

PACS numbers: 62.20.Qr, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.J-, 81.40.Pq, 81.65.Lp

**Властивості поверхонь деталей із криці 12Х18Н10Т, які працюють в умовах радіаційного опромінювання, відновлених методом електроіскрового легування.
Ч. 2. Особливості структурного стану відновлених поверхонь**

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*

В статті представлено результати досліджень структурного стану покриттів, сформованих методом електроіскрового легування при енергії розряду $W_p = 0,13, 0,52$ і $0,9$ Дж анодами з ніклю та неіржавійної криці 12Х18Н10Т на поверхні катоди із криці 12Х18Н10Т. Матеріали анод, такі як нікель і криця 12Х18Н10Т, належать до матеріалів якими доцільно відновлювати поверхні деталей із криці 12Х18Н10Т, які працюють в умовах радіаційного опромінювання. Металографічна аналіза, сформованих покриттів показала, що їх мікроструктура складається із 3-х зон: 1) «білий» шар — шар, що не піддається травленню звичайними реактивами, 2) перехідна зона або дифузійна зона, 3) основний метал. При використанні в якості електроди-інструменту ніклю і криці 12Х18Н10Т зі збільшенням енергії розряду товщина зміцненого шару, мікротвердість, су-

Corresponding author: Oksana Petrivna Gaponova
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. Gaponova and N. V. Tarelnyk, Properties of Surfaces Parts from X10CrNiTi18-10 Steel Operating in Conditions of Radiation Exposure Retailored by Electrospark Alloying. Pt. 2. Features of the Structural State of the Retailored Surfaces, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 9: 1103–1115 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.09.1103](https://doi.org/10.15407/mfint.44.09.1103)

цілність і товщина «білого» шару, а також величина шерсткості поверхні збільшуються. Заміна аноди нікелю на крицю 12Х18Н10Т приводить до збільшення шерсткості поверхні і зменшення товщини зміцненого шару.

Ключові слова: електроіскрове легування, нікель, криця, металографічна аналіза, структура, товщина шару, мікротвердість, шерсткість, суцільність.

In article we present the results of studies of the structural state of coatings formed by the method of electrospark alloying at the discharge energy $W_p = 0.13, 0.52$ and 0.9 J by anodes from nickel and stainless steel X10CrNiTi18-10 on the cathode surface from X10CrNiTi18-10 steel. Anode materials, such as nickel and X10CrNiTi18-10 steel are recommended as materials, which is advisable to use for restoring the surfaces of parts from X10CrNiTi18-10 steel operating in conditions of radiation exposure. Metallographic analysis of the formed coatings showed that their microstructure consists of 3 zones: 1) 'white layer' is the layer that cannot be etched with conventional reagents, 2) transition zone or diffuse zone, 3) base metal. Using nickel and steel X10CrNiTi18-10 with increasing discharge energy, the thickness of the hardened layer, microhardness, continuity and thickness of the white layer, as well as the surface roughness are increased. Replacing the nickel anode with steel X10CrNiTi18-10 surface roughness is increased and the thickness of the hardened layer is decreased.

Key words: electrospark alloying, nickel, steel, metallographic analysis, structure, layer thickness, microhardness, roughness; continuity.

(Отримано 28 травня 2022 р.; остаточн. варіант — 11 липня 2022 р.)

1. ВСТУП

В частині 1 статті представлено результати дослідження нового способу відновлення методом електроіскрового легування (ЕІЛ) деталей із криці 12Х18Н10Т, які працюють в умовах радіаційного опромінювання і який може бути застосованим для ремонту деталей машин атомних електростанцій [1].

Спосіб включає нанесення покриття на зношену поверхню деталю методом ЕІЛ електродою-інструментом з матеріалу (криця 12Х18Н10Т або нікель), який не містить спеціальних добавок Кобальту та інших елементів, які утворюють довго живучі ізотопи в активному робочому середовищі.

Використання нового способу відновлення деталей здійснюють у два етапи. Перед першим етапом на зношену крицеву поверхню методом ЕІЛ наносять шар покриття графітовою електродою-інструментом з енергією розряду $W_p = 0,02$ Дж і продуктивністю $0,3$ см²/хв. При ЕІЛ електродою-інструментом із криці 12Х18Н10Т перший і другий етапи проводять, відповідно при $W_p = 0,20$ Дж з

продуктивністю $1,6 \text{ см}^2/\text{хв.}$ і $Wp = 0,55 \text{ Дж}$ з продуктивністю $2,5 \text{ см}^2/\text{хв.}$ В результаті, товщина покриття $\Delta H = 0,19 \text{ мм}$, суцільність $S = 100\%$ і шерсткість $Rz = 57 \text{ мкм}$. При ЕІЛ електродою-інструментом з ніклю перший і другий етапи проводять, відповідно при $Wp = 0,55 \text{ Дж}$ з продуктивністю $2,5 \text{ см}^2/\text{хв.}$ і $Wp = 0,90 \text{ Дж}$ з продуктивністю $3,4 \text{ см}^2/\text{хв.}$ В результаті одержують $\Delta H = 0,20 \text{ мм}$, $S = 100\%$ і $Rz = 38 \text{ мкм}$.

