

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

Властивості поверхонь деталей із криці 12Х18Н10Т, які працюють в умовах радіаційного опромінювання, відновлених методом електроіскрового легування. Ч. I. Особливості топографії та механічних властивостей покриттів

Н. В. Тарельник

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

В статті представлено результати дослідження нового способу відновлення методом електроіскрового легування (ЕІЛ) деталей із криці 12Х18Н10Т, що працюють в умовах радіаційного опромінювання, і яка може бути застосована для ремонту деталей машин атомних електростанцій. Технологія включає нанесення покриття на зношену поверхню деталі методом ЕІЛ електродом-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. ЕІЛ здійснюють у два етапи. Перед першим етапом на зношену крицеву поверхню методом ЕІЛ наносять шар покриття графітовим електродом-інструментом з енергією розряду $Wp = 0,02$ Дж і продуктивністю $0,3 \text{ см}^2/\text{хв}$. При ЕІЛ електродом-інструментом із криці 12Х18Н10Т перший і другий етапи проводять, відповідно при $Wp = 0,20$ Дж з продуктивністю $1,6 \text{ см}^2/\text{хв}$, і $Wp = 0,55$ Дж з продуктивністю $2,5 \text{ см}^2/\text{хв}$. В результаті, товщина покриття $\Delta H = 0,19$ мм, суцільність $S = 100\%$ і шерсткість $Rz = 57$ мкм. При ЕІЛ електродом-інструментом з нікелю перший і другий етапи проводять, відповідно при $Wp = 0,55$ Дж з продуктивністю $2,5 \text{ см}^2/\text{хв}$. і $Wp = 0,90$ Дж з продуктивністю $3,4 \text{ см}^2/\text{хв}$. В результаті

Corresponding author: Nataliya Vyacheslavivna Tarelnyk
E-mail: natasha-tarelnik@ukr.net

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

Citation: N. V. Tarelnyk, Properties of Surfaces Parts from X10CrNiTi18-10 Steel Operating in Conditions of Radiation Exposure Retailored by Electrosark Alloying. I. Features of Topography and Mechanical Properties of Coatings, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 8: 1037–1058 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.08.1037](https://doi.org/10.15407/mfint.44.08.1037)

$\Delta H = 0,20$ мм, $S = 100\%$ і $Rz = 38$ 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 $Wp = 0,90$ Дж, порівняно 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%.

Ключові слова: електроіскрове легування, відновлення, матеріал електроду, графіт, криця, товщина шару, шерсткість, суцільність, механічні властивості.

The article presents the results of research on a new method of restoration by means of electrospark alloying (ESA) of X10CrNiTi18-10 steel details, which operates under radiation conditions. The method can be used to repair machine details of nuclear power plants. The technology includes coating the worn surface of the detail with an ESA electrode, which is made of steel X10CrNiTi18-10 or nickel, which does not contain special additives of cobalt and other elements that form long-lived isotopes in the active working environment. ESA is carried out in two stages. Before the first stage, a layer of graphite electrode coating is applied to the worn steel surface by the ESA method—a tool with a discharge energy $Wp = 0.02$ J and a productivity 0.3 sm²/min. At ESA by the electrode tool from steel X10CrNiTi18-10 the first and second stages are carried out, accordingly at $Wp = 0.20$ J with productivity 1.6 sm²/min; and $Wp = 0.55$ J with a productivity 2.5 sm²/min. As a result, the coating thickness is $\Delta H = 0.19$ mm, the continuity is $S = 100\%$ and the roughness is $Rz = 57$ μm. During ESA the first and second stages are carried out by nickel electrode tool respectively at $Wp = 0.55$ J with a capacity 2.5 sm²/min and $Wp = 0.90$ J with a capacity 3.4 sm²/min. As a result, $\Delta H = 0.20$ mm, $S = 100\%$ and $Rz = 38$ μm. The increase in discharge energy in ESA is accompanied by a decrease in yield strength and tensile strength and an increase in the relative elongation and relative narrowing of the sample. During the ESA of the sample with $Wp = 0.90$ J, compared with the undoped sample, the yield strength and tensile strength decrease with alloying by steel X10CrNiTi18-10, respectively, to 11.7% and 8.3%, and the relative elongation and relative narrowing increases, respectively, to 15% and 14.7%. During the ESA by nickel yield strength and tensile strength decreases to 13.3% and 8.6%, respectively, and the relative elongation and relative narrowing increase to 14.7% and 16.7%, respectively.

Key words: electrospark alloying, restoration, electrode material, graphite, steel, layer thickness, roughness, continuity, mechanical properties.

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

1. ВСТУП

Аналіза енергетичних потреб країни й можливостей їх задоволення

свідчать про доцільність і необхідність розвитку в Україні атомної енергетики. Вибір саме такого шляху відповідає й світовій тенденції.

Порівняно з енергетичними установками на органічному паливі умови роботи матеріалів в атомних енергетичних установках звичайно є більш складними й багатофакторними. Більшість відповідальних деталей насосного обладнання (НО) атомних електростанцій (АЕС) працюють при високих швидкостях, тисках, температурах, а також в умовах абразивного, корозійного, водневого й іншого видів впливу робочих середовищ. Крім цього, ядерний реактор, який представляє найважливішу частину АЕС, вносить свої корективи у вибір конструктивних матеріалів деталей НО. Використовувані матеріали повинні бути радіаційно-стійкими, добре поглинати нейтрони, а також бути жаростійкими й жароміцними.

Найважливішими задачами ремонтно-обслуговувального виробництва АЕС є підтримка працездатності та відновлення ресурсу машин і устаткування, забезпечення їх високої надійності і можливості ефективного використання. Для вирішення цих задач передбачається поліпшення якості ремонту за рахунок впровадження сучасних метод його організації та використання раціональних технологічних процесів зміцнення і відновлення деталей. Таким чином, під час відновлення відповідальних деталей НО (корпусів насосів, шийок валів, робочих коліс і ін.) для АЕС виникають значні труднощі, подолання яких є актуальним та своєчасним [1].

2. АНАЛІЗА ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В даний час висока продуктивність праці пов'язана з високою якістю та низьким рівнем браку продукції [2]. Особлива увага приділяється якості поверхонь, та механічним властивостям деталей [3, 4], що використовуються в обладнанні АЕС. Ще на стадії механічного оброблення приділяють велику увагу точності позиціонування на верстатах [5], вивченню вільних і вимушених коливань складної механічної системи «притосування-заготівля» [6–8]. Питання підвищення довговічності виробів може бути вирішене різноманітними методами, зокрема, у [9–15] пропонується конструювання робочих поверхонь деталей машин і знарядь геометричними методами. Не менша увага приділяється сучасним ремонтним технологіям та зміцнювальним технологіям, які постійно вдосконалюються, а їх кількість збільшується за рахунок появи нових. Значна кількість технологічних прийомів нанесення й різноманіття галузей застосування покриттів, широкий спектр використовуваних матеріалів обумовлюють ускладнення вибору того чи іншого покриття в умовах конкурентного підходу й оптимальної технології його нанесення.

