

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

ДУМАНЧУК МИХАЙЛО ЮРІЙОВИЧ



УДК 621.9.048.4; 621.825.5/.7

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ  
ДЕТАЛЕЙ ПРУЖНИХ МУФТ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

ХАРКІВ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор **Тарельник В'ячеслав Борисович**, завідувач кафедри технічного сервісу Сумського національного аграрного університету

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор **Добротворський Сергій Семенович**, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

кандидат технічних наук, доцент **Скоркін Антон Олегович**, доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання Української інженерно-педагогічної академії, м.Харків

Захист відбудеться « 13 » травня 2021 року о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.12 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичева, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичева, 2.

Автореферат розісланий « 12 » квітня 2021 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Н. В. Зубкова

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Висока енергоємність внутрішнього валового продукту України значно знижує конкурентоспроможність національного виробництва, підвищення якого можна домогтися тільки за рахунок модернізації встаткування промисловості, зниження енергоємності продукції, що випускається, впровадження новітніх енергозберігаючих, екологічно чистих технологій.

Задача забезпечення необхідних динамічних характеристик роторних машин (РМ) у сучасних швидкохідних компресорах, газових і парових турбінах та інших агрегатах, перетворилася в одну з найскладніших. Однією з принципових завод, що супроводжують створення роторних машин з високими параметрами, є проблема передачі великих потужностей від приводу до машини в умовах немінучих радіальних і кутових неспіввісностей і динамічних навантажень.

При експлуатації РМ досить часто виникають проблеми, пов'язані з роботою сполучних муфт, передчасний вихід з ладу яких стає причиною незапланованих простоїв і, як наслідок, істотних збитків підприємства. Рішенням проблеми може бути модернізація, що включає установку пружних муфт (ПМ) із гнучкими елементами (ГЕ) замість штатних зубчастих муфт. ПМ одночасно мають жорсткість відносно кручення й гнучкість в осьовому й кутовому напрямку, компенсуючи значні величини розцентрування валів, у тому числі неспіввісність. Вони не вимагають змащення й постійного обслуговування.

Незважаючи на ряд позитивних характеристик, слід зазначити, що при обертанні, під дією циклічних робочих навантажень у ПМ виникають періодичні зсуви контактуючих поверхонь деталей. Наявність контактного тиску між поверхнями, що сполучаються і амплітуди їхнього відносного зсуву обумовлюють прояв фретинг-процесу (Ф-П). Інтенсивність зношування зростає при роботі деталей в агресивних середовищах, коли знос поверхонь відбувається в умовах фретинг-корозії (Ф-К).

Нерідко саме Ф-К є причиною зниження надійності експлуатації, а в ряді випадків ушкоджень, що ведуть до руйнування ряду відповідальних деталей і вузлів ПМ. У результаті Ф-К знижується втомлювальна міцність деталей, що може з'явитися причиною серйозних аварій.

Наявність в ПМ трьох вузлів тертя, деталі яких значно відрізняються своєю конфігурацією (або конструкцією) і утворюють різні спряження («вал-півмуфта», «пружний елемент - пружний елемент» і «спряження поверхонь кріпильних деталей»), що не дозволяє застосувати до них одного механізму захисту від зношування. Тому задача розробки найбільш прогресивних технологічних рішень, які забезпечать захист поверхонь деталей ПМ від Ф-К та інших видів руйнування є актуальною і потребує своєчасного вирішення.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертація виконана на кафедрі технічного сервісу Сумського національного аграрного університету (СНАУ) згідно з пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки України «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості і сільському господарстві», а також з планом держбюджетної НДР МОН України «Дослідження ресурсозберігаючих технологій формування функціональних покриттів робочих поверхонь деталей машин» (ДР № 0118U100099), та госпдоговору № 2-11 із науково-виробничим підприємством «ТРІЗ ЛТД» на тему «Удосконалення технології захисту деталей пружних муфт від фретинг-корозії», де здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення якості поверхневих шарів деталей пружної муфти і їх елементів, шляхом спрямованого вибору найбільш перспективних технологічних методів їх формування з урахуванням існуючих аналогів, досвіду промисловості й рекомендацій у вітчизняній і закордонній літературі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- розробити систему спрямованого вибору технології, що забезпечує необхідні параметри якості поверхневих шарів деталей ПМ;
- провести аналіз існуючих вітчизняних і закордонних методів захисту деталей машин від зношування і на його підставі удосконалити методи підвищення якості поверхонь сполучення «півмуфта-вал», гнучких елементів і кріпильних деталей від Ф-К;
- провести аналіз напружено-деформованого стану гнучких елементів пружної муфти, з метою отримання їх геометричних та деформаційних параметрів осередку деформації;
- розробити процедуру вибору раціональної технології забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей ПМ, що дозволяє створити мінімізований за критерієм собівартості з урахуванням екологічної безпечності технологічний процес нанесення функціональних покриттів.
- провести розрахунки економічної ефективності розробленої технології підвищення довговічності ПМ і впровадити її у виробництво.

*Об'єкт дослідження* – технологічні процеси формування захисних покриттів поверхневих шарів сталейних деталей машин від Ф-К.

*Предмет дослідження* – закономірності утворення захисних покриттів поверхневих шарів сталейних деталей ПМ, які утворюють конструктивно різні трибоспряження, від Ф-К.

**Методи дослідження.** Метод системного аналізу дозволив досліджувати конструкторсько-технологічні вимоги до деталей ПМ, а також існуючі методи підвищення їхньої якості. Метод синтезу дозволив деталі ПМ розбити на окремі вузли тертя (трибоспряження), для яких підвищення їхньої зносостійкості досягається різними технологіями.

При розробці методики спрямованого вибору технології виготовлення ПМ використовувалися: теорія графів, математична логіка, булева алгебра, математичне моделювання, у якості оптимізаційного методу використовувався метод мінімальних перетинів.

Металографічний аналіз зразків проводився з метою оцінки якості поверхневого шару, його суцільності, товщини й будови зон підшару. Одночасно проводився дюрOMETричний аналіз на розподіл мікротвердості в поверхневому шарі й по глибині шліфа від поверхні. Шорсткість поверхні визначали на профілографі-профілометрі мод. 201 заводу «Калібр» шляхом зняття і обробки профілограм. Для дослідження розподілу елементів по глибині шару проводився локальний мікрорентгеноспектральний аналіз, для цього використовувався оснащений рентгеноспектральним мікроаналізатором електронний мікроскоп ISIS 300 Oxford Instruments.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше розроблена система цілеспрямованого вибору технології виготовлення ПМ роторних машин, що дозволяє формувати контактуючі поверхні деталей трибоспряжень: «вал-півмуфта», гнучких елементів і кріпильних деталей із

заданими експлуатаційними властивостями.

2. Вперше запропонована фізично обґрунтована математична модель (рівняння зношування) процесу зношування ГЕ пружної муфти при Ф-К, що дозволяє по роботі тертя визначати зношування, виражене зміною шорсткості поверхні.

3. Одержала подальший розвиток методика визначення констант рівняння зношування ( $E_A$  – енергії активації і  $R_{aH}$  – максимального зносу) при Ф-К поверхонь тертя ГЕ, які можуть служити критеріями для вибору раціональних технологій підвищення якості їх поверхневих шарів.

4. Вперше на підставі проведених досліджень напружено-деформованого стану гнучких елементів муфти типу МСК, вирішено задачу про їх поздовжньо-поперечний згин, а також дана порівняльна оцінка їх прогинів від поздовжньо-поперечного згину і сили, зумовленої неспіввісністю з'єднаних валів.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у розробці технологій підвищення якості поверхневих шарів деталей пружних муфт (ПМ) і їх елементів.

На основі комплексу проведених теоретичних та експериментальних досліджень, сформульованих принципів, закономірностей і положень отримано наступні практичні результати:

1. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей (патент України №121343); Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей (патент України №121346); Вузол торцевого імпульсного ущільнення, що працює в криогенних середовищах (варіанти), і спосіб його виготовлення (патент України №120979); Спосіб алітування сталевих деталей (патент України №130157); Спосіб сульфоцементації сталевих деталей (патент України №130866); Спосіб захисту деталей пари тертя пружної муфти від фретинг-корозії (патент України №142811); Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт (патент України №137273).