Збільшення енергії розряду при ЕІЛ супроводжується зниженням межі текучості і межі міцності і збільшенням відносного подовження і відносного звуження зразка. При ЕІЛ зразка з $Wp = 0,90 \text{ Дж}$, в порівнянні з нелегованим зразком, межа текучості і межа міцності зменшується при легуванні крицею 12Х18Н10Т, відповідно на $11,7\%$ і $8,3\%$, а відносне подовження і відносне звуження збільшується, відповідно на 15% і $14,7\%$. При ЕІЛ ніклем межа текучості і межа міцності зменшується, відповідно на $13,3\%$ і $8,6\%$, а відносне подовження і відносне звуження збільшується, відповідно на $14,7\%$ і $16,7\%$.

Слід відмітити, що деталі, які працюють в умовах радіаційного опромінювання, наприклад, в обладнанні атомних електростанцій, потребують високої якості і надійності [2–4], тому дослідження особливостей структурного стану відновлених поверхонь: рівномірність сформованого шару, його суцільність, товщина та структура зон підшару, дифузійної зони та зони термічного впливу, розподіл твердості по мірі поглиблення з поверхні актуальне і своєчасне.

2. АНАЛІЗА ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У [5] проводили дослідження направлені на удосконалення технології ремонту шнеків та гільз сушильних машин з метою пониження собівартості їх виготовлення та ремонту, зміцнення та механічного оброблення, збільшення зносостійкості та термінів експлуатації. Традиційно ремонт та зміцнення шнеків та гільз сушильних машин проводять методом натоплювання матеріалу ВЗК до товщини близько 8 мм з подальшим механічним обробленням до 4 мм , що вимагає великих матеріальних затрат. При цьому технологія є трудомісткою щодо подальшого механічного оброблення, а зносостійкість незадовільною.

Для досягнення найбільшої спорідненості матеріалу електроди та підкладинки були розроблені спеціальні СВС-електроди на основі твердого розчину карбідів танталу та титану зі зв'язкою із криці Х18Н9Т. Якість легованих шарів контролювали методом металографічної аналізи за їх суцільністю, товщиною та мікротвердістю.

Дослідження показали, що на поверхні зразків формується легований шар завтовшки $5\text{--}30 \text{ мкм}$, твердість якого в $4\text{--}6$ разів перевищує твердість підкладинки, при цьому суцільність покриття ста-

новить 80–100%. Зносостійкість легованих СВС-електродами зразків зростає в 1,5–3 рази порівняно з традиційним способом.

В [6] проведено електроіскрове легування хромопільовими крицями 12Х18Н10Т, 08Х22Н6Т, 14Х17Н2, 20Х13, 12ХН3А, жаростійким стопом Х20Н80-Н і чистими металами Cr і Ni на зразках із криці 45. Встановлено, що стійкість до окиснення сформованого легованого шару в інтервалі температур 25–1000°C залежить від комбінації легуючих елементів Ni і Cr, що передається матеріалом аноди при електроіскровому легуванні. Проаналізовано опір зразків газовій корозії шляхом проведення диференціальної термічної аналізи в інтервалі температур 25–1000°C і жаростійкого випробування протягом 7 годин при 730°C. Доведено, що на здатність електроіскрових покриттів довго чинити опір високій температурі, пріоритетне значення має хемічний склад легованого шару, а не його макропараметри — суцільність, пористість, товщина. Визначено умови формування термостійкого захисного шару на криці 45: а) наявність необмежених твердих розчинів на основі Cr, Ni, Fe в структурі легованого шару, б) співвідношення елементів у легованому шарі — Cr (15% ваг.) і Ni (40% ваг.). Встановлено найбільш збалансоване співвідношення в легованому шарі Cr (15% ваг.) і Ni (40% ваг.), здатне при термічному впливі формувати на поверхні легованого шару захисні структури на основі Cr₂O₃, NiO, NiCr₂O₄, опиратися окисненню та захищати підкладку з конструкційних криць. Запропоновано використовувати як легуючий матеріал стоп Х20Н80-Н, що забезпечує в процесі електроіскрового легування збалансоване співвідношення Cr і Ni в легованому шарі криці 45 для формування жаростійкого захисту.

