

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Жуков Олексій Миколайович



УДК 621.9.048.4

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ
ТОРЦЕВИХ ІМПУЛЬСНИХ УЩІЛЬНЕНЬ ТУРБОМАШИН
НАНЕСЕННЯМ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Тарельник В'ячеслав Борисович,
Сумський національний аграрний університет,
завідувач кафедри технічного сервісу.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Степанов Михайло Сергійович,
Національний технічний університет «Харківський
політехнічний інститут», професор кафедри
технології машинобудування і металорізальних
верстатів;

доктор технічних наук, професор
Мироненко Євген Васильович, Донбаська
державна машинобудівна академія, м. Краматорськ,
декан факультету економіки і менеджменту.

Захист відбудеться «28» листопада 2019 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розіслано «25» жовтня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Н. В. Зубкова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Кількість експлуатованих турбомашин лише в Україні вимірюється багатьма сотнями тисяч агрегатів. Їх робота супроводжується протіканнями, що забруднюють довкілля, та втратою не лише мільйонів тонн рідин і газів, а й величезної кількості електроенергії. Тому проблеми герметизації устаткування безпосередньо пов'язані з екологічною безпекою та енерго- і ресурсозбереженням.

Однією з найбільш важливих і складних проблем сучасного машинобудування є проблема герметизації роторів відцентрових насосів і компресорів, у яких рідке або газоподібне перекачуване середовище перебуває під високим (до 50–100 МПа) тиском, при цьому необхідно запобігти його витіканню через неминучі зазори між обертовим валом і нерухомим корпусом.

У високооборотних насосах і компресорах високого тиску широко використовуються торцеві ущільнення безконтактного типу, які одержали назву торцевих імпульсних ущільнень (ТІУ).

За нормальної роботи ТІУ торцеві поверхні кілець контактують нетривалий час, лише в моменти пуску й зупинення машини. Наявність у торцевій парі гарантованого зазору розміром 0,003–0,004 мм приводить до того, що ущільнювальні поверхні кілець майже не зношуються. Незважаючи на відсутність контакту торців під час роботи, ущільнювальні кільця повністю виготовляються зі зносостійких матеріалів, таких як карбід вольфраму, карбід кремнію, різних видів графітів, вартість яких досягає сотень і тисяч доларів США, що є причиною високої вартості ущільнювальних вузлів у цілому.

Резервом зниження собівартості ТІУ можуть бути технологічні методи: електроерозійне легування (ЕЕЛ), конденсоване іонне бомбардування (КІБ), карбонітрація (КН) та ін., а також зміцнення поверхневих шарів іонним азотуванням (ІА), цементацією методом ЕЕЛ (ЦЕЕЛ) і т. ін., що дозволяють створювати на підкладках зі сталей і сплавів нові, більш дешеві, але не менш надійні композиційні матеріали.

Таким чином, створення надійних ущільнювальних вузлів, таких як ТІУ, що забезпечують герметичність упродовж тривалого часу в широкому діапазоні зміни швидкостей, температур і тисків, є актуальним науково-практичним завданням, що виникає під час проектування турбомашин.

Зв'язок теми з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана на кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету (СНАУ) згідно з планом держбюджетної НДР МОН України «Розробка енергозберігаючих технологій для забезпечення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей» (НДР № 0116U002756), а також госпдоговору № 1-9-1 із науково-виробничим підприємством «ТРІЗ ЛТД» на тему «Розробка технологій підвищення якості елементів торцевих імпульсних ущільнень комбінованими технологіями електроерозійного легування», де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є забезпечення працездатності ТІУ турбомашин шляхом виготовлення кілець із композиційних матеріалів, що поєднують у собі механічну міцність основи й захисні властивості покриттів, підвищують зносостійкість торцевих поверхонь кілець, герметичність і захист елементів вторинного ущільнення від фретинг-корозії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

1. Провести аналіз технології виготовлення й особливостей експлуатації ТІУ.

2. Розробити методику спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості робочих поверхонь кілець ТІУ залежно від умов роботи ущільнення й властивостей навколишнього середовища.

3. Удосконалити метод ЕЕЛ для здійснення процесів сульфидування й сульфоцементації енергоефективними й екологічно чистими методами, альтернативними хіміко-термічній обробці.

4. Розробити новий метод збільшення товщини шару підвищеної твердості шляхом формування на попередньо зміцнених методом ЦЕЕЛ торцевих поверхнях кілець ТІУ комбінованих електроерозійних покриттів (КЕП);

5. Провести дослідження якісних параметрів поверхневих шарів, сформованих методом ІА, КІБ та карбонітрацією.

6. Розробити метод зниження фретинг-процесу для контактуючих поверхонь ущільнювальних елементів ТІУ.

7. Розробити технологічні рекомендації виготовлення ТІУ залежно від умов роботи та перекачуваного середовища.

8. Упровадити результати досліджень у практику виготовлення ТІУ турбомашин.

Об'єкт дослідження – технологічний процес формування функціональних покриттів на поверхні елементів торцевих імпульсних ущільнень турбомашин.

Предмет дослідження – закономірності технологічного процесу формоутворення поверхні із заданими експлуатаційними властивостями, що забезпечують необхідну якість (довговічність, зносостійкість, працездатність) торцевих імпульсних ущільнень турбомашин.

Методи дослідження. Метод системного аналізу дозволив досліджувати конструкторсько-технологічні вимоги до елементів ТІУ, а також існуючі методи підвищення їх якості.

Метод синтезу дозволив елементи ТІУ розбити на групи, для яких підвищення їх якості досягається різними технологіями.

Під час розроблення системи спрямованого вибору технології виготовлення ТІУ використовували: теорію графів, математичну логіку, булеву алгебру, математичне моделювання, як метод оптимізації застосовували метод мінімальних перерізів.

Металографічний аналіз зразків проводили з метою оцінювання якості поверхневого шару, його суцільності, товщини й будови зон підшару.

Одночасно проводили дюрOMETричний аналіз на розподіл мікротвердості в поверхневому шарі й за глибиною шліфа від поверхні.

Рентгеноструктурний аналіз передбачав топографічний аналіз найбільш характерних ділянок і якісний рентгенівський мікроаналіз поверхневого шару для ідентифікації основних елементів у ньому.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблена система спрямованого вибору технології виготовлення ТІУ турбомашин, що дозволяє формувати робочі поверхні кілець, а також контактуючі поверхні вторинного ущільнення та захисної втулки із заданими експлуатаційними властивостями.

2. Набула подальшого розвитку технологія ЕЕЛ елементів ТІУ, які працюють в агресивних середовищах і виготовляються зі сталевих, нікелевих та бронзових сплавів, що дозволило формувати торцеві поверхні кілець і контактуючі поверхні вторинного ущільнення з необхідними експлуатаційними характеристиками.

3. Доведена доцільність нанесення на робочі поверхні сталевих кілець і кілець із нікелевих сплавів ТІУ багатошарових комбінованих електроерозійних покриттів, сформованих відповідно послідовностями ВК8 + Cu + ВК8 і ВК8 + ВК8 + Cu та цементації методом ЕЕЛ, що збільшує товщину шару підвищеної твердості.

4. Обґрунтована доцільність застосування технології сульфидування та сульфоцементації, здійснюваних у практиці зміцнення сталевих поверхонь хіміко-термічною обробкою, альтернативними, екологічно чистими та більш енергоефективними методами ЕЕЛ.

5. Дістав подальшого розвитку взаємозв'язок між технологічними методами формування покриттів, що забезпечують підвищення зносостійкості торцевих поверхонь кілець, та експлуатаційними характеристиками ТІУ.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційної роботи впроваджені:

– у ПАТ «СМНВО» (м. Суми) в технологічний процес виготовлення ТІУ відцентрових насосів із планованим річним економічним ефектом 367 000 грн;

– у ТОВ «ТРИЗ ЛТД» (м. Суми) у технологічний процес виготовлення ТІУ відцентрових насосів і компресорів із планованим річним економічним ефектом 83 000 грн;

– у навчальному процесі Сумського державного університету на кафедрі загальної механіки та динаміки машин при викладанні дисциплін «Гермотехніка», «Експериментальні методи дослідження в механіці» і «Трибомеханіка та основи контактної механіки», а також під час виконання магістерських робіт, курсових та дипломних проектів.

Особистий внесок здобувача. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист, одержані автором самостійно.

Автор на підприємстві ТОВ «ТРИЗ ЛТД» та ПАТ «СМНВО» упровадив науково обґрунтовані рекомендації підвищення якості елементів ТІУ, покладені

в основу розроблення нового технологічного процесу виготовлення ТІУ турбомашин.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та схвалені на Міжнародних наукових конференціях: «Технології XXI століття» (Суми, 2016, 2017), «Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного і компресорного устаткування (ГЕРВІКОН-17)» (Суми, 2017), «Матеріали, устаткування та ресурсозберігаючі технології» (Могильов, 2018); «Electromachinihg-18» (Bydgoszcz, Poland, 2018), «SEALCONF-2018. Uszczelnienia, Pompy, Armatura» (Kudowa Zdrój, Poland, 2018), «Design, simulation, manufacturing: the innovation exchange (DSMIE-2018)» (Sumy, 2018), «Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018)» (Zatoka, 2018).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладені в 37 наукових працях, з яких розділи у 2 монографіях (з них 1 у виданні, внесеному до міжнародної наукометричної бази Scopus), 9 статей у наукових виданнях (з них 3 у виданнях, внесених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science), 8 патентів на винахід, 10 патентів на корисну модель, 8 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях (з них 1 у виданні, внесеному до міжнародної наукометричної бази Scopus).

