

## НОВИЙ СПОСІБ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Н. В. Тарельник

СНАУ; 40000, Суми, вул. Герасима Кондратьєва, 160,  
e-mail: [natasha-tarelnik@ukr.net](mailto:natasha-tarelnik@ukr.net)

Запропоновано новий спосіб відновлення зношених поверхонь сталевих деталей насосного обладнання атомних електростанцій, що підлягає радіаційному опромінюванню. Спосіб належить до галузі електрофізичної та електрохімічної обробки, зокрема до електроіскрового легування (ЕІЛ), і може бути застосованим для ремонту деталей машин атомних електростанцій. Спосіб ЕІЛ має ряд специфічних особливостей: матеріал анода (легувальний матеріал) може утворювати на поверхні катода (легованій поверхні) шар покриття, надзвичайно міцно зчеплений з поверхнею; легування можна здійснювати у строго 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. Спосіб включає нанесення покриття на зношену поверхню деталі методом ЕІЛ одним і тим же металевим електродом – інструментом з матеріалу (сталь 12Х18Н10Т або нікель), який не містить спеціальних добавок кобальту та інших елементів, які утворюють довгоживучі ізотопи в активному робочому середовищі. ЕІЛ здійснюють у два етапи. При цьому перед першим етапом нанесення покриття металевим електродом-інструментом на зношену сталеву поверхню методом ЕІЛ наносять шар покриття графітовим електродом – інструментом з енергією розряду  $W_p = 0,02$  Дж і продуктивністю  $0,3 \text{ см}^2/\text{хв}$ . Далі виконують перший етап нанесення шару покриття на отриману поверхню методом ЕІЛ металевим електродом – інструментом при енергії розряду  $0,20-0,55$  Дж і продуктивності  $1,6-2,5 \text{ см}^2/\text{хв}$ , яке забезпечує товщину поверхні  $0,09-0,16$  мм та її суцільність 100 %. Після цього отриману поверхню піддають другому етапу нанесення шару покриття методом ЕІЛ тим же металевим електродом – інструментом з енергією розряду  $0,55-0,90$  Дж і продуктивністю  $2,5-3,4 \text{ см}^2/\text{хв}$ .

Ключові слова: електроіскрове легування; відновлення; матеріал електроду; графіт; сталь; товщина шару; шорсткість.

Предложен новый способ восстановления изношенных поверхностей стальных деталей насосного оборудования атомных электростанций, подлежащего радиационному облучению. Способ относится к области электрофизической и электрохимической обработки, в частности к электроискровому легированию (ЭИЛ), и применим для ремонта деталей машин атомных электростанций. Способ ЭИЛ обладает рядом специфических особенностей: материал анода (легированный материал) может образовывать на поверхности катода (легированной поверхности) слой покрытия, чрезвычайно прочно сцепленный с поверхностью; легирование можно осуществлять в строго указанных местах (радиусом от долей миллиметра и более), не защищая при этом остальную поверхность детали; технология ЭИЛ металлических поверхностей очень проста, а необходимая аппаратура компактна и транспортабельна. Способ включает нанесение покрытия на изношенную поверхность детали методом ЭИЛ одним и тем же металлическим электродом – инструментом из материала (сталь 12Х18Н10Т или никель), не содержащим специальных добавок кобальта и других элементов, образующих долгоживущие изотопы в активной рабочей среде. ЭИЛ осуществляют в два этапа. При этом перед первым этапом нанесения покрытия металлическим электродом-инструментом на изношенную стальную поверхность методом ЭИЛ наносят слой покрытия графитовым электродом – инструментом с энергией разряда  $W_p = 0,02$  Дж и производительностью  $0,3 \text{ см}^2/\text{мин}$ . Далее выполняют первый этап нанесения слоя покрытия на полученную поверхность методом ЭИЛ металлическим электродом – инструментом при энергии разряда  $0,20-0,55$  Дж и производительности  $1,6-2,5 \text{ см}^2/\text{мин}$ , обеспечивающей толщину поверхности  $0,09-0,16$  мм и ее сплошность 100 %. После этого полученную поверхность подвергают второму этапу нанесения слоя покрытия методом ЭИЛ тем же металлическим электродом – инструментом с энергией разряда  $0,55-0,90$  Дж и производительностью  $2,5-3,4 \text{ см}^2/\text{мин}$ .