В [7, 8] запропоновано новий спосіб відновлення зношених поверхонь деталей з неіржавійної криці 12Х18Н10Т методом електроерозійного легування (ЕЕЛ), електродами із криці 12Х18Н10Т. При цьому покриття наносять у два етапи, причому на першому етапі наносять шар, використовуючи режими, які забезпечують найбільшу товщину поверхні при найбільшій суцільності, потім на одержану поверхню наносять шар покриття тією ж електродою і способом ЕЕЛ з такою енергією розряду і відповідною їй продуктивністю, якою формують поверхню з шерсткістю приблизно в 2–4 рази вище, ніж на попередньому етапі. В результаті при відносно прийнятній товщині відновленого шару формується найбільш раціональна величина шерсткості і до 100% підвищується суцільність поверхні. При формуванні покриття поетапно, згідно з запропонованим способом, з використанням спочатку енергії розряду $W_p = 0,35$ Дж, а потім $W_p = 0,55$ Дж товщина шару становить 0,22 мм при суцільності, що наближається до 100% і шерсткості $Rz = 17$ мкм. Нанесення покриття у зворотному порядку приводить до пониження його суцільності до 80% та зростання шерсткості до $Rz = 34$ мкм.

Відповідно до [9] зразки (катоди) з неіржавійної криці 12Х18Н10Т піддавали ЕІЛ. Як електроди (анооди) застосовували Ni і Мо. Леґування зразків здійснювалося на установці «ЕФІ-Елітрон» з енергією одиничного імпульсу 1 Дж, частотою імпульсних розрядів 50 Гц, робочою місткістю $c = 360$ мкФ та тривалістю імпульсу 200 мкс. Зразки оброблялися за температур підкладинки 293 К (на повітрі) та 77 К (в середовищі рідкого азоту). Дослідження мікроструктури та мікротвердості виконані з використанням мікроскопа МІМ-10 та мікротвердоміра ПМТ-3 за стандартними методиками. Корозійна стійкість покриттів визначалася шляхом витримки зразків у розчині гідрооксиду натрію (770 г/л) за температури 460 К протягом 150 год. Результати випробувань на корозійну стійкість свідчать про те, що обидва види покриттів мають підвищену корозійну стійкість порівняно з основою (сталь 12Х18Н10Т). Корозійна стійкість збільшується більш ніж 1000 разів. Причому із пониженням температури підкладинки швидкість корозії зменшується. Одержаний ефект можна пояснити схильністю криці 12Х18Н10Т при взаємодії Ni та Мо в процесі ЕІЛ до аморфізації [10]. В даному випадку має місце процес поверхневої аморфізації, що дає змогу одержувати матеріали з властивостями, які характерні для аморфного стану на поверхні — насамперед із високою корозійною стійкістю. Крім того, встановлено, що пониження температури підкладинки дає змогу збільшити товщину зміцненого шару в 2–5 разів, мікротвердість — у 1,5–2,5 рази, в залежності від матеріалу електрод.

В [11] розглянуто проблему створення паяних з'єднань із криці 12Х18Н10Т з високою температурою розпаювання для використання в реакторобудуванні для екстремальних режимів роботи. Для паяння криці використовували припій в аморфному стані у формі фольги складу Ni–7Cr–4,5Si–3,5Fe–2,6В (% мас.). Проведено експерименти з варіюванням режиму паяння в інтервалі температур 1070–1160°C та часом витримки 15–80 хв. Було показано, що для всіх режимів паяння у швах кристалізується твердий розчин на основі Ніклю з різним вмістом Cr, Fe, Mn та Si.

Метою роботи [12] було дослідження впливу локального поверхневого зміцнення електроіскровим леґуванням на працездатність колінчастих валів транспортних дизелів типів 10Д100 та Д80, виготовлених з високоміцного чавуну з кулястою формою включень графіту. В якості зміцнювальної електроди використовували неіржавійну крицю 12Х18Н10Т. Потужність розряду становила 1,0 кВт. Товщина зміцненого шару 50–300 мкм, мікротвердість $H_{20} = 5–14$ ГПа.

