

НОВИЙ СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЬНИХ КІЛЕЦЬ ІМПУЛЬСНИХ ТОРЦЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ, ЯКІ ПІДЛЯГАЮТЬ РАДІАЦІЙНОМУ ОПРОМІНЮВАННЮ

Тарельник В'ячеслав Борисович

доктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0003-2005-5861
tarelnik@i.ua

Гапонова Оксана Петрівна

доктор технічних наук, професор
Сумський державний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-4866-0599
gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Власовець Віталій Михайлович

доктор технічних наук, професор
Львівський національний університет природокористування, м. Львів, Україна
ORCID: 0000-0002-6657-6761
vlasovez@ukr.net

Тарельник Наталія В'ячеславівна

кандидат економічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-6304-6925
natasha-tarelnik@ukr.net

Зубко Владислав Миколайович

доктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-2426-2772
zubkovladislav@ukr.net

Шуляк Михайло Леонідович

доктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0001-7286-6602
m.l.shulyak@gmail.com

Кирик Григорій Васильович

доктор технічних наук, професор
Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна
ORCID: 0000-0002-8620-4842
ptmz0503071305@gmail.com

В статті проведений аналіз існуючих на теперішній час літературних та патентних джерел, направлених на покращення параметрів якості поверхневих шарів деталей пар тертя. Метою роботи визначено підвищення якості та зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець торцевих імпульсних ущільнень, які можна використовувати в умовах радіаційного опромінювання, шляхом формування на робочих поверхнях кілець методом електроіскрового легування квазібагатошарових покриттів, що об'єднують в собі змащувальні та механічні властивості.

Авторами запропонований новий спосіб підвищення якості поверхонь сталевих кілець торцевих імпульсних ущільнень, які працюють в умовах радіаційного опромінювання. Дослідження застосування нового способу проводили для сталей марок 12X18H10T, 30X13 і 40X. Спосіб полягає в нанесенні методом електроіскрового легування на поверхню кільця торцевого імпульсного ущільнення покриття з міді при енергії розряду $W_p = 0,04$ Дж, а потім, на сформовану поверхню, наносять спеціальне технологічне насичуюче середовище у вигляді пастоподібної суміші, до складу якої входять – 80% карбід вольфраму, 10% нікелю і 10% вазеліну, і проводять електроіскрове легування графітовим електродом при енергії розряду в межах $W_p = 0,5-4,6$ Дж. Легування міддю та графітовим електродом-інструментом відбувалось на установці з ручним вібратором «Елітрон-22А». З експериментальних зразків виготов-

лялися шліфи, які досліджували на оптичному мікроскопі «Неофот-2». За допомогою мікроскопа проводилася оцінка якості шару, його суцільності, товщини і будови зон підшару – дифузійної зони і зони термічного впливу. Також проводився дюрOMETричний аналіз на розподіл мікротвердості в поверхневому шарі і по глибині шліфа від поверхні.

Застосування нового способу, дозволяє, формувати шари робочих поверхонь сталевих кілець торцевих імпульсних ущільнень підвищеної твердості товщиною залежно від марки сталі й енергії розряду при цементації методом електроіскрового легування від 30 до 115 мкм, мікротвердістю до 10350 МПа і суцільністю 100%. Шорсткість сформованого покриття знаходиться в межах $Ra = 0,7-14,2$ мкм. Подальше зниження шорсткості можливо за рахунок подальшої цементації методом електроіскрового легування, але з меншою енергією розряду, а також безабразивної ультразвукової фінішної обробки.

Ключові слова: електроіскрове легування, торцеве імпульсне ущільнення, твердість, шорсткість, покриття, електрод, матеріал, поверхня.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.3.12>

Вступ. Більшість відповідальних деталей вузлів тертя високошвидкісних турбонасосних та турбокомпресорних агрегатів (ТКА) компресорів, насосів і іншого динамічного обладнання, працює при високих швидкостях, тисках, температурах, а також в умовах абразивного, корозійного й іншого видів впливу робітничих середовищ. Підвищення режимних параметрів турбонасосних та ТКА ракет-носіїв, потужність яких при мінімальних габаритах перевищує сотню мегават, супроводжується появою нових, композиційних матеріалів, типу «основа – покриття», що сполучають у собі захисні властивості покриттів з механічною міцністю основи. Перспективним напрямком створення цих матеріалів можуть бути нові екологічно чисті, енергоєфективні методи (алітування, цементація, нітроцементація, силіціювання та ін.), створені на базі методу електроіскрового легування (ЕІЛ). Формування поверхневих шарів деталей вище означеними методами, та їх комбінаціями, дозволяють підвищити зносостійкість вузлів тертя більш економічними методами.