2. Розроблено технологічні процеси виготовлення та ремонту ПМ впроваджено в ПАТ «Сумхімпром» (м. Суми), із планованим річним економічним ефектом 245000 грн. (Акт впровадження від 17.09.2020 р.); комунальному підприємстві «Міськводоканал» Сумської міської ради з очікуваним економічним ефектом 138000 грн (Акт впровадження від 03.11.2020 р.); ТОВ «ТРИЗ ЛТД» (м. Суми) із планованим річним економічним ефектом 94000 грн. (Акт впровадження від 05.12.2020 р.)

3. Розробки, які виконані в дисертації, впроваджено у навчальний процес для студентів інженерно технологічного факультету СНАУ при викладанні дисциплін «Технологія машинобудування в галузі», «Механіка матеріалів та конструкцій» і «Триботехнологія», а також при виконанні магістерських робіт, курсових і дипломних проектів (Акт впровадження від 18.12.2020 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Результати теоретичних і експериментальних досліджень, які виносяться на захист, отримані автором самостійно.

Автором на підприємстві ТОВ «ТРИЗ» впроваджені науково обґрунтовані рекомендації захисту деталей пружних муфт від Ф-К, які лягли в основу розробки нового технологічного процесу виготовлення ПМ відцентрових компресорів і насосів.

Основні результати досліджень викладені в роботах, опублікованих самостійно: в 2-х статтях у журналах, затверджених ВАК України для кандидатських дисертацій. У роботах, написаних у співавторстві, автором розроблені й теоретично обґрунтовані методики досліджень, оброблені й систематизовані отримані результати.

#### **Апробація результатів роботи.**

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й схвалені на Міжнародних науково-практичних конференціях: «Технології XXI століття» (Одеса,

2016, 2018); International conference on design, simulation, manufacturing: the innovation exchange (DSMIE-2019) June 11-14, 2019, Lutsk, Ukraine; 2018 IEEE 8<sup>th</sup> International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018) 2018, (Zatoka, Ukraine September 9–14, 2018); 2019 IEEE 9<sup>th</sup> International Conference on Nanomaterials: Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP-2019) 2019, (Odesa, Ukraine September 15–20, 2019); XVI International Scientific and Engineering Conference Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery «HERVICON+PUMPS-2020»; «Матеріали, обладнання і ресурсозберігаючі технології. (Білорусь, г. Могилев, 26–27 апр. 2018 г.); «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі» (Харків, 5-6 квітня, 2018); «Сучасні технології в науці та освіті» (м. Сєверодонецьк, 5–7 березня 2019 р.); «Експлуатаційна та сервісна інженерія» (м. Харків, 27-28 травня 2020 р).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи викладено в 26 наукових роботах, з них 1 розділ в монографії, 9 статей в наукових виданнях (2 самостійно, 7 опубліковані в виданнях, які внесені в міжнародній наукометричній базі Scopus), 6 патентів на винахід, 4 патенти на корисну модель, 5 тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

**Структура й обсяг дисертації.** Робота складається з анотації, вступ, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків, викладена на 263 сторінках машинописного тексту. Основний текст становить 144 сторінок, містить 20 таблиць, 67 ілюстрацій. Список використаних джерел складається з 140 найменування на 18 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

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

**У першому розділі** виконаний аналіз проблем підвищення зносостійкості деталей ПМ. Наведено загальні відомості про пружні муфти, розглянуті їхні конструктивні особливості, галузі застосування, матеріали і види руйнувань. Розглянуто технологічні методи підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей ПМ. 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 поверхонь деталей ПМ шляхом аналізу і синтезу існуючих аналогів, досвіду промисловості та рекомендацій у вітчизняній і зарубіжній літературі.

Система спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості поверхонь деталей ПМ охоплює весь їх життєвий цикл, що включає їх матеріал, технологію 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 (табл. 1).

Враховуючи на те, що методів досягнення заданої якості поверхневих шарів може бути багато, граф переходу поверхні з одного якісного стану в інший має вигляд, наведений на рис. 1.

Таблиця 1 - Методи досягнення необхідної якості поверхонь деталей ПМ

Спряження	Методи підвищення якості поверхонь деталей ПМ	
«вал-півмуфта»	Наплавлення, сульфоцементация, лазерна обробка, гартування ТВЧ, цементация, азотування, алітування, сульфідкування, нітроцементация, ППД, гальваніка, ....	
гнучких елементів	Лудіння, сріблення, ФАБО, іонна імплантация, покриття MoS <sub>2</sub> , графітування, сульфідкування, епіламування, фосфатування, металоплакування, оксидування, .....	
кріпильних деталей	Цинк-ламельне покриття, епіламування, негальванічні покриття, термічна обробка, лазерне зміцнення, ППД, гальванічні покриття ...	

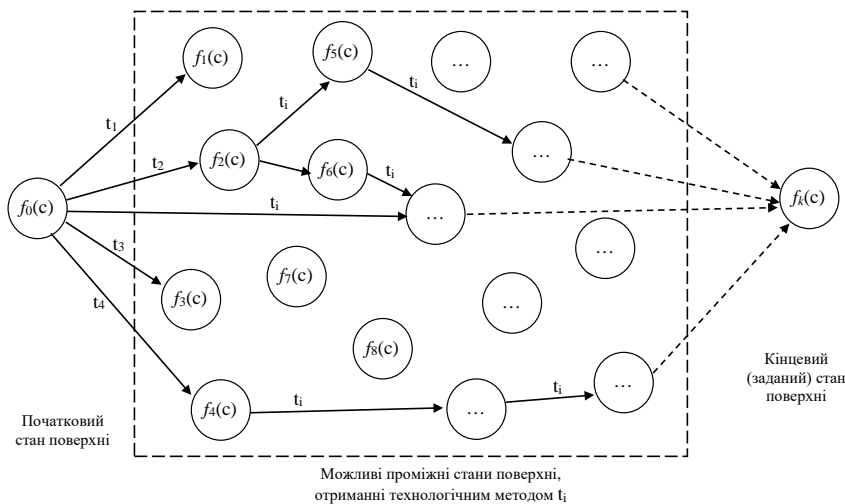


Рисунок 1 - Граф переходу поверхні виробу з одного стану в інший (цільова функція - витрати щодо переходу поверхні з одного стану в інший)

Цільова функція визначає якість керування процесом одержання виробом заданих характеристик при використанні одного з методів, і у загальному вигляді завдання оптимізації подається у вигляді

$$Q' = \text{extr} \{ f_0(x, \omega) | x \in D \};$$

при технологічних обмеженнях

$$g(x, \omega) \leq 0; f(x) \leq 0; a_i \leq x_i \leq b_i,$$

де  $f_0(x, \omega)$  - критерій оптимізації, що залежить від керованих  $x$  і постійних  $\omega$  параметрів процесу;  $D$  – область припустимих значень  $x$ ;  $a_i, b_i$  – сталі.

Оптимізація може бути як структурна – оптимізація кількості використовуваних методів або шарів, що наносяться на поверхню, так і оптимізація параметрична – оптимізація параметрів технологій, використовуваних для формування поверхні із заданими властивостями.

Зважаючи на те, що кожен з параметрів зміни якості поверхні виробу проходить за своїми законами і у відповідних умовах, причому задана якість поверхні може бути досягнута великою кількістю методів, завдання оптимізації можна вирішувати методом лінійного програмування. При цьому будується мережна модель можливих методів (рис. 2), набір яких дозволяє одержати поверхню заданої якості.

Завдання оптимізації формулюється так:  
мінімізувати

$$\sum_{ji \in \text{мережі}} \sum \Delta R_{ji} \times J_{ji}; \text{ при обмеженнях } \sum_{kj \in \text{мережі}} g_{kj} - \sum_{ik \in \text{мережі}} g_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{для } k = П; \\ 0, & \text{для } k = \text{проміжних}; \\ -1, & \text{для } k = К, \end{cases}$$

де  $g_{ji} \geq 0$  для всіх дуг мережі;  $k$  – номер вершин мережі;  $kj$  – джерела дуг з вершини  $k$  у вершину  $j$ ;  $ik$  – у вершину  $k$  впадають дуги з попередніх вершин  $i$ .