Ключевые слова: электроискровое легирование; восстановление; материал электрода; графит; сталь; толщина слоя; шероховатость.

*The paper proposes a new method of restoring worn surfaces of steel parts of pumping equipment used at nuclear power plants and subjected to radiation irradiation. The method belongs to the field of electrophysical and electrochemical treatment, in particular to electrospark alloying (ESA), and is applicable to repair parts of machines of nuclear power plants. The EBS method has a number of specific features: the anode material (alloyed material) can form a coating layer on the cathode surface (alloyed surface) that is extremely strongly bonded to the surface; the alloying can be performed in strictly specified places without protecting the rest of the part surface; the ESA technology for metal surfaces is very simple, and the necessary equipment is compact and transportable. The method includes coating of the worn surface of the part by electroplating with the same metal electrode - an instrument made of material (steel 12X18H10T or nickel) without special additives of cobalt and other elements that form long-lived isotopes in the active working environment. The electrodeposition is carried out in two stages. Before the first stage of coating with metallic electrode-tool a layer of coating with graphite electrode-tool with discharge energy  $W_p = 0.02$  J and capacity  $0.3$  cm<sup>2</sup>/min is applied to the worn-out steel surface by ESA method. Then the first stage of coating layer application by ESA method by the metal electrode/tool at discharge energy  $0.20-0.55$  J and productivity  $1.6-2.5$  cm<sup>2</sup>/min ensuring surface thickness  $0.09-0.16$  mm and its continuity 100%, after that the surface obtained is subjected to the second stage of coating layer application by ESA method by the same metal electrode/tool with discharge energy  $0.55-0.90$  J and productivity  $2.5-3.4$  cm<sup>2</sup>/min.*

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

### Вступ

Порівняно з ненадійним становищем традиційної енергетики через дефіцит органічного палива, фізичного й морального старіння встаткування ТЕС, з огляду на їх негативний вплив на навколишнє середовище, ядерна енергетика працює досить стабільно й за дотримання всіх заходів безпеки є найбільш екологічно чистим джерелом енергії. Сьогодні в Україні працюють чотири АЕС, на яких діють 15 енергоблоків типу ВВЭР (водо-водяний енергетичний реактор) загальною потужністю 13880 МВт. Аналіз 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.

Електроенергетика є одним з основних споживачів насосного обладнання (НО). На будь-якій електростанції експлуатується велика кількість найрізноманітніших насосів.

Порівняно з енергетичними установками на органічному паливі умови роботи матеріалів в атомних енергетичних установках, звичайно, є більше складними й багатofакторними. Більшість відповідальних деталей насосних агрегатів АЕС працюють при високих швидкостях, тисках, температурах, а також в умовах абразивного, корозійного, водневого й іншого видів впливу робочих середовищ. Окрім цього, наявність ядерного реактора, який є найважливішою частиною АЕС, також впливає на вибір конструктивних матеріалів деталей НО. Використовувані матеріали повинні бути радіаційно-стійкими, добре поглинати нейтрони, а також бути жаростійкими й жароміцними.

Актуальними задачами ремонту та обслуговування технологічного обладнання АЕС є

підтримання роботоздатності та можливості відновлення деталей машин і устаткування для забезпечення їх високих експлуатаційних характеристик та зменшення простою. Це досягається шляхом вибору видів організаційних методів ремонту, підвищення якості відновлення шляхом розроблення прогресивних технологічних процесів формування покриттів, які забезпечують зміцнення та відновлення робочих поверхонь деталей. Оскільки безвідмовна робота НО забезпечує безперервне функціонування АЕС, то оперативне відновлення корпусів насосів, шийок валів, робочих коліс є актуальним завданням.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні ремонтні технології мають у своєму розпорядженні численні методи відновлення деталей машин і устаткування. Значна кількість технологічних прийомів нанесення й різноманіття областей застосування покриттів, широкий спектр матеріалів для цих цілей роблять непростим в умовах конкурентного підходу об'єктивне рішення на вибір покриття й оптимальної технології його нанесення.

Згідно з [1] працездатність і ресурс відновлених деталей складає в середньому 60...80%. Однак, на сьогодні відомі технологічні методи (електромеханічні, електрофізичні й ін.), за допомогою яких можна повністю відновити первинний ресурс деталей або, навіть, збільшити його.