Дослідження впливу ЕІЛ на триботехнічні характеристики високоміцного чавуну проводили шляхом випробувань на машинах тертя СМЦ2 та СМТ-1. Зносостійкість зразків визначали щодо зміни їх

маси. Швидкість ковзання становила $1,3 \text{ мс}^{-1}$, контактний тиск — 5 МПа , мастило — М14В₂. Час випробувань — 10 годин. Ролики перед випробуваннями полірували до параметра шерсткості $0,32\text{--}0,16 \text{ мкм}$. Контртілом служили колодки, виготовлені із крицеалюмінійової смуги (криця 10–алюмінійово-олов'яний стоп АТ 20-1).

Випробування на втому при вигині виконували на універсальній випробувальній машині з гідропульсатором типу МУП-100 за методикою, викладеною у роботі [13]. Одержані дані показують, що оброблення методом ЕІЛ приводить до суттєвого зменшення зносу ролика порівняно з нормалізованими зразками та пониження коефіцієнта тертя. Зміцнення обкаткою роликами перехідних жолобників валів забезпечує збільшення значень межі витривалості в $1,8\text{--}2,3$ рази. Одержані закономірності підтверджено експлуатаційними випробуваннями. Працездатність валів до ремонту збільшилася загалом на $35\text{--}40\%$.

У [14] представлені результати металографічних досліджень покриттів на крицях (Р6М5, 12Х18Н10Т і 07Х16Н6) та стопах (ХН58МБЮД та бронза БрБ2), сформованих методом ЕІЛ із застосуванням твердих зносостійких (стопи ВК8, Т15К6), антифрикційних матеріалів (Cu, Ni, бронза БрБ2, Sn), а також легування графітом. Як показано, для всіх матеріалів досліджуваних підкладінок можливе зміцнення поверхневих шарів, існують найбільш доцільні матеріали легувальних електрод і режими ЕІЛ. На основі експериментальних досліджень запропоновано рівняння, яке дає змогу визначати мікротвердість покриття, що формується за енергетичними параметрами обладнання ЕІЛ. Визначено константи запропонованого рівняння. Розроблено алгоритм, який дає змогу прогнозувати енергетичні параметри ЕІЛ для формування поверхневого шару із заданою мікротвердістю.

У [15–18] зазначається, що комбіновані електроіскрові покриття, сформовані на криці 12Х18Н10Т у послідовності ВК8 + Cu + ВК8, характеризуються високими показниками якості (низькою шерсткістю, високою мікротвердістю, суцільністю та зносостійкістю). У [19] проведено аналізу жаростійкості алітованих покриттів, одержаних методом ЕІЛ. Показано, що одержані покриття можуть ефективно конкурувати з покриттями, одержаними традиційними способами.

Аналіза літературних джерел показала, що існує достатня кількість робіт присвячених ЕІЛ неіржавійної криці 12Х18Н10Т різними анодами (твердими зносостійкими і м'якими антифрикційними металами, їх комбінаціями і та ін.). В той же час відсутні дані, присвячені впливу величини енергії розряду при її легуванні крицею такої самої марки і ніклем на структуру сформованих шарів.

Таким чином, метою роботи є покращення якості відновлених поверхонь деталей, які працюють в умовах радіаційного опроміню-

вання шляхом дослідження впливу енергії розряду при ЕІЛ неіржавійної криці аустенітного класу 12Х18Н10Т крицею такої самої марки і ніклем на структуру, параметри топографії поверхні та механічні властивості сформованих шарів.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Зразки з неіржавійної криці аустенітного класу марки 12Х18Н10Т розміром 10×10×8 мм і з твердістю після остаточного термооброблення 140–170 НВ, шліфували до шерсткості поверхні $Ra = 0,50$ мкм. Для нанесення покриттів електродами-інструментами з неіржавійної криці 12Х18Н10Т і ніклю використовували установку ЕІЛ моделю «Елітрон-52А», що забезпечує енергію розряду W_p в діяпазоні 0,05–6,80 Дж. При цьому для досліджень застосовували енергію розряду $W_p = 0,13, 0,52$ та 0,90 Дж.

Для запобігання схоплення легуючої електроди і підкладинки при ЕІЛ криці 12Х18Н10Т електродами-інструментами з неіржавійної криці 12Х18Н10Т і ніклю всі зразки попередньо оброблювали графітовою електродою-інструментом при енергії розряду $W_p = 0,02$ Дж і продуктивності 0,3 см²/хв.

