

ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗРОБКИ ТЕХНОЛОГІЇ МОДИФІКАЦІЇ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ НАСОСІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Тарельник Наталія В'ячеславівна

кандидат економічних наук, доцент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-6304-6925

natasha-tarelnik@ukr.net

В статті проведений аналіз конструктивних і технологічних особливостей насосного обладнання, що використовується на атомних електростанціях (АЕС). Аналіз літературних джерел показав, що насосні агрегати АЕС працюють у важких умовах експлуатації (високих тисках, швидкостях, криогенних і підвищених температурах, впливу радіаційного опромінювання) та піддаються негативному впливу навколишнього середовища. При цьому їх деталі підлягають різним видам зносу: окислювальному, абразивному, кавітації, утомі, фреттинг-корозії, електроерозії тощо. Дослідженнями і аналізом методів підвищення параметрів якості поверхонь деталей встановлено, що до найбільш ефективних способів управління параметрами якості поверхневих шарів слід віднести технології, що вживають концентровані потоки енергії (КПЕ), при використанні яких протікають нерівноважні умови нагрівання та охолодження, що дозволяє формувати принципово інші, ніж за традиційними методами обробки, структури поверхневого шару. Літературними та патентними дослідженнями доведено, що однією з найперспективніших сучасних технологій, здатної керувати параметрами якості поверхонь деталей і яка здійснюється шляхом застосування КПЕ, є електроіскрове легування, завдяки якому в поверхневих шарах формуються поверхневі структури, що мають унікальні фізико-механічні та трибологічні властивості на нанорівні. В роботі проаналізовані особливості формування поверхневих шарів технологіями електроіскрового легування (ЕІЛ) і виявлені резерви до їх удосконалення за рахунок дослідження впливу продуктивності обробки (Q), тобто кількості обробленої площини в одиницю часу (см²/хв), на параметри якості покриттів. Також визначені шляхи удосконалення технологій ЕІЛ для підвищення надійності деталей насосного обладнання АЕС шляхом: підвищення їх жаростійкості, формування самозмазувальних покриттів, розробки технологій наноструктурування сталених поверхонь і формування захисних покриттів тощо.

Ключові слова: технологія, насосне обладнання, насос, атомна електростанція, електроіскрове легування, зношування, параметри якості поверхні, поверхневий шар, структура, мікротвердість, шорсткість.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.6>

Вступ. Енергетична безпека України є одним з найважливіших елементів національної безпеки і невід'ємною складовою енергетичної безпеки Європи. Це впевненість у наявності, доступності та можливості стабільно отримувати паливо та енергію належної якості як щодня за звичайних умов, так і за надзвичайних обставин. Іншими словами, енергетична безпека – це захищеність держави, її громадян та економіки від дефіциту енергії.

Розвиток ядерної енергетики зажадав створення нового енергетичного устаткування, зокрема насосів різного призначення. Особливості умов роботи, специфічні вимоги до насосів різних технологічних систем АЕС, і головне, виключно високі вимоги до надійності виділяють насосне обладнання АЕС у самостійну галузь загального насособудування. За економічною та соціальною значимістю розробка та виробництво обладнання для ядерної енергетики, включаючи насоси, повинні представляти одну з найбільш передових галузей сучасного енергетичного машинобудування та базуватись на новітніх досягненнях науки та техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Атомна електростанція — промислове підприємство в якому завдяки ядерній установці атомну енергію перетворюють на електричну (Клютенко L.P., et. al., 2007).

В Україні діють чотири атомні електростанції: Запорізьська АЕС (6 енергоблоків), Рівненська АЕС

(4 енергоблоки), Південноукраїнська АЕС (3 енергоблоки) та Хмельницька АЕС (2 енергоблоки).

Генератором енергії на АЕС є атомний (ядерний) реактор. Для реактора з водяним охолодженням тепло, що виділяється в активній зоні в результаті ланцюгової реакції розщеплення ядер деяких важких елементів, відбирає вода (теплоносія) першого контуру, яку пропомпуюють через реактор циркуляційною помпою. Нагріта вода надходить у теплообмінник (парогенератор), де передає тепло, отримане в реакторі, воді другого контуру. Вода другого контуру випаровується в парогенераторі, після чого пара, що утворюється, приводить в обертальний рух турбіну турбогенератора. У такий спосіб тепло перетворюється в електроенергію (Verkhovtsev V.H., et. al., 2014).

Ядерні реактори із водяним теплоносієм є основою ядерної енергетики України. В установках з такими реакторами найважливішу роль у технологічному циклі перетворення внутрішньоядерної енергії в електричну відіграють внутрішні процеси теплопередачі, теплоі масопереносу, здійснювані з допомогою циркулюючих потоків води. Про масштаби цих потоків можна судити за такими цифрами: витрата води, що циркулює у першому контурі ВВЕР-1000 м³/год, а витрата у системі технічного водопостачання 200 000 м³/год.

Рух таких великих потоків води за численними, в основному замкнутими, контурами з порівняно

великими швидкостями здійснюється за допомогою насосного обладнання, встановлена потужність якого досягає 12% потужності енергоблока, а споживана енергія становить від 70 до 90% енергії, що витрачається на власні потреби АЕС.

За конструктивними особливостями, призначенням та містом розташування насоси АЕС поділяються на п'ять основних груп (Nasosne...):

1) Головні циркуляційні насоси (ГЦН), які забезпечують циркуляцію води між реактором та парогенератором. Вода подається за допомогою ГЦН в реактор під тиском $P = 16,6$ МПа і при температурі $t = 289$ °С. В реакторі вода нагрівається до $t = 322$ °С і подається в парогенератор. Вода що знаходиться в першому контурі радіоактивна, тому велика увага приділяється до ущільнень головного циркуляційного насоса, щоб унеможливити її витікання.

2) Конденсатні насоси (КН) відкачують конденсат з конденсатора головної турбіни та через охолоджувачі ежекторів, ущільнень, блочну знесолюючу установку (БЗУ) подають його до другої ступені.

3) Живильні насоси (ЖН) призначені для безперебійної подачі живильної води з деаераторів через підігрівачі високого тиску (ПВТ) до парогенератора. Щоб уникнути кавітації замість ЖН використовують бустерні насоси (БН), які як і ЖН приводяться в дію турбоприводом.