Відновлення деталей дозволяє заощадити значну кількість дефіцитних матеріалів, в 2...3 рази продовжити строк їхньої служби, зменшити випуск товарних запасних частин на заводах-виробниках і знизити собівартість ремонту машин і устаткування.

Одним із шляхів поліпшення якості поверхневого шару й зниження вартості ремонту машин є багаторазове відновлення форми деталей металопокриттями й забезпечення їхньої взаємозамінності [1 - 3]. В [4] наведено найпоширеніші з них, а також їхні переваги й недоліки. Основними недоліками, які негативно впливають на кінцевий результат або значно підвищують собівартість ремонту, є: наявність повідець і жолоблень; слабка адгезія нанесеного шару з основою; наявність пор, тріщин і жузьільних включень; зниження втомної міцності; підвищена екологічна небезпека.

Серед розглянутих методів відновлення деталей на значну увагу заслуговують електроіскрове легування (ЕІЛ), яке є екологічно безпечним й останнім часом все частіше використовується в ремонтному виробництві [5]. 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 дифузія елементів анода в катод;

- легування можна здійснювати у строго зазначених місцях (радіусом від часток міліметра і більше), не захищаючи при цьому решту поверхні деталі;

- технологія електроерозійного легування металевих поверхонь дуже проста, а необхідна апаратура компактна і транспортабельна.

Незважаючи на те, що ЕІЛ позитивно впливає на зносостійкість поверхневого шару, його недоліки нерідко обмежують впровадження даної технології для широкої номенклатури деталей машин. До таких недоліків належать збільшення шорсткості поверхні виробів після ЕІЛ, нерівномірність поверхневого зміцнення, негативний вплив ерозійного розряду на втомні властивості виробів та ін. Крім того, зі збільшенням енергії розряду ЕІЛ, як правило, знижується суцільність формованого покриття [6].

Відомий також спосіб відновлення поверхонь металевих деталей, який включає нанесення на зношену поверхню деталі покриття ЕІЛ металевим електродом. Він відрізняється тим, що покриття наносять на режимах, при яких забезпечують задану шорсткість поверхні. Спочатку на отриману поверхню наносять принаймні один шар металополімерного матеріалу (МПП), чим забезпечують полімеризацію нанесеного шару МПП. Після цього покриття піддають фінішній обробці [7]. Недоліками даного способу є: низька твердість металополі-

мерних матеріалів; основне застосування способу – відновлення деталей у нероз'ємних сполуках (посадкових місць під підшипники, напівмуфти й ін.); металополімерні матеріали добре працюють на стиск і значно гірше на зрушення, що негативно впливає на їхнє застосування для відновлення в деталях поверхонь тертя; зміною властивостей з підвищенням 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. На першому етапі наносять шар з енергією розряду 0,13-0,55 Дж і продуктивністю 1,5-2,5 см<sup>2</sup>/хв, забезпечуючи товщину поверхні 0,08-0,81 мм при її суцільності 100 %. Потім на отриману поверхню наносять шар покриття тим же електродом з енергією розряду 0,55- 0,90 Дж і продуктивністю 2,5-3,4 см<sup>2</sup>/хв, чим забезпечують формування поверхні з шорсткістю, в 2-4 рази вищою, ніж на першому етапі [8]. Для цього можуть використовувати електрод з олов'яної бронзи, твердого сплаву Т15К6, сталі 12Х18Н10Т, хрому і нікелю.

Відомо [9], що порівняно з енергетичними установками на органічному паливі, умови роботи матеріалів в атомних енергетичних установках є більш складними й багатofакторними. Тому під час вибору конструкційних матеріалів для ядерних енергетичних установок (ЯЕУ) різних типів необхідно брати до уваги (серед інших основних умов) число й величину циклічних змін механічних навантажень і тепломінін та враховувати нейтронне опромінення й вплив теплоносія на корозію й корозійно-механічну міцність матеріалів. Для більшості ядерних енергетичних установок обов'язковою вимогою є застосування нержавіючих сталей (основний метал або наплавлення) для всіх елементів першого контуру, що контактують з теплоносієм. Для зниження впливу перенесених активних продуктів корозії на умови ремонту встаткування першого контуру в ряді випадків у сталі додатково регламентується вміст елементів, які при опроміненні стають джерелом небезпечних довгоживучих ізотопів. Насамперед, це стосується кобальту, який має великий період напіврозпаду. Його неприпустимо використовувати в ущільненнях насосів атомних електростанцій. Якщо замість кобальтової зв'язки використано нікель, то подібних явищ не відбувається [10]. Згідно з [11], хімічний 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. Для виготовлення ряду вузлів і деталей ГЦН застосовують наступні матеріали: раглик виготовляють, наприклад, з нержавіючої сталі 06X12H2MФА; нижній підшипник ковзання – зі сталі 12X18H10T; корпус ущільнення – як зварну конструкцію зі сталі 12X18H10T; вал насоса – як цільнокований зі сталі 14X17H2. Усі деталі й вузли ГЦН-195М, які стикаються з теплоносієм, виготовляють зі сталей, стійких до корозії та ерозії, а деталі з аустенітних марок сталей не мають схильності до міжкристалітної корозії [11].

