.ua

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

¹*Sumy State University,
116 Kharkivska Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

²*Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences,
5B Pawińskiego Str., 02-016 Warsaw, Poland*

³*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
15 Heroyiv Oborony Str., UA-03041 Kyiv, Ukraine*

⁴*G. E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering, N.A.S. of Ukraine,
15 General Naumov Str., 03164 Kyiv, Ukraine*

Citation: V. B. Tarelnyk, O. P. Haponova, N. V. Tarelnyk, T. M. Volina, V. M. Zubko, M. Yu. Dumanchuk, O. M. Lavrenko, M. A. Mikulina, A. O. Dotsenko, O. Ye. Bilyi, S. S. Shevchenko, S. G. Bondarev, and O. V. Semernya, Research of Influence of Productivity on Structural Formation of Surface Layers of Steel Details during Nitriding by Means of the Electrospark Alloying (ESA) Method. I. Evaluation of the Impact of Productivity on the Quality Parameters of the Surface Layers of Steel Parts during Nitriding by the ESA Method, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **47**, No. 10: 1061–1081 (2025) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.47.10.1061](https://doi.org/10.15407/mfint.47.10.1061)

© Publisher PH ‘Akademperiodyka’ of the NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0>)

вул. Павінського, 5В; 02-016 Варшава, Польща

³*Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15; 03041 Київ, Україна*

⁴*Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України,
вул. Генерала Наумова, 15; 03164 Київ, Україна*

В статті обґрунтовано важливість і актуальність проблеми підвищення параметрів якості поверхневих шарів відповідальних деталей динамічного обладнання (насосних і компресорних агрегатів, турбін, центрифуг і т.ін.), які лімітують їхню надійність і довговічність. Підкреслено, що під час дослідження параметрів якості поверхневих шарів, синтезованих технологіями електроіскрового легування (ЕІЛ), задля визначення впливу енергетичних параметрів обладнання на їхнє структуроутворення основна увага приділялася впливу енергії розряду W_p , а величина продуктивності оброблення Q [см²/хв.] практично не враховувалася. Щоб оцінити вплив продуктивності на параметри якості одержаних покриттів, в дослідженнях використовувалася продуктивність приблизно у два, три й чотири рази менша за традиційну, тобто час оброблення τ одиниці площі (трудомісткість процесу ЕІЛ) збільшувався у два, три й чотири рази. Проведено дослідження особливостей формування мікроструктури, розподілу мікротвердості в покритті, проаналізовано зміну шерсткості. В результаті мікроструктурної аналізи обробленої поверхні після азотування криць 20 і 40 методом ЕІЛ з використанням азотовмісного спеціального технологічного насичувального середовища встановлено, що для всіх варіантів параметра Q структура покриття складається з трьох ділянок — «білого шару», дифузійної зони й основного металу. Водночас зі збільшенням W_p зростають товщини «білого» шару та дифузійної (перехідної) зони, збільшуються мікротвердість, шерсткість і суцільність поверхні. Зі збільшенням параметра τ зростають товщини «білого» шару та дифузійної (перехідної) зони, збільшуються мікротвердість і суцільність поверхні. Із заміною криці 20 на крицю 40 незначно збільшуються товщини «білого» шару й дифузійної зони та мікротвердість поверхні.

Ключові слова: електроіскрове легування, покриття, матеріал електроди, криця, товщина шару, шерсткість, суцільність.

The importance and relevance of the problem of improving the quality parameters of surface layers of responsible parts of dynamic equipment (pump and compressor units, turbines, centrifuges, etc.), which limit their reliability and durability, are substantiated in the article. As emphasized, during the investigation of the quality parameters of surface layers synthesized by means of the electrospark alloying (ESA) technologies, during determining the influence of the energy parameters of the equipment on their structure formation, the main attention is paid to the influence of the energy discharge W_p , but the value of the processing productivity Q [cm²/min] is not practically taken into account. For evaluating the impact of productivity on the quality parameters of obtained coatings, the productivity is used in the research approximately two, three, and four times as less than the traditional one, i.e., the processing time τ of a unit of area (the labour intensity of the ESA pro-

cess) is increased by two, three, and four times. Investigation of the features of microstructure formation and distribution of microhardness in the coating is carried out, and changes in roughness are analysed. As a result of the microstructural analysis of the treated surface after nitriding of steels 20 and 40 by the ESA method using a nitrogen-containing special technological saturating medium, it is revealed that, for all variants of the parameter Q , the structure consists of three areas: the 'white layer', the diffusion zone, and the base metal. At the same time, with an increase in W_p , the thicknesses of the 'white' layer and the diffusion (transitional) zone increase, and the microhardness, roughness, and integrity of the surface increase too. As the parameter τ increases, the thicknesses of the 'white' layer and the diffusion (transitional) zone increase, and the microhardness and integrity of the surface increase too. During replacing steel 20 with steel 40, the thicknesses of the 'white' layer and the diffusion zone, as well as the microhardness of the surface, increase slightly.

Key words: electrospark alloying, coating, electrode material, steel, layer thickness, roughness, integrity.

(Отримано 25 грудня 2023 р.; остаточн. варіант — 20 червня 2024 р.)

1. ВСТУП

У зв'язку зі зростанням науково-технічного прогресу має підвищуватись якість відповідальних деталей динамічного обладнання (насосних і компресорних агрегатів, турбін, центрифуг і т.ін.), які лімітують їхню надійність і довговічність. В процесі підвищення їхніх режимних параметрів (швидкості, температури, тиску, впливу радіації) збільшуються вимоги як до в'язкості та пластичності їхньої основи, так і до захисних властивостей поверхневих шарів. Наприклад, з появою конструкції імпульсних ущільнень із зазором, що саморегулюється, які є найбільш перспективними вузлами для ущільнення валів насосів атомних електростанцій (АЕС) з високими параметрами [1–3], у технологів-трибологів виникають проблеми з забезпеченням експлуатаційних властивостей їхніх робочих поверхонь тертя [4].

На сьогодні є велика кількість технологій, які здатні поліпшити параметри якості поверхонь: підвищити твердість і зносостійкість шляхом нанесення металокерамічних покриттів [5–7], нагнітання покриттів з композиційних матеріалів [8, 9], шляхом відцентрового армування карбідом Вольфраму [10], з шарами оксиду Алюмінію [11–13], хромуванням у проточному електроліті [14] тощо. Крім того, серед технологій, спрямованих на забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь і, як наслідок, на підвищення надійності та довговічності деталей, слід виділити такі, що направлені ще на стадії проектування на забезпечення потрібної геометрії поверхневого шару виробу. Так, ряд робіт присвячено дослідженню

відцентрових розсіювальних апаратів [15–17], гравітаційного або самопливного транспорту [18], циліндричних поверхонь деталей [19].

Перспективним шляхом підвищення зносостійкості поверхонь пар тертя можуть бути багатошарові покриття, що поєднують у собі змащувальні й антизношувальні властивості [20]. Такими покриттями можуть бути комбіновані покриття, синтезовані методом електроіскрового легування, що поєднують у собі тверді зносостійкі та м'які антифрикційні матеріяли [21–25].