Для металографічних та дюрOMETричних досліджень підготовлених зразків використовували оптичний мікроскоп «Неофот-2». Також виконували дюрOMETричну аналізу розподілу мікротвердості у поверхневому шарі. Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3, шляхом вдавлення алмазної пірамідки під навантаженням 0,05 Н, згідно ГОСТ 9450-76.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

ЕІЛ електродою-інструментом з ніклю. На рисунку 1 показано структуру поверхневого шару криці 12Х18Н10Т при легуванні Ніклем при енергії розряду $W_p = 0,13, 0,52$ та 0,90 Дж (відповідно, рис. 1, а, б і в), а також розподіл мікротвердості по мірі поглиблення з поверхні (г).

Металографічна аналіза одержаних покриттів показала, що мікроструктура складається з 3-х зон: 1) «білий» шар — шар, що не піддається травленню звичайними реактивами; 2) перехідна зона або дифузійна зона; 3) основний метал.

Результати вимірювання товщини, мікротвердості та суцільності «білого» шару, а також товщини зміцненого шару і величини шерсткості поверхні, зведені до табл. 1.

Аналізуючи, рисунок 1 і таблицю 1 слід зазначити, що зі збільшенням енергії розряду товщина, мікротвердість і суцільність «білого» шару, а також величина шерсткості поверхні збільшуються.

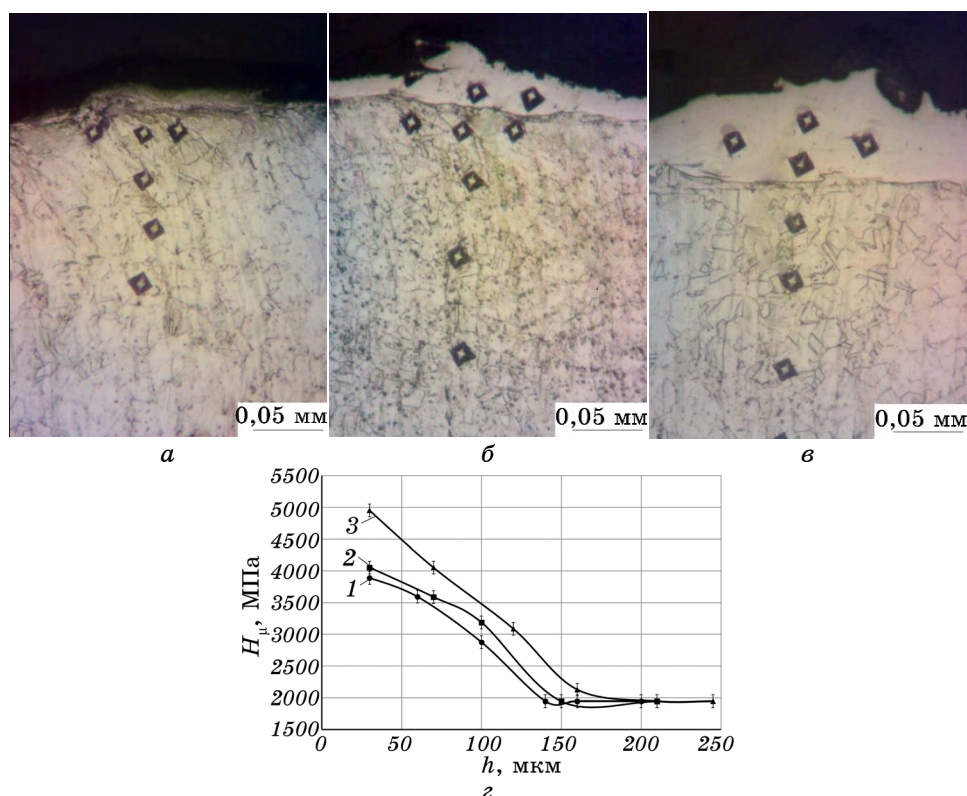


Рис. 1. Структура поверхнього шару криці 12Х18Н10Т після ЕІЛ Ніклем при $Wp = 0,13$ (а), $0,52$ (б) та $0,90$ Дж (в), а також розподіл мікротвердості в покритті (г).

Fig. 1. The structure of the surface layer of steel X10CrNiTi18-10 after ESA by nickel at: $Wp = 0.13$ (a), 0.52 (b) and 0.90 J (c), as well as the distribution of microhardness in the coating (d).

Товщина зміцненого шару, твердість якого більше твердості основного металу і який складається з «білого» шару і дифузійної зони також збільшується.

ЕІЛ електродою-інструментом із криці 12Х18Н10Т. При заміні матеріалу електроду-інструменту з ніклю на крицю 12Х18Н10Т структура підкладинки майже не змінюється.