У ході аналізу з'ясувалося, що матеріали, які у [8] застосовували для відновлення зношених поверхонь сталевих деталей як матеріал аноду, не можна використовувати для сталевих деталей машин, що працюють на атомних електростанціях. Так, при використанні як електроду-інструменту олов'яної бронзи тимчасовий опір (Бв) згідно з Держстандартом 613-79 не перевищує 245 МПа, однак в [9] стверджується, що при прийнятих у цей час значеннях товщини корпусів і нормованих коефіцієнтів запасу міцності конструкційні реакторні матеріали повинні мати при робочій температурі межу міцності не менш 400 МПа з тенденцією до покращання цієї характеристики. Твердий сплав Т15К6 містить у своєму складі кобальт, присутність якого створює загрозу утворення довгоживучих ізотопів в активному робочому середовищі. Електрод-інструмент з нержавіючої сталі аустенітного класу 12X18H10T або нікелю для ЕІЛ деталей з нержавіючих сталей при енергії розряду ( $W_p$ ), що перевищує 0,13 Дж, починає прилипати до оброблюваної поверхні, що, у свою чергу, призводить до зниження суцільності нанесеного шару, знижуючи якість нанесеного покриття.

Щоб уникнути вказаних недоліків, відповідно до [12] залежно від конкретних умов легування застосовують додаткові технологічні прийоми. Наприклад, при легуванні матеріалами, які «залипають» при зіткненні анода 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.

Таким чином, метою роботи є підвищення якості та надійності відновлювальних методом ЕІЛ сталевих деталей насосного обладнання атомних електростанцій шляхом застосування при відновленні електродів інструментів зі сталі 12X18H10T та нікелю, а для запобігання їх прилипанню до оброблюваної поверхні проводити попереднє легування електродом інструментом з графіту.

### Методи досліджень

Застосовуючи метод ЕІЛ на установці моделі «Елітрон 52-А», на зразки розміром 10x10x8 мм з нержавіючих сталей 12X18H10T, 06X12H2MФА і 14X17H2 при різних режимах енергії розряду наносили покриття електродами з нержавіючої сталі 12X18H10T і нікелю. Було виготовлено три серії зразків: 1 серія – ЕІЛ здійснювали у два етапи: на першому етапі проводили обробку графітом при енергії розряду  $W_p = 0,02$  Дж і продуктивності  $0,3 \text{ см}^2/\text{хв.}$ , а потім на другому етапі наносили покриття на одному режимі; 2 серія – покриття здійснювали у три етапи: перший етап - обробку графітом проводили при енергії розряду  $W_p = 0,02$  Дж і продуктивності  $0,3 \text{ см}^2/\text{хв.}$ , другий етап проводили на режимі, що забезпечує найбільшу суцільність і товщину покриття, а третій етап проводили на більш «грубому» режимі із забезпеченням шорсткості в 2-3 рази більшої, ніж на попередньому етапі; 3 серія – покриття здійснювали у три етапи: перший етап – обробку 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 обробці зразків серії 2.

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

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

Товщину покриття вимірювали мікрометром, шорсткість – із застосуванням профілографа-профілометра моделі 201 заводу «Калібр».