Досвід експлуатації ТКА показує, що дві третини всіх відмов устаткування відбуваються внаслідок порушення працездатності ущільнень. Останнім часом до ущільнень пред'являються підвищені вимоги відносно герметичності, довговічності, здатності працювати при високих значеннях технологічних параметрів. Створення надійних ущільнювальних вузлів, що забезпечують герметичність протягом тривалого часу в широкому діапазоні зміни температур і тисків, є однією з основних проблем, що виникають при проектуванні машин і агрегатів.

Постановка проблеми. Згідно з (Blasiak S., 2016) торцеве ущільнення (ТУ) є герметизувальним пристроєм, що складається з двох деталей у вигляді кілець: одне з яких обертається разом із валом, а інше нерухоме, пов'язане з корпусом. Кільця постійно стиснені й утворюють плоску пару тертя. Стиснення ущільнювальних поверхонь кілець забезпечується пружинами, сильфонами, надлишковим тиском мастильної рідини. Стисканню робочих поверхонь протидіє робочий тиск ущільнювального середовища p . Для запобігання витoku ущільнювального середовища через зазор пари тертя необхідно, щоб стискувальне зусилля було більшим за сили, які розкривають зазор, обумовлені робочим тиском.

Кільця ТУ являють собою пару тертя, що відіграє роль основного ущільнювального елемента, тому їх виготовляють із спеціальних матеріалів, які вибирають залежно від умов експлуатації. Правильно вибраний матеріал кілець ТУ забезпечує надійну, безпечну та безвідмовну роботу вузла ущільнення, а отже, й усього агрегату. Зазвичай

одне з кілець торцевої пари виконують із графіту, інше – з графіту, металу або кераміки (Tarelnyk V.B., 2022).

Наявність в торцевій парі ТІУ гарантованого зазору величиною 0,003–0,004 мм призводить до того, що ущільнювальні поверхні кілець майже не зношуються. Незважаючи на це, їх ущільнювальні кільця повністю виготовляються зі зносостійких матеріалів, таких як карбід вольфраму, карбід кремнію, різні види графіту. Вартість кілець із цих матеріалів досягає сотень і тисяч доларів США, що обумовлює високу вартість ущільнювальних вузлів у цілому.

Торцеві імпульсні ущільнення (ТІУ) широко використовують у високооборотних насосах і компресорах великого тиску. Робочі торцеві поверхні ТІУ контактують нетривалий час, лише в моменти пуску і зупинення машини (Zahorulko A., 2015).

Зазвичай ТІУ містять аксіально-рухоме металеве кільце, встановлене в корпусі, що забезпечене вторинним ущільненням, яке герметизує порожнину з різним тиском, опорне металеве кільце, закріплене на валу. На робочій торцевій поверхні аксіально-рухомого кільця розміщені замкнені камери, а на торцевій поверхні опорного кільця – підвідні канали, які під час обертання опорного кільця послідовно з'єднують замкнені камери з ущільнювальною порожниною.

Форма підвідних каналів може бути різною, наприклад у вигляді радіальних живильників (Tarelnyk V.B., 2022), тангенціальних живильників (Tarelnyk V.B., 2022), комбінованих живильників – радіальні та осьові канали (Tarelnyk V.B., 2022).

Конструктивно розрізняють ТІУ з гумовим вторинним ущільненням (Tarelnyk V.B., 2022) і вторинним ущільненням, виготовленим у вигляді металевої манжети (Tarelnyk V.B., 2022).

ТУ з імпульсним зрівноваженням аксіально-рухомого елемента має порівняно недавно історію – 1974 р. (Tarelnyk V.B., 2022). Традиційна конструктивна схема ТІУ показана на рис. 1. На робочій поверхні аксіально-рухомого кільця 1 розміщені замкнені камери 2, а на поверхні опорного диска 3 передбачено кілька підвідних каналів 4, які під час обертання опорного кільця послідовно з'єднують камери 2 з ущільнювальною порожниною А.

Принцип дії імпульсного ущільнення ґрунтується на тому, що під час обертання ротора підвідні канали 4 періодично сполучають камери з порожниною високого тиску 5, внаслідок цього в них відбуваються сплески тиску (імпульси), що спричиняють зміну балансу осьових сил.

ТІУ належать до типу саморегульованих, у них величина торцевого зазору витримується автоматично.