На рисунку 2 показано структуру поверхнього шару криці 12Х18Н10Т при легуванні цією ж крицею при $Wp = 0,13$, $0,52$ та $0,90$ Дж (відповідно, рис. 1, а, б і в), а також розподіл мікротвердості по мірі поглиблення з поверхні (г).

Металографічна аналіза одержаних покриттів показала, що мікроструктура складається з 3-х зон: 1) «білий» шар – шар, що не під-

ТАБЛИЦЯ 1. Параметри якості поверхневих шарів криці 12Х18Н10Т після ЕІЛ Ніклем і крицею 12Х18Н10Т в залежності від енергії розряду.

TABLE 1. Quality parameters of the surface layers of steel X10CrNiTi18-10 after ESA by nickel and steel 12X18H10T depending on the discharge energy.

Енергія розряду W_p , Дж	Шерсткість, мкм			Мікротвердість поверхні зміцненого шару H_{μ} , МПа	Товщина «білого» шару, мкм	Товщина зміцненого шару, мкм	Суцільність «білого» шару, %
	Ra	Rz	R_{max}				
Нікель							
0,13	1,9	9	11	3891	10-20	120	40
0,52	7,1	38	43	4055	10-20	140	70
0,90	12,1	69	74	4950	30-50	160	80
Сталь 12Х18Н10Т							
0,13	2,7	12	17	3502	10-20	75	70
0,52	12,2	61	75	3793	20-30	100	80
0,90	17,8	92	121	5189	40-50	125	85

дається травленню звичайними реактивами; 2) перехідна зона або дифузійна зона; 3) основний метал.

Результати вимірювання товщини, мікротвердості і суцільності «білого» шару, а також товщини зміцненого шару і величини шерсткості поверхні, зведені до табл. 1.

Аналізуючи, рисунок 2 і таблицю 1 слід зазначити, що зі збільшенням енергії розряду товщина зміцненого шару, товщина, суцільність і мікротвердість «білого» шару, а також величина шерсткості поверхні збільшуються.

Слід зазначити, що заміна електроди-інструменту з ніклю на крицю 12Х18Н10Т приводить до збільшення шерсткості поверхні і зменшення товщини зміцненого шару. Так при енергії розряду $W_p = 0,13, 0,52$ і $0,90$ Дж:

– при ЕІЛ Ніклем шерсткість поверхні (Rz) дорівнює відповідно: 9, 38, і 69 мкм, а при легуванні електродою-інструментом із криці 12Х18Н10Т — відповідно 12, 61 і 92 мкм;

– при ЕІЛ Ніклем товщина зміцненого шару дорівнює відповідно: 120, 140 і 160 мкм, а при легуванні електродою-інструментом із криці 12Х18Н10Т — відповідно 75, 100 і 125 мкм.