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків, викладена на 215 сторінках машинописного тексту. Основний текст становить 154 сторінки, містить 42 таблиці, 77 ілюстрацій. Список використаних джерел складається з 159 найменувань на 18 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтований вибір теми дисертації та наукових завдань, сформульовані мета й завдання дослідження, визначені наукова новизна й практичне значення одержаних результатів, а також наведена інформація про апробацію, структуру та обсяг роботи.

У першому розділі виконано аналіз проблем підвищення якості елементів ТІУ. Наведено загальні відомості про торцеві ущільнення, розглянуті їх конструктивні особливості, галузі застосування, матеріали і види руйнувань. Досліджено технологічні методи підвищення якості робочих поверхонь ТІУ. Все це дозволило сформулювати мету й завдання дисертації.

У другому розділі на основі теоретичного розгляду вимог до якості функціональних покриттів робочих поверхонь деталей роторних машин були розроблені система й критерії спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості робочих поверхонь кілець ТІУ шляхом аналізу і синтезу існуючих аналогів, досвіду промисловості та рекомендацій у вітчизняній і зарубіжній літературі.

Система спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості робочих поверхонь кілець ТІУ охоплює весь їх життєвий цикл, що включає матеріал кілець та їх елементів, технологію їх виготовлення, технологію

ремонту та ін. Всі вони розглядаються через спеціальні методи спрямованого вибору. До того ж враховується вплив обраних методів один на одного, який у кінцевому підсумку буде позначатися на якості виробу (рис. 1).

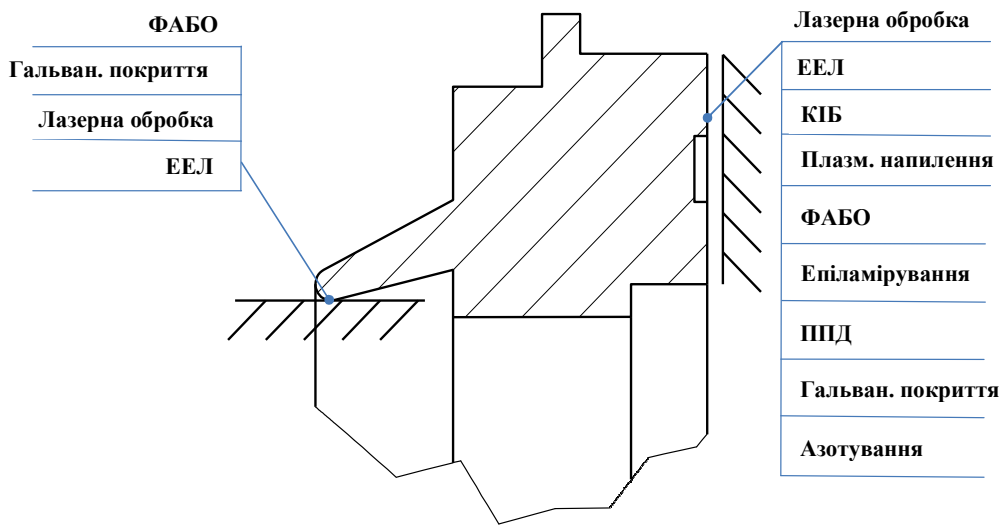


Рисунок 1 – Методи досягнення необхідної якості поверхонь кілець ТІУ

На етапах технологічної підготовки виробництва знання послідовності застосування методів підвищення якості поверхневих шарів деталей машин дозволяє планувати раціональну технологію одержання заданих властивостей. З огляду на особливості експлуатації ТІУ сформульовані вимоги до функціональних покриттів, які необхідно сформувати на їх робочих поверхнях (рис. 2). Варіанти реалізації технологій, що задовольняють рішення, подані у вигляді мережевої моделі (рис. 3).

Мережева модель подана орієнтованим графом, вузлами якого є етапи розв'язання задачі, а ребрами – трудомісткість їх розв'язання (технологічна собівартість). Необхідно визначити найкоротший шлях із вершини P_0 до вершини G_n^k . Для цього складають плани проходження шляху, що дозволяють розв'язати задачу різними методами. На першому етапі розбивають множину всіх шляхів, які ведуть із вершини P_0 до вершини G_n^k , на підмножини, що не перетинаються. Як оцінку ξ візьмемо довжину ребер графа, що є частиною шляху, до того ж для повного шляху завжди буде виконуватися умова $\geq \xi_i$, де i – номер конкретного етапу. З цих підмножин формують «плани» реалізації завдання залежно від умов експлуатації ТІУ.

Результат пошуку зводиться до розв'язання задачі цілочислового програмування комбінаторного виду, в якій розв'язок шукають на кінцевій множині можливих значень змінних. Як метод оптимізації використовували комбінаторний метод «гілок і меж».

У цьому разі цільовою функцією є технологічна собівартість, а технологічними обмеженнями – критерії якості виготовлення елементів ТІУ.

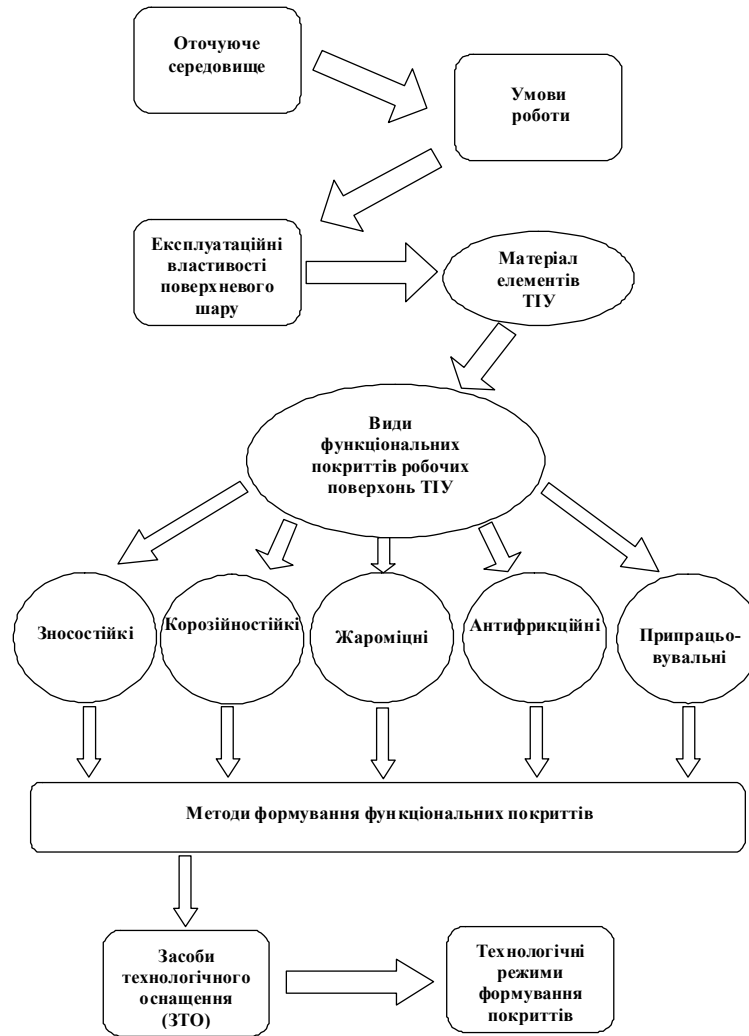


Рисунок 2 – Структура процедури синтезу раціональної технології формування функціональних покриттів на поверхнях ТІУ

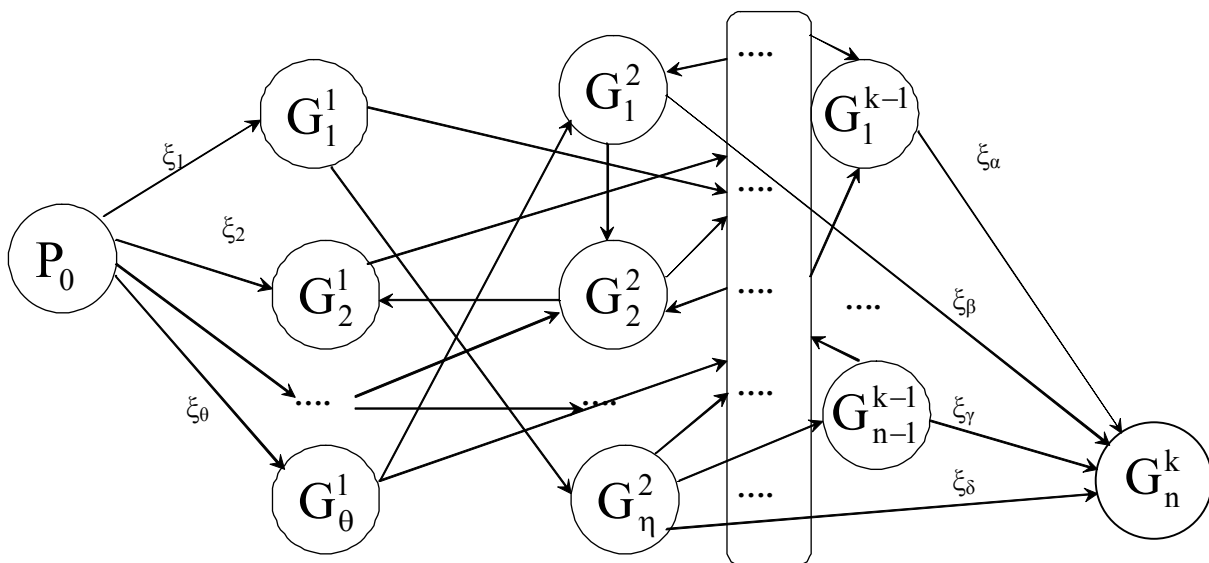


Рисунок 3 – Мережева модель пошуку варіанта розв'язання задачі

На технологічному рівні задача розв'язується відповідно до виразу (необхідна умова)

$$\exists_{\xi \in \theta} P_{0\xi} = \bigcap_{\psi=1}^k G^\psi \{P_i\} \vee \exists_{\phi=1}^{\phi} M_\phi \vee \exists_{\zeta=1}^{\chi} STO_\zeta \vee \exists_{\varepsilon=1}^{\tau} TP_\varepsilon,$$

де $\exists_{\xi \in \theta} P_{0\xi}$ – існуючий варіант розв'язання задачі; $\bigcap_{\psi=1}^k G^\psi \{P_i\}$ – сукупність планів розв'язання задачі; $\exists_{\phi=1}^{\phi} M_\phi$ – наявність методів розв'язання задачі в кожному плані; $\exists_{\zeta=1}^{\chi} STO_\zeta$ – наявність засобів технологічного оснащення, здатних реалізувати необхідні методи; $\exists_{\varepsilon=1}^{\tau} TP_\varepsilon$ – наявність необхідних технологічних режимів для засобів технологічного оснащення під кожний метод.