Таблиця 1 – Залежність якісних параметрів покриттів зі сталі 12X18H10T, нанесених методом ЕІЛ на сталь 12X18H10T, від енергії розряду

Енергія розряду, $W_p$	Продуктивність, $\text{см}^2/\text{хв.}$	Товщина шару, мм	Шорсткість, $R_z$ , мкм	Суцільність, %
0,04	0,4	0,03	7	100
0,11	1,5	0,07	12	100
0,20	1,6	0,09	19	100
0,35	1,7	0,14	41	90
0,55	2,5	0,16	61	70
0,90	3,4	0,22	92	60

### Результати досліджень

Технічне рішення пояснюється конкретними прикладами його застосування для відновлення деталей, виготовлених з матеріалів, що широко застосовуються для виготовлення обладнання атомних електростанцій. Покриття методом ЕІЛ можна наносити, варіюючи енергію розряду в діапазоні 0,036 - 6,8 Дж. Зі збільшенням енергії розряду підвищується товщина покриття і шорсткість поверхні, а суцільність знижується. Під збільшенням товщини покриття розуміють збільшення розміру деталі або зразка, виміряного по виступах шорсткості нанесеного матеріалу. При цьому товщина шару може змінюватися в залежності від характеру взаємодії анода і катода, наприклад, на установці з ручним вібратором типу «Елітрон 52-А» - від 0,01 до 0,25 мм, а висота мікронерівностей ( $R_z$ ) при цьому змінюється, відповідно, від 8,5 до 155,8 мкм. Суцільність поверхні при цьому може знижуватися зі 100% до 60%.

#### Нанесення покриттів зі сталі 12X18H10T на сталь 12X18H10T

Зразки всіх серій попередньо обробляли графітовим електродом-інструментом при енергії розряду  $W_p = 0,02$  Дж і продуктивності  $0,3 \text{ см}^2/\text{хв.}$

#### Відповідно до 1-ї серії

Згідно з даними табл. 1, під час нанесення сталі 12X18H10T найбільша суцільність покриття становить 100%. Найбільша товщина покриття (0,09 мм) при 100% суцільності досягається при енергії розряду  $W_p = 0,20$  Дж. Шорсткість поверхні покриття при цьому становить  $R_z = 19$  мкм. Подальше збільшення енергії розряду до  $W_p = 0,35$  Дж забезпечує одночасне збільшення товщини шару до 0,14 мм та різке збільшення шорсткості поверхні до  $R_z = 41$  мкм, а також зниження суцільності покриття до 90%. Подальше зростання енергії розряду призводить до зниження суцільності покриття та формування ще більш шорсткої поверхні. Найбільша товщина шару покриття становить 0,22 мм за енергії розряду  $W_p = 0,90$  Дж. При

мм за енергії розряду  $W_p = 0,90$  Дж. При цьому величини шорсткості поверхні та суцільності покриття відповідно становлять  $R_z = 92$  мкм і 60%. Подальше збільшення енергії розряду небажане, оскільки різко знижується якість покриття (низька суцільність, висока шорсткість, припали поверхні) і відбувається руйнування електрода внаслідок його вигорання.

#### Відповідно до 2-ї серії

Першим шаром наносили сталь 12X18H10T з найбільшою суцільністю (100%) і товщиною покриття 0,09 мм, при  $W_p = 0,20$  Дж і  $R_z = 19$  мкм, а потім другим шаром при  $W_p = 0,35$  і  $0,55$  Дж, де шорсткість, відповідно, більша приблизно у 2 і 3 рази ( $R_z = 41$  і  $61$  мкм). При цьому загальна товщина шару становить, відповідно, 0,18 і 0,19 мм, шорсткість  $R_z = 39$  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 призводить до різкого збільшення шорсткості поверхні – з  $R_z = 57$  до  $R_z = 83$  мкм.

#### Відповідно до 3-ї серії

У табл. 3 наведено результати якісних параметрів покриттів зі сталі 12X18H10T на сталі 12X18H10T, здійснених поетапно згідно серії 3, коли на першому етапі використовується енергія розряду більша, ніж на другому етапі. В даному випадку якість покриття значно гірша, ніж у покриттів з 2-ї серії (суцільність 65-75%, шорсткість  $R_z = 83-85$  мкм) при наближено однаковій товщині нанесеного шару.

Таким чином, відновлення сталевих деталей, які використовують в атомних електростанціях методом ЕІЛ електродом-інструментом зі сталі 12X18H10T, необхідно проводити у три етапи: перший – обробка графітом при енергії розряду  $W_p = 0,02$  Дж і продуктивністю  $0,3 \text{ см}^2/\text{хв.}$ ; на другому слід сформувати покриття при енергії розряду  $W_p = 0,20$  Дж, а на третьому – при  $W_p = 0,55$  Дж. В результаті, отримуємо покриття товщиною 0,19 мм, суцільністю 100% і шорсткістю  $R_z = 57$  мкм.