4) Циркуляційні насоси використовують для забезпечення охолоджуючою водою конденсатори головних турбін, турбін турбоприводів, інші теплообмінники з метою відводу теплоти в навколишнє середовище.

5) Сітові (мережні) насоси (СН) використовують для подачі гарячої води по теплофікаційним мережам. СН – відцентрові, горизонтальні, з приводом від електродвигуна.

На рис. 1 наведена типова структурна схема ГЦН у вигляді комплексу, який включає в себе такі типові вузли, що присутні у всіх конструкціях ГЦН цього виду: привідний електродвигун, підшипникові опори із системою змащування і ущільнення валу, що обертається, з системою живлення та охолодження, проточну частину. Для виготовлення вузлів і деталей ГЦН, використовуються такі матеріали (Chalyi D.O., et. al., 2020):

- равлік – нержавіюча сталь 06X12H2MΦA або 06X12H3ДЛ мартенситно-аустенітного класу з приварними кованими перехідниками зі сталі 10ГН2MΦA;

- корпус вузла ущільнення – зварна конструкція з поковок сталі 08X18H10T;

- нижній підшипник ковзання виготовлений зі сталі 12X18H10T з вкладишами із графітно-фторопластової пресованої маси 7В-2А;

- вал втулки виготовлений зі сталі 25X17H2Б-Ш з поверхневою термообробкою струмами високої частоти;

- корпус ущільнення – зварна конструкція зі сталі 12X18H10T;

- вал насоса – цільнокований, виготовляється зі сталі 14X17H2;

- біологічний захист – кільце зі сталі 20, що перекриває кільце зі сталі 08ГДНФЛ-Ш.

Тривалість пуску турбоагрегату, від підготовчих операцій (прогрів паропроводу, пуск циркуляційних насосів

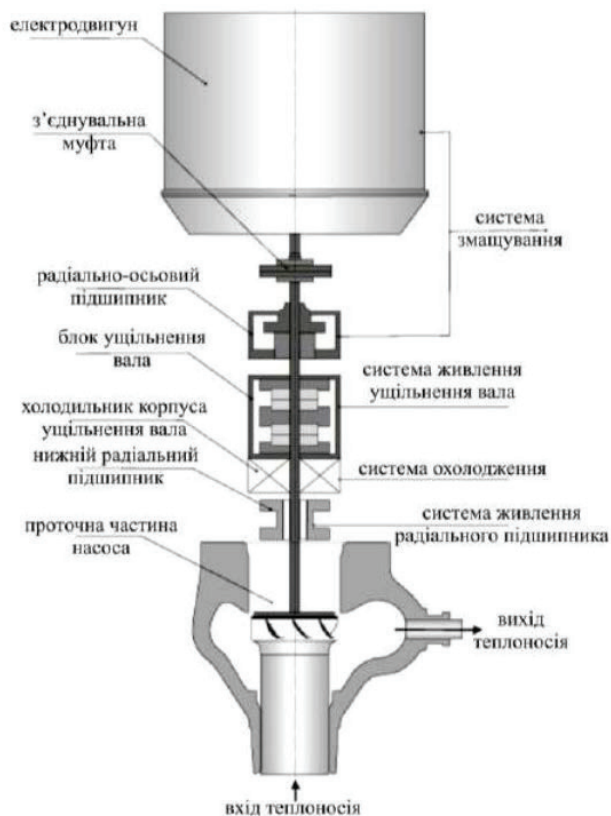


Рис. 1. Структурна схема ГЦН із механічним ущільненням валу для реакторів ВВЕР-1000 [4]

та ін.) до синхронізації і включення генератора на електричну мережу, коливається в широких межах залежно від початкових параметрів, одиничної потужності і конструкції турбіни. З підвищенням початкових параметрів пари тривалість пускових операцій різко зростає внаслідок роботи деталей і вузлів агрегату в умовах високих температур і тисків з високими, близькими до граничних, напруженнями і необхідності точно витримувати розрахункові умови і навантаження у всіх перехідних режимах пуску і навантаження (Omelianovskoho P., 2009).

Оперативна надійність обладнання електростанцій, що забезпечує безперебійність їх роботи, залежить в першу чергу від якості виготовлення агрегатів, їх монтажу, налагодження та експлуатаційного обслуговування. Вплив цих факторів тим сильніше, чим складніше конструкція агрегатів, машин і апаратів і чим вище вимоги до матеріалів, з яких вони виготовлені. Крім того, на оперативну надійність основних агрегатів АЕС впливає якість конструктивного і технологічного виконання допоміжного обладнання станції – насосних агрегатів, простота і надійність схеми їх з'єднань і взаємодії і якість їх експлуатаційного обслуговування (СНР Technology, 2008).

ГЦН-195М спроектований таким чином, що при цьому забезпечується (Chalyi D.O., et. al., 2020):

- відсутність виходу радіоактивного теплоносія в атмосферу через ущільнення валу насоса;
- матеріали деталей, які виготовлені із аустенітних марок сталей, не мають схильності до міжкристалітної корозії;
- хімічний склад матеріалів деталей, які стикаються з теплоносієм, не містить спеціальних добавок кобальту та інших елементів, що утворюють довгоживучі ізотопи в активному робочому середовищі;
- всі деталі і вузли ГЦН, що стикаються з теплоносієм і які охолоджуються водою промконтура та запираючою водою, виготовлені зі сталей, стійких до корозії і ерозії;
- ГЦН є ремонтпридатним – забезпечується можливість розбирання і заміни складових частин. При виході з ладу більшості вузлів ГЦН та їх елементів відновлення може бути проведено як шляхом заміни елементів, так і шляхом заміни всього блока;
- конструктивне виконання ГЦН забезпечує можливість ремонту електродвигуна і його елементів без розбирання насоса.

Аналіз літературних джерел (Shulzhenko M.H., 2011), (HND 34.09.453.2003. Rozrakhunok pokaznykiv, 2003) показує, що в процесі експлуатації значний вплив на надійність роботи енергоблоків надають великі маси металу, температура якого різко змінюється при змінних режимах. Значне підвищення температури як основного, так і допоміжного обладнання електростанцій супроводжується окислювальними процесами, які відбуваються в поверхневих шарах деталей і є причиною *окислювального* зносу їх поверхонь.

Найбільше усього зношування обладнання електростанцій пов'язують з забрудненням оточуючого середовища. Присутність в рідині, що перекачується насосами абразивних часток супроводжується *гідроабразивним* зносом (рис. 2, а, б), контактуючих з забрудненою рідиною поверхонь їх деталей.