Серед найуживаніших технологій нанесення захисних покриттів при виготовленні та відновленні деталей є натоплювання твердими та зносостійкими матеріалами [16–21], лазерне натоплювання [22–26], нанесення нанокомпозитів [27–29], хеміко-термічне оброблення (ХТО) [30–33] та ін. Серед шляхів поліпшення якості поверхневого шару й пониження вартості ремонту машин окремо виділяють багаторазове відновлення форми деталей полімерними матеріалами та забезпечення їх взаємозамінності [34–38]. Основними недоліками, які негативно впливають на кінцевий результат або значно підвищують собівартість ремонту, є наявність поводок і жолоблень, слабка адгезія нанесеного шару з основою, наявність пор, тріщин і неметалевих включень, пониження втомлювальної міцності, підвищена екологічна та техногенна небезпека [39].

В [40–43] описані результати досліджень впливу сильнофокусованого електронного пучка при опроміненні поверхневих шарів металів і сплавів з метою покращення їх якості. Згідно [44] при ремонтних роботах на АЕС використовують зварювання і натоплювання деталей. Ремонтне зварювання та натоплювання деталей машин та механізмів на сьогодні є одними з основних технологічних методів відновлення експлуатаційних властивостей деталей та зміцнення їх поверхонь [45–47].

Серед розглянутих методів відновлення деталей великої уваги заслуговують електроіскрове легування (ЕІЛ), яке є екологічно безпечним й останнім часом все частіше використовують в ремонтному виробництві [48–52]. Метод має ряд специфічних особливостей: матеріал анода (легувальний матеріал) може утворювати на поверхні катода (легованій поверхні) шар покриття, надзвичайно міцно зчеплений з поверхнею. У цьому випадку не тільки відсутня межа розділу між нанесеним матеріалом і металом основи, але й відбувається навіть дифузія елементів анода в катоду [53–55]; легування можна здійснювати у зазначених місцях (радіусом від часток міліметра і більше), не захищаючи при цьому решту поверхні деталі; технологія ЕІЛ металевих поверхонь дуже проста, а необхідна апаратура компактна і транспортабельна.

У [56] дослідження впливу зварювальних робіт на зміни у складі повітря показали, що у зоні проведення електрозварювання при нагріванні на крицю 12Х18Н10Т зносостійкого покриття електродом марки ОК61.30 \varnothing 2,5 мм з'являється значно більша кількість вуглекислого газу CO_2 і утворюються нестабільні йони NO, тобто виникають гази, які є отруйними навіть у малих концентраціях. Слідів озону O_3 за допомогою мас-спектрометра не виявлено. Під час дослідження хемічного складу газового середовища в зоні проведення робіт при ЕІЛ криці 12Х18Н10Т на установці «Елітрон-52А» електродом-інструментом із твердого стопу Т15К6 встановлено, що мас-спектер газового середовища практично ідентичний мас-спектру

чистого повітря. Дослідження освітленості при ЕІЛ криці 12Х18Н10Т електродом із твердого стопу Т15К6 та проведення зварювальних робіт при натоплюванні на крицю 12Х18Н10Т зносостійкого покриття електродом марки, що плавиться ОК61.30 \varnothing 2,5 мм показали її збільшення відповідно з 0,465 до 0,599 люкс та з 0,316 люкс до 6,2 тис. люкс.

Незважаючи на позитивні особливості метода ЕІЛ має і деякі недоліки, що обмежують впровадження даної технології для більш широкого кола деталей машин. До таких недоліків належать збільшення шерсткості поверхні виробів після легування, нерівномірність поверхневого зміцнення, негативний вплив ерозійного розряду на втомні властивості виробів та ін. Крім того, зі збільшенням енергії розряду ЕІЛ, як правило, понижується суцільність формованого покриття [57].

Збільшити товщину покриття можна за рахунок нанесення декількох шарів, як з одного матеріалу електроду-інструменту, так і з різних [58, 59].

Відомий також спосіб відновлення поверхонь металевих деталей, який включає нанесення на зношену поверхню деталі покриття ЕІЛ металевим електродом, що відрізняється тим, що покриття наносять на режимах, при яких забезпечують задану шерсткість поверхні, на одержану поверхню наносять, принаймні, один шар металополімерного матеріалу (МПМ), забезпечують полімеризацію нанесеного шару МПМ, після чого його піддають фінішній обробці [60]. Недоліками даного способу є низька твердість металополімерних матеріалів; основне застосування способу — відновлення деталей у нероз'ємних сполученнях (посадкових місць під підшипники, напівмуфти й ін.); металополімерні матеріали добре працюють на стиск і значно гірше на зрушування, що негативно впливає на їх застосування для відновлення поверхонь тертя деталей; зміною властивостей при збільшенні температури на поверхнях тертя й ін.

Відомий також спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей, який, включає нанесення покриття на зношену поверхню деталі методом ЕІЛ, принаймні у два етапи, але в якому, при нанесенні покриття на першому етапі наносять шар з енергією розряду 0,13–0,55 Дж і продуктивністю 1,5–2,5 см²/хв., які забезпечують товщину поверхні 0,08–0,81 мм при її суцільності 100%, потім на одержану поверхню наносять шар покриття тим же електродом з енергією розряду 0,55–0,90 Дж і продуктивністю 2,5–3,4 см²/хв., які забезпечують формування поверхні з шерсткістю, в 2–4 рази вищою, ніж на першому етапі [61]. У способі можуть використовувати електрод з олов'яної бронзи, твердого стопу Т15К6, криці 12Х18Н10Т, хрому та ніклю.

У [62] відзначається, що при виборі конструкційних матеріалів для ядерних енергетичних установок (ЯЕУ) різних типів необхідно

також враховувати число й величину циклічних змін механічних навантажень і теплосмін; нейтронне опромінення й вплив теплоносія на корозію й корозійно-механічну міцність матеріалів. Для більшості ядерних енергетичних установок обов'язковою вимогою є застосування неіржавійних криць (основний метал або натоп) для всіх елементів першого контуру, що контактують з теплоносієм. Для пониження впливу перенесених активних продуктів корозії на умови ремонту встаткування першого контуру в ряді випадків у криці додатково регламентується вміст елементів, які при опроміненні стають джерелом небезпечних довгоживучих ізотопів. Насамперед, це стосується Кобальту. Також відомо, що Кобальт, який має великий період напіврозпаду, неприпустимо використовувати в ущільненнях насосів атомних електростанцій. Якщо замість кобальтової зв'язки використано Нікель, то подібних явищ не відбувається [63].

Згідно з [64], хемічний склад матеріалів деталей, що стикаються з теплоносієм, не містить спеціальних добавок Кобальту та інших елементів, що утворюють довгоживучі ізотопи в активному робочому середовищі. В ядерній енергетиці для створення циркуляції теплоносія використовують головні циркуляційні насоси (ГЦН) з допоміжними насосами до них. Усі деталі й вузли, які стикаються з теплоносієм, виготовлені із криць, стійких проти корозії та ерозії. У [65] описаний композитний матеріал для радіаційного захисту, в якому як наповнювач полістирольної матриці використані порошки вольфраму та алюмінію.

Матеріал деталей, виготовлених з більшості аустенітних криць, не має схильності до міжкристалічної корозії [64].