5. ВИСНОВКИ

1. Проведена аналіза літературних джерел показала на відсутність

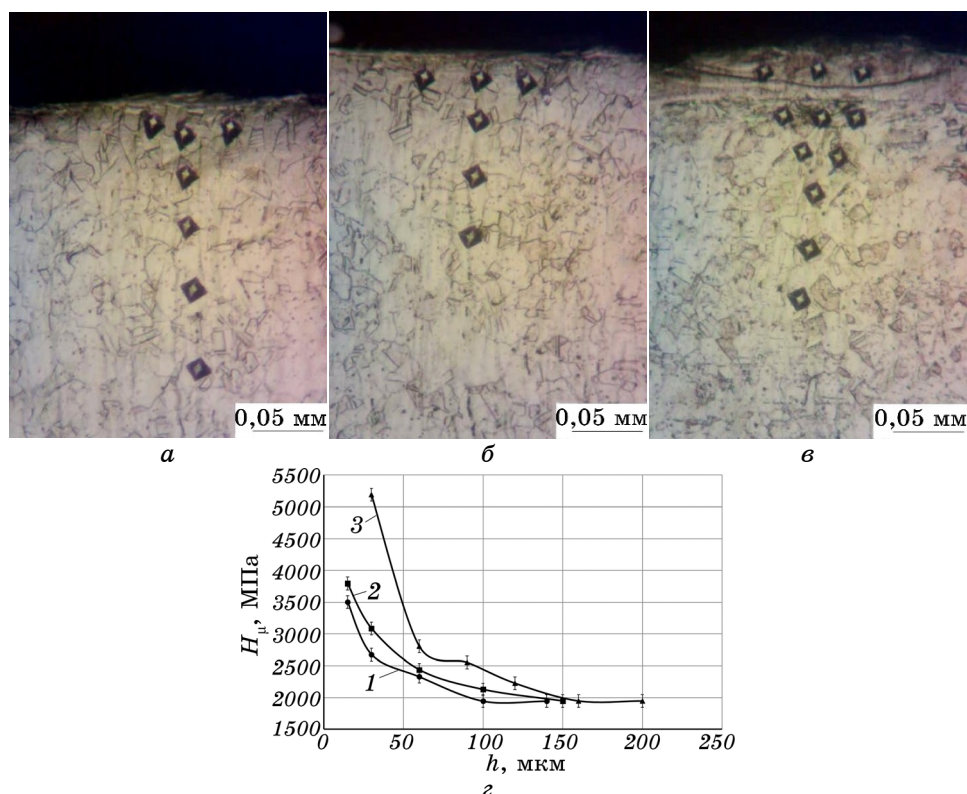


Рис. 2. Структура поверхневого шару криці 12Х18Н10Т при ЕІЛ крицею 12Х18Н10Т, при $W_p = 0,13$ (а), 0,52 (б) та 0,90 Дж (в), а також розподіл мікротвердості в покритті (з).

Fig. 2. The structure of the surface layer of steel X10CrNiTi18-10 after ESA by steel X10CrNiTi18-10 at $W_p = 0.13$ (a), 0.52 (b) and 0.90 J (c), as well as the distribution of microhardness in the coating (z).

робіт присвячених впливу величини енергії розряду при ЕІЛ неіржавійної криці 12Х18Н10Т крицею такої самої марки і ніклем на структуру сформованих шарів, що є дуже важливим при відновленні деталей, які працюють в умовах радіаційного опромінювання.

2. Металографічна аналіза покриттів, сформованих при енергії розряду $W_p = 0,13$, 0,52 і 0,9 Дж на криці 12Х18Н10Т і при використанні в якості електроди-інструменту нікелю і криці такої самої марки показала, що їх мікроструктура складається з 3-х зон: 1) «білий» шар – шар, що не піддається травленню звичайними реактивами, 2) перехідна зона або дифузійна зона, 3) основний метал.

3. При використанні в якості електроди-інструменту нікелю і криці 12Х18Н10Т зі збільшенням енергії розряду товщина зміцненого

шару, мікротвердість, суцільність і товщина «білого» шару, а також величина шерсткості поверхні збільшуються.

4. Заміна електроди-інструменту з ніклю на крицю 12X18H10T приводить до збільшення шерсткості поверхні і зменшення товщини зміцненого шару. Так при енергії розряду $W_p = 0,13, 0,52$ і $0,90$ Дж:

– при ЕІЛ Ніклем шерсткість поверхні (R_z) дорівнює, відповідно: 9, 38, і 69 мкм, а при легуванні електродою-інструментом із криці 12X18H10T, відповідно 12, 61 і 92 мкм;

– при ЕІЛ Ніклем товщина зміцненого шару дорівнює, відповідно: 120, 140 і 160 мкм, а при легуванні електродою-інструментом із криці 12X18H10T, відповідно 75, 100 і 125 мкм.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Н. В. Тарельник, *Металлофиз. новейшие технол.*, **44**, № 8: 1037 (2022).
2. *Технічне обслуговування і ремонт. Правила організації технічного обслуговування і ремонту обладнання енергоблоків та загальностанційного обладнання атомних електростанцій. СОУ НАЕК 033:2021* (Київ: НАЕК «Енергоатом»: 2021).
3. *Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. «Про схвалення енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність».*
4. *Отчет по анализу безопасности. Техническое обоснование безопасности. Блок № 1. Южно-Украинская АЭС. 23.1.39.ОБ.05.01-05* (НАЭК «Энергоатом»: 2018).
5. П. М. Бажин, А. М. Стопин, *Станочный парк*, № 10 (55), (2008).
6. А. В. Козырь, Л. А. Коневцов, С. В. Коновалов, С. В. Коваленко, В. И. Иващенко, *Письма о материалах*, **8**, № 2: 140 (2018).
7. Б. О. Саржанов, *Наукові нотатки*, № 68: 96 (2019).
8. Б. О. Саржанов, *Спосіб підвищення якості відновлених покриттів металевих деталей методом електроерозійного легування*, Патент України № 138052 (Опубліковано 11 листопада 2019 р.).
9. В. Ф. Мазанко, Е. Н. Храновская, Е. В. Иващенко, С. П. Ворона, *Доповіді Національної академії наук України*, № 8: 96 (2007).
10. К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото, *Аморфные металлы* (Ред. Ц. Масумото) (Москва: Металлургия: 1987).
11. М. А. Пенязь, Е. А. Краснова, А. А. Иванников, *Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020»* (2020).
12. Г. И. Пашкова, *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, № 33 (2006).
13. В. К. Лобанов, Г. И. Пашкова, *Механіка та машинобудування*, № 1: 32 (2004).
14. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 6: 795 (2018).
15. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко, *Металлофиз. новейшие технол.*,

- 41, № 1: 47 (2019).
16. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 266 (2017).
 17. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 385 (2017).
 18. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 114 (2017).
 19. V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, Ye. 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.
 20. 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.