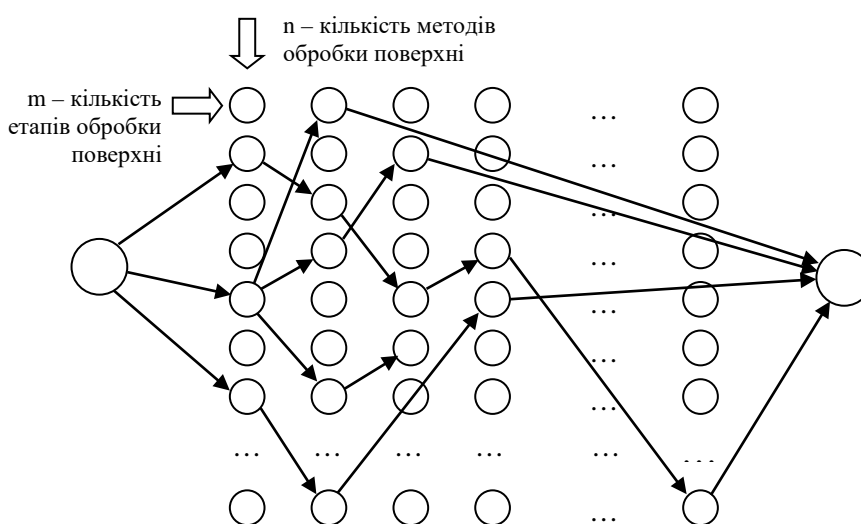


Рисунок 2 - Мережна модель можливих методів досягнення необхідної якості поверхневого шару виробів

Розмірність матриці ( $m \times n$ ) відповідає кількості аналізованих методів. Ребрами з'єднують ті методи, набір яких може бути використаний для одержання поверхні заданої якості. На початку матриці, що відбиває мережну модель, ставиться вершина, що характеризує початок «П» процесу, а наприкінці - вершина, що характеризує закінчення процесу «К» одержання поверхонь виробу із заданою якістю. У виробі може бути кілька поверхонь із різними якісними характеристиками. Тому набір використовуваних методів у цілому по виробу може бути збільшений. На ребрах вказуються вагові коефіцієнти прийнятого критерію оптимальності. Застосовуючи стандартні алгоритми, визначення найкоротшого шляху на мережі, визначається шлях, що має оптимальне значення заданих показників.

При оптимізації може змінюватися набір методів, використовуваних для формування поверхні заданої якості, кількість шарів, режими роботи застосовуваного обладнання, а також характеристики впливу на оточуюче середовище того чи іншого технологічного методу.

Аналіз причин виходу з ладу ПМ показав, що термін їх безвідмовної експлуатації лімітується довговічністю пакета ГЕ, яка в свою чергу визначається фретингостійкістю (Ф-С) окремих пластин. В результаті проведення досліджень на



електронному мікроскопі окремих ділянок поверхні ГЕ, з різним ступенем пошкодження Ф-К, встановлено, що існує, як мінімум, три стадії їх руйнування: утворення в окремих точках осередків руйнування у вигляді каверн, що зберігають в замкнутому просторі окремі мікрочастинки зруйнованого металу; ослаблення зусилля стиснення пластин і вихід продуктів зносу, у вигляді абразивних частинок, з осередку руйнування; абразивний знос, результатом якого є повне руйнування ГЕ.

Основними при оцінці зносостійкості ГЕ, на наш погляд, повинні бути енергетичні критерії. Нижче представлена методика визначення критеріїв зношення поверхонь ГЕ з використанням енергетичного підходу. Перевага енергетичного підходу полягає в можливості інтегрального опису за допомогою енергетичних критеріїв впливу численних параметрів, від яких залежать процеси тертя і зносу. Так як великі механічні навантаження, що виникають при зовнішньому терті призводять до різкої зміни фізико-механічних властивостей поверхневих шарів і їх докорінної трансформації (механічна енергія стимулює хімічні реакції), то за критерій Ф-К можна прийняти енергію активації процесу зношування.

Для отримання достовірної інформації про правильність обраного способу підвищення якості поверхневого шару ГЕ нам необхідна математична модель – рівняння зносу при Ф-К, що зв'язує величину зношування поверхні ГЕ з роботою, витраченою на тертя і енергією активації процесу зношування.

Згідно з проведеними раніше дослідженнями (розділ 1) між шорсткістю ( $Ra$ ) і роботою тертя ( $A_{тр}$ ) існує експоненціально зростаюча залежність. При цьому необхідно зазначити, що існує граничне значення шорсткості, допустиме для надійної роботи ГЕ муфти. Назвемо цю величину зносом насичення і позначимо  $Ra_n$ .

Зі збільшенням величини роботи, витраченої на тертя  $A_{тр}$ , знос збільшується тим сильніше, чим більше енергія активації  $E_A$ . Виходячи з експериментальної залежності  $Ra$  від  $A_{тр}^{-1}$  (спадаюча експонента), можна зробити висновок, що  $\Delta Ra$  пропорційно  $(-A_{тр})^{-1}$  і величині  $E_A$ , тобто

$$\ln Ra \sim (-A_{тр})^{-1}, E_A \quad (1)$$

Переходячи від наближеної рівності до точної

$$Ra = C \cdot e^{\frac{-E_A}{A_{тр}}}, \quad (2)$$

де  $C = \Delta Ra_n$  – знос насичення, тобто максимально допустимий знос.

Тоді

$$Ra = Ra_n \cdot e^{\frac{-E_A}{A_{тр}}}. \quad (3)$$

Залежність (3) назвемо рівнянням зношування.

Приймаючи у формулі (3)

$$E_A = A_{тр}, \quad (4)$$

отримаємо:

$$\frac{Ra}{Ra_n} = e^{-1}. \quad (5)$$

Звідси  $E_A$  - це фізична величина, що дорівнює такій роботі тертя, при якій  $Ra = \frac{Ra_n}{e}$ , тобто  $Ra$  в  $e$  раз менше  $Ra_n$ . Назвемо її константою рівняння зношування поверхонь ГЕ. Розмірність  $[E_A] = \text{Дж}$ .

Величину роботи тертя, яку необхідно виконати при зношуванні до отримання необхідної шорсткості ( $Ra_x$ ), можна визначити з рівняння (3).

Тоді відповідно

$$A_{mp.} = \frac{E_A}{\ln \frac{Ra_n}{Ra_x}}. \quad (6)$$

Таким чином, на підставі запропонованої математичної моделі, з'являється можливість достовірно прогнозувати величину зносу ( $Ra$ ) для поверхонь ГЕ, сформованими різними технологічними методами. При цьому константи рівняння зносу (енергія активації процесу зношування,  $E_A$  і максимально допустимий знос  $Ra_n$ ) можуть служити критеріями для вибору раціональних технологій підвищення якості поверхневих шарів ГЕ пружної муфти. Отримані залежності шорсткості від часу роботи ПМ дозволяють науково обгрунтовано обирати раціональні технології забезпечення необхідної якості поверхневих шарів ГЕ пружної муфти.

**В третьому розділі** на основі аналізу напружено-деформованого стану ГЕ пружної муфти робиться спроба оцінити сили тиску між пластинами і відносні зміщення контактуючих точок при передачі муфтою навантаження, які є однією з причин Ф-К. Показано, що муфти з пружними кільцевими елементами типу МСК застосовуються для передачі крутного моменту і компенсації неспіввісності і відносних осевих переміщень валів, що з'єднуються. Вони мають високу радіальну гнучкість і передають великий крутний момент. ПМ складається з двох півмуфт, з'єднаних між собою пакетами ГЕ і циліндричною проставкою (рис. 3).

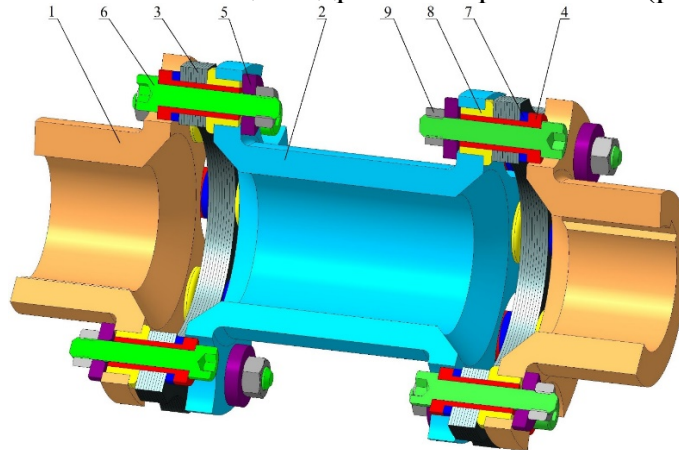


Рисунок 3 - Конструкція муфти с пружними металевими елементами:

- 1 - півмуфта; 2 - проставка; 3 - пакет пружних металевих елементів;  
4 - втулка; 5 - шайба; 6 - болт; 7 - шайба; 8 - втулка; 9 - гайка

Крутний момент передається від фланця півмуфти приводу на пакет, а потім на фланець проставки за допомогою стягуючих болтів, які розташовані по колу і по черзі (через один) кріплять пакет то до одного то іншого фланцю. Пружні елементи виготовляються з нержавіючої сталі високої міцності і зносостійкості. Однак в процесі роботи ГЕ (пластини), стягнуті болтами лише в окремих точках, мають незначні зміщення один відносно іншого на ділянках між болтами, що є причиною механічних пошкоджень і Ф-К їх поверхні.