Аналіза матеріалів (олов'яної бронзи, твердого стопу Т15К6 і неіржавійної криці аустенітного класу 12Х18Н10Т), що застосовують у [61] для відновлення зношених поверхонь крицевих деталей як матеріалу аноди показала, що їх не рекомендовано використовувати для крицевих деталей машин, що працюють на атомних електростанціях. Так:

– при використанні як електроду-інструменту олов'яної бронзи тимчасовий опір (σ_b), згідно з ГОСТ 613-79, не перевищує 245 МПа, але в [62] стверджується, що відповідно до вимог по товщині корпусів і нормованих коефіцієнтах запасу міцності конструкційні реакторні матеріали мають мати за робочої температури межу міцності не менше 400 МПа з можливістю до збільшення цієї характеристики;

– твердий стоп т15к6 містить у своєму складі Кобальт, присутність якого створює загрозу утворення довгоживучих ізотопів в активному робочому середовищі;

– електрод-інструмент з неіржавійної криці 12Х18Н10Т або нікелю при обробленні деталей із неіржавійних криць прилипає до об-

роблюваної поверхні, що веде до пониження суцільності нанесеного шару, і таким чином знижує якість нанесеного покриття.

Відповідно до [66–69], залежно від конкретних умов легування, застосовують додаткові технологічні прийоми. Наприклад, при легуванні матеріялами, які «залипають» при зіткненні аноди з поверхнею, яку піддають легуванню, що порушує частоту проходження імпульсів і збільшує нерівність поверхні, рекомендується попереднє короткочасне легування поверхні іншим матеріалом на режимах з малою енергією імпульсів (так званих м'яких режимах) для утворення своєрідного перехідного тонкого шару. Найчастіше для цього застосовують графіт. У результаті, при подальшому легуванні «залипання» значно зменшується, покриття стає рівномірним, а питома кількість перенесеного матеріалу не знижується.

Аналіза проведених літературних досліджень показала, що для відновлення поверхонь крицевих деталей, що працюють в умовах радіаційного опромінювання, більш корисною є енергоефективна, екологічна та техногенно безпечна метода ЕІЛ, яка мало в чому поступається іншим методам, а іноді переважає їх. В якості електроду-інструменту потрібно використовувати нікель і неіржавійну крицю 12Х18Н10Т.

Метою роботи є забезпечення якості відновлених поверхонь деталей, що працюють в умовах радіаційного опромінювання, 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 покриттів.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Зразки з неіржавійної криці аустенітного класу марки 12Х18Н10Т, розміром $10 \times 10 \times 8$ мм і з твердістю після остаточного термооброблення 140–170 НВ, шліфували до шерсткості поверхні $Ra = 0,50$ мкм (рис. 1). Потім, на установці моделю «Елітрон 52-А», методом ЕІЛ при різних режимах енергії розряду наносили покриття електродами-інструментами з неіржавійної криці 12Х18Н10Т і ніклю. Таким чином були виготовлені три серії зразків [1]: 1 серія — ЕІЛ здійснювали у два етапи: на першому етапі проводили оброблення графітом при енергії розряду $Wp = 0,02$ Дж і продуктивності $0,3$ см²/хв., а потім, на другому етапі, наносили покриття на одному режимі; 2 серія — покриття здійснювали у три етапи: перший етап — оброблення графітом проводили при енергії розряду $Wp = 0,02$ Дж і продуктивності $0,3$ см²/хв., другий етап проводили на режимі, що забезпечує найбільшу суцільність і товщину покриття, а третій етап проводили на більш «грубому» режимі із забезпеченням шерсткості в 2–3 рази більшої, ніж на попере-

дньому (другому) етапі; 3 серія — покриття здійснювали у три етапи: перший етап — оброблення графітом проводили при енергії розряду $W_p = 0,02$ Дж і продуктивності $0,3 \text{ см}^2/\text{хв.}$, другий і третій етапи проводили у послідовності, протилежній обробленню зразків серії 2.

Перший етап нанесення шару покриття методою ЕІЛ електродом-інструментом із криці 12X18H10T виконують з енергією розряду $0,04\text{--}0,20$ Дж і продуктивністю $0,40\text{--}1,6 \text{ см}^2/\text{хв.}$, а другий етап — з енергією розряду $0,35\text{--}0,55$ Дж і продуктивністю $1,7\text{--}2,5 \text{ см}^2/\text{хв.}$

Перший етап нанесення шару покриття методою ЕІЛ електродом-інструментом з ніклю виконують з енергією розряду $0,04\text{--}0,55$ Дж і продуктивністю $0,4\text{--}2,5 \text{ см}^2/\text{хв.}$, а другий етап — з енергією розряду $0,90$ Дж і продуктивністю $3,4 \text{ см}^2/\text{хв.}$

Товщину покриття вимірювали мікрометром, шерсткість — із застосуванням профілографа-профілометра моделю 201 заводу «Калібр» (рис. 1, а). Результати через спеціальний пристрій видавалися на монітор комп'ютера у вигляді графіків (рис. 1, б).

Для дослідження впливу методи ЕІЛ на механічні властивості деталі (межу міцності, межу текучості, відносне подовження та відносне звуження) були виготовлені зразки із криці 12X18H10T відповідно до ГОСТ 7855-84. Для кожного матеріалу електроду-інструменту і режиму ЕІЛ виготовляли по 3 зразки.

Для металографічних та дюрOMETричних досліджень підготовлених зразків використовували оптичний мікроскоп «Неофот-2», за допомогою якого оцінювали якість сформованого шару, його суцільність, товщину та структуру зон підшару, дифузійної зони та зони термічного впливу.

Також виконували дюрOMETричну аналізу розподілу мікротвер-

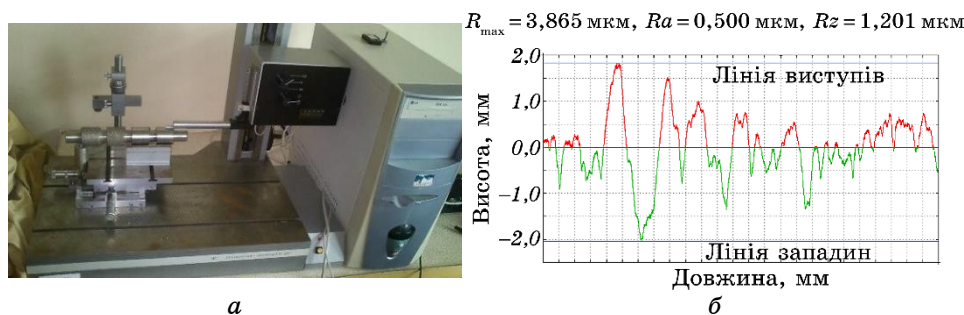


Рис. 1. Профілограф-профілометр мод. 201 заводу «Калібр» (а) і профілограма шерсткості вихідного зразка (б).

Fig. 1. Profilograph-profilometer mod. 201 plant 'Caliber' (a) and profilogram of the roughness of the original sample (b).

дості у поверхневому шарі. Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 згідно ГОСТ 9450-76. Розподіл елементів у поверхневому шарі визначали на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106 з камерою низького вакууму і системою енергодисперсійної мікроаналізи. Встановлений на приладі детектор XR-100FASTSDD фірми Amptek (США) давав змогу проводити якісну і кількісну елементну аналізу областей досліджуваного об'єкта.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТОПОГРАФІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТІВ

До топографічних параметрів покриттів, сформованих методом ЕІЛ, слід віднести товщину, шерсткість і суцільність, а до механічних властивостей межу міцності, межу текучості, відносне подовження та відносне звуження деталі.