Таким чином, нові композиційні матеріяли поєднують захисні властивості покриттів із механічною міцністю основи. Деталі, що виготовляються з більш дешевого й легко оброблюваного матеріялу основи та мають поверхневий шар, одержаний шляхом застосування прогресивної, малоенергоємної й екологічно безпечної технології, не поступаються, а часто за окремими показниками (довговічність, вартість, витрата металорізального інструменту й оснастки, можливість легування певними елементами та ін.) перевершують деталі, виготовлені з литого матеріялу. Таким чином, технологічні рішення, спрямовані на створення принципово нових матеріялів, що мають підвищену поверхневу зносостійкість, відносно високу міцність і в'язкість [26–29], є актуальними та затребуваними.

Особливе місце серед технологій, використовуваних для підвищення показників якості поверхонь деталей, займає хемікотермічне оброблення (ХТО) [30–32], яке поєднує в собі цементацію, азотування, нітроцементацію та ряд інших методів.

Одним із затребуваних методів ХТО є алітування [33–35], яке забезпечує залізовуглецевим столам підвищену жужелетривкість, опір атмосферній корозії та ряд інших корисних властивостей. Крім того, комплексні алюмінієві покриття [36] характеризуються високою температурою топлення, низькою густиною, високим модулем пружности, жароміцністю, стійкістю до окиснення і займання. Незважаючи на позитивні результати, технологія алітування має ряд недоліків, притаманних ХТО.

Багато робіт присвячено опромінюванню алюмінієвих стопів імпульсними електронними жмутами для поліпшення якості покриттів [37, 38] і способів їхнього нанесення [39–41].

З появою нових технологій підвищення параметрів якості поверхонь деталей машин методом ЕІЛ із застосуванням спеціальних технологічних насичувальних середовищ (СТНС), використання яких дає змогу одержувати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними та трибологічними властивостями на нанорівні. Із ЕІЛ, застосовуючи СТНС, можна одержати однокомпонентні покриття: алітувальні [42–44], цементувальні [45–48], азотувальні [49] та багатокомпонентні [50–52].

Враховуючи, що за традиційного ХТО найбільш позитивні ре-

зультати (твердість і глибина зміцненого шару) за азотування забезпечують високолеговані та високовартісні криці, до складу яких входить Алюміній (38Х2МЮА, 38ХМЮА, 38Х2ЮА, 38ХВФЮ, 38Х2Ю, 38Х2Ю), для ЕІЛ із застосуванням СТНС можна використовувати менш дорогі вуглецеві та хромисті криці (40, 45, 50, 40Х та ін.), попередньо леговані методом ЕІЛ АІ.

Таким чином, використовуючи нанесення на зміцнювану поверхню СТНС, що містять азотовмісні компоненти, можна проводити азотування поверхонь деталей із криці, а попереднє ЕІЛ оброблюваної поверхні Алюмінієм може бути корисним для підвищення параметрів якості їхнього поверхневого шару [52].

Аналіза робіт стосовно азотування, нітроцементзації та цементзації поверхонь із криці методом ЕІЛ як компактними електродами-інструментами, так і з застосуванням СТНС показала, що параметри якості сформованих поверхневих шарів досліджували переважно залежно від основного параметра роботи обладнання — енергії розряду W_p . Водночас величина продуктивності оброблення Q , тобто кількість 100%-обробленої площі в одиницю часу [$\text{см}^2/\text{хв.}$], приймалася згідно з рекомендаціями табл. 1. Також відомо, що для більшості матеріалів товщина сформованого на катоді (деталі) шару обмежена.

В роботі [53] стверджується, що в процесі ЕІЛ з часом уповільнюється та припиняється осадження матеріалу аноди, а не ерозія та його викид. Це пов'язують з утворенням оксидів і нітридів у поверхневому шарі, які перешкоджають взаємочині порцій матеріалу аноди, які знову надходять на катоду, з раніше нанесеними та призводять до окрихчування та руйнування сформованого шару.

Як наслідок вичерпання енергоємності металу за багаторазової деформації в контакт з поверхнево-активним розтопом, динаміка формування поверхневих шарів характеризується тим, що інтенсивність перенесення є максимальною в перші хвилини процесу; далі вона зменшується і зрештою, при певних значеннях W_p перенесення змінюється ерозією вже нанесеного шару, а приріст стає негативним.

Слід відмітити, що наявність між анодою та катодою СТНС переважно в пастоподібному (рідкому) стані приводить до зміни величини електроіскрового розряду, і процес масоперенесення значно відрізняється від традиційного.

ТАБЛИЦЯ 1. Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду.

TABLE 1. Dependence of ESA productivity on energy discharge.

Енергія розряду W_p , Дж	0,52	1,3	2,6	4,6	6,8
Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв.}$	1,0–1,3	1,3–1,5	1,5–2,0	2,0–2,5	2,5–3,0

Фізико-хемічна природа структуроутворення поверхневого шару за ЕІЛ зумовлює великі труднощі вибору технологічних параметрів процесу. Тому є наукова та практична доцільність у проведенні досліджень впливу продуктивності ЕІЛ в більшому діапазоні на параметри якості сформованого поверхневого шару за використання компактних електрод-інструментів із застосуванням СТНС.

Таким чином, метою даної роботи є підвищення експлуатаційних показників деталей із криці шляхом удосконалення технології азотування поверхонь із криці методом ЕІЛ з використанням СТНС за рахунок дослідження впливу на параметри якості поверхневих шарів трудомісткості процесу.

2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Щоб оцінити вплив продуктивності на параметри якості одержаних покриттів, нами в подальших дослідженнях використовувалася продуктивність приблизно у два, три та чотири рази менша, тобто час оброблення τ одиниці площі (трудомісткість процесу ЕІЛ) збільшувався у два, три та чотири рази (табл. 2).

Враховуючи [52], кращі результати визначено за ЕІЛ алюмінійовою електродою-інструментом і з $W_p = 3,40$ Дж; тому в подальших дослідженнях використовували зазначений режим оброблення.

Процес азотування методом ЕІЛ проводили наступним чином. Спочатку поверхню зразків із криць 20 і 40 розміром $15 \times 15 \times 8$ мм легували Алюмінієм на установці ЕІЛ моделю «Елітрон-52А» із енергією розряду $W_p = 3,40$ Дж за допомогою електродо-інструменту з алюмінійового дроту $\varnothing 3,0$ мм марки АД згідно з ГОСТ 14838-78. Потім на леговану Алюмінієм поверхню наносили СТНС у вигляді пастоподібної суміші, приготовленої замішуванням $\cong 90\%$ порошку сечовини у вазеліні (10%), і, не чекаючи висихання, проводили ЕІЛ електродою-інструментом із криць 20 і 40 відповідно для зразків з ідентичних матеріалів із $W_p = 0,13, 0,52$ й $3,40$

ТАБЛИЦЯ 2. Залежність продуктивності ЕІЛ від енергії розряду.

TABLE 2. Dependence of ESA productivity on energy discharge.

Енергія розряду W_p , Дж		0,13	0,52	3,4
Продуктивність Q , см ² /хв.	перший варіант	$\cong 0,3$	$\cong 0,6$	$\cong 1,0$
	другий варіант	$\cong 0,2$	$\cong 0,3$	$\cong 0,5$
	третій варіант	$\cong 0,1$	$\cong 0,2$	$\cong 0,3$
Трудомісткість τ , хв./см ²	перший варіант	$\cong 3,3$	$\cong 1,7$	$\cong 1,0$
	другий варіант	$\cong 5,0$	$\cong 3,3$	$\cong 2,0$
	третій варіант	$\cong 10,0$	$\cong 5,0$	$\cong 3,3$

Дж і продуктивністю згідно з табл. 2.