Ерозійне зношування, яке виникає внаслідок дії потоку рідини, називається *гідроерозійним*. Різновидом гідроерозійного зношування є *кавітаційне зношування*, яке виникає під час руху твердого тіла щодо рідини, за якого пухирці газу лопаються поблизу поверхні, що створює місцевий ударний та температурний вплив.

Зношування від кавітації, як правило, виникає в гідравлічних машинах, завдяки пухирцям пари та газу, що утворюються в потоці рідини, при переході в зону високих тисків, коли відбувається конденсація пари і створюються умови для місцевого гідравлічного удару. При цьому дія тиску на поверхню буває настільки значною, що виникають глибокі каверни, які можуть зливатися і утворювати навіть наскрізний отвір (Herman V.F., 2014) (рис. 3).

Зношування від *утомлюваності* – це механічне зношування внаслідок руйнування від утомлюваності при повторному деформуванні мікрооб'ємів поверхневого шару. Утомлюваність – виникає у випадку, коли деталі зазнають статичних і циклічних навантажень (шестерні, підшипники кочення, вали, пружини та ін.) (рис. 4).

Корозія робочих поверхонь деталей непрацюючих машин знижує зносостійкість пар тертя. У непрацюючих пар погіршується якість поверхні і після запуску машини знову починається опрацювання; продукти корозії діють як абразив. У стиснутих деталях при вібрації може виникнути *цілинна корозія* (рис. 5,а). Наслідки *хімічної корозії* можуть виникнути в результаті стиснення хімічно активної рідини з поверхнею робочого колеса (рис. 5, б). Зношування при *фреттинг-корозії* виникає при малих коливальних, циклічних, зворотно-поступальних



а

б

Рис. 2. Корозійно-абразивний знос підшипникових шийок валу ротора насоса (а) та гідроабразивний знос робочого колеса (б)



Рис. 3. Кавітаційне знищення напрямного апарату насоса



а



б



в



г



д

Рис. 4. Втомлювальне руйнування лопатей турбіни (а), робочого колеса насоса (б), руйнування валу насоса інерційною силою внаслідок заклинювання підшипника кочення і бабітового шару вкладишу опорного (г) і опорно-упорного підшипника ковзання (д)

переміщеннях з малими амплітудами і залежить від багатьох чинників: амплітуди відносного прослизання, контактного тиску, кількості циклів, частоти коливань, матеріалу та довкілля. В результаті фреттинг-корозії знижується втомна міцність деталей, що може спричинити серйозні аварії.

Втомні руйнування притаманні деталям, що працюють в умовах високих знакозмінних навантажень.

Характерні ознаки руйнування сталевих деталей від втоми – відсутність помітних залишкових деформацій та утворення на поверхні зламу двох зон: зони розвитку тріщини з гладкою поверхнею та зони поломки з шорсткою поверхнею та слідами крихкого кристалічного зламу (Тарелпук V.B., 2005). На рис. 6 показаний втомний злам вал – шестерні мультиплікатора компресора 101 JT.

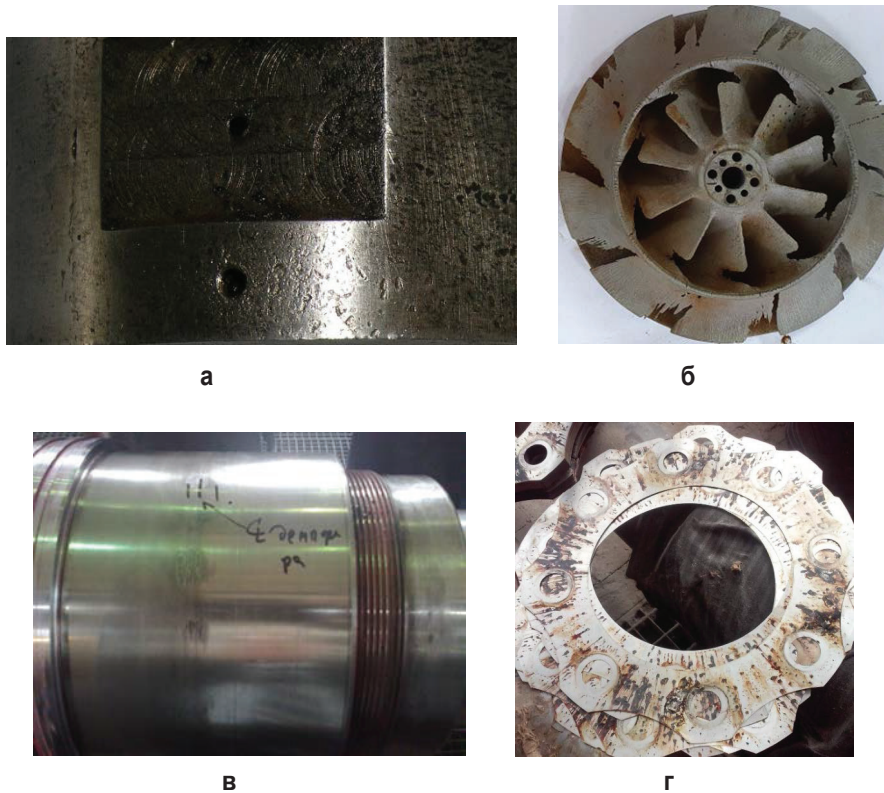


Рис. 5. Поверхня вкладишу підшипника, пошкоджена щілинною корозією (а), хімічна корозія робочого колеса (б), фреттинг корозія шийки валу відцентрового насосу (в) і поверхонь гнучких елементів пружної муфти (г)



Рис. 6. Втомний злам вал – шестерні мультиплікатора

Електроерозія – пошкодження, спричинене перенесенням матеріалу з поверхонь деталей при протіканні через них електричних струмів. Основною умовою електроерозійного пошкодження деталей та вузлів турбоагрегатів є наявність роторних струмів, загальною причиною появи яких є наявність залишкової намагніченості на роторних та статорних елементах. Залежно від конструктивних особливостей вузла, частоти та амплітуди вібрації, роду, напрямку, частоти і щільності струму, що протікає, види пошкодження можуть істотно відрізнятися. Протікання електроерозії призводить, як правило, до таких пошкоджень: перегріву та задиракам шийок валів (рисунки 7 та 8), опорних колодок плаваючого ущільнення (рис. 9, а) та опорних колодок підшипника (рис. 9, б).