Технічне рішення способу [70], пояснюється конкретними прикладами його застосування для відновлення деталей, виготовлених з матеріалів, що широко застосовуються для одержання обладнання для атомних електростанцій. Покриття методом ЕІЛ можна наносити, варіюючи енергію розряду в діапазоні 0,036–6,8 Дж. Із зростанням енергії розряду збільшується товщина покриття і шерсткість поверхні, а суцільність (S) знижується.

Під збільшенням товщини покриття (ΔH) розуміють збільшення розміру деталі або зразка, виміряного по виступах шерсткості нанесеного матеріалу. При цьому товщина шару може змінюватися в залежності від характеру взаємодії аноди і катода, наприклад, на установці з ручним вібратором типу «Елітрон 52-А» — від 0,01 до 0,25 мм, а висота мікронерівностей (Rz) при цьому змінюється, відповідно, від 8,5 до 155,8 мкм. Суцільність поверхні при цьому може знижуватися зі 100% до 60%.

Нанесення покриттів із криці 12Х18Н10Т на крицю 12Х18Н10Т. Зразки всіх серій попередньо оброблювали графітовим електродом-інструментом при енергії розряду $W_p = 0,02$ Дж і продуктивністю 0,3 см²/хв.

В таблиці 1 представлені результати дослідження зразків першої серії. При нанесенні криці 12Х18Н10Т найбільша суцільність покриття становить 100%. Найбільша товщина покриття (0,09 мм) при 100% суцільності досягається при енергії розряду $W_p = 0,20$ Дж. Шерсткість поверхні покриття при цьому становить $Rz = 19$ мкм. Подальше збільшення енергії розряду до $W_p = 0,35$ Дж приводить поряд зі збільшенням товщини шару до 0,14 мм до різкого збільшення шерсткості поверхні (до $Rz = 41$ мкм), а також пониження суцільності покриття до 90%. Подальше збільшення енергії розряду супроводжується ще більшим зростанням шерсткості поверхні і пониженням суцільності. Найбільша товщина шару, яка стано-

ТАБЛИЦЯ 1. Залежність параметрів топографії та механічних властивостей покриттів на зразках першої серії, нанесених методом ЕІЛ, від енергії розряду.

TABLE 1. Dependence of topography parameters and mechanical properties of coatings on samples of the first series applied by electrospark alloying on discharge energy.

Енергія розряду Wp	Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв.}$	Топографічні параметри			Механічні властивості			
		Товщина покриття ΔH , мм	Шерсткість Rz , мкм	Суцільність, %	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %
Термічна обробка (гартування 1000–1080°C, охолодження у воді)					196	510	40,0	55,0
0,04	0,4	0,03	7	100	191	503	40,3	55,5
0,11	1,5	0,07	12	100	189	496	41,1	56,1
0,20	1,6	0,09	19	100	187	490	42,1	57,5
0,35	1,7	0,14	41	90	185	483	43,2	58,3
0,55	2,5	0,16	61	70	183	471	44,1	59,7
0,90	3,4	0,22	92	60	173	468	46	63,1

віль 0,22 мм, формується при $Wp = 0,90$ Дж. При цьому шерсткість поверхні і суцільність покриття дорівнюють, відповідно, $Rz = 92$ мкм і 60%. Подальше збільшення енергії розряду небажане, оскільки воно приводить до різкого пониження якості покриття (низька суцільність, висока шерсткість, прилипання електроду до оброблюваної поверхні) і вигорання електрода.

Аналіза результатів дослідження механічних властивостей покриттів на криці 12X18H10T показала, що використання методи ЕІЛ для відновлення деталей супроводжується негативними результатами — пониженням межі текучості і межі міцності і збільшенням відносного подовження і відносного звуження. При цьому зі збільшенням енергії розряду ці негативні наслідки посилюються. Так при ЕІЛ криці 12X18H10T цією ж крицею при енергії розряду 0,90 Дж порівняно з нелегованою межа текучості і межа міцності зменшуються, відповідно на 11,7% і 8,3%, а відносне подовження і відносне звуження збільшуються, відповідно на 15% і 14,7%.

В таблиці 2 представлені результати дослідження зразків другої серії. На зразок із криці 12X18H10T після оброблення графітовим електродом першим шаром наносили крицю 12X18H10T при $Wp = 0,20$ Дж, при цьому одержали максимальну суцільність покриття (100%) і товщину 0,09 мм, шерсткість складала $Rz = 19$ мкм. Другим шаром методом ЕІЛ наносили крицю 12X18H10T при

ТАБЛИЦЯ 2. Залежність параметрів топографії та механічних властивостей покриттів на зразках другої серії, нанесених методом ЕІЛ, від енергії розряду.

TABLE 2. Dependence of topography parameters and mechanical properties of coatings on samples of the second series applied by electrospark alloying on discharge energy.

Енергія розряду W_p	Продуктивність, $\text{см}_2/\text{хв.}$	Топографічні параметри			Механічні властивості			
		Товщина покриття ΔH , мм	Шерсткість, Rz , мкм	Суцільність, %	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %
0,04 + 0,35	1-й етап 0,4 2-й етап 1,7	0,15	41	90	185	482	43,3	58,4
0,20 + 0,35	1-й етап 1,6 2-й етап 1,7	0,18	39	100	183	480	43,8	58,7
0,20 + 0,55	1-й етап 1,6 2-й етап 2,5	0,19	57	100	180	470	44,2	59,9
0,20 + 0,90	1-й етап 1,6 2-й етап 3,4	0,20	83	100	173	469	46,1	63,3

$W_p = 0,35$ і $0,55$ Дж, де шерсткість, відповідно, більше \sim у 2 і 3 рази ($Rz = 41$ і 61 мкм). При цьому загальна товщина шару становила, відповідно, $0,18$ і $0,19$ мм, шерсткість $Rz = 39$ і 57 мкм при 100% суцільності (див. табл. 2). Подальше збільшення енергії розряду при нанесенні другого шару до $W_p = 0,90$ Дж і при незначному збільшенні товщини шару приводить до різкого збільшення шерсткості поверхні з $Rz = 57$ до $Rz = 83$ мкм.

3 серія — покриття здійснювали у три етапи: перший етап — оброблення графітом проводили при енергії розряду $W_p = 0,02$ Дж і продуктивності $0,3 \text{ см}_2/\text{хв.}$, другий і третій етапи проводили у послідовності, протилежній обробленню зразків серії 2.

В таблиці 3 представлені результати дослідження зразків третьої серії. Аналіза результатів показала, що якість покриттів значно гірша, ніж у покриттів другої серії (суцільність 65–75%, шерсткість $Rz = 83$ –85 мкм) при наближено однаковій товщині нанесеного шару. Механічні властивості незначно кращі порівняно з зразками другої серії. Так при поетапному нанесенні покриттів в послідовності: 1-й етап: $W_p = 0,90$ Дж і 2-й етап: $W_p = 0,04$ Дж межа текучості і межа міцності збільшились, відповідно на 2,3% і 2,1%, а відносне подовження і відносне звуження зменшились, відповідно на 2,2% і 3,5%.

ТАБЛИЦЯ 3. Залежність параметрів топографії та механічних властивостей покриттів на зразках третьої серії, нанесених методом ЕІЛ, від енергії розряду.

TABLE 3. Dependence of topography parameters and mechanical properties of coatings on samples of the third series applied by electrospark alloying on discharge energy.