REFERENCES

1. N. V. Tarelnyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 8: 1037 (2022) (in Ukrainian).
2. *Tekhnichne Obsluhovuvannya i Remont. Pravyla Orhanizatsiyi Tekhnichnoho Obsluhovuvannya i Remontu Obladnannya Enerhobloktiv ta Zahal'nostantsiynoho Obladnannya Atomnykh Elektrostantsiy. SOU NAEK 033:2021* [Technical Maintenance and Repair. Rules for the Organization of Technical Maintenance and Repair of Power Unit Equipment and General Plant Equipment of Nuclear Power Plants. SOU NAEK 033:2021] (Kyiv: NAEK 'Enerhoatom': 2021) (in Ukrainian).
3. *Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 18 Serpnya 2017 r. No. 605-r. 'Pro Skhvalennya Enerhetychnoyi Stratehii Ukrayiny na Period do 2035 Roku «Bezpeka, Enerhoefektyvnist', Konkurentospromozhnist'* [Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine Dated August 18, 2017 No. 605-r. 'On the Approval of the Energy Strategy of Ukraine for the Period until 2035 'Safety, Energy Efficiency, Competitiveness'] (in Ukrainian).
4. *Otchet po Analizu Bezopasnosti. Tekhnicheskoe Obosnovanie Bezopasnosti. Blok No.1. Yuzhno-Ukrainskaya AES. 23.1.39.OB.05.01-05* [Security Analysis Report. Technical Justification for Safety. Block No. 1. Yuzhnoukrainsk NPP. 23.1.39.OB.05.01-05] (NAEK «Energoatom»: 2018) (in Russian).
5. P. M. Bazhin and A. M. Stopin, *Stanochnyy Park*, No. 10 (55), (2008) (in Russian).
6. A. V. Kozyr', L. A. Konevtsov, S. V. Konovalov, S. V. Kovalenko, and V. I. Ivashchenko, *Pis'ma o Materialakh*, **8**, No. 2: 140 (2018) (in Russian).
7. B. O. Sarzhanov, *Naukovi Notatky*, No. 68: 96 (2019) (in Ukrainian).
8. B. O. Sarzhanov, *Sposib Pidvyshchennya Yakosti Vidnovlenykh Pokryt' Metalevykh Detaley Metodm Elektroeroziynoho Lehuвання* [The Method of Improving the Quality of Restored Coatings of Metal Parts by the Method of Electroerosion Alloying], Patent of Ukraine No. 138052 (Published November 11, 2019) (in Ukrainian).
9. V. F. Mazanko, E. N. Khranovskaya, E. V. Yvashchenko, and S. P. Vorona,

- Dopovidi Natsional'noyi Akademiyi Nauk Ukrayiny*, No. 8: 96 (2007) (in Ukrainian).
10. K. Sudzuki, Kh. Fudzimori, and K. Khasimoto, *Amorfnye Metally* [Amorphous Metals] (Ed. Ts. Masumoto) (Moscow: Metallurgiya: 1987) (in Russian).
 11. M. A. Penyaz', E. A. Krasnova, and A. A. Ivannikov, *Proc. Int. Young Scientific Forum 'LOMONOSOV-2020'* (2020) (in Russian).
 12. G. I. Pashkova, *Visnyk Kharkivs'koho Natsional'noho Avtomobil'no-dorozhn'oho Universytetu*, No. 33 (2006) (in Russian).
 13. V. K. Lobanov and G. I. Pashkova, *Mekhanika ta Mashynobuduvannya*, No. 1: 32 (2004) (in Russian).
 14. V. B. Tarel'nik, O. P. Gaponova, E. V. Konoplyanchenko, N. S. Evtushenko, and V. O. Gerasimenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
 15. 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. 1: 47 (2019) (in Russian).
 16. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 266 (2017).
 17. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 385 (2017).
 18. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 114 (2017).
 19. V. Martsynkovskyy, V. Tarel'nyk, Ye. 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.
 20. O. Gaponova, C. 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), p. 249.