При цьому множина розв'язків на якісному рівні буде описуватися рівнянням (достатня умова)

$$\forall_{k \in X} P_{0k} = \{P_0 \mid \lambda_{P_0}^{\min} \leq \lambda_{P_0} \leq \lambda_{P_0}^{\max}\},$$

тобто для всіх існуючих варіантів розв'язання задачі закладені критерії, за якістю процесу повинні знаходитися в області допустимих значень

$$\lambda_{P_0}^{\min} \leq \lambda_{P_0} \leq \lambda_{P_0}^{\max}.$$

У цьому разі з технологічних собівартостей варіантів розв'язання задачі, що задовольняють необхідну та достатню умови, формується множина згідно з виразом

$$\{C_{P_0}\} = \bigcup_{k \in X} \left\{ C_{P_0}(k) \left[\begin{array}{l} \exists_{\xi \in \theta} P_{0\xi} = \bigcap_{\psi=1}^k G^\psi \{P_i\} \vee \exists_{\phi=1}^{\phi} M_\phi \vee \exists_{\zeta=1}^{\chi} STO_\zeta \vee \exists_{\varepsilon=1}^{\tau} TP_\varepsilon, \\ \forall_{k \in X} P_{0k} = \{P_0 \mid \lambda_{P_0}^{\min} \leq \lambda_{P_0} \leq \lambda_{P_0}^{\max}\} \end{array} \right. \right\}.$$

Оптимізаційну задачу за економічними критеріями (мінімум технологічною собівартістю) можна подати виразом

$$P_0^{opt} = \lim_{C_{mex} \rightarrow \min} P_0 \mid C_{mex} \in \{C_{P_0}\}.$$

Результатом спрямованого вибору технології, що забезпечує необхідні експлуатаційні властивості робочих поверхонь торцевих імпульсних ущільнень, буде мінімізований за критерієм собівартості технологічний процес формування функціональних покриттів.

Третій розділ присвячений методиці експериментальних досліджень впливу різних технологій на якість поверхонь елементів ТІУ.

ЕЕЛ виконували на установках «Елітрон-52А» та «ЕІЛ-9» в автоматизованому режимі (рис. 4).

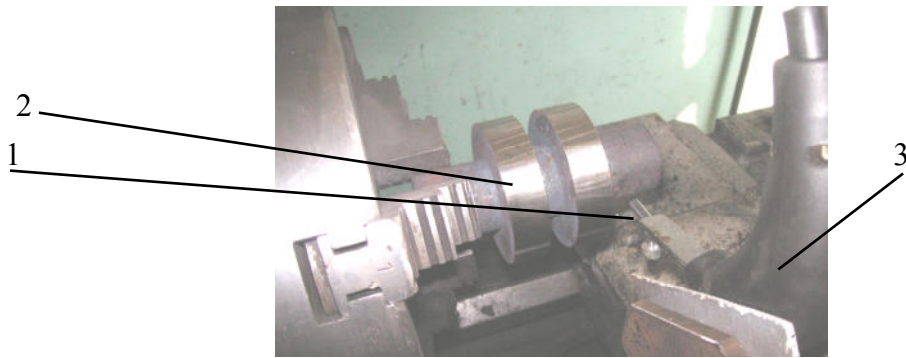


Рисунок 4 – Схема ЕЕЛ круглого зразка: 1 – електрод;
2 – зразок; 3 – вібратор

Для досліджень застосовували круглі зразки, на яких проводили ЦЕЕЛ, ЕЕЛ і безабразивне ультразвукове фінішне оброблення (БУФО). Як катод (деталі) використовували сталь 40Х, 38Х2МЮА, Р6М5, 12Х18Н10Т, нікелевий сплав ХН58МБЮД та бронзу БрБ2, а як анод (легувальний електрод) – графіт (С), твердий сплав ВК8, хром, нікель, мідь, срібло, олово, індій.

Для металографічних досліджень виготовляли зразки розміром 15x15x8 мм, а для трибологічних – у вигляді кілець розміром 42x25x6 мм. Металографічні дослідження проводили на оптичному мікроскопі «Неофот-2», де оцінювали якість шару, його суцільність, товщину й будову зон підшару – дифузійної зони та зони термічного впливу. Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомері ПМТ-3.

Для дослідження розподілу елементів за глибиною шару використовували електронний мікроскоп, оснащений рентгеноспектральним мікроаналізатором ISIS 300 Oxford instruments. На всіх етапах оброблення вимірювали шорсткість поверхні на приладі профілографі – профілометрі мод. 201 заводу «Калібр».

Для оброблення зразків зі сталі 40Х і 38Х2МЮА методом ІА застосовували електропіч іонну ковпакову вакуумну моделі «НГВ-6,6/6-ІІ». Зразки обробляли впродовж 12 годин за температури 540–560 °С. Покриття з нітриду титану наносили методом КІБ на установці ННВ-66-ІІ за температур (520 ± 20) і (800 ± 20) °С відповідно для сталей Р6М5 та 12Х18Н10Т. Карбонітрації підлягали зразки зі сталі 38Х2МЮА.

Для експрес-оцінювання величини лінійного зношування зразків із покриттям була виготовлена установка на базі свердлильного верстата моделі 2М-112. Контрзразком був порожній циліндр (матеріал 4К-20 або вуглеграфіт), закріплений у шпинделі верстата.

Лінійне зношування визначали методом штучних баз за різницею глибин відбитків, нанесених на приладі Віккерса й вимірюваних до та після проведення випробувань. Час випробування зразків на один кілометр шляху при 2 500 об/хв шпинделя становив 16 хв. Випробування проводили впродовж 320 хв за швидкості ковзання 1 м/с і питомого тиску 4,0 МПа.

Трибологічні властивості сформованих поверхневих шарів кілець (рис. 5) визначали на тестері Т-01М за схемою кулька – диск.

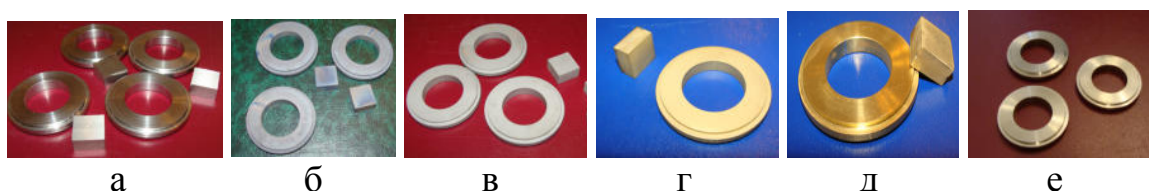


Рисунок 5 – Прямокутні зразки й кільця зі сталі 38X2МЮА після ТО (а), ІА (б), КН (в); сталі 12X18Н10Т і Р6М5 після оброблення КІБ відповідно (г) і (д); сплаву ХН58МБЮД після ТО, ЦЕЕЛ і КЕП (е)

У процесі досліджень використовувалися наступні робочі параметри тестера: швидкість обертання $\omega = 360$ об/хв; навантаження T , що змінювалося після кожних 60 м і становило 0,5 кгс, 1,0 кгс, 2,0 кгс і 4,0 кгс, а для кільця зі сталі Р6М5 – додаткове, що становило 6,0 кгс.

Як припрацьовувальні КЕП поверхневих шарів кілець зі сталей 12X18H10T і Р6М5 використовували КЕП складу Pb + Cu і Pb + Ag + Cu + Ag. Крім того, для кільця зі сталі 12X18H10T проводили сульфидування поверхні.

Як зразки на фретингостійкість використовували гнучкі елементи зі сталі 12X18H9, на які методом ЕЕЛ наносили покриття з нікелю, міді, срібла й індію, а потім збирали в пакет. Випробування проводили на базі 1×10^6 циклів на спеціальному стенді. Фретингостійкість оцінювали за зміною шорсткості поверхні за трьома параметрами: Ra, Rz і Rmax. База вимірювань становила 4 мм.

Для дослідження впливу різних методів зміцнення на механічні властивості виготовляли зразки відповідно до ГОСТ 7855-84. На кожну серію виготовляли по 3 зразки й випробовували на розрив.

Натурні випробування газових торцевих імпульсних ущільнень (ГТІУ) проводили на спеціальному стенді (рис. 6), до складу якого входять: випробувальний блок 1, блок керування 2, система трубного обв'язування із запірними арматурами 3.