**Таблиця 2 – Якісна характеристика покриттів зі сталі 12X18H10T, нанесених методом ЕІЛ на сталь 12X18H10T, згідно серії 2**

Енергія розряду, $W_p$	Продуктивність, $см^2/хв.$	Товщина шару, мм	Шорсткість, $R_z$ , мкм	Суцільність, %
1-й етап 0,04 2-й етап 0,35	1-й етап 0,4 2-й етап 1,7	0,15	41	90
1-й етап 0,20 2-й етап 0,35	1-й етап 1,6 2-й етап 1,7	0,18	39	100
1-й етап 0,20 2-й етап 0,55	1-й етап 1,6 2-й етап 2,5	0,19	57	100
1-й етап 0,20 2-й етап 0,90	1-й етап 1,6 2-й етап 3,4	0,20	83	100

**Таблиця 3 – Якісна характеристика покриттів зі сталі 12X18H10T, нанесених методом ЕІЛ на сталь 12X18H10T, згідно серії 3**

Енергія розряду, $W_p$	Продуктивність, $см^2/хв.$	Товщина шару, мм	Шорсткість, $R_z$ , мкм	Суцільність, %
1-й етап 0,90 2-й етап 0,04	1-й етап 3,4 2-й етап 0,4	0,20	83	65
1-й етап 0,90 2-й етап 0,20	1-й етап 3,4 2-й етап 1,6	0,21	85	75

#### *Нанесення покриттів з нікелю на сталь 12X18H10T*

При нанесенні покриттів з нікелю на сталь 12X18H10T зразки всіх серій попередньо обробляли графітовим електродом-інструментом при енергії розряду  $W_p = 0,02$  Дж і продуктивності  $0,3 см^2/хв.$

У таблиці 4 представлені результати якісних параметрів покриттів при ЕІЛ сталі 12X18H10T електродом-інструментом з нікелю. Як видно з таблиці, найбільша суцільність покриття 100 % і товщина шару 0,15 мм досягається при енергії розряду  $W_p = 0,55$  Дж. Шорсткість поверхні при цьому становить  $R_z = 37$  мкм. Подальше збільшення енергії розряду призводить до зростання товщини шару до 0,17 мм і значного зниження якості покриття (суцільність 85 % і шорсткість  $R_z = 69$  мкм).

Під час формування покриття із східчастим зростанням енергії розряду  $W_p = 0,55$  Дж, а потім  $W_p = 0,90$  Дж, досягається товщина шару 0,20 мм при 100 % суцільності та шорсткості  $R_z = 38$  мкм. Формування покриття зі східчастим спаданням енергії розряду: спочатку з  $W_p = 0,90$  Дж, а потім –  $W_p = 0,55$  Дж призводить до зниження його суцільності до 90 % і зростання шорсткості до  $R_z = 56$  мкм.

#### *Нанесення покриттів зі сталі 12X18H10T і нікелю на сталь 06X12H2MФА і 14X17H2*

Нижче, в табл. 5, представлені результати параметрів якості відновлених поверхонь зраз-

ків з матеріалу деталей що використовують на атомних електростанціях зі сталі 06X12H2MФА і зі сталі 14X17H2.

Зразки всіх серій попередньо обробляли графітовим електродом-інструментом при енергії розряду  $W_p = 0,02$  Дж і продуктивності  $0,3 см^2/хв.$

Аналіз таблиці 5 показує, що якість відновлених поверхонь, сформованих відповідно 2 серії, є найкращою, тобто вони мають найбільшу товщину відновленого шару і суцільність покриття, а шорсткість їх найменша.

#### **Висновки**

1. Запропонований новий спосіб відновлення зношених поверхонь сталевих деталей насосного обладнання, які використовують на атомних електростанціях і яке підлягає радіаційному опромінюванню.

2. Спосіб включає нанесення покриття на зношену поверхню деталі методом ЕІЛ одним і тим же металевим електродом – інструментом з матеріалу сталь 12X18H10T або нікель, який не містить спеціальних добавок кобальту та інших елементів, які утворюють довгоживучі ізотопи в активному робочому середовищі.