В результаті проведених досліджень дана порівняльна оцінка податливості пакета пластин муфти в стягнутому і в нестягнутому станах пластин. Встановлено, що в реальних умовах при заданій конструкції муфти пластини працюють як нестягнутий пакет. Для визначення реакції опор пакета був застосований метод сил, при цьому кожна пластина і пакет в цілому розглядалися як двічі статично

невизначена система. Також: були визначені крайові умови у вигляді значень деформації в місцях затяжки пластин болтами на кінцях пакетів; вирішена задача про визначення напружень і деформацій пластин від сил, викликаних неспіввісністю валів, що з'єднуються муфтою; знайдено вирази для питомого тиску між пластинами; отримана формула для визначення роботи від сил тертя і від сил пружної деформації, що дозволяють оцінити непродуктивну потужність і уточнити коефіцієнт корисної дії установки, в якій застосовується муфта даного типу.

Загальний висновок: основними чинниками, що зумовлюють знос пластин внаслідок тертя, є згинаючі сили, викликані неточністю з'єднуваних муфтою валів і поздовжньо-поперечним згином від колової сили.

На підставі проведених досліджень сформульовані наступні рекомендації щодо підвищення фретингостійкості ГЕ:

- зменшення довжини пакета за рахунок оптимального збільшення кількості стягуючих болтів;
- збільшення довжини проставки, що дозволить зменшити кути повороту по краях пакетів ГЕ і тим самим знизити згинаючий ефект;
- за рахунок поліпшення технології виготовлення і підвищення точності монтажу досягти зниження кутових і лінійних похибок з'єднуваних валів.

У четвертому розділі приведені результати дослідження параметрів якості деталей ПМ.

**Гнучкі елементи пружних муфт.** Дослідження впливу амплітуди й частоти деформації ГЕ, виготовлених з холоднокатаної нержавіючої сталі 12Х18Н9 (ГОСТ 4986-79), на Ф-К проводили спеціально виготовленому стенді (рис. 4), що включає: 1 – лічильник циклів; 2 – станину з підшипниковими опорами; 3 – електропривод; 4 – ексцентриковий механізм; 5 – пакет з гнучких елементів; 6 – механізм кріплення гнучких елементів.

Величина амплітуди змінювалася в діапазоні від 1,0 до 5,0 мм, а частота деформацій від 500 до 1500. При цьому база випробувань становила  $10^7$  циклів. Як критерій зношування приймали зміну величини шорсткості контактуючих поверхонь ГЕ ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ ). При цьому база випробувань становила  $10^7$  циклів.

На рис. 5 представлені результати зміни шорсткості контактуючих поверхонь ГЕ залежно від амплітуди  $A$  і частоти деформацій,  $n$ .

Як видно з рис. 5 інтенсивність зношування в результаті Ф-К зі збільшенням амплітуди деформації збільшується, а частоти деформації незначно зменшується, що найімовірніше пов'язано зі зменшенням часу контактування зношуваних поверхонь, з навколишнім середовищем.

Для підвищення стійкості ГЕ від Ф-К нами запропонований новий спосіб (патент на корисну модель UA №137273). Спосіб включає виготовлення ГЕ, подальше їх складання в пакет з механічним кріпленням, в якому перед складанням на поверхні сполучених пластин наносять МММ, принаймні, в місцях їх механічного кріплення при формуванні пакета, а після складання пакет стискають, видаляючи його надлишок.

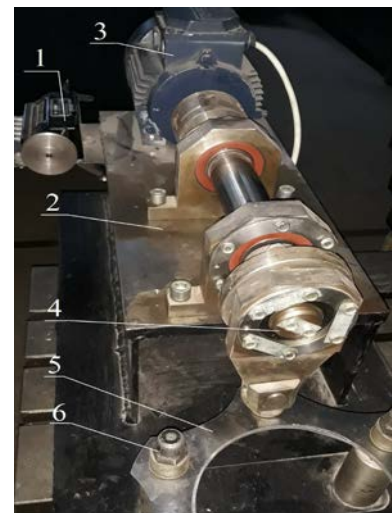
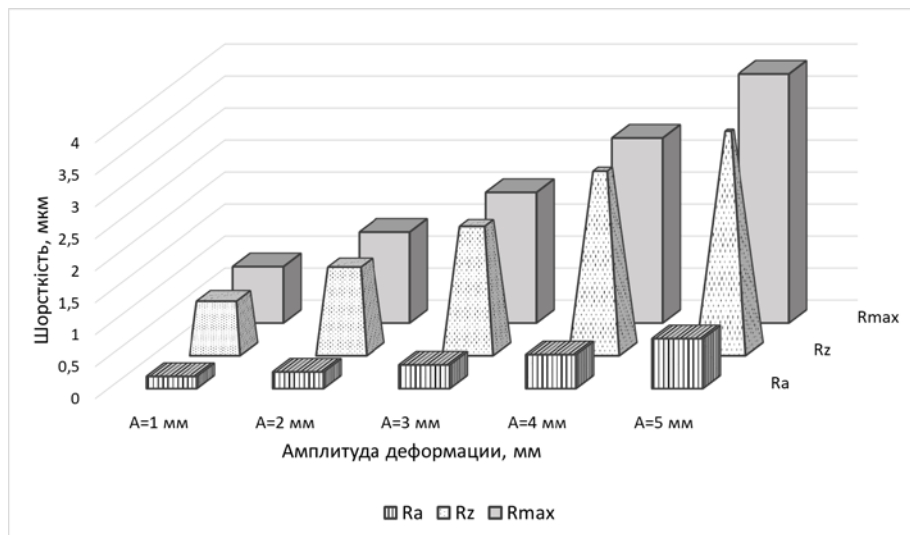
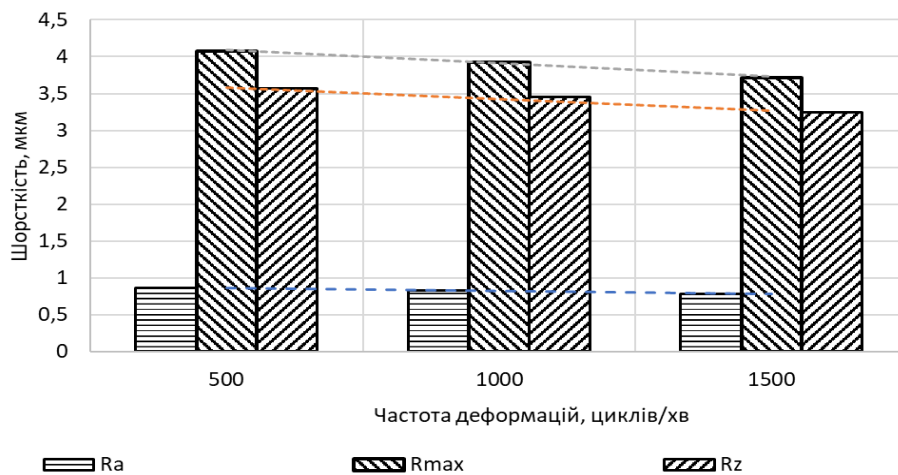


Рисунок 4 – Стенд для дослідження фретингостійкості



а



б

Рисунок 5 – Залежності величини зміни шорсткості ГЕ залежно від амплітуди (а) і частоти деформацій (б)

У запропонованому способі МММ попередньо готують з парафіну з додаванням порошку міді в кількості від 5 до 25 вагових відсотків і порошку дисульфиду молібдену ( $\text{MoS}_2$ ) в кількості від 5 до 25 вагових відсотків і наносять по всій поверхні кожного ГЕ, принаймні, в межах 20-30 мм від місця його механічного кріплення при формуванні пакета.