Для нормального функціонування системи підготовки газу використовували газ, відібраний із лінії нагнітання компресора (вуглекислий газ). Вентиліями 4 і 5 (рис. 6) задавали тиски, які імітують ущільнювальний тиск і буферний тиск компресора, що працює.

Очищений газ після вентиля 4 під тиском, що контролюється за допомогою манометра 6, надходить у торцеві пари випробувальних ущільнень. У кінцеві ущільнення випробувальних вузлів під необхідним тиском, що контролюється манометром 7, надходить бар'єрний газ (повітря), витрата якого вимірюється за допомогою ротаметра 8. Сумарна витрата витоків бар'єрного й буферного газу вимірюється ротаметром 9 і передається на свічку. Контроль температури буферного газу, що подається на турбопривод і у випробувальні ущільнення, здійснюється за допомогою датчиків температури 10 і 11 відповідно. Температура газу витоків фіксується датчиком 12 (рис. 6).

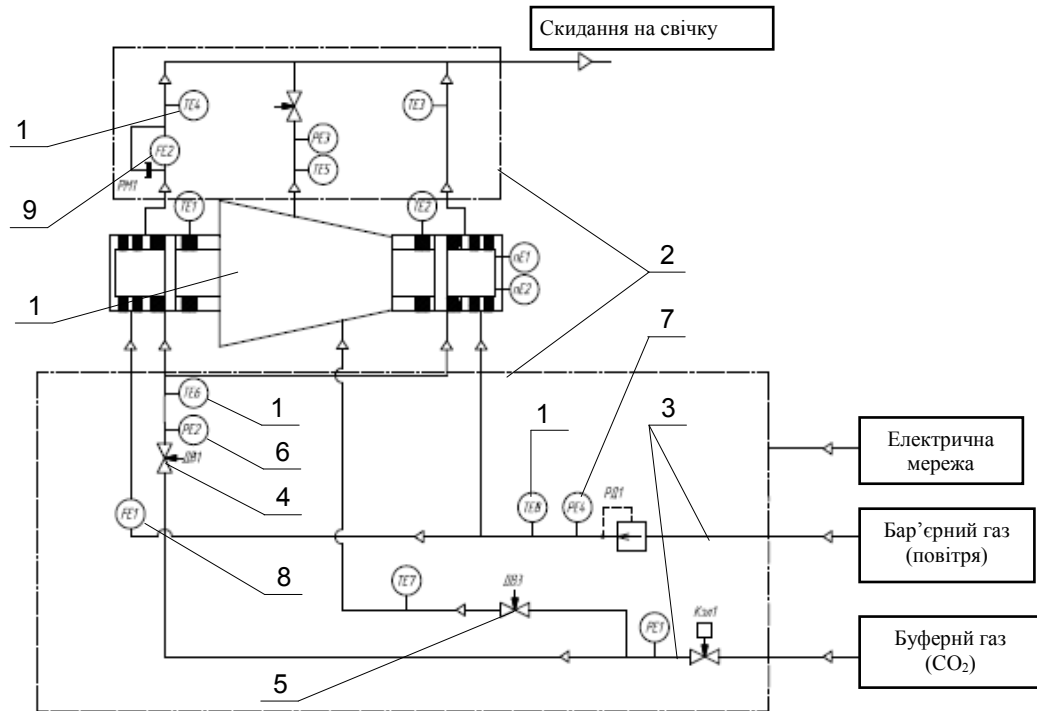


Рисунок 6 – Принципова схема випробувального стенда ГТІУ

Таким чином, на базі проведених експериментальних досліджень, були розроблені технологічні рекомендації по отриманню функціональних покриттів, сформованих різними методами.

У четвертому розділі наведені результати експериментальних досліджень підвищення якості поверхні кілець ТІУ технологіями ЕЕЛ, ІА, КІБ і КН.

Аналізуючи дані проведених металографічних досліджень, необхідно зазначити, що для зміцнення сталевих деталей методом ЕЕЛ найкращим є КЕП складу ВК8 + Cu + ВК8, нікелевих сплавів – ВК8 + ВК8 + Cu і ВК8 + ВК8 + Ni, а для бронзи – хром. До того ж товщину зони підвищеної твердості можна збільшити за рахунок попередньої ЦЕЕЛ.

Для вирішення проблеми забезпечення герметичності й захисту контактуючих поверхонь елементів вторинного ущільнення від фретинг-корозії запропонований спосіб, за якого перед ЦЕЕЛ на одну контактуючу поверхню зі сплаву ХН58МБЮД наносять електроерозійне покриття з міді або нікелю, а на іншу – з міді. Відповідно до іншого варіанта способу перед ЦЕЕЛ на одну з контактуючих поверхонь із бронзи БрБ2 наносять покриття з міді. З метою підвищення герметичності й міцності з'єднань елементів вторинного ущільнення з натягом як покриття рекомендують використовувати індій, що має кращі експлуатаційні характеристики в умовах криогенних температур. Ураховуючи, що контактуючою поверхнею «вуса» є сфера з радіусом ~ 1 мм, нанесення на неї покриття з індію запропоновано проводити зануренням у його розплав.

М'які антифрикційні метали (мідь, срібло й нікель) технологічно наносити на контактуючу поверхню втулки методом ЕЕЛ, де наступним БУФО можна знизити нерівномірність і шорсткість покриття.

Для запобігання схоплюванню поверхонь кілець ТГУ запропонований спосіб сульфоцементатації, який передбачає процес сульфидування, здійснюваний шляхом ЦЕЕЛ поверхні сталевих деталей, покритих консистентною речовиною, що утримує сірку.

При зміцненні сталей 40X і 38X2МЮА методом ІА глибина зміцненого шару досягає 500–550 мкм, а мікротвердість – відповідно 7 000 і 9 700 МПа. Після ІА й нанесення на сталь 38X2МЮА КЕП ВК8 → Сu → ВК8 мікротвердість досягає 10 000 МПа.

Попередня й наступна ЦЕЕЛ поверхневого шару, зміцненого методом ІА, збільшує мікротвердість сталі 40X відповідно до 8 250 і 11 190 МПа, але глибина зміцненого шару в цьому разі знижується до 250–270 мкм.

Нітридтитанові покриття наносили на зразки зі сталі Р6М5 і 12Х18Н10Т на установці ННВ-6,6-ІІ. Товщина покриття становить ~2–3 мкм. Мікротвердість основи відповідно для сталі Р6М5 і 12Х18Н10Т становить ~6,5–7,0 і ~2,3–2,7 ГПа, а покриття – ~17,5–18,3 і 12,1–16,4 ГПа

Суть КН полягає в зміцненні поверхневого шару виробів зі сталі методом дифузійного насичення азотом і вуглецем у розплаві солей за температури 560–580 °С.

Мікроструктурний аналіз (рис. 7, а) покриттів на сталі 38Х2МЮА після карбонітрації засвідчив, що поверхневий шар складається з двох зон: приповерхневого шару товщиною до 15 мкм, який є залежно від складу сталі карбонітридом або оксикарбонітридом, та дифузійної зони, що складається із твердого розчину вуглецю й азоту в залізі із включеннями карбонітридних фаз.

Як показали дюрOMETричні дослідження (рис. 7, в), карбонітридна зона характеризується підвищеною мікротвердістю (більше ніж $\geq 10\,000$ МПа), мікротвердість дифузійної зони плавно знижується від поверхні до основи. Загальна товщина зони підвищеної твердості досягає 0,5 мм.

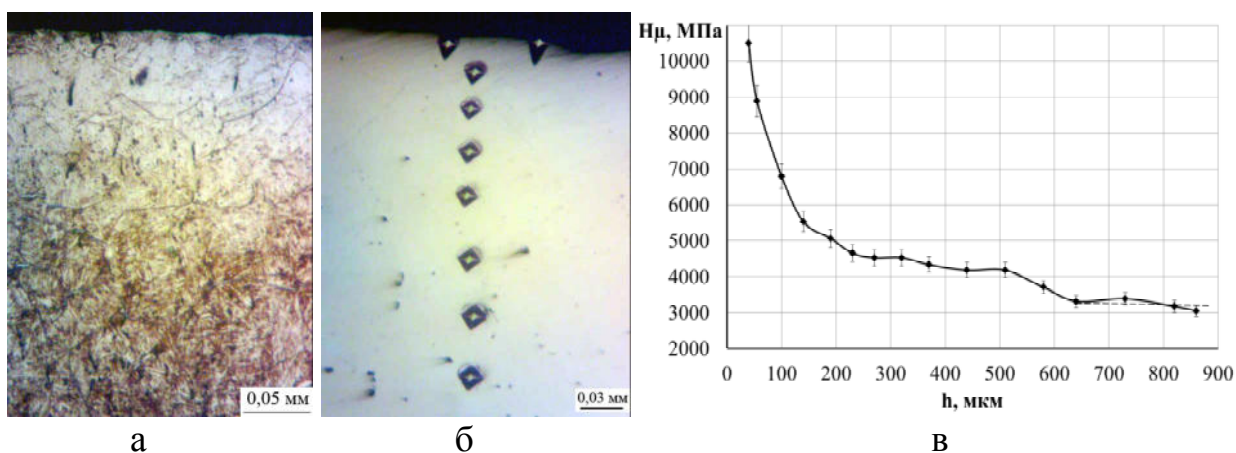


Рисунок 7 – Результати досліджень сталі 38Х2МЮА після КН:
а – мікроструктура травленого (а) і нетравленого (б) шліфів із відбитками;
в – розподіл мікротвердості за глибиною шару

Найбільшу мікротвердість поверхневого шару (18 300 МПа) мають покриття, сформовані методом КІБ на підкладках зі сталі Р6М5. Найтовщі (до 500 мкм) поверхневі шари формуються методом ІА й КН.