Для проведення металографічних досліджень підготовлених зразків використовували оптичний мікроскоп «Неофот-2», за допомо-

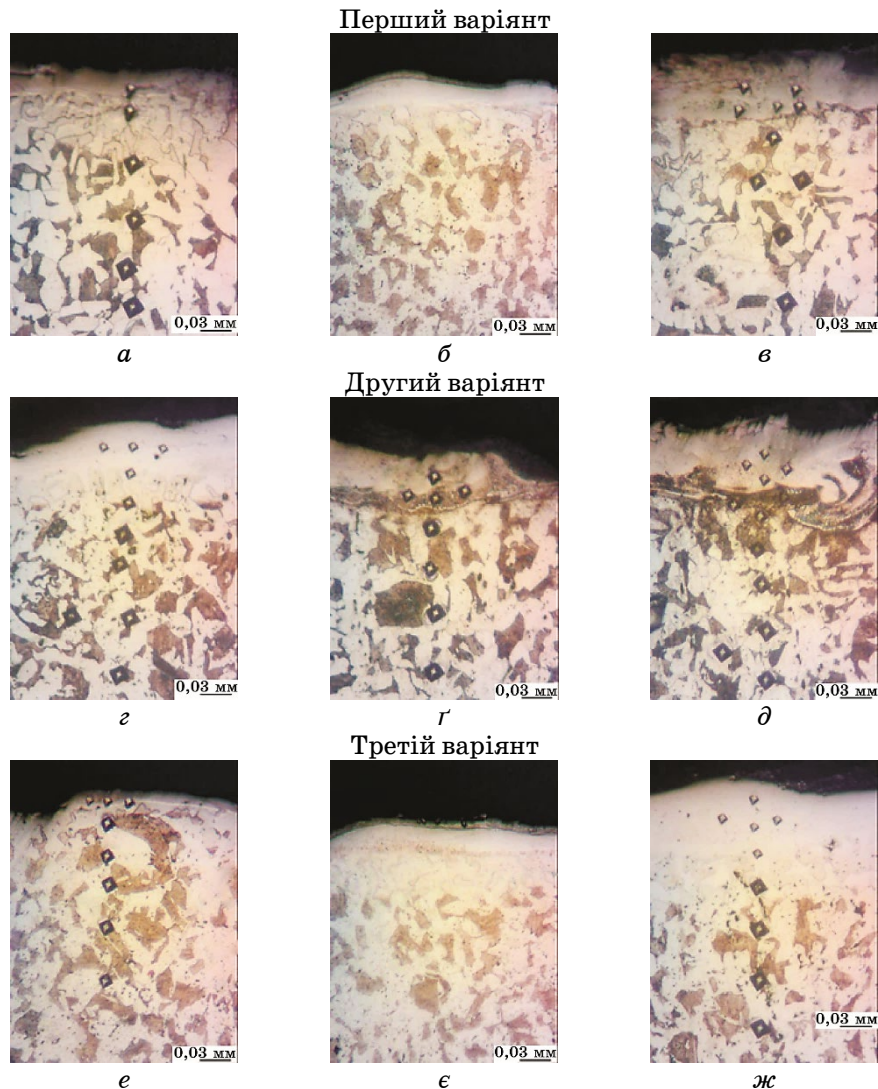


Рис. 1. Мікроструктури поверхневого шару зразка криці 20 після азотування методом ЕІЛ з $W_p = 0,13, 0,52$ й $3,40$ Дж і продуктивністю згідно з першим, другим і третім варіантами відповідно до табл. 2.

Fig. 1. Microstructures of the surface layer of steel 20 sample after nitriding by the ESA method with $W_p = 0.13, 0.52$ and 3.40 J and productivity, according to the first, second, and third variants according to the Table 2.

гою якого оцінювали якість шару, його суцільність, товщину та будову зон підшару — дифузійної зони та зони термічного впливу.

Також проводили дюрOMETричну аналізу розподілу мікротвердості в поверхневому шарі та по глибині шліфу від поверхні.

Мірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавлюванням алмазної піраміди під навантаженням у 0,05 Н згідно з ГОСТ 9450-76.

На всіх етапах оброблення вимірювали шерсткість поверхні на приладі профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр». Результати фіксували за допомогою спеціальної приставки.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На рисунку 1 показано мікроструктури поверхневого шару зразка криці 20 після азотування методом ЕІЛ з $W_p = 0,13, 0,52$ й $3,40$ Дж і продуктивністю згідно з першим, другим і третім варіантами відповідно до табл. 2.

Мікроструктурна аналіза показала, що покриття за усіх трьох варіантів (див. табл. 2) складається з трьох ділянок — «білого шару», дифузійної зони й основного металу. Водночас за використання кожного з варіантів зі збільшенням енергії розряду збільшуються товщини «білого» шару та дифузійної (перехідної) зони.

ТАБЛИЦЯ 3. Результати дюрOMETричної аналізи поверхневих шарів криці 20.

TABLE 3. Results of durometric analysis of surface layers of steel 20.

Енергія розряду, Дж	Розподіл мікротвердості H_n у поверхневому шарі по мірі поглиблення із кроком мірювання у 30 мкм										
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	340
Криця 20											
Перший варіант											
0,13	6490	5650	4800	2750	2100	1700	1700				
0,52	9530	8850	8300	7450	5750	3200	2200	1700	1700		
3,4	9870	9250	8560	7950	6850	5520	3160	2500	2100	1700	1700
Другий варіант											
0,13	6540	5930	5350	4530	2720	2000	1700	1700			
0,52	9890	9130	8540	7530	5910	4500	3400	2300	1700	1700	
3,4	9910	9340	8790	7980	6420	5150	3650	2450	1950	1700	1700
Третій варіант											
0,13	6560	5590	4810	3940	2710	1700	1700				
0,52	9900	9350	8670	7650	6220	4650	3460	2460	2120	1700	1700
3,4	9920	9550	8650	7550	6520	5250	3740	2950	2240	1700	1700

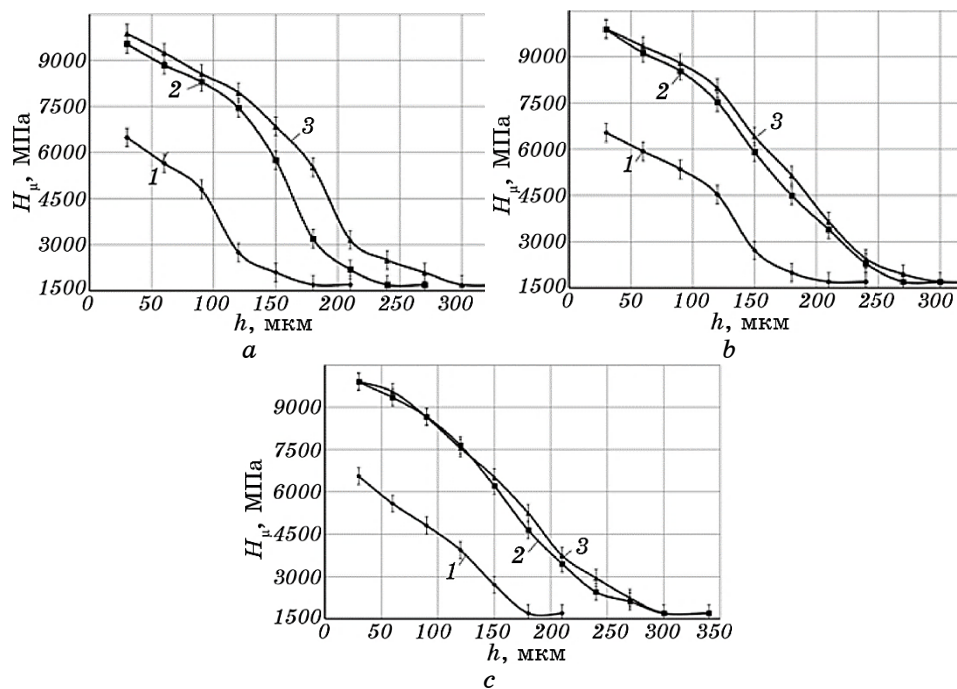


Рис. 2. Розподіл мікротвердості по глибині шару поверхні зразка криці 20 після азотування методом ЕІЛ, де $a, б, в$ — перший, другий і третій варіанти зміни продуктивності відповідно. На графіку: 1, 2 і 3 — ЕІЛ за енергій розряду $W_p = 0,13, 0,52$ і $3,4$ Дж відповідно.