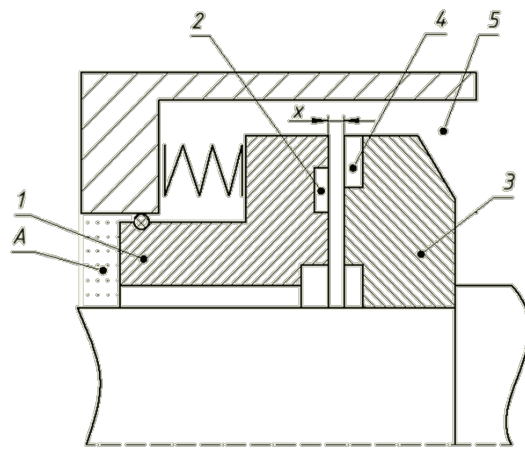


Рис. 1. Конструктивна схема ТЛУ

ТЛУ на рідинному мастилі досліджені в широкому діапазоні параметрів режиму: ущільнювальний перепад тисків до 16,0 МПа, швидкість ковзання до 100 м/с. Завдяки своїм високим експлуатаційним якостям, вони успішно працюють у високооборотних живильних насосах атомних і теплових електростанцій. У середньому їх напрацювання між плановими ремонтами насосів становить не менше ніж 8 000 год, водночас ступінь зношення при шляху 10^6 км залишається в межах 1–2 мкм, що для вузлів тертя характеризується як нульове зношення. За типових умов роботи (тиск – 2,0–4,0 МПа, колова швидкість – 40–60 м/с) рівень витoku становить усього 1–2 л/год (Tarel'nyk V.B., 2022).

У (Tarel'nyk V.B., 2022) проведено аналіз роботи затворного імпульсного ущільнення. Відзначено, що застосування таких ущільнень дозволяє заощадити енергію й ресурси, а також підвищити екологічну безпеку насосного та компресорного обладнання.

У деяких агресивних середовищах, де застосування в різних з'єднаннях ущільнень із неметалевих матеріалів обмежене або неможливе, використовують металеві ущільнення.

До останнього часу вважалось, що ТЛУ працює лише в рідких середовищах. Однак проведені теоретичні та експериментальні дослідження засвідчили, що ці ущільнення працює і в рідинах, і в газах. Були виконані унікальні дослідження імпульсних ущільнень за надвисоких режимних параметрів $p_v > 400$ МПа · м/с в криогенній рідині (рідкий азот, $t = -195$ °С), які показали, що таке ущільнення малочутливе до теплофізичних властивостей і температури робочого середовища. Усе це дозволяє зробити висновок про універсальність ТЛУ і велику практичну цінність (Tarel'nyk V.B., 2022).

З огляду на те, що при використанні високих і надвисоких тисків, екстремальних температур (від високих до криогенних), агресивних середовищ та ін., де застосування в різних з'єднаннях ущільнень із неметалевих матеріалів обмежене або неможливе, стає доцільним застосування металевих ущільнень, для яких практично немає обмежень, крім міцності самого матеріалу ущільнень і термостійкості матеріалу покриття

(Tarel'nik V.B., 2017, P.1; Tarel'nik V.B., 2017, P.2; Tarel'nik V.B., 2017, P.3).

Необхідно зазначити, що ущільнення, які мають гумові ущільнювачі вторинного ущільнення, не працює в криогенних середовищах.

Згідно з (Tarel'nyk V.B., 2022) ущільнення роторів повинні задовольняти дві головні умови: мати необхідну герметичність і підвищену надійність за заданих перепадів тиску, частот обертання, температур і фізичних властивостей ущільнювального середовища. Зазвичай ТУ працюють у режимі граничного або напіврідинного змащування і на розрахункових режимах забезпечують мінімальне, краплинне витікання. Внаслідок цього зазор між кільцями повинен бути дуже маленьким, змащувальна плівка дуже тонкою, а матеріали поверхні ущільнення витримувати тертя один об одного, причому часто за високих швидкостей і навантажень. Тому матеріали для поверхонь ТУ повинні мати низький коефіцієнт тертя, достатню твердість, хорошу стійкість до корозії й високу теплопровідність. Допустима неплоскостиність контактних поверхонь – не більше ніж 0,6 мкм.

Перспективним шляхом підвищення зносостійкості кілець ТЛУ можуть бути комбіновані методи текстурування поверхонь кілець методом ЕІЛ та лазерним обробленням (Antoszewski B., 2014), а також формування на робочих торцевих поверхнях квазібагатошарових покриттів, що поєднують у собі тверді зносостійкі й м'які антифрикційні матеріали (Tarel'nyk V.B., 2012).