У п'ятому розділі наведені результати дослідження впливу способів підвищення якості елементів ТІУ на механічні властивості. Установлено, що ЕЕЛ знижує межі текучості й міцності зразків, але збільшує їх відносні подовження й звуження. Методи ЦЕЕЛ, БУФО, ІА, КІБ і КН збільшують межі текучості та міцності зразків і знижують їх відносні подовження й звуження.

Результати експрес-оцінювання величини лінійного зношування зразків, зміцнених різними способами, в парі з інденторами з фторопласта 4К-20 і вуглеграфіту після 320 хв випробувань подані в табл. 1. Необхідно зазначити, що зношування з індентором із вуглеграфіту вище, ніж із фторопласту 4К-20.

У табл. 2 наведені результати трибологічних випробувань усіх серій зразків. Для кожної серії визначали силу тертя й коефіцієнт тертя залежно від прикладеного навантаження. Установлено, що для кілець, виготовлених зі сталей 12Х18Н10Т і Р6М6, як без покриття, так і зміцнених методом КІБ, характерне абразивне зношування, а для інших – механоокисне. У разі застосування припрацювальних покриттів абразивний вид зношування змінюється на механоокисний (табл. 3).

Таблиця 1 – Лінійне зношування зразків

Матеріал	Вид зміцнення	Лінійне зношування, мкм	
		фторопласт 4К-20	вуглеграфіт
38Х2МЮА	ТО	4,1	5,2
38Х2МЮА	ТО + ІА	2,5	3,1
38Х2МЮА	ТЕ + КН	2,3	2,7
38Х2МЮА	ТО + ЦЕЕЛ + ВК8 + Cu + ВК8 + БУФО	1,4	2,5
Р6М5	ТО	1,6	2,2
Р6М5	ТЕ + КІБ	1,1	1,7
Р6М5	ТО + КЕП (Pb + Cu)	0,6	0,9
Р6М5	Ti + КЕП (Pb + Cu)	0,5	0,8
12Х18Н10Т	ТО	3,7	4,6
12Х18Н10Т	КІБ	0,9	1,5
12Х18Н10Т	КЕП (Pb + Cu)	1,2	2,1
12Х18Н10Т	КЕП (Pb + Ag + Cu + Ag)	1,1	1,9
12Х18Н10Т	КІБ + КЕП (Pb + Cu)	1,0	1,8
БрБ2	ТО	0,8	1,5
БрБ2	ТО + КЕП (Cu + Ag + Cu)	0,7	1,3
БрБ2	ТО + КЕП (Pb + Cu)	0,4	1,0
БрБ2	ТО + ЦЕЕЛ + ЕЕЛСr + ЦЕЕЛ	0,9	1,4
ХН58МБЮД	ТО	4,8	5,9
ХН58МБЮД	ТО + ЦЕЕЛ + ВК8 + ВК8 + Cu + БУФО	1,5	2,6

Таблиця 2 – Результати трибологічних випробувань зразків

№ пор.	Матеріал кільця	Вид зміцнення	Товщина зміцненого шару, мкм	Твердість зміцненого шару	Навантаження, Н	Сила тертя, Н	Коефіцієнт тертя μ
1	38Х2МЮА	ТО	–	302–341 НВ	4,91	0,56	0,114
					9,81	5,47	0,558
					19,62	6,68	0,340
					39,24	8,46	0,216
2	38Х2МЮА	ТО + ІА	500	9 950 МПа	4,91	0,59	0,120
					9,81	5,44	0,554
					19,62	6,40	0,326
					39,24	8,09	0,206
3	38Х2МЮА	ТО + КН	500	10 000 МПа	4,91	0,55	0,112
					9,81	5,55	0,566
					19,62	6,41	0,327
					39,24	8,09	0,206
4	38Х2МЮА	ТО + ЦЕЕЛ + КЕП (ВК8 + Cu + ВК8)	30	9 700 МПа	4,91	0,35	0,071
					9,81	1,37	0,140
					19,62	2,15	0,110
					39,24	4,37	0,111
5	Р6М5	ТО	–	61-63 HRC	4,91	0,63	0,128
					9,81	5,55	0,566
					19,62	6,79	0,346
					39,24	8,82	0,225
6	Р6М5	ТЕ + КІБ	3, 0–3,5	17,5–18–18,3 ГПа	4,91	0,65	0,132
					9,81	5,54	0,565
					19,62	6,45	0,329
					39,24	8,53	0,217
7	12Х18Н10Т	ТО	–	140–170 НВ	4,91	2,18	0,443
					9,81	8,74	0,891
					19,62	14,16	0,722
					39,24	21,87	0,557
8	12Х18Н10Т	ТЕ + КІБ	2, 0–2,5	12,1–16–16,4 ГПа	4,91	2,57	0,522
					9,81	8,75	0,892
					19,62	11,91	0,607
					39,24	22,10	0,563
9	ХН58МБЮД	ТО	–	400 НВ	4,91	0,68	0,138
					9,81	5,7	0,581
					19,62	6,68	0,340
					39,24	8,66	0,221
10	ХН58МБЮД	ТЕ + ЦЕЕЛ + КЕП (ВК8 + ВК8 + Cu)	40	9 850 МПа	4,91	0,45	0,092
					9,81	1,57	0,160
					19,62	2,35	0,120
					39,24	4,63	0,118

Таблиця 3 – Результати трибологічних досліджень зразків із припрацювальними покриттями

№ пор.	Матеріал кільця	Вид зміцнення	Товщина зміцненого шару, мкм	Твердість зміцненого шару	Навантаження, Н	Сила тертя Н	Коефіцієнт тертя μ
1	12X18H10T	ТО + (Pb + Cu)	10	600–700 МПа	4,91	0,38	0,078
					9,81	0,93	0,095
					19,62	1,91	0,098
					39,24	4,30	0,109
2	12X18H10T	ТО + (Pb + Ag + Cu + Ag)	15	600–700 МПа	4,91	0,03	0,007
					9,81	1,46	0,149
					19,62	3,83	0,195
					39,24	8,56	0,218
3	12X18H10T	ТО + Ti + (Pb + Cu)	10	600–700 МПа	4,91	0,81	0,164
					9,81	2,13	0,217
					19,62	6,66	0,340
					39,24	14,87	0,379
4	P6M5	ТЕ + (Pb + Cu)	10	600–700 МПа	4,91	0,38	0,077
					9,81	1,17	0,119
					19,62	2,06	0,105
					39,24	4,33	0,110
5	P6M5	ТО + Ti + (Pb + Cu)	10	600–700 МПа	4,91	0,45	0,092
					9,81	1,08	0,110
					19,62	2,90	0,148
					39,24	5,49	0,140
6*	12X18H10T	ТО + (Pb + Cu)	10	600–700 МПа	4,91	0,24	0,05
					9,81	1,09	0,11
					19,62	4,17	0,21
					39,24	5,73	0,15

*Зразок у процесі нанесення КЕП Pb + Cu підлягав сульфидуванню

У результаті проведення іспитів гнучких елементів на стенді встановлено, що кращим покриттям із м'яких антифрикційних матеріалів для зниження фретинг-корозії є індій, який зменшує зношування після $1 \cdot 10^6$ циклів згину в 2,91 рази менше, ніж без покриття.

Процедура відпрацювання системи спрямованого вибору інтегрованої технології формування функціонального покриття (рис. 8) наведена на прикладі кільця торцевого імпульсного ущільнення, виготовленого з матеріалу сталь 12X18H10T.

Згідно з розробленою методикою спрямованого вибору, виходячи з експлуатаційних властивостей функціональних покриттів і показників якості поверхні, таких як: шорсткість, мікротвердість, зносостійкість, мікроструктура поверхневого шару, які необхідно забезпечити, відбувається спрямований вибір технологічних методів, якими можна вирішити поставлене завдання. До того ж критерієм вибору є мінімальна технологічна собівартість реалізації інтегрованої технології в умовах конкретного підприємства.