Fig. 2. Distribution of microhardness along the depth of the surface layer of steel 20 sample after nitriding by the ESA method, where $a, б, в$ are the first, second, and third variants of changing productivity, respectively. In the graph: 1, 2, and 3—ESA at discharge energies $W_p = 0.13, 0.52$, and 3.4 J, respectively.

Крім цього, зі зменшенням продуктивності ЕІЛ збільшуються мікротвердість, шерсткість і суцільність поверхні.

У таблиці 3 та на рис. 2 представлено розподіл мікротвердості по мірі віддалення від поверхні вглиб криці 20 згідно з рис. 1.

Результати мірвання товщини, мікротвердості та суцільності «білого шару», а й величини шерсткості поверхні зразків з криці 20 після азотування методом ЕІЛ з використанням СТНС зведено до табл. 4.

На рисунках 3–6 показано залежності товщини зміцненого шару (a) і мікротвердості ($б$) «білого» шару від енергії розряду та трудомісткості за азотування методом ЕІЛ криці 20 для наявної технології (рис. 3) і першого (рис. 4), другого (рис. 5) та третього (рис. 6) варіантів оброблення.

ТАБЛИЦЯ 4. Параметри якості азотованих шарів, одержаних методом ЕІЛ, на зразках із криці 20.**TABLE 4.** Parameters of the quality of nitrided layers obtained by the ESA method on steel 20 samples.

Енергія розряду, Дж	Продуктивність Q , $\text{см}^2/\text{хв.}$	Трудомісткість τ , $\text{хв.}/\text{см}^2$	Товщина зміцненого шару, мкм	Мікротвердість, МПа		Шерсткість Ra , мкм	Суцільність «білого» шару, %
				«білого» шару	перехідної зони		
Наявна технологія							
0,13	0,6	1,7	150,0	6350	4350	1,1	70
0,52	1,2	0,8	160,0	9421	4550	1,5	80
3,40	2,0	0,5	225,0	9721	4870	6,5	90
Перший варіант							
0,13	0,3	3,3	165,0	6490	4750	1,0	80
0,52	0,6	1,7	175,0	9530	5750	1,6	90
3,40	1,0	1,0	240,0	9870	6850	6,4	95
Другий варіант							
0,13	0,2	5,0	172,5	6540	4810	1,1	100
0,52	0,3	3,3	185,0	9890	5910	1,5	100
3,40	0,5	2,0	250,0	9910	6420	6,3	100
Третій варіант							
0,13	0,1	10,0	177,5	6560	5350	1,0	100
0,52	0,2	5,0	190,0	9900	6220	1,4	100
3,40	0,3	3,3	255,0	9920	6520	6,2	100

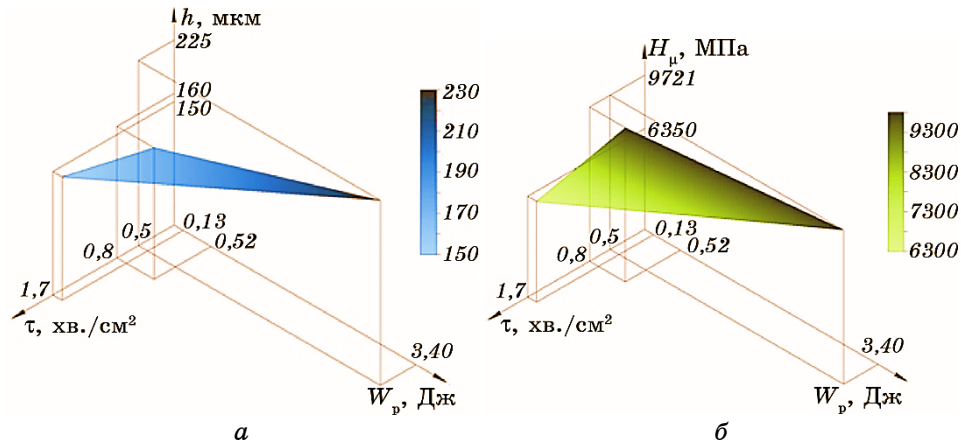


Рис. 3. Залежності товщини зміцненого шару (а) та мікротвердості (б) «білого» шару від енергії розряду й трудомісткості за азотування методом ЕІЛ криці 20 за наявною технологією.

Fig. 3. Dependences of the thickness of the strengthened layer (a) and the microhardness (b) of the 'white' layer on the discharge energy and labour intensity during nitriding by the ESA method of steel 20 for the available technology.

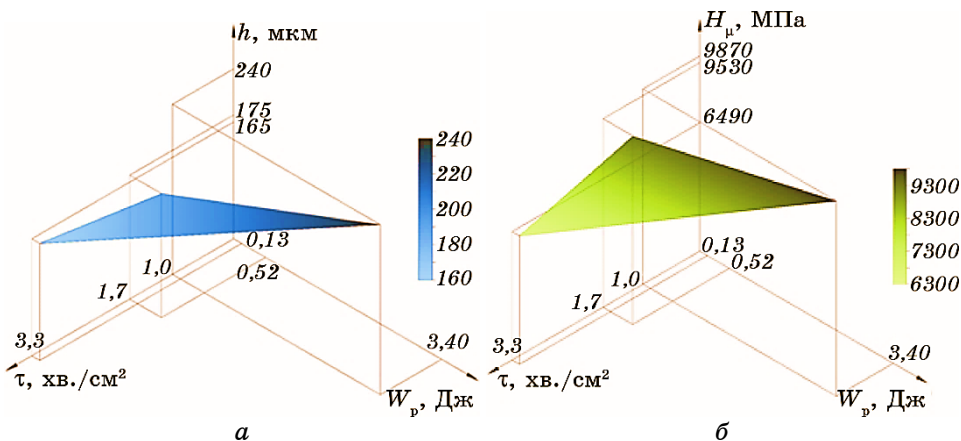


Рис. 4. Залежності товщини зміцненого шару (а) та мікротвердості (б) «білого» шару від енергії розряду й трудомісткості за азотування методом ЕІЛ криці 20 за першим варіантом оброблення.

Fig. 4. Dependences of the thickness of the strengthened layer (a) and the microhardness (b) of the 'white' layer on the discharge energy and labour intensity during nitriding by the ESA method of steel 20 for the 1st processing variant.