Енергія розряду W_p	Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв.}$	Топографічні параметри			Механічні властивості			
		Товщина покриття ΔH , мм	Шерсткість R_z , мкм	Суцільність, %	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне зрушення, %
0,90 + 0,04	1-й етап 3,4 2-й етап 0,4	0,20	83	65	175	475	45,7	62,1
0,90 + 0,20	1-й етап 3,4 2-й етап 1,6	0,21	85	75	177	479	45,1	61,2

Аналіза одержаних результатів дослідження якості покриттів на криці 12X18H10T методом ЕІЛ електродом-інструментом із криці 12X18H10T при різних режимах енергії розряду (зразки серій 1, 2 і 3) дала змогу визначити технологію відновлення деталей, що працюють в умовах радіаційного опромінювання. Вона здійснюється у три етапи: перший — провести ЕІЛ графітом при енергії розряду $W_p = 0,02$ Дж і продуктивності $0,3 \text{ см}^2/\text{хв.}$; другий — провести ЕІЛ електродом інструментом із криці 12X18H10T при $W_p = 0,20$ Дж і продуктивності $1,6 \text{ см}^2/\text{хв.}$; третій — провести ЕІЛ електродом інструментом із криці 12X18H10T при $W_p = 0,55$ Дж і продуктивності $2,5 \text{ см}^2/\text{хв.}$

В результаті, одержимо покриття товщиною $0,19$ мм, суцільністю 100% і шерсткістю $R_z = 57$ мкм.

Нанесення покриттів з ніклю на крицю 12X18H10T. При нанесенні покриттів з ніклю на крицю 12X18H10T зразки всіх серій попередньо обробляли графітовим електродом-інструментом при енергії розряду $W_p = 0,02$ Дж і продуктивності $0,3 \text{ см}^2/\text{хв.}$

У таблиці 4 представлені результати параметрів топографії та механічні властивості покриттів при ЕІЛ криці 12X18H10T електродом-інструментом з ніклю. Як видно з таблиці найбільша суцільність покриття 100% і товщина шару $0,15$ мм досягається при енергії розряду $W_p = 0,55$ Дж. Шерсткість поверхні при цьому становить $R_z = 37$ мкм. Подальше збільшення енергії розряду приводить до зростання товщини шару до $0,17$ мм і значного пониження якості покриття (суцільність 85% і шерсткість $R_z = 69$ мкм).

ТАБЛИЦЯ 4. Залежність параметрів топографії та механічних властивостей покриттів з ніклю, нанесених методом ЕІЛ на крицю 12Х18Н10Т, від енергії розряду (зразки 1–3 серії: * — зразки 1-ї серії, ** — зразки 2-ї серії, *** — зразки 3-ї серії).

TABLE 4. Dependence of topography parameters and mechanical properties of nickel coatings applied by electrospark alloying on steel X10CrNiTi18-10, the discharge energy (samples 1–3 series: *—samples of first series, **—samples of second series, ***—samples of third series).

		Топографічні параметри			Механічні властивості			
Енергія розряду, Wp	Продуктивність, $cm^2/xv.$	Товщина покриття ΔH , мм	Шерсткість Rz , мкм	Суцільність, %	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %
0,55*	2,5	0,15	38	100	181	468	45,1	60,5
0,90*	3,4	0,19	69	85	170	466	45,9	64,2
0,55 + 0,90**	1-й етап 2,5 2-й етап 3,4	0,20	38	100	174	464	46,2	61,9
0,90 + 0,55***	1-й етап 3,4 2-й етап 2,5	0,14	56	90	177	466	45,9	61,3

При формуванні покриття поетапно, з використанням спочатку енергії розряду $Wp = 0,55$ Дж, а потім $Wp = 0,90$ Дж, товщина шару становить 0,20 мм при 100% суцільності і шерсткості $Rz = 38$ мкм. Нанесення покриття в зворотному порядку: спочатку з $Wp = 0,90$ Дж, а потім з $Wp = 0,55$ Дж приводить до пониження його суцільності до 90% і зростання шерсткості до $Rz = 56$ мкм.

Аналіза впливу енергії розряду при відновленні методом ЕІЛ криці 12Х18Н10Т ніклем і способу формування покриттів на механічні властивості зразків показала:

– при відновленні деталей із криці 12Х18Н10Т ніклем зі збільшенням енергії розряду знижується межа текучості і межа міцності, а відносне подовження і відносне звуження збільшується;

– при ЕІЛ криці 12Х18Н10Т ніклем з $Wp = 0,90$ Дж порівняно з нелегованою 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%.

– механічні властивості зразків, відновлених згідно 3-ї серії, незначно кращі порівняно з властивостями зразків, відновлених згідно 2-ї серії. Так при поетапному нанесенні покриттів в послідовності: 1-й етап: $Wp = 0,90$ Дж і 2-й етап: $Wp = 0,55$ Дж межа текучості і

межа міцности збільшились, відповідно на 1,7% і 4,3%, а відносне подовження і відносне звуження зменшились, відповідно на 0,7% і 0,9%.

5. ВИСНОВКИ

В результаті дослідження технології відновлення методом ЕІЛ деталей із криці 12X18H10T, що працюють в умовах радіаційного опромінювання, встановлено:

1. З метою усунення залипання електроду-інструменту при відновленні поверхні деталі із криці 12X18H10T необхідно попередньо проводити ЕІЛ графітом при енергії розряду $W_p = 0,02$ Дж і продуктивності $0,3 \text{ см}^2/\text{хв}$.

2. Відновлення деталей електродом-інструментом із криці 12X18H10T необхідно проводити в два етапи: перший і другий, відповідно при $W_p = 0,20$ Дж з продуктивністю $1,6 \text{ см}^2/\text{хв}$. і $W_p = 0,55$ Дж з продуктивністю $2,5 \text{ см}^2/\text{хв}$. В результаті, товщина покриття $\Delta H = 0,19$ мм, суцільність $S = 100\%$ і шерсткість поверхні $Rz = 57$ мкм.

3. Відновлення деталей електродом-інструментом з ніклю необхідно проводити в два етапи: перший і другий, відповідно при $W_p = 0,55$ Дж з продуктивністю $2,5 \text{ см}^2/\text{хв}$, а потім $W_p = 0,90$ Дж з продуктивністю $3,4 \text{ см}^2/\text{хв}$. В результаті $\Delta H = 0,20$ мм, $S = 100\%$ і $Rz = 38$ мкм.

4. Збільшення енергії розряду як при ЕІЛ крицею 12X18H10T, так і при легуванні Ніклем супроводжується пониженням межі текучості і межі міцности і збільшенням відносного подовження і відносного звуження зразка. При ЕІЛ з $W_p = 0,90$ Дж порівняно з нелегуюваною крицею межа текучості і межа міцности зменшуються при легуванні крицею 12X18H10T, відповідно на 11,7% і 8,3%, а відносне подовження і відносне звуження збільшуються, відповідно на 15% і 14,7%. При ЕІЛ Ніклем межа текучості і межа міцности зменшуються, відповідно на 13,3% і 8,6%, а відносне подовження і відносне звуження збільшуються, відповідно на 14,7% і 16,7%.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Н. В. Тарельник, *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, № 2: 32 (2021).
2. I. Kuric, M. Kandra, J. Klarák, V. Ivanov, and D. Więcek, *Advanced Manufacturing Processes* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, M. Edl, I. Kuric, I. Pavlenko, and P. Dasic) (Springer: 2020), p. 148.
3. A. Zahorulko, C. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012039 (2017).
4. A. Zahorulko, *Sealing Technology*, 2015, Iss. 8: 7 (2015).

5. A. Kotliar, Y. Basova, V. Ivanov, O. Murzabulatova, S. Vasytsova, M. Litvynenko, and O. Zinchenko, *Management and Production Engineering Review*, **11**, No. 1: 52 (2020).
6. V. Ivanov, I. Dehtiarov, Y. Denysenko, N. Malovana, and N. Martynova, *Diagnostyka*, **19**, No. 3: 3, (2018).
7. V. Ivanov, I. Dehtiarov, I. Pavlenko, M. Kosov, and M. Hatala, *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. 114.
8. V. Ivanov, I. Pavlenko, I. Kuric, and M. Kosov, *Industry 4.0: Trends in Management of Intelligent Manufacturing Systems* (Eds. L. Knapčiková and M. Balog) (Springer: 2019), p. 133.
9. 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.
10. S. Pylypaka, T. M. 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.
11. S. Pylypaka, V. Nesvidomin, T. Volina, L. Sirykh, and L. Ivashyna, *Inmateh Agricultural Engineering*, **62**, No. 3: 79 (2020).
12. S. Pylypaka, T. Volina, I. Hryshchenko, I. Rybenko, and N. Sydorenko, *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. 196.
13. T. Volina, S. Pylypaka, A. Rebrii, O. Pavlenko, Y. 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.
14. T. Volina, S. Pylypaka, V. Nesvidomin, A. Pavlov, and S. Dranovska, *Eastern-European J. Enterprise Technologies*, **3**, No. 7: 45 (2021).
15. S. Pylypaka, T. Volina, A. Nesvidomin, I. Zakharova, 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. А. А. Паркин, С. С. Жаткин, А. Б. Семин, *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, **18**, № 4(2): 362 (2016).
17. A. Panasyuk, O. Umanskyi, M. Storozhenko, and V. Akopyan, *Key Engineering Materials*, **527**: 9 (2013).
18. O. Umanskyi, M. Storozhenko, M. Antonov, O. Terentjev, O. Koval, and D. Goljandin, *Key Engineering Materials*, **604**: 16 (2019).
19. M. S. Storozhenko, A. P. Umanskii, A. E. Terentiev, and I. M. Zakiev, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, No. 1–2: 60 (2017).
20. M. Storozhenko, A. Umanskii, V. A. Lavrenko, S. S. Chuprov, and A. D. Kostenko, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **50**, No. 11–12: 719 (2012).
21. O. Umanskyi, M. Storozhenko, V. Krasovskiy, O. Terentjev, and M. Antonov, *J. Alloys Compd.*, **778**: 15 (2019).
22. N. Radek and K. Bartkowiak, *Physics Procedia A*, **5**: 417 (2010).
23. V. G. Smelov, A. V. Sotov, and S. A. Kosirev, *ARPJ. Eng. Applied Sci.*, **9**, No. 10: 1854 (2014).

24. O. Gaponova, C. Kundera, G. Kirik, V. Tarellyk, 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.
25. V. Tarellyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, N. V. Tarellyk, V. S. Martsynkovskyy, B. O. Sarzhanov, O. A. Sarzhanov, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **58**: 703 (2020).
26. A. Kovalchenko, O. Ajayi, A. Erdemir, G. Fenske, and I. Etsion, *Tribol. International*, **38**: 219 (2005).
27. A. D. Pogrebnjak, A. M. Mahmud, I. T. Karasha, G. V. Kirik, R. Y. Tkachenko, and A. P. Sypylenko, *J. Nano-Electron. Phys.*, **3**, No. 4: 73 (2011).
28. A. D. Pogrebnjak, M. M. Danilionok, V. V. Uglov, N. K. Erdybaeva, G. V. Kirik, S. N. Dub, V. S. Rusakov, A. P. Shypylenko, P. V. Zukovski, and Y. Zh. Tuleushev, *Vacuum*, **83**, Suppl. 1: S235 (2009).
29. A. D. Pogrebnjak, A. P. Shpak, V. M. Beresnev, G. V. Kirik, D. A. Kolesnikov, F. F. Komarov, P. Konarski, N. A. Makhmudov, M. V. Kaverin and V. V. Grudnitskii, *Tech. Phys. Lett.*, **37**: 636 (2011).
30. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, and Heng Chang, *Engineering*, **3**, No. 9: 942 (2011).
31. S. Ben Slima, *Materials Sciences and Applications*, **3**, Iss. 9: 640 (2012).
32. C. M. Suh, J. K. Hwang, K. S. Son, and H. K. Jang, *Mater. Sci. Eng. A*, **392**, No. 1–2: 31 (2005).
33. J. Baranowska and S. E. Franklin, *Wear*, **264**, No. 9–10: 899 (2008).
34. А. А. Ищенко, *Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами* (ПГТУ: 2007).
35. І. О. Мікульонок, О. Л. Сокольський, *Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості)* (Київ: Політехніка: 2015).
36. Ю. Н. Анисимов, С. Н. Савин, *Журн. прикл. химии*, **75**, № 6: 1015 (2002).
37. Ю. А. Анисимов, Ю. Н. Анисимов, *Пластические массы*, № 2: 47 (2007).
38. О. Л. Гайдамак, В. А. Матвійчук, Ю. С. Кучеренко, *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 2 (109): 105 (2020).
39. V. Tarellyk, V. Martsynkovskyy, A. Sarzhanov, A. Pavlov, V. Gerasimenko, and B. Sarzhanov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012050 (2017).
40. 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, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **499**: 25 (2021).
41. S. E. Donets, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. A. Startsev, and V. T. Uvarov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 4: 302 (2015).
42. V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. G. Tolstolutskiy, V. V. Uvarov, and V. T. Uvarov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 1: 119 (2009).
43. A. G. Kobets, P. R. Horodek, O. A. Startsev, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, and V. T. Uvarov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **51**: 478 (2015).
44. *Наказ Державної інспекції ядерного регулювання України від 04.08.2020 № 319 «Про затвердження Загальних вимог безпеки до улаштування та експлуатації обладнання й трубопроводів атомних станцій».*

45. Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов, В. М. Константинов, *Восстановление деталей машин* (Ред. В. П. Иванов) (Москва: Машиностроение: 2003).
46. Р. Е. Есенберлин, *Восстановление автомобильных деталей сваркой, наплавкой и пайкой* (Москва: Транспорт: 1994).
47. В. А. Коротков, И. Д. Михайлов, А. М. Веснин, А. С. Зотов, *Сборка в машиностроении, приборостроении, 10*: 33 (2008).
48. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarel'nik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering, 39*: 148 (2012).
49. V. B. Tarel'nyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskiy, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 55*: 585 (2017).
50. 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.
51. V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, and A. Dziuba, *Applied Mechanics and Materials, 630*: 388 (2014).
52. V. Tarel'nyk and V. Martsynkovskyy, *Applied Mechanics and Materials, 630*: 397 (2014).
53. V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, M. Dovzyk, N. Tarel'nyk, and S. Gorovoy, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 233*: 012049 (2017).
54. V. Tarel'nyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 233*: 012048 (2017).
55. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry, 53*: 258 (2017).
56. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, V. B. Loboda, E. V. Konoplyanchenko, V. S. Martsinkovskii, Yu. I. Semirnenko, N. V. Tarel'nyk, M. A. Mikulina, and B. A. Sarzhanov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry, 57*: 173 (2021).
57. 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).
58. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng., 53*: 114 (2017).
59. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng., 53*: 385 (2017).
60. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petroleum Eng., 53*: 540 (2017).
61. Б. О. Саржанов, *Спосіб підвищення якості відновлених покриттів металевих деталей методом електроерозійного легування*, Патент України на корисну модель № u201909758 (Опубліковано 11 листопада 2019 р.).
62. Ю. Ф. Баландин, И. Б. Горьнин, Ю. И. Звездин, Б. Г. Мирков, *Конструкционные материалы АЭС* (Москва: Энергоатомиздат: 1984).
63. Э. Майер, *Торцовые уплотнения* (Москва: Машиностроение: 1978).
64. А. С. Шелегов, С. Т. Лескин, В. И. Слободчук, *Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000* (Москва: НИЯУ «МИФИ»: 2011).

65. E. M. Prokhorenko, V. Klepikov, V. V. Lytvynenko, A. Zakharchenko, and M. Khazhmuradov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2:193 (2015).
66. Н. И. Лазаренко, *Электроискровое легирование металлических поверхностей* (Москва: Машиностроение: 1976).
67. А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревуцкий, *Электроискровое легирование металлических поверхностей* (Кишинев: Штиинца: 1985).
68. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 266 (2017).
69. B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarel'nyk, O. M. Myslyvchenko, P. Kurp, T. I. Zhylenko, and I. Konoplianchenko, *Materials*, **14**, Iss. 4: 739 (2021).
70. Н. В. Тарельник, *Спосіб відновлення зношених поверхонь сталевих деталей обладнання, яке підлягає радіаційному опромінюванню*, Патент України № 150213 (Опубліковано 13 січня 2022 р.).

REFERENCES

1. N. V. Tarel'nyk, *Naukovyy Visnyk Ivano-Frankivs'koho Natsional'noho Tekhnichnoho Universytetu Nafty i Hazu*, No. 2: 32 (2021) (in Ukrainian).
2. I. Kuric, M. Kandra, J. Klarák, V. Ivanov, and D. Więcek, *Advanced Manufacturing Processes* (Eds. V. Tonkonogyi, V. Ivanov, J. Trojanowska, G. Oborskyi, M. Edl, I. Kuric, I. Pavlenko, and P. Dasic) (Springer: 2020), p. 148.
3. A. Zahorulko, C. Kundera, and S. Hudkov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012039 (2017).
4. A. Zahorulko, *Sealing Technology*, **2015**, Iss. 8: 7 (2015).
5. A. Kotliar, Y. Basova, V. Ivanov, O. Murzabulatova, S. Vasytsova, M. Litvynenko, and O. Zinchenko, *Management and Production Engineering Review*, **11**, No. 1: 52 (2020).
6. V. Ivanov, I. Dehtiarov, Y. Denysenko, N. Malovana, and N. Martynova, *Diagnostyka*, **19**, No. 3: 3, (2018).
7. V. Ivanov, I. Dehtiarov, I. Pavlenko, M. Kosov, and M. Hatala, *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. 114.
8. V. Ivanov, I. Pavlenko, I. Kuric, and M. Kosov, *Industry 4.0: Trends in Management of Intelligent Manufacturing Systems* (Eds. L. Knapčíková and M. Balog) (Springer: 2019), p. 133.
9. 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.
10. S. Pylypaka, T. M. 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.
11. S. Pylypaka, V. Nesvidomin, T. Volina, L. Sirykh, and L. Ivashyna, *Inmateh Agricultural Engineering*, **62**, No. 3: 79 (2020).
12. S. Pylypaka, T. Volina, I. Hryshchenko, I. Rybenko, and N. Sydorenko, *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. 196.
13. T. Volina, S. Pylypaka, A. Rebrii, O. Pavlenko, Y. 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.
 14. T. Volina, S. Pylypaka, V. Nesvidomin, A. Pavlov, and S. Dranovska, *Eastern-European J. Enterprise Technologies*, **3**, No. 7: 45 (2021).
 15. S. Pylypaka, T. Volina, A. Nesvidomin, I. Zakharova, 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. A. A. Parkin, S. S. Zhatkin, and A. B. Semin, *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossiyskoy Akademii Nauk*, **18**, No. 4 (2): 362 (2016) (in Russian).
 17. A. Panasyuk, O. Umanskyi, M. Storozhenko, and V. Akopyan, *Key Engineering Materials*, **527**: 9 (2013).
 18. O. Umanskyi, M. Storozhenko, M. Antonov, O. Terentjev, O. Koval, and D. Goljandin, *Key Engineering Materials*, **604**: 16 (2019).
 19. M. S. Storozhenko, A. P. Umanskii, A. E. Terentiev, and I. M. Zakiev, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **56**, No. 1–2: 60 (2017).
 20. M. Storozhenko, A. Umanskii, V. A. Lavrenko, S. S. Chuprov, and A. D. Kostenko, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **50**, No. 11–12: 719 (2012).
 21. O. Umanskyi, M. Storozhenko, V. Krasovskiy, O. Terentjev, and M. Antonov, *J. Alloys Compd.*, **778**: 15 (2019).
 22. N. Radek and K. Bartkowiak, *Physics Procedia A*, **5**: 417 (2010).
 23. V. G. Smelov, A. V. Sotov, and S. A. Kosirev, *ARPJ. Eng. Applied Sci.*, **9**, No. 10: 1854 (2014).
 24. 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.
 25. V. Tarelnyk, I. Konoplianchenko, O. Gaponova, N. V. Tarelnyk, V. S. Martsynkovskyy, B. O. Sarzhanov, O. A. Sarzhanov, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **58**: 703 (2020).
 26. A. Kovalchenko, O. Ajayi, A. Erdemir, G. Fenske, and I. Etsion, *Tribol. International*, **38**: 219 (2005).
 27. A. D. Pogrebnyak, A. M. Mahmud, I. T. Karasha, G. V. Kirik, R. Y. Tkachenko, and A. P. Sypylenko, *J. Nano-Electron. Phys.*, **3**, No. 4: 73 (2011).
 28. A. D. Pogrebnyak, M. M. Danilionok, V. V. Uglov, N. K. Erdybaeva, G. V. Kirik, S. N. Dub, V. S. Rusakov, A. P. Shypylenko, P. V. Zukovski, and Y. Zh. Tuleushev, *Vacuum*, **83**, Suppl. 1: S235 (2009).
 29. A. D. Pogrebnyak, A. P. Shpak, V. M. Beresnev, G. V. Kirik, D. A. Kolesnikov, F. F. Komarov, P. Konarski, N. A. Makhmudov, M. V. Kaverin and V. V. Grudnitskii, *Tech. Phys. Lett.*, **37**: 636 (2011).
 30. Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, and Heng Chang, *Engineering*, **3**, No. 9: 942 (2011).
 31. S. Ben Slima, *Materials Sciences and Applications*, **3**, Iss. 9: 640 (2012).
 32. C. M. Suh, J. K. Hwang, K. S. Son, and H. K. Jang, *Mater. Sci. Eng. A*, **392**,