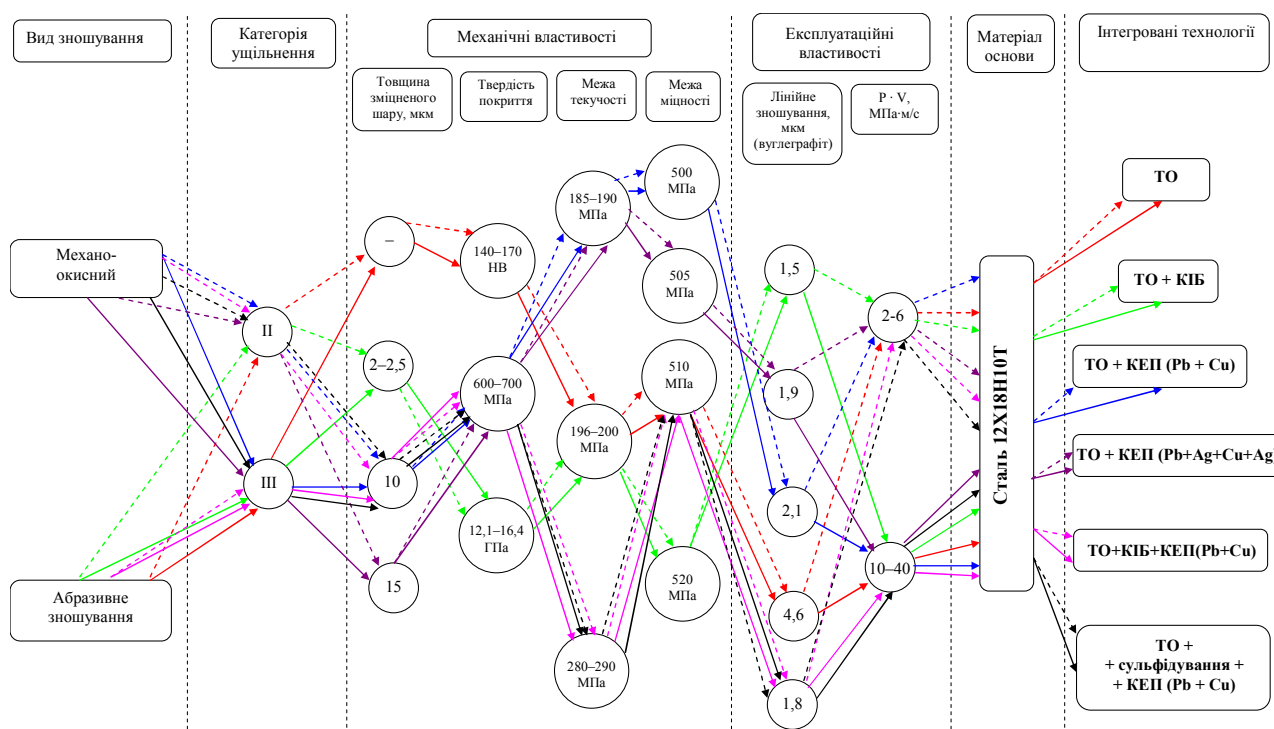


Рисунок 8 – Схема спрямованого вибору інтегрованої технології на прикладі ТІУ зі сталі 12X18H10T

Практична корисність розробленої методики представлена технологічними рекомендаціями, наведеними у зведеній таблиці. Ця таблиця містить механічні й триботехнічні властивості функціонального покриття, а також інформацію про інтегровану технологію, що дозволяє забезпечити ці властивості.

Проведені попередні випробування ГТІУ на експериментальному стенді показали, що впродовж усього періоду досліджень забезпечується достатня герметичність ущільнювального вузла (витік становить 37 нл/хв), а температура в парі тертя (вуглеграфіт АГ 1500 – сталь 30X13) не перевищує 45 °С.

У додатках наведені документи про охорону прав на винаходи та корисні моделі за темою дисертації, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також подано список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Аналіз технології виготовлення та експлуатації ТІУ засвідчив, що резервом зниження собівартості та підвищення якості ТІУ можуть бути технологічні методи ББЛ, ЦББЛ, ІА, КІБ, КН та ін., що дозволяють створювати на підкладках зі сталей і сплавів композиційні матеріали, що поєднують захисні властивості покриттів із механічною міцністю основи.

2. На підставі теоретичних досліджень розроблена формалізована методика визначення раціонального варіанта технології виготовлення елементів

ТІУ, яка відрізняється тим, що кожному варіанту відповідає план реалізації можливих комбінацій рішень, мінімізований за трудомісткістю виконання. Розроблено модель синтезу інтегрованої технології, що враховує умови експлуатації ТІУ, фізичні принципи роботи устаткування та дозволяє відповідно до технологічних обмежень формувати функціональні покриття на робочих поверхнях елементів ТІУ. Проведені дослідження були передумовами для створення системи спрямованого вибору технології виготовлення ТІУ турбомашин, що дозволяє формувати робочі поверхні кілець ТІУ, а також контактуючої поверхні вторинного ущільнення й захисної втулки із заданими експлуатаційними властивостями.

3. Набув подальшого розвитку метод ЕЕЛ для здійснення процесів сульфидування та сульфоцементації, застосовуваних для запобігання схоплюванню й зміцненню контактуючих поверхонь ТІУ.

4. Визначено, що для зміцнення сталевих кілець ТІУ методом ЕЕЛ найкращим є КЕП складу $ВК8 + Cu + ВК8$, нікелевих сплавів – $ВК8 + ВК8 + Cu$ і $ВК8 + ВК8 + Ni$, а для берилієвої бронзи – хром. Водночас товщину зони підвищеної твердості можна збільшити за рахунок попередньої ЦЕЕЛ.

5. Установлено, що при зміцненні методом ІА, сталі 40Х і 38Х2МЮА товщина зміцненого шару досягає 250 і 500 мкм, а мікротвердість – 8 820 і 9 950 МПа відповідно. Найбільша товщина 250 мкм і мікротвердість зміцненого шару 11 190 МПа, при ІА сталі 40Х належать комбінованому способу зміцнення ІА + ЦЕЕЛ. При зміцненні зразків зі сталі 12Х18Н10Т і Р6М5 методом КІБ товщина покриттів становить $\sim 2\text{--}3$ мкм, мікротвердість основи відповідно для сталі Р6М5 і 12Х18Н10Т становить $\sim 6,8$ і $\sim 2,5$ ГПа, а покриття – ~ 18 і 14,5 ГПа. При зміцненні зразків зі сталі 38Х2МЮА методом КН формуються поверхневі шари товщиною до 0,5 мм і мікротвердістю $\geq 10\ 000$ МПа.

6. Запропоновано новий спосіб зниження фретинг-корозії контактуючих поверхонь вторинного ущільнення, виготовлених зі сплаву ХН58МБЮД або БрБ2, за якого перед ЦЕЕЛ на одну поверхню сплаву ХН58МБЮД методом ЕЕЛ наносять покриття з міді або нікелю, а на іншу – з міді. Відповідно до іншого способу перед ЦЕЕЛ на одну з контактуючих поверхонь із бронзи БрБ2 наносять покриття з міді.

7. Розроблено технологічні рекомендації виготовлення ТІУ, адаптовані до умов їх роботи. Аналіз поданих даних дозволяє в першому наближенні вибрати найбільш кращий матеріал для їх виготовлення, а також метод підвищення якості їх елементів. Використання в парах тертя припрацювальних КЕП сприяє зниженню сили й коефіцієнта тертя. Дослідження показало, що кільця із застосованих матеріалів мають низький, середній і високий параметри РV і їх можна застосовувати в I, II і III категоріях ущільнень.

8. Очікуваний економічний ефект від упровадження основних положень роботи у виробництво становитиме 450 тис. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Zhukov A. Problems of improving the quality of the surface layers of the mechanical seal rings / V. Tarellyk, B. Antoszewski, A. Belous, A. Zhukov // Selected problems of surface engineering and tribology : monograph / edited by B. Antoszewski, V. Tarellyk. – Kielce : Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2016. – P. 99–110.

Здобувачем розроблена система спрямованого вибору раціонального варіанту технології формування поверхневого шару

2. Zhukov A. Comparative Tribological Tests for Face Impulse Seals Sliding Surfaces Formed by Various Methods / V. Tarellyk, I. Konoplianchenko, V. Martsynkovskyy, A. Zhukov, P. Kurp // In: Ivanov V. et al. (eds.) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE-2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2019. – P. 382–391. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_40 (Scopus)

Здобувачем представлені результати проведених досліджень сили тертя зразків зі сталі 12X18H10T (X6CrNiTi18-10KT)

3. Жуков А. Н. Повышение надежности импульсных торцевых уплотнений / В. Б. Тарельник, Е. В. Коноплянченко, А. Н. Жуков, А. В. Белоус, Т. П. Волошко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2016. – № 5. – С. 43–54.

Здобувачем запропонований спосіб формування квазібагатошарових комбінованих покриттів

4. Жуков А. Н. Направленный выбор технологии и установление критериев оценки наиболее рационального метода упрочнения колец торцевых уплотнений / А. Н. Жуков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2017. – № 1 (47). – С. 15–20.

5. Жуков А. Н. Повышение качества термообработанных стальных деталей интегрированными технологиями ионного азотирования и электроэрозионного легирования / А. Н. Жуков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2017. – № 2 (48). – С. 61–65.

6. Zhukov A. N. Strengthening of face impulse seals rings by electroerosive alloying method / A. N. Zhukov // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2018. – № 12. – С. 15–25.

7. Жуков А. Н. Повышение надежности и эффективности торцового уплотнения для компрессора углекислого газа / О. В. Данилейко, С. В. Ладенко, А. Н. Жуков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282). – С. 43–49.

Здобувачем здійснений аналіз мікротвердості поверхневого шару зразків, зміцнених різними способами

8. Жуков А. Н. Формализация поиска рационального варианта технологии формирования функциональных покрытий на рабочих поверхностях торцевых импульсных уплотнений / А. Н. Жуков // Вісник

Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – № 19 (1344). – С. 11–15.

9. Zhukov A. N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse End Seals. Part 1 [Electronic resource] / V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, A. N. Zhukov // Chemical Petroleum Engineering. – 2017. – Vol. 53, Issue 1–2. – P. 114–120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0305-y> (Scopus & Web of Science)

Здобувачем проведений аналіз впливу матеріалів легування та енергетичних параметрів на якість покриття

10. Zhukov A. N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 2 [Electronic resource] / V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, A. N. Zhukov // Chemical Petroleum Engineering. – 2017, July. – Vol. 53, Issue 3–4. – P. 266–272. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0333-7> (Scopus & Web of Science)

Здобувачем проведені випробування мікротвердості по глибині та аналіз мікроструктури поверхневого шару покриття

11. Zhukov A. N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3 [Electronic resource] / V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, A. N. Zhukov // Chemical Petroleum Engineering. – 2017, September. – Vol. 53, Issue 5–6. – P. 385–389. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0351-5> (Scopus & Web of Science)

Здобувачем проведені випробування лінійного зносу та фретингостійкості зразків

12. Пат. на корисну модель 114075 Україна, МПК F16I 15/34. Вузол торцевого імпульсного ущільнення/ В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. М. Жуков, Чеслав Кундера; № u201609478; заявл. 13.09.16; опубл. 27.02.17, Бюл. № 4. – 4 с.