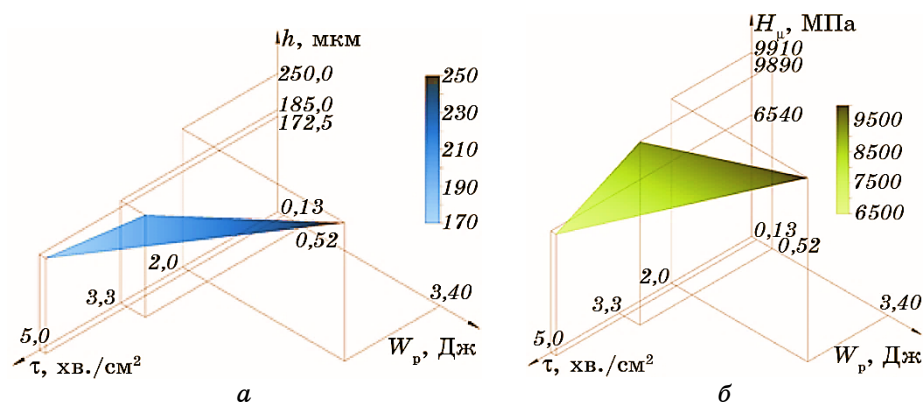


Рис. 5. Залежності товщини зміцненого шару (а) та мікротвердості (б) «білого» шару від енергії розряду й трудомісткості за азотування методом ЕІЛ криці 20 за другим варіантом оброблення.

Fig. 5. Dependences of the thickness of the strengthened layer (a) and the microhardness (б) of the 'white' layer on the discharge energy and labour intensity during nitriding by the ESA method of steel 20 for the 2nd processing variant.

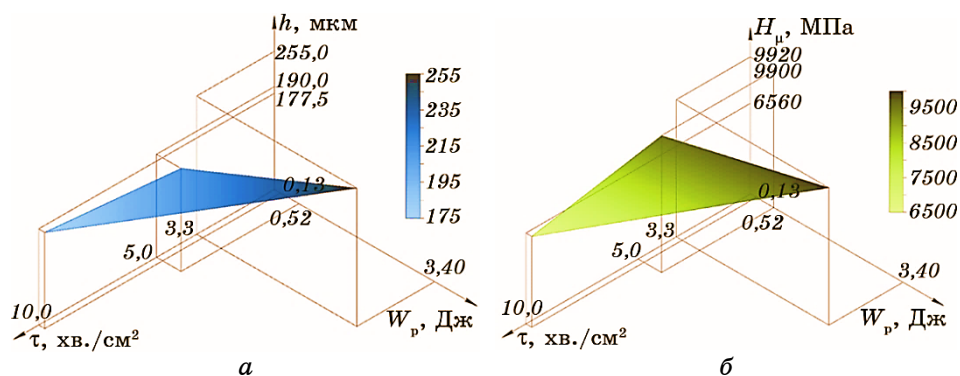


Рис. 6. Залежності товщини зміцненого шару (а) та мікротвердості (б) «білого» шару від енергії розряду й трудомісткості за азотування методом ЕІЛ криці 20 за третім варіантом оброблення.

Fig. 6. Dependences of the thickness of the strengthened layer (a) and the microhardness (б) of the 'white' layer on the discharge energy and labour intensity during nitriding by the ESA method of steel 20 for the 3rd processing variant.

На рисунку 7 показано мікроструктури поверхневого шару зраз-

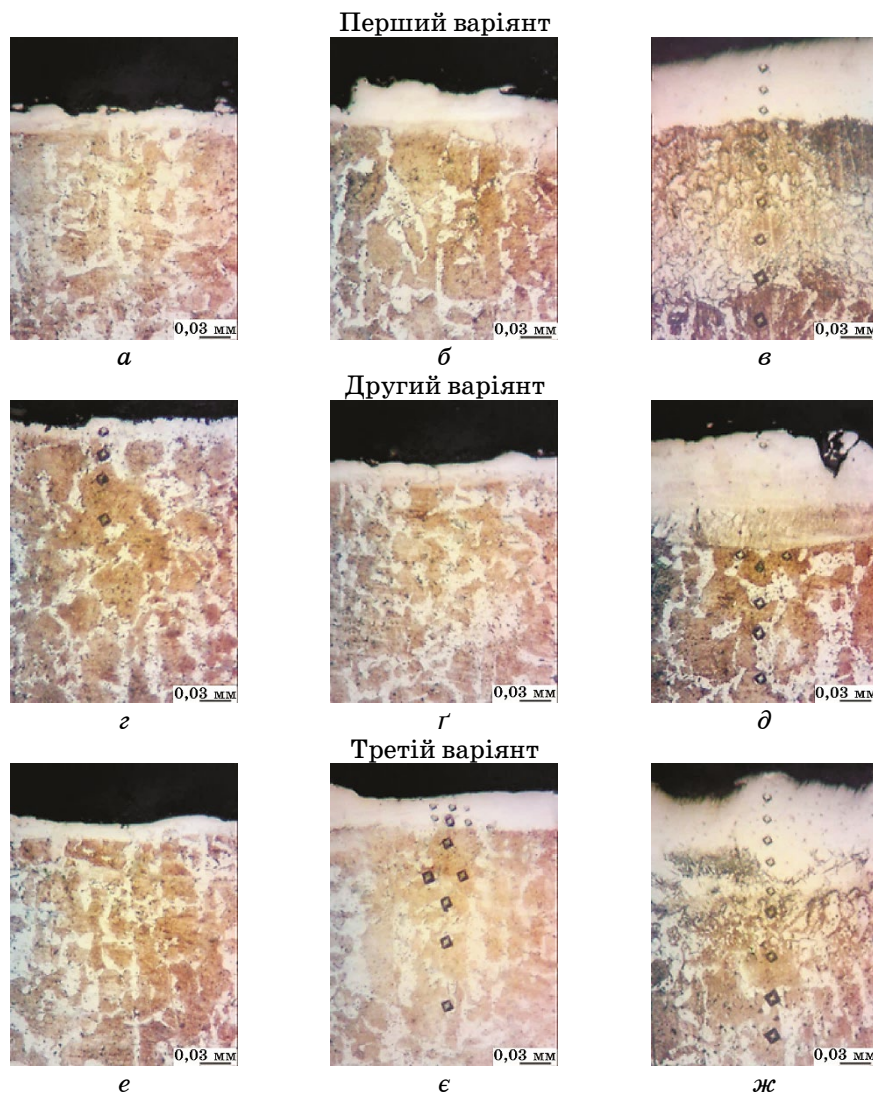


Рис. 7. Мікроструктури азотованого поверхневого шару зразків криці 40 за ЕІЛ електродою-інструментом із криці 40 з енергіями розряду: $W_p = 0,13$ (а, б, в), $W_p = 0,52$ (г, д, е) і $W_p = 3,40$ Дж (ж, з, и) та трудомісткістю згідно з табл. 2.

Fig. 7. Microstructures of the nitrided surface layer of samples of steel 40 during ESA with an electrode instrument made of steel 40 at discharge energies: $W_p = 0.13$ (a, б, в), $W_p = 0.52$ (г, д, е) and $W_p = 3.40$ J (ж, з, и) and labour intensity, according to the Table 2.

ка криці 40 після азотування методом ЕІЛ за продуктивності згідно з першим, другим і третім варіантами відповідно до табл. 2.

Аналіза мікроструктур показала, що, як і на рис. 1, поверхневий шар за усіх трьох варіантів (див. табл. 2) складається з трьох ділянок — «білого шару», дифузійної зони й основного металу.

Також, як і для криці 20, по кожному з варіантів зі збільшенням енергії розряду збільшуються товщини «білого» шару та дифузійної (перехідної) зони.

Крім цього, зі зменшенням продуктивності ЕІЛ (збільшенням трудомісткості) зростають значення мікротвердості, шерсткості та суцільності поверхні.

В таблиці 5 і на рис. 8 представлено розподіл мікротвердості в поверхневому шарі криці 40 згідно з рис. 7.

Результати мірювання товщини, мікротвердості та суцільності «білого шару», а також величини шерсткості поверхні зразків з криці 40 після азотування методом ЕІЛ зведено до табл. 6.

На рисунках 9–12 показано залежності товщини зміцненого шару (а) та мікротвердості (б) «білого» шару від енергії розряду та трудомісткості за азотування методом ЕІЛ криці 40 для наявної технології (рис. 9) і першого (рис. 10), другого (рис. 11) і третього (рис. 12) варіантів оброблення.

ТАБЛИЦЯ 5. Результати дюрOMETричної аналізи поверхневих шарів криці 40, структури яких представлено на рис. 7.

TABLE 5. Results of durometric analysis of the surface layers of steel 40, structures of which are presented in Fig. 7.

Енергія розряду, Дж	Розподіл мікротвердості H_v у поверхневому шарі по мірі поглиблення із кроком мірювання у 30 мкм											
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	340	390
Перший варіант												
0,13	7100	6540	5860	5250	4520	3800	2790	1900	1700			
0,52	9980	9320	8610	7360	6330	5220	4170	3240	2210	1700	1700	
3,4	10080	9660	9140	8250	7050	5750	4810	3780	2520	2000	1700	1700
Другий варіант												
0,13	7130	6550	5790	5350	4630	4020	2850	2000	1700	1700		
0,52	9990	9230	8450	7350	6500	5500	4300	3250	2230	1700	1700	
3,4	10100	9750	9250	8400	7110	5770	4720	3730	2650	2100	1700	1700
Третій варіант												
0,13	7140	5340	4320	3640	2750	2400	2000	1750	1700			
0,52	10010	9360	8560	7480	6000	5000	4000	3240	2300	1700	1700	
3,4	10110	9790	9050	7900	7010	5600	4560	3850	2800	2300	1700	1700

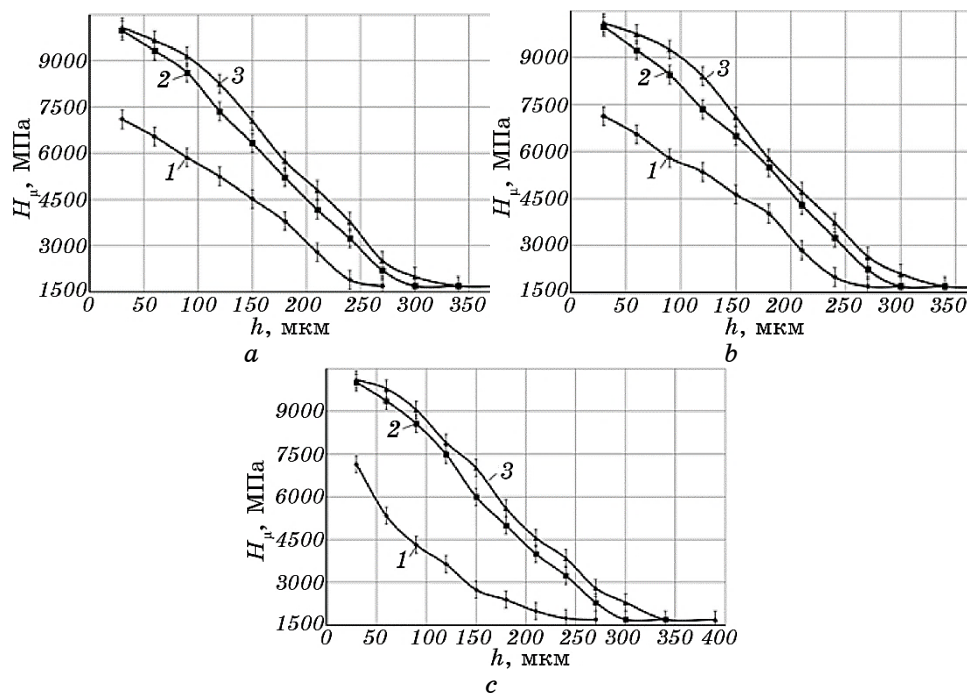


Рис. 8. Розподіл мікротвердості по глибині шару поверхні зразка криці 40 після азотування методом ЕІЛ, де *a*, *б*, *в* — перший, другий і третій варіанти зміни продуктивності процесу ЕІЛ відповідно. На графіку: 1, 2 та 3 — енергія розряду $W_p = 0,13, 0,52$ і $3,4$ Дж відповідно.

Fig. 8. Distribution of microhardness along the depth of the surface layer of steel 40 sample after nitriding by the ESA method, where *a*, *б*, *в* are the first, second, and third variants of changing productivity of the ESA process. In the graph: 1, 2, and 3—ESA at discharge energies $W_p = 0.13, 0.52$, and 3.4 J, respectively.

4. ВИСНОВКИ

В результаті аналізу структури поверхневих шарів після азотування криць 20 і 40 методом ЕІЛ з використанням азотовмісного СТНС встановлено наступне.

1. Зі збільшенням енергії розряду зростають товщини «білого» шару та дифузійної (перехідної) зони, а також збільшується мікротвердість, шерсткість і суцільність поверхні.
2. Зі зменшенням продуктивності ЕІЛ і, відповідно, збільшенням трудомісткості процесу зростають товщини «білого» шару та дифузійної (перехідної) зони; крім цього, збільшуються мікротвердість і суцільність покриття.
3. Із заміною криці 20 на крицю 40 незначно збільшуються товщи-

ни «білого» шару й дифузійної (перехідної) зони та мікротвердість поверхневого шару.

ПОДЯКИ

Результати даної роботи частково було одержано в рамках виконання науково-дослідного проєкту Сумського державного університету «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» за фінансування Міністерством освіти і науки України (державний реєстраційний № 0124U000539).

ТАБЛИЦЯ 6. Параметри якості азотованих шарів, одержаних методом ЕІЛ на зразках зі криці 40.

TABLE 6. Quality parameters of nitrided layers obtained by the ESA method on steel 40 samples.

Енергія розряду, Дж	Продуктивність Q, см²/хв.	Трудомісткість τ, хв./см²	Товщина зміцненого шару, мкм	Мікротвердість, МПа		Шерсткість Ra, мкм	Суцільність «білого» шару, %
				«білого» шару	перехідної зони		
Існуюча технологія							
0,13	1,7	1,7	155	6650	4350	0,9	85
0,52	0,8	0,8	165	9850	4550	1,3	90
3,40	0,5	0,5	230	9910	4870	5,9	95
Перший варіант							
0,13	0,3	3,3	170	7100	4500	1,0	90
0,52	0,6	1,7	180	9980	4570	1,4	95
3,40	1,0	1,0	245	10080	4970	6,1	100
Другий варіант							
0,13	0,2	5,0	180	7130	4540	1,1	100
0,52	0,3	3,3	190	9990	4630	1,4	100
3,40	0,5	2,0	255	10100	4980	6,0	100
Третій варіант							
0,13	0,1	10,0	185	7140	4540	1,0	100
0,52	0,2	5,0	195	10010	4590	1,4	100
3,40	0,3	3,3	260	10110	4920	6,2	100

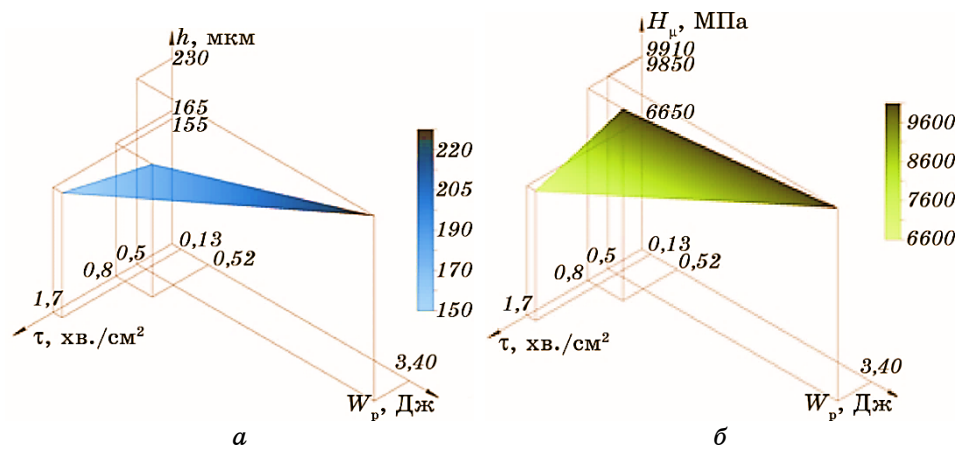


Рис. 9. Залежності товщини зміцненого шару (а) й мікротвердості (б) «білого» шару від енергії розряду та трудомісткості за азотування методом ЕІЛ криці 40 для наявної технології.

Fig. 9. Dependences of the thickness of the strengthened layer (a) and the microhardness (b) of the 'white' layer on the discharge energy and labour intensity during nitriding by the ESA method of steel 40 for the available technology.

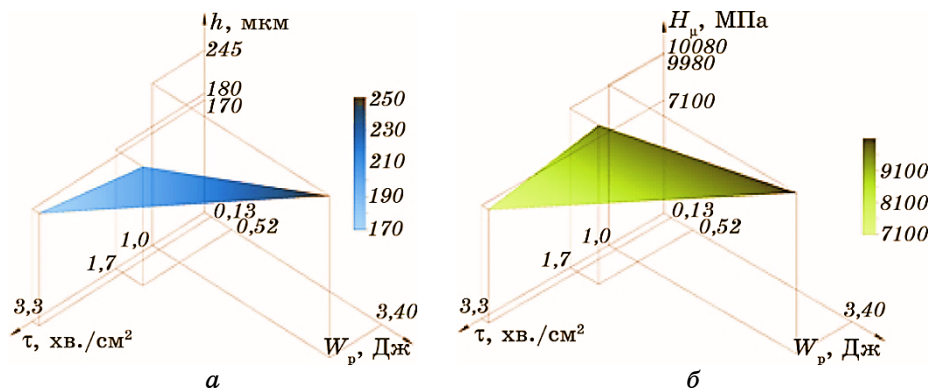


Рис. 10. Залежності товщини зміцненого шару (а) й мікротвердості (б) «білого» шару від енергії розряду та трудомісткості за азотування методом ЕІЛ криці 40 за першим варіантом оброблення.

Fig. 10. Dependences of the thickness of the strengthened layer (a) and the microhardness (b) of the 'white' layer on the discharge energy and labour intensity during nitriding by the ESA method of steel 40 for the 1st processing variant.

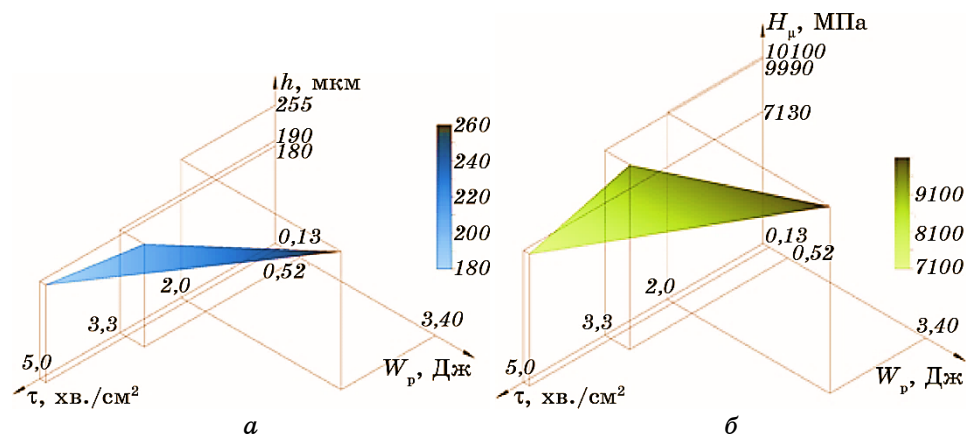


Рис. 11. Залежності товщини зміцненого шару (а) й мікротвердості (б) «білого» шару від енергії розряду та трудомісткості за азотування методом ЕІЛ криці 40 за другим варіантом оброблення.

Fig. 11. Dependences of the thickness of the strengthened layer (a) and the microhardness (б) of the 'white' layer on the discharge energy and labour intensity during nitriding by the ESA method of steel 40 for the 2nd processing variant.

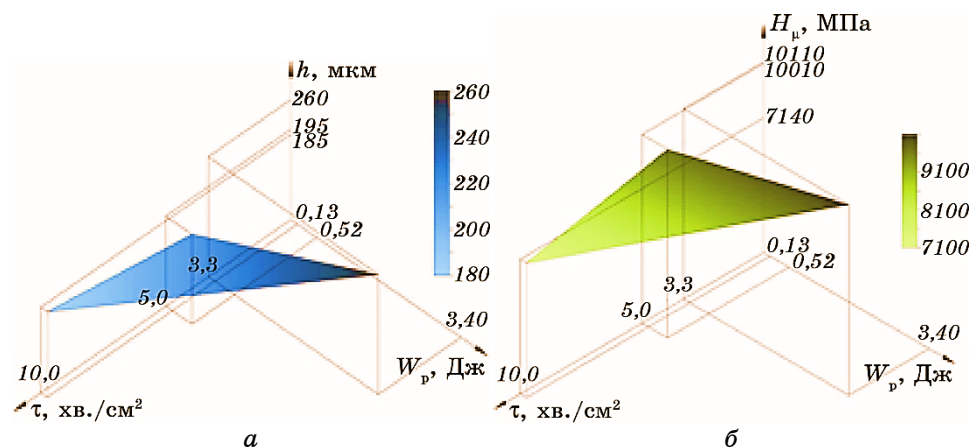


Рис. 12. Залежності товщини зміцненого шару (а) й мікротвердості (б) «білого» шару від енергії розряду та трудомісткості за азотування методом ЕІЛ криці 40 за третім варіантом оброблення.