3. Для запобігання прилипанню при ЕІЛ до оброблюваної поверхні електродів-інструментів зі сталі 12X18H10T та нікелю пропонується проводити її попереднє легування електродом інструментом з графіту.

Таблиця 4 – Залежність якісних параметрів покриттів з нікелю, нанесених методом ЕЕЛ на сталь 12Х18Н10Т

Енергія розряду, Wp	Продуктивність, см <sup>2</sup> /хв.	Товщина шару, мм	Шорсткість, Rz, мкм	Суцільність, %
*0,55	2,5	0,15	38	100
*0,90	3,4	0,19	69	85
** 1-й етап 0,55 2-й етап 0,90	1-й етап 2,5 2-й етап 3,4	0,20	38	100
*** 1-й етап 0,90 2-й етап 0,55	1-й етап 3,4 2-й етап 2,5	0,14	56	90

\* - Покриття наносили відповідно до 1-ї серії;  
 \*\* - Покриття наносили відповідно до 2-ї серії;  
 \*\*\* - Покриття наносили відповідно до 3-ї серії

Таблиця 5 – Залежність якісних параметрів покриттів зі сталі 12Х18Н10Т і нікелю, нанесених методом ЕЕЛ на сталь 06Х12Н2МФА і 14Х17Н2

Матеріал деталі	Продуктивність, см <sup>2</sup> /хв.	Продуктивність, см <sup>2</sup> /хв.	Товщина шару, мм	Шорсткість, Rz, мкм	Суцільність, %	
сталь 12Х18Н10Т						
06Х12Н2МФА	*0,35	1,7	0,15	35	100	
	*0,55	2,5	0,17	64	85	
	** 1-й етап 0,35 2-й етап 0,55	1-й етап 1,7 2-й етап 2,5	0,18	33	100	
	*** 1-й етап 0,55 2-й етап 0,35	1-й етап 2,5 2-й етап 1,7	0,14	56	90	
	нікель					
	*0,55	2,5	0,18	56	100	
	*0,90	3,4	0,19	93	85	
	** 1-й етап 0,55 2-й етап 0,90	1-й етап 2,5 2-й етап 3,4	0,20	53	100	
	*** 1-й етап 0,90 2-й етап 0,55	1-й етап 3,4 2-й етап 2,5	0,14	83	90	
	сталь 12Х18Н10Т					
14Х17Н2	** 1-й етап 0,35 2-й етап 0,55	1-й етап 1,7 2-й етап 2,5	0,18	31	100	
	*** 1-й етап 0,55 2- й етап 0,35	1-й етап 2,5 2-й етап 1,7	0,15	61	85	
	Нікель					
	** 1-й етап 0,55 2-й етап 0,90	1-й етап 2,5 2-й етап 3,4	0,21	49	100	
	*** 1-й етап 0,90 2-й етап 0,55	1-й етап 3,4 2-й етап 2,5	0,17	81	90	

\* - Покриття наносили відповідно до 1-ї серії;  
 \*\* - Покриття наносили відповідно до 2-ї серії;  
 \*\*\* - Покриття наносили відповідно до 3-ї серії

4. За результатами проведених досліджень подано заявку на корисну модель (№ u202105262) і на винахід (№ a202105261) під назвою «Спосіб відновлення зношених поверхонь сталених деталей обладнання, яке підлягає радіаційному опромінюванню».

**Література**

1. Чабанний В.Я. Ремонт автомобілів: навчальний посібник. Кіровоград: Кіровоградська районна друкарня, 2007. 720 с.
2. Ищенко А.А. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами. Мариуполь: ПГТУ, 2007. 250 с.

3. Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М. Восстановление деталей машин: справочник / Под ред. В.П. Иванова. Москва: Машиностроение, 2003. 672 с.

4. Tarelyk V., Martsynkovskyy V., Sarzhanov A., Pavlov A., Gerasimenko V., Sarzhanov B. Improvement of integrated technology for restoring surfaces of steel and iron parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 233. doi:10.1088/1757-899X/233/1/012050

5. Tarelyk V.B., Gaponova O.P., Loboda V.B., Konoplyanchenko E.V., Martsinkovskii V.S., Semirnenko Yu.I., Tarelyk N.V., Mikulina M.A., Sarzhanov B.A. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2021. 57, 173–184 <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113>

6. Tarelyk V.B., Gaponova O.P., Kirik G.V., Konoplianchenko Ye. V., Tarelyk N. V., Mikulina M. O. Cementation of Steel Details by Electrospark Alloying, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. 42, No 5. P. 655–667. DOI: 10.15407/mfint.42.05.0655.