Здобувачем запропоновано конструкцію полімерної проміжної втулки торцевого імпульсного ущільнення

13. Пат. на корисну модель 115059 Україна, МПК B23H 1/00, C23C 8/60, C22C 37/00, C22C 37/06, C22C 37/08. Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. М. Жуков, П. В. Косенко, О. П. Гапонова; № u201611901; заявл. 24.11.16; опубл. 27.03.17, Бюл. № 6. – 10с.

Здобувачем здійснено аналіз складу покриття в характерних точка по досліджувальній поверхні

14. Пат. 2648425 Российская Федерация, МПК B23H 9/00. Способ повышения износостойкости торцевых поверхностей колец из жаропрочных сплавов импульсного торцевого уплотнения (ИТУ), работающего в криогенных средах (варианты) /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский, А. В. Белоус, А. Н. Жуков; № 2016106530; заявл. 24.02.16; опубл. 26.03.18, Бюл. № 9. – 6с.

Здобувачем подано результати металографічних досліджень КЕП нікелевого сплаву ХН58МБЮД

15. Пат. 2648434 Российская Федерация, МПК В23Н 9/00. Способ обработки контактирующих уплотнительных поверхностей элементов из жаропрочных сплавов импульсного торцового уплотнения (ИТУ), работающего в криогенных средах (варианты) /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский, А. В. Белоус, А. Н. Жуков; № 2016116699; заявл. 27.04.16; опубл. 26.03.18, Бюл. № 9. – 6с.

Здобувачем здійснено аналіз мікрошліфів після легування графітовим електродом

16. Пат. полезной модели 170279 Российская Федерация, МПК F16I 15/34. Узел торцового импульсного уплотнения/ В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский, А. В. Белоус, А. Н. Жуков, Чеслав Кундера.; №2016138108; заявл. 23.09.16; опубл. 19.04.17, Бюл. № 11. – 6с.

Здобувачем запропоновано конструкцію полімерної проміжної втулки із фторопласту Ф-4

17. Пат. 114671 Україна, МПК F16J 15/16, F16J 15/34, В23Н 9/00, С23С 28/00.Спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець імпульсних торцевих ущільнень /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, А. Н. Жуков; № а201512459; заявл. 16.12.15; опубл. 10.07.17, Бюл. № 13. – 11с.

Здобувачем запропоновано послідовність формування покриття

18. Пат. 117528 Україна, МПК В23Н 1/04, С23С 8/60. Спосіб сульфидування поверхні сталевих і чавунних деталей методом електроерозійного легування /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. М. Жуков, П. В. Косенко, О. П. Гапонова; № а201611900; заявл. 24.11.16; опубл. 10.08.18, Бюл. № 15. – 10с.

Здобувачем здійснено аналіз складу покриття

19. Пат. 2631439 Российская Федерация, МПК В23Н 9/00. Способ повышения износостойкости рабочих поверхностей стальных колец импульсных торцевых уплотнений /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский, А. В. Белоус, А. Н. Жуков; № 2015155260; заявл. 22.12.15; опубл. 22.09.17, Бюл. № 27. – 14с.

Здобувачем запропонована схема застосування інтегрованих технологій

20. Пат. на корисну модель 119316 Україна, МПК С23С 10/48, В23Н 9/00. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Богдан Антошевський, Чеслав Кундера, О. М. Жуков; № u201701845; заявл. 27.02.17; опубл. 25.09.17, Бюл. № 18. – 18с.

Здобувачем досліджені якісні параметри поверхневих шарів сталевих зразків після ЕЕЛ алюмінієвим електродом

21. Пат. на корисну модель 119317 Україна, МПК В23Н 1/00, С23С 8/60. Спосіб насичення поверхні сталевих і чавунних деталей сіркою методом електроерозійного легування /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Богдан Антошевський, Чеслав Кундера, О. М. Жуков; № u201701846; заявл. 27.02.17; опубл. 25.09.17, Бюл. № 18. –10с.

Здобувачем здійснено аналіз результатів сульфідуювання зразків зі сталі 20 і високоміцного чавуну ВЧ60.

22. Пат. на корисну модель 119319 Україна, МПК В23Н 9/00, С23С 8/00, F16J 15/16, F16J 15/34. Спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець імпульсних торцевих ущільнень /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Богдан Антошевський, Чеслав Кундера, О. М. Жуков; № u201701848; заявл. 27.02.17; опубл. 25.09.17, Бюл. № 18. – 11с.

Здобувачем подано результати дослідження зразків із сталі 12Х18Н10Т

23. Пат. на корисну модель 119318 Україна, МПК В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 8/60. Спосіб сульфоцементації сталевих деталей /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Богдан Антошевський, Чеслав Кундера, О. М. Жуков; № u201701847; заявл. 27.02.17; опубл. 25.09.17, Бюл. № 18. – 11с.

Здобувачем здійснено металографічний аналіз зразків

24. Пат. на корисну модель 119707 Україна, МПК С23С 10/48, В23Н 9/00. Спосіб алітування сталевих деталей /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Богдан Антошевський, Чеслав Кундера, О. М. Жуков; № u201701844; заявл. 27.02.17; опубл. 10.10.17, Бюл. № 19. – 24с.

Здобувачем досліджені якісні параметри поверхневих шарів зразків після алітування методом ЕЕЛ

25. Пат. на корисну модель 121847 Україна, МПК F16J 15/16, F16J 15/34, В23Н 9/00, С23С 8/00, С23С 28/00. Спосіб обробки торцевої поверхні кільця з жароміцного сплаву імпульсного торцевого ущільнення, що працює в кріогенних середовищах/ В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. М. Жуков; № u201601708; заявл. 23.02.16; опубл. 26.12.17, Бюл. № 24. – 5с.

Здобувачем представлені результати металографічних досліджень КЭП нікелевого сплаву ЭКБ1

26. Пат. на корисну модель 123189 Україна, МПК F16J 15/16, F16J 15/34, В23Н 9/00, С23С 8/00. Спосіб обробки торцевої поверхні кільця з берилієвої бронзи БрБ2 імпульсного торцевого ущільнення, що працює в кріогенних середовищах /В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. М. Жуков.; № u201710091; заявл. 23.02.16; опубл. 12.02.18, Бюл. № 3. – 4с.

Здобувачем представлені результати металографічних досліджень покриттів на берилієвій бронзі БрБ2

27. Пат. 116687 Україна, МПК F16J 15/16, F16J 15/34, В23Н 9/00, С23С 8/20, С23С 28/00, С23С 4/04, С23С 4/06, С23С 4/08. Спосіб обробки контактуючих поверхонь ущільнювальних елементів з жароміцних сплавів імпульсного торцевого ущільнення, яке працює в кріогенних середовищах (варіанти) / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. М. Жуков; № a201604505; заявл. 22.04.16; опубл. 25.04.18, Бюл. № 8. – 5с.

Здобувачем здійснений аналіз розподілу мікротвердості і глибини поверхневого шару нікелевого сплаву ХН58МБЮД і берилієвої бронзи БрБ2

28. Пат. 2663799 Российская Федерация, МПК В23Н 1/00, В23Н 9/00. Способ сульфоцементации стальных деталей / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковский, А. В. Белоус, А. Н. Жуков, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко; № 2016152822; заявл. 30.12.16; опубл. 09.08.18, Бюл. № 22. – 15с.

Здобувачем здійснено металографічний аналіз зразків

29. Пат. 117867 Україна, МПК В23Н 1/00, В23Н 9/02, С23С 8/64, В23Н 5/02, С23С 8/66. Спосіб сульфоцементації поверхні сталеві деталі / В. Б. Тарельник, В. С. Марцинковський, А. В. Білоус, О. М. Жуков, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко; № а201613145; заявл. 22.12.16; опубл. 10.10.18, Бюл. № 19. – 11с.

Здобувачем здійснено металографічний аналіз зразків

30. Жуков А. Н. Интегрированная технология повышения надежности импульсных торцевых уплотнений / В. Б. Тарельник, А. Н. Жуков // Системи розробки та постановки продукції на виробництво : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми, 17–20 травня 2016 року) / редкол.: О. Г. Гусак, К. О. Дядюра. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – С. 173–175.

Здобувачем проведені металографічні дослідження квазібагатошарових комбінованих покриттів

31. Zhukov A. Increase the impulse face seal operational reliability using new composite materials / A. Belous, A. Zhukov, K. Antoshevsky // Технологии XXI века : сборник тезисов по материалам 22-й Международной научной конференции (г. Сумы, 12–17 сентября 2016 г.). – Сумы : СНАУ, 2016. – Ч. 1. – С. 95–97.

Здобувачем запропонована послідовність нанесення зносостійких покриттів

32. Жуков А. Н. Разработка торцевого импульсного уплотнения для компрессора углекислого газа / О. В. Данилейко, В. С. Марцинковский, А. Н. Жуков, В. И. Юрко // Технологии XXI века : сборник тезисов по материалам 22-й Международной научной конференции (г. Сумы, 12–17 сентября 2016 г.). – Сумы : СНАУ, 2016. – Ч. 1. – С. 118–127.

Здобувачем проведені стендові випробування елементів торцевих імпульсних ущільнень

33. Zukov A. Technological methods of face mechanical seal rings quality improvement / V. Tarelnik, A. Belous, B. Antoszewski, A. Zukov // Технологии XXI века : сборник тезисов по материалам 23-й Международной научно-практической конференции (г. Сумы, 11–16 сентября 2017 г.). – Сумы : СНАУ, 2017. – Ч. 1. – С. 140–141.