Для боротьби з електроерозією ПК зазвичай застосовуються струмозйомники різної конструкції. Однак якщо їх установка не була передбачена при проектуванні

машини, то найчастіше встановити їх у процесі експлуатації неможливо (Martsynkovskiy V.S., 2006).

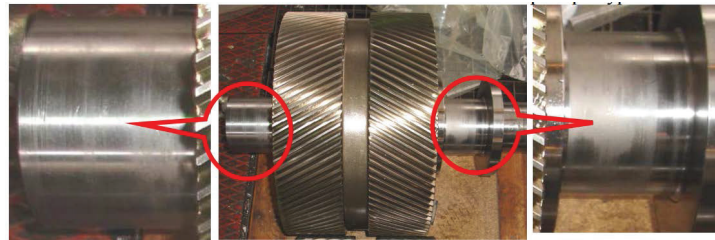
У підшипниках конструкції ТОВ «ТPIЗ» передбачено встановлення протектора (захисту) виконаного з електропровідного матеріалу (рис. 10). Його конструкція розроблена таким чином, що він постійно контактує з корпусом підшипника та ротором машини, навіть якщо зношується у процесі роботи [11].

Аналіз літературних джерел показав, що насосні агрегати АЕС працюють в важких умовах експлуатації (високих тисках, швидкостях, криогенних і підвищених температурах, впливу радіаційного опромінювання) та піддаються негативному впливу оточуючих середовищ. При цьому їх деталі підлягають різним видам зносу: окислювальному, абразивному, кавітації, утомі, фреттинг-корозії, електроерозії тощо.

У зв'язку зі зростанням науково-технічного прогресу повинна підвищуватись якість відповідальних деталей



а б
Рис. 7. Сліди електроерозії на шийці ротора турбіни



а б
Рис. 8. Сліди електроерозії на шийках валу зубчастого колеса



а б
Рис. 9. Електроерозійне зношування опорних колодок плаваючого ущільнення (а) та опорних колодок підшипника (б)

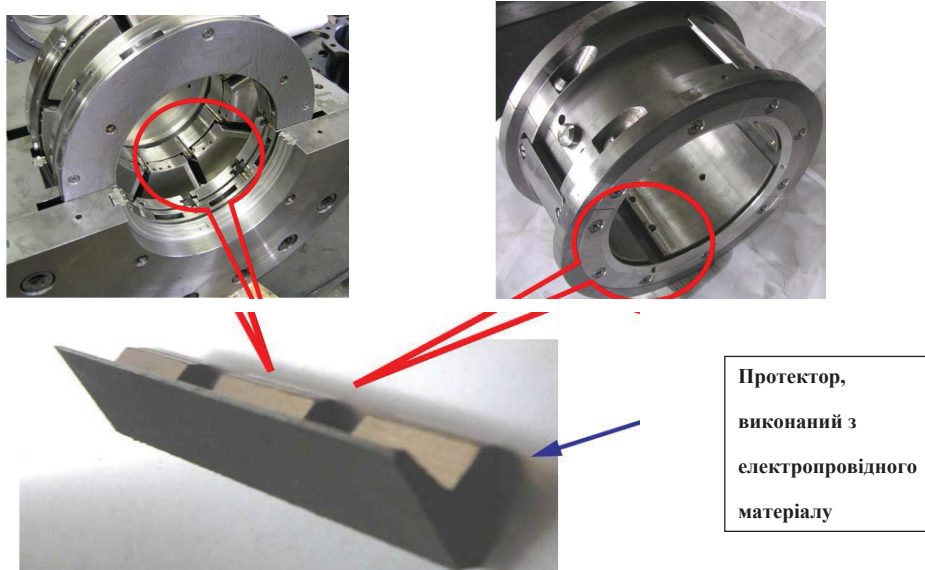


Рис. 10. Підшипники ТОВ «ТРВЗ» із встановленими протекторами захисту від електроерозії

динамічного обладнання АЕС (насосних і компресорних агрегатів, турбін, центрифуг і таке інше), які лімітують їх надійність та довговічність.

Аналіз розглянутих літературних джерел показав, що до найбільш ефективних способів управління параметрами якості поверхневих шарів слід віднести технології, що використовують для обробки матеріалу концентровані потоки енергії (КПЕ): плазмові технології (напилення (Kuzmin V.I., et. al., 2012) та плазмова обробка (Maistro G., et.al., 2021)), лазерна обробка (Pliszka I. & Radek N., 2017). При обробці КПЕ протікають нерівноважні умови нагрівання та охолодження, що тягне у себе формування принципово інший, ніж за традиційних методах обробки, структури поверхневого шару.

Однією з найперспективніших сучасних технологій, здатної керувати параметрами якості поверхонь деталей і здійснювана шляхом застосування КПЕ є ЕІЛ, завдяки якому в поверхневих шарах формуються поверхневі структури, що мають унікальні фізико-механічні та трибологічні властивості на нанорівні (Aghajani N., et. al., 2020). При зближенні електродів поверхні зазнають локальної дії високих тисків ударної хвилі та температур (Korotaev D.N., 2009).

В переважній більшості робіт (Tarelnyk V.B., et. al., 2017) підкреслюється, що при розробці кожної нової технології ЕІЛ, для кожної окремої електродної пари електродів (аноду і катоду), без проведення експериментальних дослідів, важко спрогнозувати більш раціональні режими легування для досягнення потрібних параметрів якості сформованих поверхневих шарів виробів.

Значення параметрів ЕІЛ суттєво впливають на інтенсивність нанесення покриттів та якість одержуваної поверхні. Найважливішими є потужність (енергія) розряду і продуктивність легування (Q) – площа обробленої поверхні в одиницю часу. Вплив енергії розряду при ЕІЛ достатньо широко вивчений при використанні різних електродних матеріалів (Mashkov Y. & Korotaev D., 2016). Її підвищення веде до збільшення величини кожного окремого електричного розряду i , у певних межах, сприяє підвищенню кількості перенесеного матеріалу покриття і більш глибоким перетворенням в сформованому поверхневому шарі в зоні розряду. Дія імпульсних розрядів на поверхню струмопровідних матеріалів в процесі ЕІЛ приводить до складних структурних і фазових перетворень, які в подальшому визначають широкий комплекс властивостей цих поверхонь (Chang-bin T., et. al., 2011).

Це саме стосується часу обробки, тобто трудомісткості, (τ) – величині зворотної продуктивності (Q), і з збільшенням якої товщина нанесених шарів зростає.

Найбільшу складність при використанні ЕІЛ на практиці представляє підбір, найбільш раціонального питомого часу легування. Це пов'язане з нелінійною зміною сумарного приросту ваги зразка у процесі ЕІЛ.

Таким чином, **метою роботи** є підвищення надійності і довговічності працюючого динамічного обладнання АЕС, шляхом розробки технологічних рішень, направлених на зниження процесів руйнування поверхневих шарів деталей за рахунок покращення параметрів якості їх поверхонь.

Методи і результати. З появою нових технологій підвищення параметрів якості поверхонь деталей машин методом ЕІЛ із застосуванням спеціальних технологічних насичуючих середовищ (СТНС) (Tarelnyk V.B., et. al., 2018), значно розширилось коло їх використання. З'явилась можливість отримувати поверхневі структури з унікальними фізико-механічними та трибологічними властивостями на нанорівні. При ЕІЛ, застосовуючи СТНС, можна отримати однокомпонентні покриття: алітування (Haropova O.P., et. al., 2023), цементация (Haropova O.P., et. al., 2020), азотування (Tarelnyk V., et. al., 2021), а й багато компонентні (Tarelnyk V.B., et. al., 2022).

Нижче представлені більш перспективні напрями підвищення параметрів якості деталей обладнання АЕС за рахунок удосконалення їх поверхневої обробки технологіями ЕІЛ.

Попереднє алітування методом ЕІЛ сталей поверхонь

Враховуючи, що при традиційній ХТО найбільш позитивні результати (твердість і глибина зміцненого шару) при азотуванні забезпечують високолеговані і високовартісні сталі, до складу яких входить алюміній (38Х2МЮА, 38ХМЮА, 38Х2ЮА, 38ХВФЮ, 38Х2Ю, 38Х2Ю), для ЕІЛ із застосуванням СТНС можна використовувати менш дорогі вуглецеві та хромисті сталі (40, 45, 50, 40Х та ін.), попередньо леговані методом ЕІЛ алюмінієм (Al).

Таким чином, використовуючи нанесення на зміцнювану поверхню СТНС, що містять азотовмісні компоненти можна проводити азотування поверхонь сталевих деталей, а попереднє ЕІЛ оброблюваної поверхні алюмінієм може бути корисним для підвищення параметрів якості їх поверхневого шару (Haropova O.P., et. al., 2022).

Підвищення жаростійкості

Для порівняльної оцінки показників жаростійкості (Δg – приріст маси на одиницю площі поверхні випробуваних зразків, мг / см²) випробовувалися зразки зі сталі 20 після класичної технології алітування (алітування в розплаві алюмінію, докладно описаної у (Кугук V.H., et. al., 2018)) і без покриття. Випробування, проведені на повітрі при температурі 980 °С протягом 50 годин показали, що ЕІЛ покриття характеризуються високою жаростійкістю.

Вище відмічалось, що в технологічному циклі АЕС вода подається за допомогою ГЦН в реактор під тиском $P = 16,6$ МПа і при температурі $t = 289$ °С, а в реакторі вода нагрівається до $t = 322$ °С і подається в парогенератор. Тому, бажано провести дослідження направлені на підвищення жаростійкості поверхневих шарів деталей, виконаних з аустенітної сталі марки 12Х18Н10Т і мартенситно-аустенітної сталі 06Х12Н3Д, робочі поверхні яких контактують з гарячою рідиною.

Дослідження продуктивності при формуванні функціональних покриттів технологіями ЕІЛ

Аналіз робіт по алітуванню, азотуванню, нітроцементации і цементации сталей поверхонь методом ЕІЛ як компактними електродами-інструментами, так і з застосуванням СТНС показав, що параметри якості сформованих поверхневих шарів досліджували переважно

залежно від основних параметрів роботи обладнання – енергії розряду (W_p). При цьому величина продуктивності обробки (Q), тобто кількість 100 % обробленої площини в одиницю часу ($\text{cm}^2/\text{хв}$) приймалась згідно рекомендацій з паспортів на установки ЕІЛ різних відомих виробників. Це: «Елітрон -14», «Елітрон -22», «Елітрон -22А», «Елітрон -52А», «Елітрон -52Б», «Елітрон -347» – виробник «Опитний завод Молдавської Академії наук» м. Кішенев, Республіка Молдова, та «ЕІЛ-6», «ЕІЛ-7», «ЕІЛ-8», «ЕІЛ-9», «ЕІЛ-9А», «УІЛВ-9» – виробник Проектно Технологічний Інститут «ПТІмаш», м. Луганськ, Україна. Також відомо, що для більшості матеріалів товщина сформованого на катоді (деталі) шару обмежена.

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

Фізико-хімічна природа структуроутворення поверхневого шару при ЕІЛ обумовлює великі труднощі вибору технологічних параметрів процесу. Тому існує наукова та практична доцільність в проведенні досліджень впливу продуктивності ЕІЛ на параметри якості сформованого поверхневого шару при використанні компактних електродів-інструментів, із застосуванням СТНС в більшому діапазоні.

Розробка технології формування самозмазувальних покриттів, сформованих методами ЕІЛ

Однією із основних переваг методу ЕІЛ є можливість модифікувати поверхні різними матеріалами, у тому числі не струмопровідними, такими як бор, азот, сірка тощо, що значно розширює галузі застосування технології ЕІЛ. У (Garonova O.P., et. al., 2021) було запропоновано для практичного використання технологію ЕІЛ із застосуванням сірки для створення MoS_2 -вмісних покриттів.

Покриття, що містять сульфід молібдену, відрізняються одними з найкращих антифрикційних властивостей (Antony Joseph, et. al., 2023). Трибологічні властивості MoS_2 пояснюються його шаруватою структурою із слабкими силами Ван-дер-Ваальса.

Аналіз літературних джерел свідчить про те, що метод ЕІЛ має багатообіцяючу перспективу для отримання покриттів з дихалькогенідів перехідних металів.

Завдання підвищення надійності, зносостійкості і довговічності деталей тертя обладнання електростанцій, шляхом створення нових технологій поверхневого оброблення антифрикційних деталей, які б відповідали сучасним вимогам машинобудування та були б здатні працювати без мастила, а також були б недорогими, є вельми актуальним і потребує подальших досліджень.

Розробка захисних покриттів проти абразивного зносу, сформованих технологіями ЕІЛ

Для захисту деталей від абразивного зносу використовують шлікерні покриття зносостійкими матеріалами (Radziiievskiy V.M., et. al., 1997). Відомо зносостійке спечене покриття, в якому наповнювачем служить твердосплавна суміш ВК-6, а легкоплавким зв'язком – твердий розчин системи Ni-Cr-Si-B. Покриття наносять на

поверхні деталей шлікерним методом з наступним відпалом у вакуумі.

Усунути недоліки шлікерних покриттів (складна і коштовна технологія, слабе зчеплення покритті з основою тощо) можливо за рахунок виготовлення ЕІ методом порошкової металургії (ПМ), які мають склад як в шлікерному покритті. Використання ЕІ, виготовлених методом ПМ, складу 1М – 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В та 90% ВК6 + 10% 1М, дозволяють досягти мікротвердості, відповідно 11500 та 14200 МПа (Tarelnyk V.B., et. al., 2019).

Незважаючи на значні переваги покриттів складу 90% ВК6 + 10% 1М, наявність кобальту не дозволяє використовувати їх для зміцнення деталей обладнання АЕС які піддаються радіаційному опроміненню (Tarelnyk N.V., 2021). Тому, в подальших дослідженнях, після алітування, згідно патенту (Наронова О.Р., et. al., 2023) замість композиційного зносостійкого матеріалу, отриманого за допомогою ПМ, складу 90% ВК6+10% 1М, на алітовану поверхню методом ЕІЛ наносять шар свинцю, після чого на вкриту свинцем поверхню методом ЕІЛ наносили зносостійкий композитний матеріал ЕІ, виготовлений методом ПМ з композитного матеріалу 90% WC+10% 1М. Після цього поверхню сформованого КЕП для зйження шорсткості можна обробляти металополімерними матеріалами (МПМ), армованими порошками карбіду або нітриду або їх сумішшю, наприклад, WC+ZnN. Потім, після полімеризації, поверхню шару МПМ видаляють до виступів шорсткості покриття 90% WC+10% 1М.

Розробка технологій наноструктурування сталейних поверхонь методом ЕІЛ

Розробка технологічних основ для розроблення методів наноструктурування деталей методом ЕІЛ є актуальним завданням. Застосування таких методів поверхневого наноструктурування дозволить підвищити ефективність роботи відповідального обладнання АЕС.

Дослідження показали, що, крім подрібнення блоків тонкої структури і підвищення щільності дислокацій, в результаті застосування ЕІЛ наноструктуризація покриттів може проходити за рахунок застосування анодних матеріалів з наноконцентів.

Автори (Hossein Aghajani, 2020) досліджували наноструктурування сталі 35 електродами на основі карбіду вольфраму з добавкою нанопорошків Al_2O_3 . Встановлено, що на катодній поверхні (підкладці) утворюються впорядковані скупчення нанокластерів, що складаються з наночастинок розміром до 30 нм. При цьому підкреслюється, що добавки в електрод-анод з твердого сплаву ВК8 всього лише 1% Al_2O_3 , підвищує ефективність формування легованого шару в 3 рази, а мікротвердість покриття стає в 3-4 рази вище мікротвердості сталі 35.

Таким чином, дослідження спрямовані на підвищення параметрів якості поверхневих шарів відповідальних деталей динамічного обладнання електростанцій, які лімітують термін його роботи, шляхом дослідження особливостей структуроутворення покриттів, отриманих методом ЕІЛ сталейних поверхонь із застосуванням спеціального технологічного середовища, що містить нанотрубки, актуальні і своєчасні.

Висновки

1. Проведений аналіз конструктивних і технологічних особливостей насосного обладнання, що використовується на АЕС.

2. Аналіз літературних джерел показав, що насосні агрегати АЕС працюють в важких умовах експлуатації (високих тисках, швидкостях, криогенних і підвищених температурах, впливу радіаційного опромінювання) та піддаються негативному впливу оточуючих середовищ. При цьому їх деталі підлягають різним видам зносу: окислювальному, абразивному, кавітації, утомі, фреттинг-корозії, електроерозії тощо.

3. Дослідженнями і аналізом методів підвищення параметрів якості поверхонь деталей встановлено, що до найбільш ефективних способів управління параметрами якості поверхневих шарів слід віднести технології, що вживають концентровані потоки енергії при використанні яких протікають нерівноважні умови нагрівання та охолодження, що дозволяє формувати принципово інші, ніж за традиційними методами обробки, структури поверхневого шару.

4. Доведено, що однією з найперспективніших сучасних технологій, здатної керувати параметрами якості поверхонь деталей і яка здійснюється шляхом застосування КПЕ є електроіскрове легування, завдяки якому в поверхневих шарах формуються поверхневі структури, що мають унікальні фізико-механічні та трибологічні властивості на нанорівні.

5. Проаналізовані особливості формування поверхневих шарів технологіями ЕІЛ і виявлені резерви до їх удосконалення за рахунок дослідження впливу продуктивності обробки (Q), тобто кількості обробленої площини в одиницю часу ($\text{cm}^2/\text{хв}$) на параметри якості покриттів.

6. Визначені шляхи удосконалення технологій ЕІЛ для підвищення надійності деталей насосного обладнання АЕС шляхом: підвищення їх жаростійкості, формування самозмазувальних покриттів, розробки технологій наноструктурування сталевих поверхонь і формування захисних покриттів тощо.

Бібліографічні посилання:

1. Aghajani H., Hadavand E., Peighambardoust N.-S. & Khameneh-asl S. (2020). Electro spark deposition of WC–TiC–Co–Ni cermet coatings on St52 steel. *Surfaces and Interfaces*. 18, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100392>
2. Antony Joseph, Athira S. Vijayan, C. Muhammed Shebeeb, K. S. Akshay, Kevin P. John Mathew & V. Sajith (2023). A review on tailoring the corrosion and oxidation properties of MoS₂-based coatings. *Journal of Materials Chemistry A*, 7, 3172–3209. <https://doi.org/10.1039/d2ta07821j>
3. Chalyi D.O., Tarnavskiy A.B., Sukach R.Iu. & Veselivskiy R.B. (2020). Tekhnohenna bezpeka AES. [Man-made safety of nuclear power plants]: Navch. posibn.; Ch. II. Derzh. sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii; Lviv. derzh. un-t bezpeky zhyttiedialnosti. Lviv: Kameniar. 340 p. (in Ukrainian)
4. Chang-bin T., Dao-xin L., Zhan W. & Yang G. (2011). Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical application. *Applied surface Science*. 257(15), 6364 – 6371.
5. CHP Technology. A detailed guide for CHP developers – Part 2. Crown copyright 2008. Department of Energy & Climate Change. – 64 p. Elektronnyi resurs. URL: <https://www.gov.uk/government/collections/combined-heat-and-power-chp-developers-guides>
6. Gaponova O.P., Antoszewski B., Tarelnyk V.B., Kurp P. Myslyvchenko O.M. & Tarelnyk N.V. (2021). Analysis of the Quality of Sulfomolybdenum Coatings Obtained by Electrospark Alloying Methods. *Materials*. 2021, 14, 6332. <https://doi.org/10.3390/ma14216332>
7. Gaponova O.P., Tarelnyk V.B., Antoszewski B., Myslyvchenko O.M. & Hoffman J. (2022). Technological Features for Controlling Steel Part Quality Parameters by the Method of Electrospark Alloying Using Carburezer Containing Nitrogen—Carbon Components. *Materials*, 15(17), 6085.
8. Haponova O.P., Myslyvchenko O. M., Pyrohov V.O., Hapon O.O. & Lazarenko A.D. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroiskrovym lehuванням [The method of cementation of steel parts by electrospark alloying]. Pat. na korysnu model 142822 UA, MPK C23C 8/00, C23C 28/00; zaiavl. 11.02.2020; opubl. 25.06.2020, Biul. № 12, 2020. (in Ukrainian)
9. Haponova O.P., Tarelnyk N.V., Tarelnyk V.B., Zhylenko T.I., Myslyvchenko O.M., Dudchenko V.V. & Holub N.R. Sposib pidvyshchennia znosostiikosti stalevykh detalei obladnannia, yake pratsiuie v umovakh radiatsiinoho vyprominiuvannia. [A method of increasing the wear resistance of steel parts of equipment that operates under radiation conditions]: pat. 152967 Ukrainy na korysnu model, MPK (2023.01), B23H 1/06. / –u 202203922; opubl. 03.05.2023, Biul. № 18. (in Ukrainian)
10. Haponova O.P., Tarelnyk V.B., Zhylenko T.I. & Tarelnyk N.V. Sposib alituvannia stalevykh detalei [The method of alitizing steel parts]: pat. 153741 Ukrainy na korysnu model, MPK (2006): B23H 9/00, B23H 1/00, C23C 8/60 (2006.01), C23C 10/48 (2006.01), opubl. 23.08.2023, Biul. № 34. (in Ukrainian)
11. Herman V.F. (2014). Nadiinist hidromashyn i hidropryvodiv: konspekt leksii [Reliability of hydraulic machines and hydraulic drives: lecture notes] – Sumy: Sumskiy derzhavnyi universytet. – 84 p. (in Ukrainian)
12. HND 34.09.453.2003. Rozrakhunok pokaznykiv nadiinosti dlia elektrostantsii, teplovykh merezh ta enerhokompanii [Calculation of reliability indicators for power plants, heating networks and energy companies]. – Metodyka. – Ofits. Vyd., 2003. – 26 p. Elektronnyi resurs. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=61561 (in Ukrainian)
13. Hossein Aghajani, Ebrahim Hadavand, Naeimeh-Sadat Peighambardoust & Shahin Khameneh-asl (2020). Electro spark deposition of WC–TiC–Co–Ni cermet coatings on St52 steel. *Surfaces and Interfaces*, 18, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100392>
14. Klymenko L.P., Soloviov S.M., Nord H.L. (2007). Systemy tekhnolohii [Technology systems]: Navchalnyi posibnyk. – Mykolaiv: Vyd-vo MDHU im. Petra Mohyly, 600 p. Elektronnyi resurs. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefndmkaj/https://lib.chmnu.edu.ua/pdf/posibnuku/247/12.pdf (in Ukrainian)

15. Korotaev D.N. (2009). Technological Possibilities of Wear-Resistant Nanostructure Formation by Electric-Spark Alloying), SibADI.
16. Kuzmin V. I., Mikhal'chenko A. A., Kovalev O. B. & Kartaev E.V. (2012). The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials / J. of Thermal Spray Technology. 21 (1), 159–168.
17. Kyryk V.H., Tarelyk V.B. & Haponova O.P. (2018). Doslidzhennia vlastyvostei zharostiikykh funktsionalnykh pokryttiv, sformovanykh metodom elektroiskrovoho lehuвання [Investigation of the properties of heat-resistant functional coatings formed by the method of electrospark alloying]. *Kompresorne ta enerhetychne mashynobuduvannia*. 2018, 4 (54), 17-22. (in Ukrainian)
18. Maistro, G., Kante, S., Nyborg, L. & Cao, Y. (2021). Low-temperature carburized high-alloyed austenitic stainless steels in PEMFC cathodic environment *Surfaces and Interfaces*, 24, 101093. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101093>
19. Martsynkovskiy V.S. Oporny pidshyynykovyi vuzol (varianty) [Support bearing assembly (options)]: pat. 74963 Ukrainy na vynakhid MPK (2006) F16S 32/00/ -opubl.15.02.2006, Biul. №2. (in Ukrainian)
20. Mashkov Y., Korotaev D. (2016). The effect of electric – spark treatment on the structure and properties of modified friction surfaces. *Friction and wear*, 37, 1, 83-88.
21. Nasosne ustatkuvannia v tekhnolohichnii skhemi AES [Pumping equipment in the technological scheme of nuclear power plants]. *Elektronnyi resurs*. URL: <https://vseosvita.ua/library/embed/0100a91v-0886.docx.html> (in Ukrainian)
22. Omelianovskoho P., Mysaka Y. & Akimov A. (2009). Teplova enerhetyka – novi vyklyky chasu [Thermal energy – new challenges of the time]. L: Ukrainski tekhnolohii. 658 p. (in Ukrainian)
23. Pliszka I. & Radek N. (2017). Corrosion Resistance of WC-Cu Coatings Produced by Electrospark Deposition. *Procedia Engineering*, 192, 707-712. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.122>
24. Radziievskiy V.M., Hartsunov Yu.F. & Tkachenko H.H. (1997). Plakuvannia stalevykh detalei iz zastosuvanniam vysokotemperaturnoho paiannia po shyrokomu zazoru z napovniuvachem [Plating of steel parts using high-temperature soldering along a wide gap with a filler]. *Avtomatychne zvariuvannia*. 3, 48-50. (in Ukrainian)
25. Shulzhenko M.H. (2011). Vyznachennia rozrakhunkovoho resursu ta otsinky zhyvuchosti rotoriv ta korpusnykh detalei turbiny [Determination of the calculated resource and assessment of the survivability of rotors and turbine body parts]: *Metodychni vkazivky*. Minenerhovuhillia Ukrainy. Ofits. vyd. 24 p. (in Ukrainian)
26. Tarelyk N.V. (2021). Novyi sposib vidnovlennia znoshenykh poverkhon stalnykh detalei nasosnoho obladnannia atomnykh elektrostantsii [A new method of restoration of worn surfaces of steel parts of pumping equipment of nuclear power plants]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*, 2(51), 32-39. (in Ukrainian)
27. Tarelyk V., Gaponova O., Martsynkovskiy V., Kutakh A. & Golovchenko G. (2021). New Process for Nitriding Steel Parts. *Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference "Nanomaterials: Applications and Properties"*, NAP 2021.
28. Tarelyk V.B. & Martsynkovskiy V.S. (2005). Modernizatsiia ta remont rotornykh mashyn [Modernization and repair of rotary machines]: *Monohrafiia*. Sumy: Vydavnytstvo „Kozatskyi val”. 364 p. (in Ukrainian)
29. Tarelyk V.B., Gaponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Martsynkovskiy V.S., Tarelyk N.V. & Vasilenko O.O. (2019). Improvement of quality of the surface electroerosive alloyed layers by the combined coatings and the surface plastic deformation. I. Features of formation of the combined electroerosive coatings on special steels and alloys. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 41 (1), 47-69. <https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047>
30. Tarelyk V.B., Martsynkovskiy V.S., Bilous A.V., Zhukov O.M., Kosenko P.V. & Haponova O.P. Sposib sulfiduvannia poverkhni stalevykh i chavunnykh detalei metodom elektroeroziinoho lehuвання [The method of sulphiding the surface of steel and cast iron parts by electroerosion alloying]: pat. 117528 Ukrainy na vynakhid, MPK B23H 1/04 (2006.01), S23S 8/60 (2006.01) / ; zaiavl. 24.11.2016 ; opubl. 10.08.2018, Biul. № 15. 8 p. (in Ukrainian)
31. Tarelyk V.B., Martsynkovskiy V.S., Haponova O.P., Konoplianchenko Ye.V., Sarzhanov O.A., Tarelyk N.V., Mikulina M.O., Lazarenko A.D. & Polyvanyi A.D. Sposib nitrotsementatsii poverkhon stalevykh detalei metodom elektroiskrovoho lehuвання (EIL). [The method of nitrocementing of the surfaces of steel parts by the method of electrospark alloying (ESA)] Pat. na korysnu model 150385 UA, MPK (2006) B23H 1/00, B23H 5/00, B23H 9/00, C23C 8/20 (2006.01), C23C 8/22 (2006.01) / ; zaiavl. 30.08.2021; opubl. 09.02.2022, Biul. № 6, 2022. (in Ukrainian)
32. Tarelyk V.B., Paustovskii A.V., Tkachenko Y.G., Konoplianchenko E. V., Martsynkovskiy V.S. & Antoszewski B. (2017). Electrode Materials for Composite and Multilayer Electrospark-Deposited Coatings from Ni-Cr and WC-Co Alloys and Metals. *Powder Metall Met Ceram*, 55, 585–595. <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9843-2>
33. Verkhovtsev V.H., Lysychenko H.V. & Zabulonov Yu.L. (2014) Perspektivy rozvytku uranovoi syrovynnoi bazy yadernoi enerhetyky Ukrainy [Prospects for the development of the uranium ore base of the nuclear power industry in Ukraine]: *monohrafiia*. Derzh. ustanova «In-t heokhimii navkolysh. seredovyschcha NAN Ukrainy». Kyiv: Nauk. dumka. 356 p. (in Ukrainian)

Tarelyk N. V., PhD of Economic Sciences, Assistant Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Problems and prospects for the development of technology for modification of surfaces of pump parts for nuclear power plants

The paper has studied the structural and technological features of pumping equipment used at nuclear power plants (NPP). The analysis of literary sources has shown that the NPP pumping units work under difficult operating conditions (high pressures, speeds, cryogenic and elevated temperatures, as well as under the influence of radiation exposure). Moreover, they have been being exposed to the negative influence of the surrounding environment. At the same time, their parts are subject to various types of wear: oxidative, abrasive, cavitation, fatigue, fretting corrosion, electro erosion, etc. Research

and investigation of methods for improving the quality parameters of the surfaces of the parts have found that the most effective methods for controlling the quality parameters of the surface layers of the parts should include the technologies using concentrated energy flows (CEFs), while applying which, the non-equilibrium heating and cooling conditions occur. In comparison with the traditional processing methods, the above technologies allow forming the fundamentally different structure of the surface layers. It has been proven by literature and patent studies that one of the most promising modern technologies being capable of controlling the quality parameters of the part surfaces and carrying out through the application of the CEFs is an electrospark alloying (ESA) process. Owing to applying the ESA method, the surface structures with unique physical-mechanical and tribological properties at the nano-level are formed in the surface layers. The paper analyzes the features of the formation of the surface layers with the use of the ESA technologies and reveals reserves for their improvement due to the study of the effect of processing productivity (Q), i.e. the amount of processed surface per unit of time (cm^2/min), on the quality parameters of the coatings. Moreover, there have been defined the ways for improving the ESA technologies to increase the reliability of the NPP pumping equipment parts by: increasing their heat resistance, forming self-lubricating coatings, developing technologies for nanostructuring of steel surfaces and creating protective coatings, etc.

Key words: technology, pumping equipment, pump, nuclear power plant, electrospark alloying, wear, surface quality parameters, surface layer, structure, microhardness, roughness.