За способом електроерозійного легування (ЕЕЛ), те саме, що і ЕІЛ (Tarel'nyk V.B., 2022) з метою підвищення зносостійкості і зменшення шорсткості поверхні, спочатку наносять шар покриття антифрикційним легкоплавким металом, обраним з групи In, Cd, Sn, Pb, а потім шар покриття із зносостійкого високотвердого металу, вибраного з групи Ti, V, W та їх карбідів. При цьому різко знижується шорсткість поверхні до $Ra = 0,54-0,91$ мкм. Одночасно підвищується зносостійкість. Проте досвід показав, що, незважаючи на підвищення зносостійкості, мікротвердість таких покриттів недостатньо висока. Тому було запропоновано спосіб ЕІЛ, в якому спочатку наносили шар покриття антифрикційним металом міддю, а потім шар із зносостійкого

високотвердого металу або його карбїду, обраного з групи Ti, V, W. Металографічні дослідження шарів ЕІЛ покриттів, сформованих за вказаним способом на сталі 45, свідчать про те, що їх мікротвердість знаходиться на порівняно високому рівні (8400–12300 МПа). Причому, на покритті присутня плівка міді товщиною 1–3 мкм. Усі покриття, сформовані таким способом, мають характерний жовтий колір. Наявність міді як на поверхні, так і по всій товщині покриття підтверджується рентгеноструктурним аналізом (Tarelnyk V.B., 2022). Однак, слід зазначити, що товщина таких покриттів невелика і складає 15–20 мкм, а суцільність – менше 100%.

Найбільш близьким до способу, що пропонується в дійсній роботі, є спосіб (прототип) в якому для збільшення товщини і суцільності покриття запропоновані квазібагат шарові електроіскрові покриття, що формуються в послідовності ВК8+Cu+ВК8. За цим способом перший і останній шари з твердого сплаву ВК8 наносять при енергії розряду $W_p = 0,2$ Дж, а мідь – при $W_p = 0,08$ Дж. У цьому випадку товщина зміцненого шару збільшується до 30–40 мкм, мікротвердість знаходиться на рівні 8740 МПа, а суцільність становить 100% (Tarelnyk V.B., 2022).

Незважаючи на низку позитивних особливостей квазібагат шарових електроіскрових покриттів, складу ВК8+Cu+ВК8, відмічених у прототипі, слід відмітити, що твердий сплав ВК8 має в своєму складі 8% кобальту, наявність якого, не дозволяє використовувати їх для ТІУ, що працюють в умовах радіаційного опромінювання. Порівняно з енергетичними установками на органічному паливі, умови роботи матеріалів в атомних енергетичних установках звичайно є більш складними й багатфакторними. При виборі конструкційних матеріалів для ядерних енергетичних установок (ЯЕУ) різних типів необхідно брати до уваги серед інших основних умов: число й величину циклічних змін механічних навантажень; нейтронне опромінення й вплив теплоносія на корозію й корозійно-механічну міцність матеріалів. Для зниження впливу перенесених активних продуктів корозії на умови ремонту встаткування першого контуру в ряді випадків у сталі 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 (Наронова О. Р., 2022; Yefimov O. V., 2017).

Крім цього, кобальт має низьку хімічну стійкість, він розчиняється навіть у дистильованій воді, тому його не можна застосовувати в апаратах харчової промисловості. Кобальтове зв'язування кілець з карбїдів вольфраму піддається сильній корозії в морській воді (Tarelnyk V.B., 2022; Tarelnyk N. V., 2022). Причому, наявність у покритті навіть незначної кількості (до 8%) кобальту за певних умов може негативно позначитися на його зносостійкості.

Використання нікелю вирішує явища, які відбуваються при використанні кобальтової зв'язки (Tarelnyk V.B., 2022; Tarelnyk N. V., 2021). Хімічний склад матеріалів деталей, що стикаються з теплоносієм, не містить спеціальних добавок кобальту та інших елементів, що

утворюють довгоживучі ізотопи в активному робочому середовищі. Тому в якості матеріалу покриттів можна використати метали, які не утворюють довгоживучі ізотопи в активному робочому середовищі, наприклад, хром, молібден, нікель та ін.

Таким чином, **метою роботи** є підвищення якості та зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець торцевих імпульсних ущільнень, які можна використовувати в умовах радіаційного опромінювання, шляхом формування на робочих поверхнях кілець методом ЕІЛ квазібагат шарових покриттів, що об'єднують в собі змащувальні та механічні властивості.