- No. 1–2: 31 (2005).
33. J. Baranowska and S. E. Franklin, *Wear*, **264**, No. 9–10: 899 (2008).
 34. A. A. Ishchenko, *Tekhnologicheskie Osnovy Vosstanovleniya Promyshlennogo Oborudovaniya Sovremennymi Polimernymi Materialami* [Technological Foundations for the Restoration of Industrial Equipment with Modern Polymeric Materials] (PGTU: 2007) (in Russian).
 35. I. O. Mikul'onok and O. L. Sokol's'kyy, *Polimerni Materialy i Vyroby z Nykh (Oderzhannya, Pereroblennya, Vlastyivosti)* [Polymer Materials and Products from Them (Production, Processing, Properties)] (Kyiv: Politekhnik: 2015) (in Ukrainian).
 36. Yu. N. Anisimov and S. N. Savin, *Zhurn. Prikl. Khimii*, **75**, No. 6: 1015 (2002) (in Russian).
 37. Yu. A. Anisimov and Yu. N. Anisimov, *Plasticheskie Massy*, No. 2: 47 (2007) (in Russian).
 38. O. L. Haydamak, V. A. Matviychuk, and Yu. S. Kucherenko, *Tekhnika, Enerhetyka, Transport APK*, No. 2 (109): 105 (2020) (in Russian).
 39. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, A. Sarzhanov, A. Pavlov, V. Gerasimenko, and B. Sarzhanov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012050 (2017).
 40. 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, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **499**: 25 (2021).
 41. S. E. Donets, V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. A. Startsev, and V. T. Uvarov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 4: 302 (2015).
 42. V. F. Klepikov, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, O. G. Tolstolutskiy, V. V. Uvarov, and V. T. Uvarov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 1: 119 (2009).
 43. A. G. Kobets, P. R. Horodek, O. A. Startsev, V. V. Lytvynenko, Yu. F. Lonin, A. G. Ponomarev, and V. T. Uvarov, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **51**: 478 (2015).
 44. *Nakaz Derzhavnoyi Inspektsiyi Yadernoho Rehulyuvannya Ukrayiny vid 04.08.2020 No. 319 'Pro Zatverzhennya Zahal'nykh Vymoh Bezpeky do Ulashuvannya ta Ekspluatatsiyi Obladnannya y Truboprovodiv Atomnykh Stantsiy* [Order of the State Inspection of Nuclear Regulation of Ukraine dated 04.08.2020 No. 319 'On Approval of General Safety Requirements for the Installation and Operation of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants'] (in Ukrainian).
 45. F. I. Panteleenko, V. P. Lyalyakin, V. P. Ivanov, and V. M. Konstantinov, *Vosstanovlenie Detaley Mashin* [Reduction of Machine Parts] (Ed. V. P. Ivanov) (Moscow: Mashinostroenie: 2003) (in Russian).
 46. R. E. Esenberlin, *Vosstanovlenie Avtomobil'nykh Detaley Svarkoy, Naplavkoy i Paykoy* [Reduction of Automotive Parts by Welding, Surfacing and Soldering] (Moscow: Transport: 1994) (in Russian).
 47. V. A. Korotkov, I. D. Mikhaylov, A. M. Vesnin, and A. S. Zotov, *Sborka v Mashinostroenii, Priborostroenii*, **10**: 33 (2008) (in Russian).
 48. V. Martsinkovsky, V. Yurko, V. Tarelnik, and Y. Filonenko, *Procedia Engineering*, **39**: 148 (2012).
 49. V. B. Tarelnyk, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko,

- V. S. Martsynkovskiy, and B. Antoszewski, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, **55**: 585 (2017).
50. 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.
51. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, and A. Dziuba, *Applied Mechanics and Materials*, **630**: 388 (2014).
52. V. Tarelnyk and V. Martsynkovskyy, *Applied Mechanics and Materials*, **630**: 397 (2014).
53. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, M. Dovzyk, N. Tarelnyk, and S. Gorovoy, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012049 (2017).
54. V. Tarelnyk, V. Martsynkovskyy, O. Gaponova, I. Konoplianchenko, A. Belous, V. Gerasimenko, and M. Zakharov, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **233**: 012048 (2017).
55. V. B. Tarel'nik, A. V. Paustovskii, Y. G. Tkachenko, V. S. Martsinkovskii, E. V. Konoplyanchenko, and K. Antoshevskii, *Surf. Eng. Applied Electrochemistry*, **53**: 258 (2017).
56. 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 Electrochemistry*, **57**: 173 (2021).
57. V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 1: 47 (2019).
58. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 114 (2017).
59. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 385 (2017).
60. V. B. Tarel'nik, E. V. Konoplyanchenko, P. V. Kosenko, and V. S. Martsinkovskii, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 540 (2017).
61. B. O. Sarzhanov, *Sposib Pidvyshchennya Yakosti Vidnovlenykh Pokryt' Metalevykh Detaley Metodom Elektroeroziynoho Lehuвання* [The Method of Improving the Quality of Restored Coatings of Metal Parts by the Method of Electroerosion Alloying], Utility Model Patent of Ukraine No. u201909758 (Published November 11, 2019) (in Ukrainian).
62. Yu. F. Balandin, I. B. Gorynin, Yu. I. Zvezdin, and B. G. Mirkov, *Konstruksionnye Materialy AES* [Constructional Materials of NPP] (Moscow: Energoatomizdat: 1984) (in Russian).
63. E. Mayer, *Tortsovye Uplotneniya* [Front Seals] (Moscow: Mashinostroenie: 1978) (in Russian).
64. A. S. Shelegov, S. T. Leskin, and V. I. Slobodchuk, *Fizicheskie Osobennosti i Konstruktsiya Reaktora VVER-1000* [Physical Features and Design of VVER-1000 Reactor] (Moscow: NIYaU 'MIFI': 2011) (in Russian).
65. E. M. Prokhorenko, V. Klepikov, V. V. Lytvynenko, A. Zakharchenko, and M. Khazhmuradov, *Problems of Atomic Science and Technology*, No. 2:193 (2015).
66. N. I. Lazarenko, *Elektroiskrovoe Legirovanie Metallicheskih Poverkhnostey* [Electrospark Alloying of Metal Surfaces] (Moscow: Mashinostroenie: 1976) (in Russian).

67. A. E. Gitlevich, V. V. Mikhaylov, N. Ya. Parkanskiy, and V. M. Revutskiy, *Elektroiskrovoe Legirovanie Metallicheskih Poverkhnostey* [Electrospark Alloying of Metal Surfaces] (Chişinău: Shtiintsa: 1985) (in Russian).
68. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petroleum Eng.*, **53**: 266 (2017).
69. B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarel'nyk, O. M. Myslyvchenko, P. Kurp, T. I. Zhylenko, and I. Konoplianchenko, *Materials*, **14**, Iss. 4: 739 (2021).
70. N. V. Tarel'nyk, *Sposib Vidnovlennya Znoshenykh Poverkhon' Stal'nykh Detaley Obladnannya, yake Pidlyahaye Radiatsynomu Oprominyuvannyu* [The Method of Reduction of Worn Surfaces of Steel Parts of Equipment Subject to Radiation Exposure], Patent of Ukraine No. 150213 (Published January 13, 2022) (in Ukrainian).