7. Пат. 104664. Україна, Спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей (варіанти) / Марцинковський В.С., Тарельник В.Б., Павлов О.Г., Іщенко А.О.; Опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. 3 с.

8. Пат. на корисну модель 138052 Україні, Спосіб підвищення якості відновлених покриттів металевих деталей методом електроерозійного легування / Саржанов Б.О.; № u201909758 ; заявл. 12.09.2019; опубл. 11.11.2019, Бюл.№ 21.

9. Баландин Ю. Ф., Горынин И. Б., Звездин Ю. И., Мирков Б. Г. Конструкционные материалы АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1984. 280 с.

10. Майер Э. Торцовые уплотнения. М.: Машиностроение, 1978. 288 с.

11. Шелегов А. С., Лескин С. Т., Слободчук В. И. Насосное оборудование АЭС: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: НИЯУ "МИФИ", 2011. 346 с.

12. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование, металлических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 46 с.

2. Ischenko A.A. Tehnologicheskie osnovy vosstanovleniya promyshlennogo oborudovaniya sovremennymi polimernymi materialami. Mariupol: PGTU, 2007. 250 p. (in Ukrainian).

3. Panteleenko F.I., Lyalyakin V.P., Ivanov V.P., Konstantinov V.M. Vosstanovlenie detaley mashin: spravochnik / Pod red. V.P. Ivanova. M.: Mashinostroenie, 2003. 672 p. (in Russian).

4. Tarelyk V., Martsynkovskyy V., Sarzhanov A., Pavlov A., Gerasimenko V., Sarzhanov B. Improvement of integrated technology for restoring surfaces of steel and iron parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 233. doi:10.1088/1757-899X/233/1/012050 (in Ukrainian).

5. Tarelyk V.B., Gaponova O.P., Loboda V.B., Konoplyanchenko E.V., Martsinkovskii V.S., Semirnenko Yu.I., Tarelyk N.V., Mikulina M.A., Sarzhanov B.A. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2021. 57, 173–184 <https://doi.org/10.3103/S1068375521020113> (in Ukrainian).

6. Tarelyk V.B., Gaponova O.P., Kirik G.V., Konoplianchenko Ye. V., Tarelyk N. V., Mikulina M. O. Cementation of Steel Details by Electrospark Alloying, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. 42, No 5. P. 655–667. DOI: 10.15407/mfint.42.05.0655 (in Ukrainian).

7. Pat. 104664. Ukraine, Sposib vidnovlennia znoshenykh poverkhon metalevykh detalei (varianty) / Martsynkovskyy V.S., Tarelyk V.B., Pavlov O.H., Ishchenko A.O.; Opubl. 25.02.2014, Biul. No 4. p.3. (in Ukrainian).

8. Pat. na korysnu model 138052 Ukraini, Sposib pidvyshchennia yakosti vidnovlennykh pokryt metalevykh detalei metodom elektroeroziinoho lehuвання / Sarzhanov, BO.; No u201909758 ; zaiavl. 12.09.2019; opubl. 11.11.2019, Biul. No 21. (in Ukrainian).

9. Balandin Yu.F., Goryinin I.B., Zvezdin Yu.I., Mirkov B.G. Konstruktsionnyie materialy AES. M.: Energoatomizdat, 1984. p.280 (in Russian).

10. Mayer E. Tortsovyie uplotneniya. M.: Mashinostroenie, 1978. 288 p. (in Russian).

11. Shelegov A.S., Leskin S.T., Slobodchuk V.I. Nasosnoe oborudovanie AES: uchebnoe posobie dlya studentov vyisshih uchebnyih zavedeniy. M.: NIYaU "MIFI", 2011. 346 p. (in Russian).

12. Lazarenko N.I. Elektroiskrovoe legirovaniye, metallicheskikh poverhnostey. M.: Mashinostroenie, 1976. 46 p. (in Russian).

### References

1. Chabannyi V.Ia. Remont avtomobiliv: Navchalnyi posibnyk. Kirovohrad: Kirovohradska raionna drukarnia, 2007. 720 p. (in Ukrainian).