Здобувачем вирішено задачу вибору оптимальних технологічних параметрів формування функціонального покриття

34. Жуков А. Н. Разработка системы направленного выбора технологии изготовления колец торцевых уплотнений / А. Н. Жуков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии [Электронный ресурс] : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (г. Могилев, 26–27 апр. 2018 г.) /

редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорусско-Российский университет, 2018. – С. 85–86. URL:

<http://bru.by/content/science/conferences/materialsconferences#2018>

35. Zhukov A. Effect of Running Coatings on Tribological Properties of Strngthened Steel Surfaces /VI. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, Vs. Martsynkovskyy, Ie. Konoplianchenko, A. Zhukov, P. Kurp, P. Furmańczyk, N. Tarelnyk // Electromachinihg-18 [Electronic resource]: AIP Conf. Proc. Vol. 2017 (Bydgoszcz, Poland, 9-11 May 2018). – 2018. – P. 020017-1-020017-12. DOI: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5056280> (Scopus)

Здобувачем здійснений аналіз впливу припрацювальних покриттів на трибологічні властивості зміцнених зразків із сталі

36. Żukow A. Odporność na fretting elementów uszczelnienia impulsowego / W. Tarelnik, B. Antoszewski, W. Marcinkowski, E. Kopoliaczenko, A. Żukow // Streszczenia artykułów XV International Scientific – Technical Conference SEALCONF 2018, Kudowa Zdrój, 23– 25 May 2018. – P. 22.

Здобувачем запропонована технологія підвищення фретингостійкості елементів ущільнення

37. Zhukov A. Alternative Methods for Forming Sliding Surfaces of Face Impulse Seals / Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Martsynkovskyy V., Zhukov A., Tarelnyk N., Antoszewski B., Kundera C., Smolyarov G., Gaponova O., Kozachenko A. // Proceedings of the 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018) (Zatoka, Ukraine, 9–14 September 2018). – Zatoka, 2018. – Part 3. –03TFNMC24-1– 03TFNMC24-6.

Здобувачем представлені результати проведених досліджень сили тертя зразків зі сталі 38X2МЮА

АНОТАЦІЇ

Жуков О.М. Підвищення ефективності виготовлення елементів торцевих імпульсних ущільнень турбомашин нанесенням функціональних покриттів. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної задачі забезпечення працездатності торцевих імпульсних ущільнень (ТІУ) турбомашин шляхом удосконалення технології виготовлення кілець із композиційних матеріалів, що поєднують у собі механічну міцність основи та захисні властивості покриттів.

Проведено аналіз технології виготовлення й особливостей експлуатації ТІУ, з метою пошуку технологічних методів, які дозволяють створювати на підкладках зі сталей і сплавів функціональні покриття із заданими експлуатаційними властивостями.

Розроблено методику спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості робочих поверхонь кілець ТІУ залежно від умов роботи ущільнення й властивостей навколишнього середовища.

Удосконалено технологію виготовлення елементів ТІУ, які працюють в агресивних середовищах і виготовляються зі сталевих, нікелевих та бронзових сплавів, за рахунок застосування енергоефективних та екологічно чистих методів, альтернативних хіміко-термічній обробці.

Розроблено новий метод збільшення товщини шару підвищеної твердості шляхом формування на попередньо зміцнених методом цементації електроерозійним легуванням торцевих поверхнях кілець ТІУ комбінованих електроерозійних покриттів.

Проведено трибологічні дослідження та дослідження параметрів якості поверхневих шарів, сформованих методом іонного азотування, конденсованого іонного бомбардування та карбонітрацією.

Розроблено метод зниження фретинг-корозії для контактуючих поверхонь ущільнювальних елементів ТІУ.

Розроблено технологічні рекомендації виготовлення ТІУ залежно від умов роботи та перекачуваного середовища.

Економічний ефект від впровадження основних положень роботи у виробництво становить 450 тис. грн.

Ключові слова: технологічне забезпечення, зносостійкість, торцеві імпульсні ущільнення, турбомашини, функціональні покриття, спрямований вибір, електроерозійне легування.

Жуков А.Н. Повышение эффективности изготовления элементов торцевых импульсных уплотнений турбомашин нанесением функциональных покрытий. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 - технология машиностроения. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2019.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи обеспечения работоспособности торцевых импульсных уплотнений (ТИУ) турбомашин путем совершенствования технологии изготовления колец из композиционных материалов, сочетающих в себе механическую прочность основы и защитные свойства покрытий.

Проведен анализ технологии изготовления и особенностей эксплуатации ТИУ, с целью поиска технологических методов, которые позволяют создавать на подложках из сталей и сплавов функциональные покрытия.

На основании теоретических исследований разработана формализованная методика определения рационального варианта технологии изготовления элементов ТИУ, отличающаяся тем, что каждому варианту соответствует план реализации возможных комбинаций решений, минимизирован по трудоемкости выполнения. Разработана модель синтеза интегрированной технологии, учитывающая условия эксплуатации ТИУ, физические принципы работы оборудования которая позволяет, в соответствии с технологическими ограничениями, формировать функциональные покрытия на рабочих

поверхностях элементов ТИУ. Проведенные исследования явились предпосылками создания системы направленного выбора технологии изготовления ТИУ турбомашин, которая позволяет формировать рабочие поверхности колец ТИУ, а также контактирующей поверхности вторичного уплотнения и защитной втулки с заданными эксплуатационными свойствами.

Научно обоснована целесообразность применения технологии сульфидирования и сульфоцементации, осуществляемых в практике укрепления стальных поверхностей химико-термической обработкой, альтернативными, экологически чистыми и более энергоэффективными методами электроэрозионного легирования (ЭЭЛ).

Разработан новый метод увеличения толщины слоя повышенной твердости путем формирования на предварительно усиленных методом цементации электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) торцевых поверхностях колец ТИУ комбинированных электроэрозионных покрытий (КЭП). Экспериментально доказана целесообразность проведения ЦЭЭЛ перед нанесением на рабочие поверхности стальных колец и колец с никелевых сплавов ТИУ многослойных КЭП, сформированных, соответственно, в последовательности $VK8 + Cu + VK8$ и $VK8 + VK8 + Cu$.

Предложен новый способ снижения фреттинг-коррозии контактирующих поверхностей вторичного уплотнения, изготовленных из сплава ХН58МБЮД или БрБ2, при котором, перед ЦЭЭЛ на одну поверхность сплава ХН58МБЮД методом ЭЭЛ наносят покрытие из меди или никеля, а на другую из меди. Согласно другому варианту способа, перед ЦЭЭЛ на одну из контактирующих поверхностей из бронзы БрБ2 наносят покрытие из меди.

Проведены трибологические исследования и исследования параметров качества поверхностных слоев, сформированных методом ионного азотирования, конденсированной ионной бомбардировки и карбонитрации.

Экспериментально подтверждена взаимосвязь между технологическими методами формирования покрытий, обеспечивающих повышение износостойкости торцевых поверхностей колец и эксплуатационными характеристиками ТИУ.

Разработаны технологические рекомендации изготовления ТИУ, адаптированные к условиям их работы. Анализ представленных данных позволяет, в первом приближении, выбрать наиболее лучший материал для их изготовления, а также рациональный метод повышения качества их элементов. Использование в парах трения прирабатывающих КЭП способствует снижению силы и коэффициента трения. Исследование показало, что кольца из примененных материалов имеют низкий, средний и высокий параметр PV и их можно применять в I, II и III категориях уплотнений.

Экономический эффект от внедрения основных положений работы в производство составляет 450 тыс. грн.

Ключевые слова: технологическое обеспечение, износостойкость, торцевые импульсные уплотнения, турбомашин, функциональные покрытия, направленный выбор, электроэрозионные легирования.

ABSTRACT

Zhukov O. M. Increasing the efficiency of manufacturing elements of turbo machine face impulse seals by applying functional coatings. Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in specialty 05.02.08 - Manufacturing Engineering. - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical problem of ensuring the efficiency of face impulse seals (FIS) of turbomachines by improving the technology of manufacturing rings made of composite materials, which combine the mechanical strength of the substrate and the protective properties of coatings.

An analysis of manufacturing technology and features of FIS operation was conducted in order to search for technological methods that allow to create functional coatings with specified operational properties on substrates of steels and alloys.

The technique of directional choice of technology for ensuring the required quality of the working surfaces of the FIS rings, depending on the working conditions of the seal and the environmental properties, is developed.

The technology of manufacturing FIS elements that work in corrosive environments and made of steel, nickel and bronze alloys has been improved due to the use of energy-efficient and environmentally friendly methods, alternative to chemical-thermal treatment.

A new method of increasing the thickness of the layer of increased hardness by forming on the pre-strengthened cementing method by electro-erosion doping of the end surfaces of the FIS rings of the combined electro-erosion coatings is developed.

Tribological researches and investigations of quality parameters of surface layers formed by the method of ion nitriding, condensed ion bombardment and carbonitration were carried out.

The method of reducing the fretting corrosion for the contact surfaces of the sealing elements of the FIS has been developed.

Technological recommendations for the production of FIS depending on the operating conditions and the pumped medium are developed.

The economic effect of the introduction of the main provisions of work in production is 450 000 UAH.

Key words: technological support, durability, face impulse seals, turbomachines, functional coatings, directional choice, electro-erosion alloying.



Відповідальний за випуск
Вчений секретар НТУ «ХП»
д.т.н., проф. Заковоротний О.Ю.

Підписано до друку __.10.2019 р. Формат 60x84/16.
Папір офсетн. Друк – різнографічний. Умовн. друк. арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення № _____