

СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Думанчук Михайло Юрійович

УДК 621.9.048.4; 621.825.5/.7

## ДИСЕРТАЦІЯ

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПРУЖНИХ МУФТ

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування  
13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 М. Ю. Думанчук

Науковий керівник  
Тарельник В'ячеслав Борисович  
доктор технічних наук, професор

*Звернувшись до  
змісту з першого  
примірника  
дисертації  
вчений секретар  
проф. Думанчук  
16.02.21*



## АНОТАЦІЯ

**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.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи. Визначено мету і задачі 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 фретинг-корозії (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 сталених деталей машин від Ф-К.

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

**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.

**У другому розділі** 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.

Показано, що термін експлуатації ПМ лімітується довговічністю пакета ГЕ, яка в свою чергу визначається фретингостійкістю (Ф-С) окремих пластин. Встановлено три стадії руйнування ГЕ. Створено математичну модель їх фретингового зносу.

**В третьому розділі** виконано аналіз напружено-деформованого стану ГЕ пружної муфти. Проведено оцінку сили тиску між пластинами і відносні зміщення контактуючих точок при передачі муфтою навантаження, які є однією з причин Ф-К. 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. Встановлено, що основними чинниками, що зумовлюють знос пластин внаслідок тертя, є згинаючі сили, викликані неточністю

з'єднаних муфтою валів і поздовжньо-поперечним згином від колової сили.

На підставі проведених досліджень сформульовані рекомендації щодо підвищення фретингостійкості ГЕ.

**У четвертому розділі** приведені результати дослідження параметрів якості деталей ПМ. Досліджено вплив амплітуди й частоти деформації ГЕ, на Ф-К. Для підвищення стійкості ГЕ від Ф-К запропоновано новий спосіб. Його особливістю є те, що перед складанням на поверхні сполучених пластин наносять МММ, який складається з парафіну, порошоків міді та дисульфиду молібдену. Встановлено, що найбільш раціональним процентним вмістом металоплакуючих присадок, є 5-25 вагових відсотків.

З метою реалізації способу захисту пресового з'єднання від Ф-К, на контактуючі поверхні деталей сполучення «півмуфта-вал» запропоновано поетапне нанесення комбінованого електроіскрового покриття.

Проведено дослідження впливу епіламування на фретингостійкість кріпильних деталей ПМ.

**У п'ятому розділі** наведено дані про промислове впровадження результатів дослідження. Визначено вплив способів підвищення якості поверхонь деталей на механічні властивості їх матеріалів. Виконано розрахунки критеріїв рівняння зношування ГЕ пружної муфти при Ф-К. Отримані результати дозволяють прогнозувати їх довговічність в умовах промислової експлуатації.

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.

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Вперше розроблена система цілеспрямованого вибору технології виготовлення ПМ роторних машин, що дозволяє формувати контактуючі поверхні деталей трибоспрязень: «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 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 і їх елементів, 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.

### **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.

2. T 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).

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).

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).

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).

6. Tarelnyk V., Hlushkova D., Martsynkovskyy V., Dumanchuk M.,

Antoszewski B., Kundera Cz., Konoplianchenko Ie., Tarellyk 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).

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).

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).

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.

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.

11. Думанчук М.Ю. Новый способ снижения фреттинг-корозии 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>.

12. Спосіб обробки поверхонь сталевих деталей: пат. 121343 Україна: МПК (2020.01) B23H 1/06 (2006.01) B23H 9/00 C23C 12/02 (2006.01): заявл.

29.05.2018; опубл. 12.05.2020. Бюл. № 9.

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.

14. Вузол торцевого імпульсного 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.

15. Способ 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.

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.

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.

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.

19. Спосіб сульфоцементації 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.

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.

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.



***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. *Технологии XXI века: 24-я между. 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.

## ABSTRACT

**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.

The introduction substantiates the relevance of the topic of work. The purpose and tasks of research are defined.

The **aim** of the work is to improve the quality of surface layers of elastic coupling parts and their elements by directing the most promising technological methods of their formation taking into account existing analogues, industry experience and recommendations in domestic and foreign literature.

To achieve this goal it is necessary to solve the following **tasks**:

- to develop a system of directed choice of technology that provides the necessary quality parameters of the surface layers of EC parts;

- to analyze the existing domestic and foreign methods of protection of machine parts from wear and on its basis to improve methods of improving the quality of the surfaces of the connection "half-coupling-shaft", flexible elements and fasteners from fretting corrosion (FC);

- to analyze the stress-strain state of the flexible elements of the elastic coupling, in order to obtain their geometric and deformation parameters of the deformation center;

- to develop a procedure for selecting a rational technology to ensure the necessary performance properties of the working surfaces of EC parts, which allows you to create a minimized cost criterion, taking into account environmental safety, the technological process of applying functional coatings.

- to calculate the economic efficiency of the developed technology to increase the durability of EC and implement it in production.

The *object of research* - technological processes of formation of protective coatings of surface layers of steel parts of machines from FC.

The *subject of research* is the regularities of formation of protective coatings of surface layers of steel parts of EC, which form structurally different tribocouples, from FC.

In the **first section** the analysis of EC parts wear resistance increase problems is executed. General information about elastic couplings is given, their design features, areas of application, materials and types of fractures are considered. Technological methods of the EC parts working surfaces wear resistance increasing are considered.

In the **second section** developed the system and criteria of the EC parts surfaces necessary quality maintenance technology directed choice by the analysis and synthesis of existing analogues, experience of the industry and recommendations in domestic and foreign literature were.

It is shown that the service life of EC is limited by the durability of the flexible elements (FE) set, which in turn is determined by the fretting resistance (FR) of individual plates. Three stages of FE destruction have been identified. A mathematical model of their fretting wear is created.

In the **third section**, the analysis of the stress-strain state of the FE of the elastic coupling is performed. The strength of the pressure between the plates and the relative displacements of the contact points during the transfer of the clutch load, which is one of the causes of FC. The analysis of the stress-strain state of the flexible elements set is 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 sets. It is established that the main factors that cause the wear of the plates due to friction are the bending forces caused by the inaccuracy of the shafts connected by the coupling and the longitudinal-transverse bending of the circular force.

On the basis of the conducted researches recommendations on increase of fretting resistance of FE are formulated.

The **fourth section** presents the results of the EC parts quality parameters study. The influence of the amplitude and frequency of FE deformation on FC was investigated. A new method has been proposed to increase the stability of FE from FC. Its peculiarity is that before assembly on the surface of the connected plates is applied MMM, which consists of paraffin, copper powders and molybdenum disulfide. It is established that the most rational percentage of metal-plating additives is 5-25 weight percent.

In order to implement the method of protection of the press connection from FC, on the contact surfaces of the parts of the connection "half-coupling-shaft" proposed a step-by-step application of a combined electrospark coating.

The influence of epilation on the fretting resistance of EC fasteners has been studied.

The **fifth section** provides data on the industrial implementation of the study results. The influence of ways to improve the quality of surfaces of parts on the mechanical properties of their materials is determined. Calculations of the criteria of the FE wear equation of the elastic coupling at FC are performed. The obtained results allow to predict their durability in the conditions of industrial operation.

Offered the procedure of rational maintenance technology choice of necessary operational properties of EC parts working surfaces, that allows to create the technological process of drawing functional coverings minimized on a cost criterion.

The developed technological methods of the EC tribocouples parts surface layers quality improving are positively distinguished by environmental safety, low cost, energy saving, which formed the basis for the creation of new technology.

**Scientific novelty** of the obtained results:

1. For the first time is developed the system of rotary machines EC manufacturing technology directed choice, that allows to form three-couplings parts contact surfaces: "shaft-half coupling", flexible elements and fastening parts with the set operational properties.

2. For the first time a physically substantiated mathematical model (wear equation) of the wear process of the FE of the elastic coupling at FC is proposed, which allows to determine the wear expressed by the change of surface roughness by the work of friction.

3. The method of determining the constants of the wear equation at FC friction surfaces of FE, which can serve as criteria for choosing rational technologies to improve the quality of their surface layers, was further developed.

4. For the first time on the basis of studies of the stress-strain state of flexible elements of the coupling type MSK, solved the problem of their longitudinal-transverse bending, as well as a comparative assessment of their deflections from longitudinal-transverse bending and force due to misalignment of connected shafts.

The practical significance of the obtained results lies in the development of technologies to improve the quality of the surface layers of the parts of elastic couplings and their elements, which is practically implemented in production with an annual economic effect of 477 thousand UAH

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

## **LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT ON THE TOPIC OF THE THESIS**

*List of publications in which the main scientific results of the thesis are published:*

1. Martsynkovskiy V.S., Tarelnyk V.B. ta in. Problemy bezpechnoi ekspluatatsii kompresornoho ta nasosnoho obladnannia v suchasni promyslovosti: [kolektyvna monohrafiia] / za red. V. B. Tarelnyka, Ye. V. Konoplianchenka. Sumy: FOP Lytovchenko Ye.B., 2020. 410 s.

2. T 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).

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).

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).

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).

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).

7. Tarelnyk 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).

8. Tarelnyk 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).

9. Dumanchuk M.Yu. Novyy sposob povysheniya stoykosti protiv fretting-korrozii paketov gibkikh elementov uprugikh muft. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*. №1 (55). 2019. S. 24-27.

10. Tarelnyk V.B., Dumanchuk M.Iu., Tarelnyk N.V., Mikulina M.O. Novi tekhnolohichni metody zakhystu poverkhon detalei transportnykh i pidiomnykh mashyn vid fretynh-korozii. *Visnyk KhNADU*, vyp. 91, 2020. S.86-99.

11. Dumanchuk M.Iu. Novyi sposib znyzhennia fretynh-korozii kripylnykh detalei pruzhnykh muft. *Mizhvuzivskiyi zbirnyk «NAUKOVI NOTATKY»*. Lutsk: Vyd-vo LNTU. 2020. №70. S. 43-49. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2020.70.6>.

12. Sposib obrobky poverkhon stalevykh detalei: pat. 121343 Ukraina: MPK (2020.01) B23H 1/06 (2006.01) B23H 9/00 C23C 12/02 (2006.01): zaiavl. 29.05.2018; opubl. 12.05.2020. Biul. № 9.

13. Sposib obrobky poverkhon stalevykh detalei: pat. 121346 Ukraina: MPK (2020.01) B23H 1/06 (2006.01), B23H 9/00, C23C 12/02 (2006.01); zaiavl. 06.07.2018; opubl. 12.05.2020. Biul. № 9.

14. Vuzol tortsevoho impulsnoho ushchilnennia, shcho pratsiuie v kriohennykh seredovyschakh (varianty), i sposib yoho vyhotovlennia: pat. 120979

Ukraina: MPK (2020.01), F16J 15/34 (2006.01), B23H 9/00, C23C 8/00. № a201803983; zaiavl. 12.04.2018; opubl. 10.03.2020. Biul. № 5/2020.

15. Sposob sul'fotsementatsii stal'nykh detaley: pat. 2707776 C1 (51) Rossiyskaya Federatsiya: MPK, B23H 1/00 (2006.01), B23H 9/00 (2006.01); zayavl. 25.07.2018; opubl. 29.11.2019. Byul. № 34.

16. Sposob alitirovaniya stal'nykh detaley: pat. 2696616C1 Rossiyskaya Federatsiya: MPK B23H9/00 (2006-01-01); zayavl. 04.06.2018; opubl. 06.08.2019. Byul. № 22.

17. Uzel tortsevogo impul'snogo uplotneniya, rabotayushchiy v kriogennykh sredakh, (varianty) i sposob ego izgotovleniya: pat. 2696423C1 Rossiyskaya Federatsiya: MPK F16J 15/34 (2006.01); zayavl. 27.04.2018; opubl. 01.08.2019. Byul. № 22.

18. Sposib alituvannia stalevykh detalei: pat. 130157 Ukraina: MPK (2018.01), B23H 1/00, B23H 9/00, S23S 10/48 (2006.01), S23S 8/60 (2006.01). Zaiavl. 29.05.2018; opubl. 26.11.2018. Biul. № 22.

19. Sposib sulfotsementatsii stalevykh detalei: pat. 130866 Ukraina: MPK (2018.01), B23H 1/00, B23H 9/00, S23S 10/48 (2006.01), S23S 8/60 (2006.01). zaiavl. 06.07.2018; opubl. 26.12.2018. Biul. №24.

20. Sposib zakhystu detalei pary tertia pruzhnoi mufty vid fretynh-korozii: pat. 142811 Ukraina: MPK (2020.01), C23F 15/00, F01D 5/28 (2006.01); zaiavl. 05.02.2020; opubl. 25.06.2020. Biul. № 12.

21. Sposib formuvannia paketiv hnuchkykh elementiv pruzhnykh muft: pat. 137273 Ukraina: MPK (2019.01), F16D 3/70 (2006/01), C10M 103/00 zaiavl. 15.04.2019; opubl. 10.10.2019. Biul. № 19.

***Scientific works that testify to the approbation of the dissertation materials:***

22. Dumanchuk M.Yu. Analiz problem ekspluatatsii uprugikh muft. Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Mogilev, 26–27 apr. 2018 g.) [Elektronnyy resurs] / redkol.: I. S. Sazonov (gl. red.) [i dr.]. Mogilev: Belorussko-Rossiyskiy universitet,



2018. S.83-84. Rezhim dostupa:  
<http://bru.by/content/science/conferences/materialsconferences>

23. Dumanchuk M. Technological methods of parts surface fretting corrosion protection. *XIV-y Mizhnarodnyi forum molodi «Molod i silskohospodarska tekhnika u XXI storichchi»*. Zbirnyk materialiv forumu. Kharkiv: KhNTUSH. 2018. S. 178-182

24. Dumanchuk M.Iu. Vyiavlennia perspektyvnykh napriamkiv vdoskonalennia pruzhnykh muft. *Tekhnolohyy XXI veka: 24-ya mezhd. konf. (10-15 sentiabria 2018, h. Odessa)*. Sumy: SNAU. S.161-162

25. Tatianchenko B.Ia., Dumanchuk M.Iu. Shchodo doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu hnuchkykh elementiv pruzhnykh muft. *Suchasni tekhnolohii v nautsi ta osviti : materialy Druhoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii ; 5–7 bereznia 2019 r., m. Sievierodonetsk / Hol. red. O.I. Riazantsev*. Sievierodonetsk: vyd-vo SNU im. V. Dalia, 2019. C.160-161.

26. Dumanchuk M.Iu. Doslidzhennia osoblyvostei deformuvannia paketu hnuchkykh elementiv pruzhnoi mufty. *Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh «Ekspluatatsiina ta servisna inzheneriia»*. Kharkiv: KhNTUSH. 2020. S. 103-104.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	11
1.1 Загальні відомості про пружні муфти .....	11
1.2 Умови роботи і види руйнування деталей пружних муфт .....	16
1.3 Аналіз існуючих конструкційних і технологічних способів підвищення якості деталей пружних муфт .....	21
1.4. Висновки по розділу 1 .....	34
1.5 Мета роботи і задачі дослідження.....	35
РОЗДІЛ 2 СПРЯМОВАНИЙ ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ПРУЖНИХ МУФТ .....	37
2.1 Управління параметрами якості поверхневих шарів деталей пружних муфт на етапах життєвого циклу .....	37
2.2 Система керування якістю поверхневих шарів деталей пружної муфти ..	40
2.3 Дослідження та аналіз причин пошкодження гнучких елементів пружних муфт .....	46
2.4 Формування математичної моделі фретингового зносу поверхонь деталей пружної муфти.....	53
2.5 Висновки по розділу 2 .....	58
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГНУЧКИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРУЖНОЇ МУФТИ .....	61
3.1 Вплив неспіввісності валів, що з'єднуються, на напружено-деформований стан ГЕ.....	61
3.2 Деформований стан окремої пластини. Робота сил тертя і деформації. ...	77
3.3. Вплив динамічних навантажень на напружено-деформований стан гнучких елементів пружної муфти.....	87
3.4 Висновки по розділу 3 .....	96
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ ПРУЖНОЇ МУФТИ .....	98

4.1	Методика дослідження .....	98
4.2	Результати дослідження впливу експлуатаційних параметрів ПМ на інтенсивність Ф-К гнучких елементів.....	107
4.3	Результати впливу захисних покриттів на Ф-К гнучких елементів.....	111
4.4	Технологічне забезпечення захисту контактуючих поверхонь з'єднання «півмуфта-вал» від фретингового зносу .....	115
4.5	Результати дослідження способу зниження Ф-К кріпильних деталей пружних муфт.....	124
4.6	Висновки по 4-му розділу .....	128
<b>РОЗДІЛ 5 ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ .....</b>		
5.1	Результати дослідження впливу способів нанесення КЕП на механічні властивості сталі.....	129
5.2	Прогнозування наробітку ГЕ на знос.....	130
5.3	Процедура вибору раціональної технології забезпечення якості поверхневих шарів деталей при виготовленні ПМ.....	136
5.4	Визначення економічної ефективності розробленої технології.....	141
5.5	Висновки по розділу 5 .....	149
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ.....</b>		
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>		
<b>ДОДАТКИ.....</b>		
Додаток А Список публікацій за темою дисертації .....		
Додаток Б Документи про охорону прав на винаходи та корисні моделі за темою дисертації .....		
Додаток В Акти впровадження результатів дисертаційної роботи .....		