Вимірювання шорсткості проводили упоперек напрямку прокатки. База вимірювань становила 4 мм. Вихідна шорсткість ГЕ становила:  $R_a=0,16$  мкм;  $R_z=1,4$  мкм і  $R_{\text{max}}=1,7$  мкм. Для випробувань набирали пакет з ГЕ муфти МСК-470, розрізаних навпіл. Як матеріал покриття використовували парафін, як в чистому вигляді, так і з добавками з міді і дисульфиду молібдену. Випробування проводили на стенді (рис. 4), при амплітуді 5 мм і з кількістю циклів  $2 \times 10^7$ .

Аналіз результатів дослідження (рис. 6) показав, що згідно запропонованого винаходу, при використанні МММ у вигляді парафіну з добавками з міді і дисульфиду молібдену знос приблизно на 20% менше ніж в прототипі. Найбільш раціональним процентним вмістом металоплакуючих присадок, як для міді, так і для дисульфиду молібдену, є 5-25 вагових відсотків, оскільки подальше збільшення процентного вмісту присадки не впливає на якість змащування.

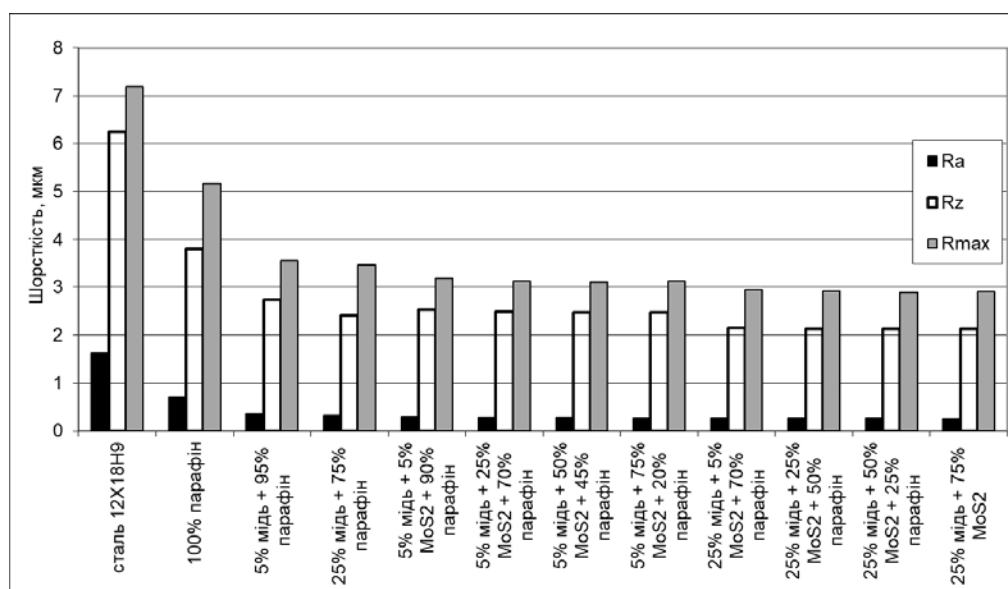


Рисунок 6 - Результати використання МММ у вигляді парафіну з добавками з міді і дисульфиду молібдену на знос ГЕ

**Сполучення «півмуфта-вал».** Електроіскрове легування (ЕІЛ) контактуючих поверхонь здійснювали на установках моделі «ЕІЛ-8А» і «Елітрон-52А». Процес легування здійснювався в автоматизованому режимі Діапазон енергій розряду ( $W_p$ ) використовували від 0,04 до 6,8 Дж. Для металографічних і діурометричних досліджень параметрів покриттів після сульфоалітування, сульфоцементалітування та сульфоцементування методами ЕІЛ використовували круглі зразки  $\varnothing 50$  мм з низьколегованої сталі 40Х в покращеному стані і з твердістю основи 2950-3100 МПа. Зразки закріплювали в патроні токарного верстата, після чого проводили ЕІЛ алюмінієм, сріблом, міддю, ЦЕІЛ. Для зниження шорсткості поверхні проводили безабразивну ультразвукову фінішну обробку (БУФО).

З метою реалізації способу захисту пресового з'єднання від Ф-К, шляхом запобігання схоплювання поверхонь при терті, поліпшення опору атмосферній корозії, забезпечення твердості і зносостійкості поверхонь деталей, а також збільшення сили тертя в контакт і герметичності з'єднання, на контактуючі поверхні деталей сполучення «півмуфта-вал» поетапно наносили комбіновані електроіскрові покриття (КЕІП) (рис. 7).

**1-й етап** - на внутрішні поверхні півмуфти, на відстань 5-7 мм від торців, перед ЕІЛ графітовим електродом (ЦЕІЛ) наноситься консистентна речовина, що містить сірку і алюмінієву пудру, вміст якої становить не більше 56%. Після чого, не чекаючи висихання консистентної речовини, один, або більше разів, проводять процес ЦЕІЛ. При цьому одночасно здійснюється алітування, сульфідкування і цементация. У випадку багаторазового ЕІЛ, кожен наступний раз знижують енергію розряду, яку

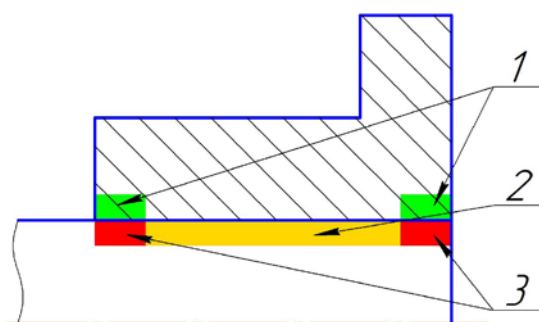


Рисунок 7 – КЕІП на поверхнях з'єднання «півмуфта – вал»:  
1 – сульфоцементалітування (патенти на винахід UA121346, RU2707776); 2 – сульфоцементация, або сульфоалітування (патенти на винахід UA121343, RU2696616); 3 – ЦЕІЛ + ЕІЛ мідь + БУФО.

застосовують в залежності від заданої шорсткості і суцільності поверхневого шару;

**2-й етап** - поверхню вала, що контактує з поверхнею півмуфти, на відстані 5-7 мм від торців піддають ЦЕІЛ, нанесенню на неї міді або срібла і зміцнення методом БУФО;

**3-й етап** - інша поверхня вала піддається сульфоцементатії, або алітуванню методом ЕЕЛ, при якій безпосередньо перед ЦЕІЛ, або обробкою алюмінієвим електродом на сталеву поверхню наноситься консистентна речовина, що містить сірку.

В результаті проведених досліджень встановлено, що одночасне проведення на поверхнях півмуфти, в районі її торців, методом ЕЕЛ процесів алітування, сульфидування і цементатії (етап 1) покращує опір атмосферній корозії (Ф-К), запобігає схопленню контактуючих поверхонь, забезпечує підвищення мікротвердості поверхні до 9700 МПа, глибиною до 80 мкм і суцільності покриття до 95%. Аналіз хімічного складу покриття показує, що дифузія підвищеного вмісту сірки, досягає глибини 150 мкм.

Формування КЕП, згідно етапу 2, представлено на рис. 8. На поверхні зразка 1 (срібло), розташовується шар глибиною до 35 мкм з мікротвердістю близько 800-900 МПа. Далі, у міру заглиблення, мікротвердість плавно підвищується і на глибині ~60 мкм досягає максимального значення 4700 МПа, після чого знову знижується, і на глибині ~100 мкм, відповідає мікротвердості основи. На поверхні зразка 2 (мідь), розташовується шар з мікротвердістю 1400-1700 МПа і глибиною до 40 мкм. Далі, у міру заглиблення мікротвердість плавно підвищується до глибини ~75 мкм і досягає максимального значення 5100 МПа, після чого знову знижується до глибини 120 мкм, де відповідає мікротвердості основи.

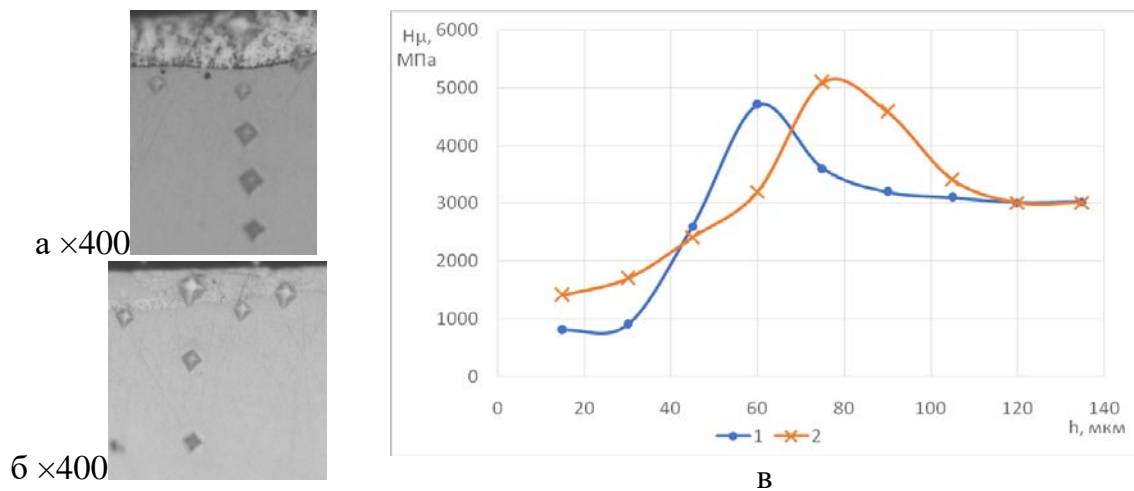


Рисунок 8 - Мікрошліфи поверхневого шару сталі 40X після ЦЕІЛ, ЕІЛ Ag (а), ЕІЛ Cu (б) і обробки БУФО і розподіл мікротвердості в поверхневому шарі (в): 1 – ЕІЛ Ag; 2 – ЕІЛ Cu

При складанні півмуфти і вала, м'який антифрикційний матеріал деформується і заповнює всі пори і мікронерівності поверхонь деталей. В результаті значно збільшується площа поверхонь, що контактують, зростає герметичність з'єднання, підвищується його надійність і довговічність.

Проведення на решті підступічної поверхні вала процесу сульфоцементатії (етап 3) супроводжується зниженням мікротвердості поверхневого шару до 1500 МПа на глибину 5-10 мкм, що забезпечує зниження опору деформації і схоплювання при

запресовуванні, збільшує площу контактуючих поверхонь і, таким чином, підвищує міцність і герметичність з'єднання. Металографічний аналіз сульфоцементованих покриттів показав, що мікротвердість поверхневих шарів при  $W_p = 0,13$  і  $0,52$  Дж, відповідно, становить  $H_\mu = 7100$  і  $13065$  МПа, товщина 10 і 20 мкм, а суцільність «білого» шару 70 і 100%.

**Кріпильні деталі.** Ураження Ф-К кріпильних деталей становить велику небезпеку, так як може служити джерелом втомного руйнування деталей і, в кінцевому підсумку, виходу ПМ з ладу. Епіламування кріпильних деталей ПМ є ефективним методом зниження їх Ф-К. В результаті експериментальних досліджень на стенді (рис. 4) при базі  $10^7$  циклів встановлено, що параметри шорсткості кріпильних деталей ( $R_a$ ,  $R_z$  і  $R_{max}$ ), оброблених методом епіламування, в порівнянні з необробленими деталями, знизилися, відповідно, в 1,55; 1,53 і 1,39 рази. На рис. 9 графічно показано результати вимірювання величини шорсткості поверхні кріпильних деталей.

У п'ятому розділі наведено дані про промислове впровадження результатів дослідження.

Виконано дослідження впливу способів підвищення якості поверхонь деталей на механічні властивості їх матеріалів (сталі 40, 40Х та 40ХН2МА). Було встановлено, що сульфоцементация, сульфоцементоалітування, комплексні обробки ЦЕІЛ + ЕІЛ мідь + БУФО та ЦЕІЛ + ЕІЛ мідь + ППД (обкатка кулькою) супроводжується збільшенням меж плинності та міцності, відповідно на 5...7; 7...9; 12...15 і 15...18%, та зменшення пластичності.

Виконано розрахунки критеріїв рівняння зношування ГЕ пружної муфти при Ф-К (величини шорсткості насичення  $R_{a_n}$  і енергії активації процесу зношування  $E_A$ ) для необроблених пластин і оброблених різними методами. Отримані результати дозволяють прогнозувати їх довговічність в умовах промислової експлуатації.

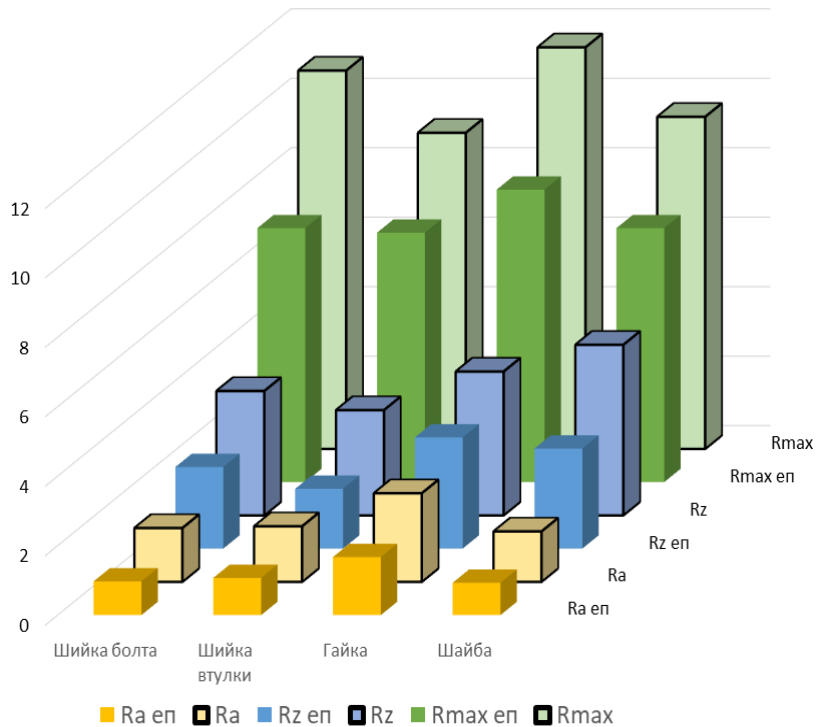


Рисунок 9 - Результати вимірювання величини шорсткості поверхні кріпильних деталей: 1-й, 3-й і 5-й ряд, відповідно  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  - після епіламування; 2-й, 4-й і 6-й ряд, відповідно  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  - без епіламування

Розроблена процедура спрямованого вибору технології забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей ПМ, що дозволяє створити мінімізований за критерієм собівартості технологічний процес нанесення функціональних покриттів.

На підставі проведених розрахунків економічної ефективності розробленої технології виготовлення ПМ було встановлено, що термін окупності капіталовкладень буде менше 1 року, а економічний ефект за вдосконаленою технологією складає 5082,52 грн. на одну муфту.

### **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ**

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічну задачу підвищення якості поверхневих шарів деталей пружної муфти і їх елементів, шляхом спрямованого вибору найбільш перспективних технологічних методів їх формування.

1. На підставі виконаних досліджень розроблена система спрямованого вибору технології отримання поверхонь деталей трибологічних спряжень, при виготовленні і ремонті вузлів тертя машин і механізмів, за рахунок чого забезпечуються потрібні параметри якості поверхонь деталей ПМ найбільш економічними засобами.

2. Аналіз існуючих вітчизняних і закордонних методів захисту деталей машин від Ф-К, що резервом захисту спряження «півмуфта-вал» можуть бути комбіновані електроіскрові покриття, які складаються з твердих зносостійких і м'яких антифрикційних шарів (патенти на винахід UA121346, UA121343, RU2707776, RU2696616); для підвищення зносостійкості ГЕ найбільш ефективним є покриття МММ що складається з парафіну, порошку міді і порошку дисульфиду молібдену, яке забезпечує на 20% менше зношування в порівнянні з аналогічним покриттям без дисульфиду молібдену (патент на корисну модель UA 137273); для кріпильних деталей пропонується метод епіламування, яке не змінює структуру оброблюваної поверхні, а лише модифікує її, надаючи антифрикційні, антиадгезійні та інші корисні властивості (патент на корисну модель UA 142811).

3. В результаті аналізу напружено-деформованого стану ГЕ була вирішена задача про визначення залежності напружень і деформацій пластин від сил, викликаних неспіввісністю валів, що з'єднуються муфтою; знайдено вирази для питомого тиску між пластинами; отримана аналітична залежність для визначення роботи сил тертя і сил пружної деформації, що дозволяє оцінити непродуктивну потужність і уточнити коефіцієнт корисної дії установки, в якій застосовується муфта даного типу. На підставі проведених досліджень сформульовані рекомендації щодо підвищення фретингостійкості ГЕ.

4. Розроблена процедура вибору раціональної технології забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей ПМ, що дозволяє створити мінімізований за критерієм собівартості технологічний процес нанесення функціональних покриттів.

5. Розроблені технологічні методи підвищення якості поверхневих шарів деталей трибоспряжень ПМ, які позитивно відрізняються екологічною безпекою, низькою собівартістю, енергозбереженням, що лягли в основу створення нової технології, яка практично реалізована в виробництво з річним економічним ефектом 477 тис. грн.

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



## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Марцинковський В.С., Тарельник В.Б. та ін. Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості: [колективна монографія] / за ред. В. Б. Тарельника, Є. В. Коноплянченка. Суми: ФОП Литовченко Є.Б., 2020. 410 с.

*Здобувачем виконано аналіз напружено-деформованого стану пакету гнучких елементів пружної муфти.*

2. Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Martsynkovskyy V., Dovzhyk M., Dumanchuk M., Goncharenko M., Antoszewski B., Gaponova O. Investigation of Qualitative Parameters of Surface Layers Formed By Stepwise Carburizing and Sulfo-Carburizing of Steel Parts With The Use of Electroerosion Alloying Method. *8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties, NAP 2018*. 2018. P. 03TFNMC26. <https://doi.org/10.1109/NAP.2018.8915035>. (Scopus).

*Здобувачем проведено дослідження впливу режимів цементації та сульфоцементації на параметри поверхневих шарів.*

3. Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Antoszewski B., Kundera C., Martsynkovskyy V., Dovzhyk M., Dumanchuk M., Vasilenko O. Application of Multicomponent Wear-Resistant Nanostructures Formed by Electrospark Allowing for Protecting Surfaces of Compression Joints Parts. *Microstructure and Properties of Micro- and Nanoscale Materials, Films, and Coatings (NAP 2019)*. Springer Proceedings in Physics. 2019. Vol. 240. P. 195–209. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1742-6\\_18](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1742-6_18). (Scopus).

*Здобувачем запропоновано метод формування багатокомпонентного покриття та виконано дослідження його впливу на склад та структуру поверхневого шару.*

4. Martsynkovskyy V., Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Dumanchuk M. Technology support for protecting contacting surfaces of half-coupling—Shaft press joints against fretting wear. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer. 2020, P. 216–225. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_22) (Scopus).

*Здобувачем запропоновано метод зміцнення контактуючих поверхонь в з'єднання типу «півмуфта-вал».*

5. Melnyk V., Vlasovets V., Konoplianchenko Ie., Tarelnyk V., Dumanchuk M., Martsynkovskyy Vas., Semirnenko Yu., Semirnenko S. Developing a system and criteria for directed choice of technology to provide required quality of surfaces of flexible coupling parts for rotor machines. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741. P. 012030-1 – 012030-15. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012030> (Scopus).

*Здобувачем розроблено методику проектування параметрами якості поверхневих шарів деталей пружних муфт.*

6. Tarelnyk V., Hlushkova D., Martsynkovskyy V., Dumanchuk M., Antoszewski B., Kundera Cz., Konoplianchenko Ie., Tarelnyk N., Hudkov S., Zahorulko A. Increasing fretting resistance of flexible element pack for rotary machine flexible coupling Part 1. Analysis of the reasons affecting fretting resistance of flexible elements for expansion couplings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741 P. 012048-1 – 012048-11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012048> (Scopus).

*Здобувачем виконано аналіз процесу фретингового зношування гнучких елементів пружної муфти.*

7. Tarellyk V., Dumanchuk M., Martsynkovskyy Vas., Mikulina M., Smolyarov G., Semernya O. Increasing fretting resistance of flexible element pack for rotary machine flexible coupling Part 2. The influence of coupled shafts misalignment on flexible coupling flexible elements stress-strain state. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741 P. 012049-1 – 012049-16. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012049> (Scopus).

*Здобувачем визначено вплив похибок співвісності з'єднаних валів на напружено-деформований стан пакету гнучких елементів пружної муфти.*

8. Tarellyk V., Dumanchuk M., Martsynkovskyy Vas., Dovzhyk M., Nahorni M., Vasilenko O., Bondarev S. Increasing fretting resistance of flexible element pack for rotary machine flexible coupling Part 3. The influence of dynamic loads on flexible coupling flexible element stress-strain state. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1741. P. 012050-1 – 012050-7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012050> (Scopus).

*Здобувачем визначено вплив зовнішнього навантаження на напружено-деформований стан пакету гнучких елементів пружної муфти*

9. Думанчук М.Ю. Новый способ повышения стойкости против фреттинг-коррозии пакетов гибких элементов упругих муфт. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. №1 (55). 2019. С. 24-27. (фахова).

10. Тарельник В.Б., Думанчук М.Ю., Тарельник Н.В., Мікуліна М.О. Нові технологічні методи захисту поверхонь деталей транспортних і підйомних машин від фреттинг-корозії. *Вісник ХНАДУ*, вип. 91, 2020. С.86-99. (фахова).

*Здобувачем розроблено методи формування якісних параметрів контактних поверхонь трибоспряжень транспортних машин.*

11. Думанчук М.Ю. Новый способ снижения фреттинг-коррозии крепильных деталей пружных муфт. *Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ»*. Луцьк: Вид-во ЛНТУ. 2020. №70. С. 43-49. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2020.70.6> (фахова).

12. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей: пат. 121343 Україна: МПК (2020.01) В23Н 1/06 (2006.01) В23Н 9/00 С23С 12/02 (2006.01): заявл. 29.05.2018; опубл. 12.05.2020. Бюл. № 9.

*Здобувачем запропоновано спосіб сульфолітування поверхонь сталевих деталей та досліджено вплив режимів обробки на якісні параметри поверхні.*

13. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей: пат. 121346 Україна: МПК (2020.01) В23Н 1/06 (2006.01), В23Н 9/00, С23С 12/02 (2006.01); заявл. 06.07.2018; опубл. 12.05.2020. Бюл. № 9.

*Здобувачем запропоновано спосіб сульфоцементзації поверхонь сталевих деталей та досліджено вплив режимів обробки на якісні параметри поверхні*

14. Узел торцевого импульсного ущільнення, що працює в криогенних середовищах (варіанти), і спосіб його виготовлення: пат. 120979 Україна: МПК (2020.01), F16J 15/34 (2006.01), В23Н 9/00, С23С 8/00. № а201803983; заявл. 12.04.2018; опубл. 10.03.2020. Бюл. № 5/2020.

*Здобувачем запропоновано спосіб зміцнення контактуючих поверхонь торцевого ущільнення*

15. Спосіб сульфоцементации стальных деталей: пат. 2707776 С1 (51) Российская Федерация: МПК, В23Н 1/00 (2006.01), В23Н 9/00 (2006.01); заявл. 25.07.2018; опубл. 29.11.2019. Бюл. № 34.

*Здобувачем запропоновано спосіб сульфоцементзації поверхонь сталевих деталей та досліджено вплив режимів обробки на якісні параметри поверхні*

16. Способ алитирования стальных деталей: пат. 2696616С1 Российская Федерация: МПК В23Н9/00 (2006-01-01); заявл. 04.06.2018; опубл. 06.08.2019. Бюл. № 22.

*Здобувачем запропоновано спосіб сульфоалітування поверхонь сталевих деталей та досліджено вплив режимів обробки на якісні параметри поверхні*

17. Узел торцевого импульсного уплотнения, работающий в криогенных средах, (варианты) и способ его изготовления: пат. 2696423С1 Российская Федерация: МПК F16J 15/34 (2006.01); заявл. 27.04.2018; опубл. 01.08.2019. Бюл. № 22.

*Здобувачем запропоновано спосіб зміцнення контактуючих поверхонь торцевого ущільнення*

18. Спосіб алітування сталевих деталей: пат. 130157 Україна: МПК (2018.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01). Заявл. 29.05.2018; опубл. 26.11.2018. Бюл. № 22.

*Здобувачем запропоновано спосіб сульфоалітування поверхонь сталевих деталей та досліджено вплив режимів обробки на якісні параметри поверхні*

19. Спосіб сульфоцементзації сталевих деталей: пат. 130866 Україна: МПК (2018.01), В23Н 1/00, В23Н 9/00, С23С 10/48 (2006.01), С23С 8/60 (2006.01). заявл. 06.07.2018; опубл. 26.12.2018. Бюл. №24.

*Здобувачем запропоновано спосіб сульфоцементзації поверхонь сталевих деталей та досліджено вплив режимів обробки на якісні параметри поверхні*

20. Спосіб захисту деталей пари тертя пружної муфти від фретинг-корозії: пат. 142811 Україна: МПК (2020.01), С23F 15/00, F01D 5/28 (2006.01); заявл. 05.02.2020; опубл. 25.06.2020. Бюл. № 12.

*Здобувачем запропоновано спосіб захисту поверхонь кріпильних деталей від фретинг-корозії та досліджено його ефективність*

21. Спосіб формування пакетів гнучких елементів пружних муфт: пат. 137273 Україна: МПК (2019.01), F16D 3/70 (2006/01), С10М 103/00 заявл. 15.04.2019; опубл. 10.10.2019. Бюл. № 19.

*Здобувачем запропоновано спосіб використання дисульфиду молибдену для захисту поверхонь гнучких елементів від фретинг-корозії та досліджено його ефективність*

### ***Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:***

22. Думанчук М.Ю. Анализ проблем эксплуатации упругих муфт. *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Могилев, 26–27 апр. 2018 г.)* [Электронный ресурс] / редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. Могилев: Белорусско-Российский университет, 2018. С.83-84. Режим доступа: <http://bru.by/content/science/conferences/materialsconferences>

23. Dumanchuk M. Technological methods of parts surface fretting corrosion protection. *XIV-й Міжнародний форум молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі»*. Збірник матеріалів форуму. Харків: ХНТУСГ. 2018. С. 178-182

24. Думанчук М.Ю. Виявлення перспективних напрямків вдосконалення пружних муфт. *Технології XXI века: 24-я межд. конф. (10-15 сентября 2018, г. Одесса)*. Суми: СНАУ. С. 161-162

25. Татьяначенко Б.Я., Думанчук М.Ю. Щодо дослідження напружено-деформованого стану гнучких елементів пружних муфт. *Сучасні технології в науці та освіті : матеріали Другої міжнародної науково-практичної конференції ; 5–7 березня*

2019 р., м. Сєвєродонецьк / Гол. ред. О.І. Рязанцев. Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2019. С. 160-161.

26. Думанчук М.Ю. Дослідження особливостей деформування пакету гнучких елементів пружної муфти. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Експлуатаційна та сервісна інженерія»*. Харків: ХНТУСГ. 2020. С. 103-104.

## АНОТАЦІЇ

**Думанчук Михайло Юрійович. Підвищення ефективності виготовлення деталей пружних муфт.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування (13 – механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню науково-практичної задачі захисту поверхонь деталей пружних муфт (ПМ) від фретингового зношування з метою підвищення довговічності виробу в цілому.

На підставі вивчення умов роботи та видів зношування поверхонь деталей ПМ та їх елементів, аналізу існуючих конструкційних і технологічних методів підвищення параметрів їх якості розроблено систему спрямованого вибору поверхневих шарів деталей ПМ з потрібними властивостями. Створено математичну модель їх фретингового зносу.

Проведений аналіз напружено-деформованого стану пакету гнучких елементів дозволив визначити основні чинники, що впливають на контактний тиск між пластинами, величини енергетичних втрат на тертя та деформацію пакета.

Запропонована процедура вибору раціональної технології забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей ПМ, що дозволяє створити мінімізований за критерієм собівартості технологічний процес нанесення функціональних покриттів.

Розроблені технологічні методи підвищення якості поверхневих шарів деталей трибоспряжень ПМ позитивно відрізняються екологічною безпекою, низькою собівартістю, енергозбереженням, що лягли в основу створення нової технології, яка практично реалізована в виробництво з річним економічним ефектом 477 тис. грн.

*Ключові слова:* технологічний процес, поверхневий шар, фретинг, фретингостійкість, пружна муфта, функціональне покриття, електроіскрове легування, зношування.

**Думанчук Михаил Юрьевич. Повышение эффективности изготовления деталей упругих муфт.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 - технология машиностроения (13 - механическая инженерия). - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2021.

Диссертация посвящена решению научно-практической задачи защиты поверхностей деталей упругих муфт (УМ) от фретингового износа с целью повышения долговечности изделия в целом.

Целью работы является повышение качества поверхностных слоев деталей упругой муфты и их элементов путем направленного выбора наиболее перспективных

технологических методов их формирования с учетом существующих аналогов, опыта промышленности и рекомендаций в отечественной и зарубежной литературе.

Объект исследования - технологические процессы формирования защитных покрытий поверхностных слоев стальных деталей машин от фреттинг-коррозии (Ф-К).

Предмет исследования - закономерности образования защитных покрытий поверхностных слоев стальных деталей ПМ, которые образуют конструктивно разные трибосопряжения, от Ф-К.

На основании изучения условий работы и видов износа поверхностей деталей УМ и их элементов, анализа существующих конструкционных и технологических методов повышения параметров их качества разработана система направленного выбора технологии формирования поверхностных слоев деталей УМ с нужными свойствами. Создана математическая модель их фреттингового износа.

Проведенный анализ напряженно-деформированного состояния пакета гибких элементов позволил определить основные факторы, влияющие на контактное давление между пластинами, величины энергетических потерь на трение и деформацию пакета.

Исследовано влияние амплитуды и частоты деформации ГЭ, на Ф-К. Для повышения устойчивости ГЭ от Ф-К предложен новый способ: перед сборкой на поверхности соединенных пластин наносят МСМ, который состоит из парафина, порошков меди и дисульфида молибдена. Установлено, что наиболее рациональным процентным содержанием металлоплакующих присадок является 5-25 весовых процентов.

С целью реализации способа защиты прессового соединения от Ф-К, на контактирующие поверхности деталей сопряжения «полумуфта-вал» предложено поэтапное нанесение комбинированного электроискрового покрытия.

Проведено исследование влияния эпиламирования на фреттингостойкость крепежных деталей УМ.

Определено влияние способов повышения качества поверхностей деталей на механические свойства их материалов. Выполнены расчеты критериев уравнения износа ГЭ упругой муфты при Ф-К. Полученные результаты позволяют прогнозировать их долговечность в условиях промышленной эксплуатации.

Предложенная процедура выбора рациональной технологии обеспечения необходимых эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей УМ, что позволяет создать минимизирован по критерию себестоимости технологический процесс нанесения функциональных покрытий.

Разработаны технологические методы повышения качества поверхностных слоев деталей трибосопряжений УМ отличаются экологической безопасностью, низкой себестоимостью, энергосбережением, которые легли в основу создания новой технологии, которая практически реализована в производство с годовым экономическим эффектом 477 тыс. грн.

*Ключевые слова:* технологический процесс, поверхностный слой, фреттинг, фреттингостойкость, упругая муфта, функциональное покрытие, электроискровое легирование, износ.

**Dumanchuk M. Y. Improving the efficiency of manufacturing parts of elastic couplings.** Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in specialty 05.02.08 - Manufacturing Engineering (13 - mechanical engineering). - National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2021.

The dissertation is devoted to the scientific and practical problem decision of elastic couplings (EC) parts surfaces protection against fretting wear for the purpose of a product durability increase as a whole.

Based on the study of operating conditions and of parts surfaces and elements EC wear types, analysis of existing structural and technological methods to improve their quality parameters, developed a directed choice system of EC parts surface layers with the desired properties. A mathematical model of their fretting wear is created.

The analysis of the stress-strain state of the flexible elements set allowed to determine the main factors influencing the contact pressure between the plates, the magnitude of energy losses due to friction and deformation of the package.

The procedure of rational technology choice of the necessary maintenance properties providing of EC parts working surfaces is offered. That allows to create the technological process of drawing functional coverings minimized on a cost criterion.

Developed technological methods to improve the quality of EC tribocouples parts surface layers. That positively differ in environmental safety, low cost, energy saving, which formed the basis for the creation of new technology, which is practically implemented in production with an annual economic effect of 477000 UAH.

*Key words:* technological process, surface layer, fretting, fretting resistance, elastic coupling, functional covering, electrospark alloying, wear.



Підписано до друку 06.04.2021 р.  
Формат 60×84/16. Обл.-вид. арк. 0,8. Ум. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим.

Видавець і виготовлювач  
Сумський національний аграрний університет  
вул. Г. Кондратьєва, 160, м. Суми, 40021