Методи досліджень

Для досягнення поставленої мети першим шаром на поверхню кільця ТІУ наносять мідь при енергії розряду $W_p = 0,04$ Дж, а потім, на сформоване покриття з міді, наносять спеціальне технологічне насичувальне середовище (СТНС) у вигляді пастоподібної суміші, до складу якої входять – 80% карбїду вольфраму, 10% нікелю і 10% вазеліну, і проводять електроіскрове легування графітовим електродом при енергії розряду в межах $W_p = 0,5–4,6$ Дж.

Слід відмітити, що при ЕІЛ графітовим електродом протікає безліч дискретних процесів насичення оброблюваної поверхні вуглецем, які співпадають з загартуванням поверхневого шару. Таким чином відбувається процес цементації методом електроіскрового легування (ЦЕІЛ).

З метою зменшення шорсткості поверхні після ЦЕІЛ рекомендовано проводити подальшу обробку поверхні графітовим електродом при енергії розряду в межах $W_p = 0,06–2,6$ Дж для надання необхідної шорсткості. В подальшому робочі поверхні, які підлягають ЕІЛ, піддаються безабразивній ультразвуковій фінішній обробці (БУФО).

Дослідження застосування нового способу проводили для різних матеріалів сталі: 12Х18Н10Т, 30Х13 і 40Х.

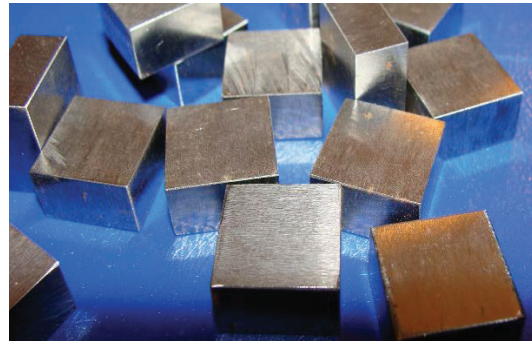
Для дослідження структури і виміру твердості поверхневого шару використовували шліфи зразків розміром 10×10×8 мм. Легування міддю та графітовим електродом-інструментом відбувалось на установці з ручним вібратором «Елітрон-22А» (рис. 2).

Для виготовлення спеціального технологічного насичувального середовища у вигляді пастоподібної суміші, використовували 80% порошку карбїду вольфраму (розмір часток 4–6 мкм) марки WC, який складається, згідно ТУ48-19-540-92 з 94% W і 6% C; 10% порошку нікелю карбонільного, марки ПНК (ГОСТ 9722-97), в склад якого входить 99,7–99,9% нікелю, з розміром часток < 20 мкм і 10% вазеліну.

Поверхня шліфа була орієнтована перпендикулярно до поверхні легування. Перед виготовленням шліфа для виключення крайового ефекту при легуванні торець зразка фрезерували на глибину не менше 2 мм. Для попередження зминання шару, завалів краю зразок кріпили за контртіло в струбціні. Далі шліф піддавався хімічному травленню для виявлення структури в реактиві. Після виготовлення шліфи досліджували на оптич-



а



б

Рис. 2. Зображення установки електроерозійного легування моделі «Елітрон–22А» (а) та зразки для досліджень (б)

ному мікроскопі «Неофот-2», за допомогою якого проводилася оцінка якості шару, його суцільності, товщини і будови зон підшару – дифузійної зони і зони термічного впливу. Також проводився дюрOMETричний аналіз на розподіл мікротвердості в поверхневому шарі і по глибині шліфа від поверхні. Замір мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавненням алмазної піраміди під навантаженням 0,05 Н. Шорсткість вимірювали на приладі профілографі-профілометра мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття та обробки профілограм.

Результати дослідження. На рис. 4 зображені мікроструктури (а, в) і розподіл мікротвердості за товщиною шару (б, г), відповідно зразків сталі 12Х18Н10Т і 40Х після ЦЕІЛ, які були отримані при енергії розряду 2,6 Дж. Проведений металографічний аналіз показав, що мікроструктури складаються з 3-х зон: верхній «білий» шар, що не травиться у реактиві, дифузійна зона і основа. Найбільша мікротвердість знаходиться ближче до поверхні зразків, яка по мірі поглиблення повільно зменшується до мікротвердості основи. Глибина зміцненого шару, найбільша мікротвердість і шорсткість поверхні відображені в табл. 1.

В зведеній табл. 1 представлені результати проведених досліджень сталевих зразків після ЕІЛ міддю і ЦЕІЛ при різних енергіях розряду.

Аналіз таблиці 1 показав, що незалежно від досліджуваного матеріалу, шорсткість поверхні зростає з підвищенням енергії розряду. Крім того, для всіх мате-

ріалів сталей, зі збільшенням енергії розряду збільшується загальна глибина зміцненого шару і максимальна мікротвердість на поверхні досліджуваних зразків. Мікротвердість зміцненого шару зростає до енергії розряду $W_p = 4,6$ Дж, а потім знижується. Незалежно від досліджуваного матеріалу і режиму ЦЕІЛ мікротвердість зміцненого шару, від максимальної на поверхні, у міру поглиблення плавно знижується і переходить в мікротвердість основи. Суцільність зміцненого шару на усіх досліджуваних зразках становить 100%.

Враховуючи те, що ЦЕІЛ при енергії розряду $W_p = 6,8$ Дж, супроводжується зниженням мікротвердості і значним підвищенням шорсткості поверхневого шару, до практичної реалізації запропонованого способу рекомендуються параметри W_p в межах 0,5–4,6 Дж.

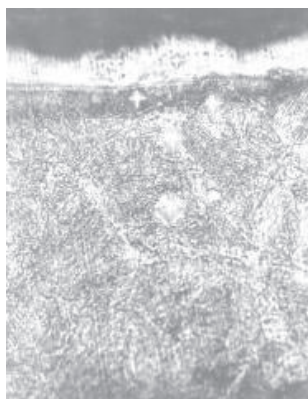
В попередніх роботах нами відмічалось, що шорсткість поверхневого шару можна знизити за рахунок подальшої ЦЕІЛ, але з меншою енергією розряду (Martsynkovskiy V.S., 2013), а також БУФО (Tarelnyk V.B., 2006). Результати шорсткості поверхні сталі 12Х18Н10Т після ЦЕІЛ з меншою енергією розряду і БУФО представлені в табл. 2.

Висновки:

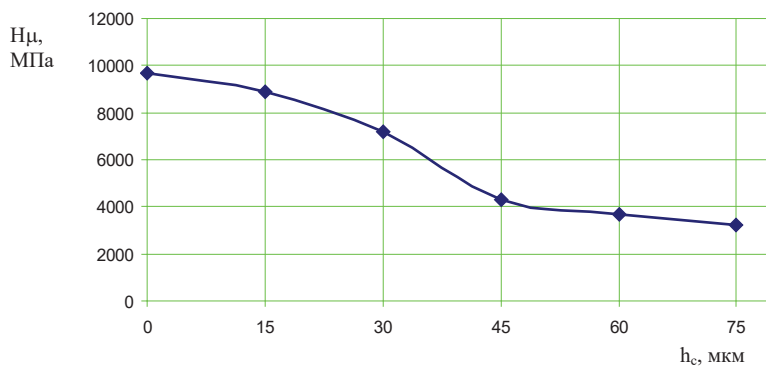
1. Запропонований новий спосіб підвищення якості поверхонь сталевих кілець торцевих імпульсних ущільнень, які працюють в умовах радіаційного опромінювання. Спосіб полягає в нанесенні методом ЕІЛ на поверхню кільця ТІУ покриття з міді при енергії розряду



Рис. 3. Зображення профілографі-профілометра мод. 201 заводу «Калібр»



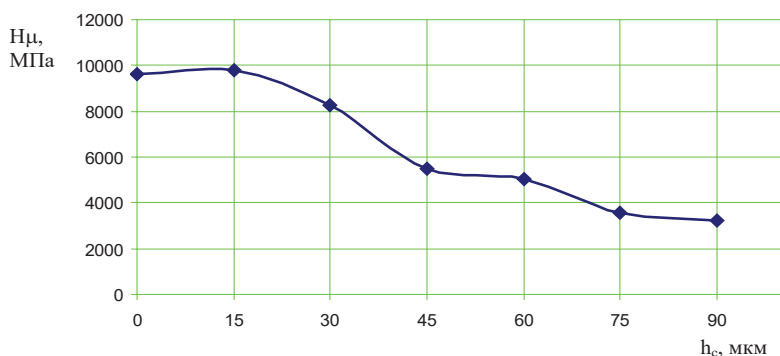
а



б



в



г

Рис. 4. Мікроструктура (а, в) і розподіл мікротвердості за товщиною шару (б, г), відповідно зразків сталі 12X18H10T і 40X після ЦЕІЛ з $W_p = 2,6$ Дж

Таблиця 1

Параметри якості поверхневих шарів зразків сталі 12X18H10T

Енергія розряду W_p , Дж	Продуктивність, $см^2/хв$	Загальна глибина шару, мкм	Мікротвердість, МПа	Шорсткість, R_a , мкм
Сталь 12X18H10T				
0,5	1,0-1,3	30	9020	0,8-0,9
1,3	1,3-1,5	45	9320	1,0-1,8
2,6	1,5-2,0	60	9740	5,1-6,7
4,6	2,0-2,5	70	9860	8,3-9,0
6,8	2,5-3,0	110	8590	11,0-14,2
Сталь 30X13				
0,52	1,0-1,3	40	9510	0,7-0,9
1,3	1,3-1,5	55	9630	1,1-1,7
2,6	1,5-2,0	70	9840	5,8-6,3
4,6	2,0-2,5	80	10350	8,0-8,5
6,8	2,5-3,0	115	9270	11,9-14,0
Сталь 40X				
0,52	1,0-1,3	35	9430	0,7-1,1
1,3	1,3-1,5	50	9590	1,2-2,3
2,6	1,5-2,0	65	9830	5,5-6,8
4,6	2,0-2,5	75	10150	8,3-9,1
6,8	2,5-3,0	110	8900	11,5-13,9

Параметри шорсткості зразків сталі 12X18H10T при подальшій ЦЕІЛ з меншою енергією розряду і БУФО

Енергія розряду Wp, Дж	Шорсткість, Ra, мкм	Зменшена енергія розряду Wp, Дж	Продуктивність, см ² /хв	Шорсткість, Ra, мкм	Шорсткість, Ra, мкм після обробки БУФО
0,5	0,8-0,9	0,06	0,5-0,8	0,6-0,7	0,3-0,4
1,3	1,0-1,8	0,5	1,0-1,3	0,8-0,9	0,4-0,5
2,6	5,1-6,7	1,3	1,3-1,5	1,2-1,4	0,6-0,7
4,6	8,3-9,0	2,6	1,5-2,0	5,2-6,8	1,0-1,2

Wp = 0,04 Дж, а потім, на сформовану поверхню, наносять СТНС у вигляді пастоподібної суміші, до складу якої входять – 80% карбиду вольфраму, 10% нікелю і 10% вазеліну, і проводять електроіскрове легування графітовим електродом при енергії розряду в межах Wp = 0,5–4,6 Дж.

2. Застосування нового способу, дозволяє, формувати шари робочих поверхонь сталевих кілець торцевих

імпульсних ущільнень підвищеної твердості товщиною залежно від марки сталі й енергії розряду при ЦЕІЛ від 30 до 115 мкм, мікротвердістю до 10350 МПа і суцільністю 100%. Шорсткість сформованого покриття знаходиться в межах Ra = 0,7–14,2 мкм.

3. Шорсткість поверхневого шару можна знизити за рахунок подальшої ЦЕІЛ, але з меншою енергією розряду, а також БУФО до 0.3–0,4 мкм при Wp = 0,5 Дж.

Бібліографічні посилання:

1. Antoszewski B., Tarelnik V. (2014) Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 630. P. 301-307.
2. Yefimov O. V., Pylypenko M. M., Potanina T. V. та ін. (2017). Reaktory i paroheneratory enerhoblokov AES: skhemy, protsesy, materialy, konstruksii, modeli [Reactors and steam generators of NPP power units: schemes, processes, materials, designs, models] / za red. O.V. Yefimova. – Kharkiv : TOV «V spravi», 2017. – 420 s.
3. Blasiak, S., Zahorulko, A.V. (2016) A parametric and dynamic analysis of non-contacting gas face seals with modified surfaces. *Tribology International*. Vol. 94. P. 126-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.08.014>
4. Haponova O. P., Martsynkovskiy V. S., Tarelnyk N. V., Zubko V. M., & Dumanchuk M. Yu. (2022). A new method of assembling sliding bearings for centrifugal pumps operating in radiation exposure. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, (1(52)), 7–14. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1\(52\)-7-14](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2022-1(52)-7-14)
5. Tarelnyk V.B, Konoplianchenko Ye.V., Haponova O.P, & Tarelnyk N.V. (2022). Zabezpechennia zakhystu poverkhon tortsevykh impulsnykh ushchilnen turbomashyn shliakhom formuvannia znosostiikykh nanostruktur: monohrafiia [Ensuring the protection of the surfaces of end pulse seals of turbomachines by forming wear-resistant nanostructures: monograph] / za zah. red. V.B. Tarelnyk. Sumy: Universytetska knyha (in Ukrainian).
6. Martsynkovskiy V.S., Tarelnyk V.B., Bratushchak M.P. (2013) Patent Ukrainy na vynakhid № 101715, 23N 9/00. Sposib tsementatsii stalevykh detalei elektroeroziinym lehuванням [The method of cementation of steel parts by electroerosion alloying] / Opubl. 25.01.2013, biul. № 8 (in Ukrainian).
7. Martsynkovskyy V., Zahorulko A. , Gudkov S., Mischenko S. (2012) Analysis of buffer impulse seal. *Procedia Engineering*. Vol. 39. P. 43-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.006>
8. Tarelnik, V.B., Martsinkovskii, V.S. & Zhukov, A.N. (2017) Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse End Seals. Part 1. *Chem Petrol Eng* **53**, 114–120. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0305-y>
9. Tarelnik, V.B., Martsinkovskii, V.S. & Zhukov, A.N. (2017) Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 2*. *Chem Petrol Eng* **53**, 266–272
10. Tarelnik, V.B., Martsinkovskii, V.S. & Zhukov, A.N. (2017) Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3*. *Chem Petrol Eng* **53**, 385–389. <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0351-5>
11. Tarelnyk N. V. (2021). A new method for restoring worn surfaces of steel parts of pumping equipment, nuclear power plants. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, (2(51)), 32–39. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2\(51\)-32-39](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2021-2(51)-32-39).
12. Tarelnyk N.V. (2022) Properties of Surfaces Parts from X10CrNiTi18-10 Steel Operating in Conditions of Radiation Exposure Retailed by Electrospark Alloying. I. Features of Topography and Mechanical Properties of Coatings, *Metallifiz. Noveishie Tekhnol.*, 44, No. 8: 1037–1058 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/mfint.44.08.1037
13. Tarelnyk V.B., Martsynkovskiy V.S., Antoshevskiy B. (2006) Pidvyshchennia yakosti pidshypnykiv kovzannia [Improving the quality of sliding bearings] Vydavnytstvo «MakDen», Sumy, 160 (in Ukrainian).
14. Tarelnyk V.B., Martsynkovskiy V.S., Antoshevskiy B. (2012) Suchasni metody formoutvorennia poverkhon tertia detalei mashyn: monohrafiia [Modern methods of forming friction surfaces of machine parts: monograph]. Vydavnytstvo «MakDen», Sumy, 280 p. (in Ukrainian).
15. Zahorulko A. (2015) Theoretical and experimental investigations of face buffer impulse seals with discrete supplying. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 4, No 7(76). P. 45-52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.48298>

Tarelnyk V. B., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Gaponova O. P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy State University, Sumy, Ukraine

Vlasovets V. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv National University of Nature Management, Lviv, Ukraine

Tarelnyk N. V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Zubko V. M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Shulyak M. L., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Kyryk H. V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

A new method of improving the surface quality of steel rings of impulse end seals subjected to radiation irradiation

The article analyzes the currently existing literature and patent sources aimed at improving the quality parameters of the surface layers of friction pair parts. The purpose of the work is to improve the quality and wear resistance of the working surfaces of steel rings of end pulse seals, which can be used in conditions of radiation exposure, by forming quasi-multilayer coatings combining lubricating and mechanical properties on the working surfaces of the rings by the method of electrospark alloying.

The authors proposed a new way of improving the quality of the surfaces of steel rings of end pulse seals that work under conditions of radiation exposure. Research on the application of the new method was carried out for steel grades 12X18N10T, 30X13 and 40X. The method consists in applying a copper coating to the surface of the end pulse sealing ring by the method of electrospark alloying at a discharge energy $W_p = 0.04$ J, and then, on the formed surface, a special technological saturating medium is applied in the form of a paste-like mixture, the composition of which includes – 80% tungsten carbide, 10% nickel and 10% petroleum jelly, and carry out electrospark alloying with a graphite electrode at a discharge energy in the range of $W_p = 0.5–4.6$ J. Alloying with copper and a graphite electrode-tool was carried out on an installation with a manual vibrator "Elytron-22A". Grits were made from the experimental samples, which were examined on the optical microscope "Neofot-2". With the help of a microscope, the quality of the layer, its integrity, thickness and structure of the sublayer zones – the diffusion zone and the zone of thermal influence – were assessed. A durometric analysis was also carried out on the distribution of microhardness in the surface layer and along the depth of the cut from the surface.

The application of the new method allows forming layers of the working surfaces of steel rings of end pulse seals of increased hardness with a thickness depending on the grade of steel and the energy of the discharge during cementation by the method of electrospark alloying from 30 to 115 microns, with a microhardness of up to 10350 MPa and 100% integrity. The roughness of the formed coating is within $R_a = 0.7–14.2$ microns. Further reduction of roughness is possible due to further cementation by electrospark alloying, but with lower discharge energy, as well as non-abrasive ultrasonic finishing.

Key words: electrospark alloying, end pulse sealing, hardness, roughness, coating, electrode, material, surface.