Fig. 12. Dependences of the thickness of the strengthened layer (a) and the microhardness (б) of the 'white' layer on the discharge energy and labour intensity during nitriding by the ESA method of steel 40 for the 3rd processing variant.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. S. Shevchenko, O. Shevchenko, and S. Vynnychuk, *Nuclear and Radiation Safety*, No. 1 (89): 80 (2021).
2. S. Shevchenko and O. Shevchenko, *Nuclear and Radiation Safety*, No. 4 (88): 47 (2020).
3. V. S. Vahrusheva, D. B. Hlushkova, V. M. Volchuk, T. V. Nosova, S. I. Mamhur, N. I. Tsokur, V. A. Bagrov, S. V. Demchenko, Yu. V. Ryzhkov, and V. O. Scrypnikov, *PAST*, No. 4: 137 (2022).
4. B. Antoszewski, S. Tofil, M. Scendo, and W. Tarelnik, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012036 (2017).
5. I. P. Shatskyi, V. V. Perepichka, and L. Ya. Ropyak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 1: 69 (2020) (in Ukrainian).
6. M. S. Storozhenko, A. P. Umanskii, A. E. Terentiev, and I. M. Zakiev, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, Nos. 1–2: 60 (2017).
7. 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).
8. M. Bembenek, P. Prysyazhnyuk, T. Shihab, R. Machnik, O. Ivanov, and L. Ropyak, *Materials*, **15**, No. 14: 5074 (2022).
9. 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).
10. L. Ropyak, I. Schuliar, and O. Bohachenko, *Eastern-European J. Enterprise Technol.*, **1**, No. 5: 53 (2016) (in Ukrainian).
11. I. Ivasenko, V. Posuvailo, H. Veselivska, and V. Vynar, *2020 IEEE 15th Int. Conf. on Computer Sci. and Information Technol. (CSIT) (Zbarazh, 2020)*, p. 50.
12. M. Bembenek, M. Makoviichuk, I. Shatskyi, L. Ropyak, I. Pritula, L. Gryn, and V. Belyakovskiy, *Sensors*, **22**, No. 21: 8105 (2022).
13. M. M. Student, V. M. Dovhunyk, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and V. M. Hvozdet's'kyi, *Mater. Sci.*, **53**, No. 3: 359 (2017).
14. O. Bazaluk, O. Dubei, L. Ropyak, M. Shovkopliash, T. Pryhorovska, and V. Lozynskiy, *Energies*, **15**, Iss. 1: 83, (2022).
15. S. Pylypaka, T. Volina, A. Nesvidomin, I. Zakharaova, and A. Rebrii, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV* (Eds. V. Ivanov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, J. Machado, and M. Edl) (Springer: 2021), p. 156.
16. S. Pylypaka, V. Nesvidomin, T. Volina, L. Sirykh, and L. Ivashyna, *Agricultural Eng.*, **62**, No. 3: 79 (2020).
17. 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.
18. 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: 2020), p. 63.
19. S. Pylypaka, T. Zaharova, O. Zalevska, D. Kozlov, and O. Podliniaieva, *Advanced Manufacturing Processes* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, M. Edl, I. Kuric, I. Pavlenko, and P. Dasic)

- (Springer: 2020), p. 582.
20. O. D. Pogrebnjak, K. O. Dyadyura, and O. P. Gaponova, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **37**, No. 7: 899 (2015) (in Russian).
 21. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 266 (2017).
 22. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 385 (2017).
 23. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Proc. Eng.*, **39**: 157 (2012).
 24. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, N. S. Yevtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
 25. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Yu. Filonenko, *Proc. Eng.*, **39**: 148 (2012).
 26. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, N. Tarelnyk, and A. Kozachenko, *Mater. Sci. Forum*, **968**: 131 (2019).
 27. V. A. Tatarenko, T. M. Radchenko, A. Yu. Naumuk, and B. M. Mordiyuk, *Progress in Physics of Metals*, **26**, No. 1: 3 (2025).
 28. D. B. Hlushkova, V. A. Bagrov, S. V. Demchenko, V. M. Volchuk, O. V. Kalinin, and N. E. Kalinina, *PAST*, No. 4: 125 (2022).
 29. A. Zahorulko, C. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012039 (2017).
 30. F. A. P. Fernandes, S. C. Heck, R. G. Pereira, A. Lombardi-Neto, G. E. Totten, and L. C. Casteletti, *J. Achievements Mater. Manufacturing Eng.*, **40**: 175 (2010).
 31. S.-H. Yeh, L.-H. Chiu, and H. Chang, *Eng.*, **3**, No. 9: 942 (2011).
 32. S. Ben Slima, *Mater. Sci. Applications*, **3**, No. 9: 640 (2012).
 33. E. J. Lavernia and T. S. Srivastan, *J. Mater. Sci.*, **45**: 287 (2010).
 34. M. Salehi and K. Dehghani, *J. Alloys Compd.*, **457**: 357 (2008).
 35. F. Zupanic, T. Boncina, A. Krizman, W. Grogger, C. Gspan, B. Markoli, and S. Spaic, *J. Alloys Compd.*, **452**: 343 (2008).
 36. M. Brochu, J. G. Portillo, J. Milligan, and D. W. Heard, *Open Surface Sci. J.*, **3**: 105 (2011).
 37. V. V. Bryukhovetsky, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, D. E. Myla, V. P. Poyda, A. V. Poyda, V. T. Uvarov, Yu. F. Lonin, and A. G. Ponomarev, *Nuclear Inst. Methods in Phys. Research B*, **499**: 25 (2021).
 38. V. P. Poida, D. E. Pedun, V. V. Bruhovetskii, A. V. Poida, R. V. Sukhov, A. L. Samsonik, and V. V. Litvinenko, *Phys. Metals Metallography*, **114**: 779 (2013).
 39. S. E. Donets, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. A. Startsev, and V. T. Uvarov, *PAST*, No. 4: 302 (2015).
 40. V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. G. Tolstolutskiy, V. V. Uvarov, and V. T. Uvarov, *PAST*, No. 1: 119 (2009).
 41. V. F. Klepikov, E. M. Prokhorenko, V. V. Lytvynenko, A. A. Zakharchenko, and M. A. Hazhmuradov, *PAST*, No. 2: 193 (2015).
 42. 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. Pogrebnjak and V. Novosad) (Springer: 2019), p. 249.

43. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, N. V. Tarelnyk, and O. M. Myslyvchenko, *Progress in Physics of Metals*, **24**, No. 2: 282 (2023).
44. G. V. Kirik, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**: 688 (2018).
45. V. Tarelnyk and V. Martsynkovskyy, *Applied Mech. Mater.*, **630**: 397 (2014).
46. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 540 (2017).
47. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **233**: 012048 (2017).
48. V. B. Tarelnik, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, A. V. Belous, E. V. Konoplyanchenko, and O. P. Gaponova, *Surf. Eng. Applied Electrochem.*, **54**, No. 2: 147 (2018).
49. V. B. Tarelnyk, Ie. V. Konoplianchenko, O. P. Gaponova, N. V. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, B. O. Sarzhanov, O. A. Sarzhanov, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **58**: 703 (2020).
50. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, and M. Dumanchuk, *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II* (Eds. V. Ivanov, J. Trojanowska, J. Machado, O. Liaposhchenko, J. Zajac, I. Pavlenko, M. Edl, and D. Perakovic) (Springer: 2019), p. 216.
51. B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, O. M. Myslyvchenko, P. Kurp, T. I. Zhylenko, and I. Konoplianchenko, *Materials*, **14**, Iss. 4: 739 (2021).
52. O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk, B. Antoszewski, N. Radek, N. V. Tarelnyk, P. Kurp, O. M. Myslyvchenko, and J. Hoffman, *Materials*, **15**, Iss. 17: 6085 (2022).
53. 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).