

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Волошина Людмила Володимирівна

УДК [62-728+621.794.6]:621.43

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ МАСЛЯНИХ ШЕСТЕРЕННИХ**  
**НАСОСІВ ТРАКТОРНИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ**

Спеціальність 05.02.01 – «Матеріалознавство»

(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.



\_\_\_\_\_/Л.В.Волошина/

Науковий керівник Тимофеева Ларіса Андріївна, доктор технічних наук,  
професор, Лауреат державної премії України

Харків – 2021

## АНОТАЦІЯ

**Волошина Л.В.** Підвищення зносостійкості масляних шестеренних насосів тракторних дизельних двигунів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 «Матеріалознавство» (132 Матеріалознавство) – Український державний університет залізничного транспорту, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

У дисертації вирішено наукове завдання щодо підвищення зносостійкості та працездатності деталей масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згорання за рахунок розроблення інноваційної технології формування багат шарового покриття в одному технологічному циклі.

Метою дисертаційного дослідження є підвищення експлуатаційних властивостей деталей масляних шестеренних насосів за рахунок розробки способу нанесення покриття з заданими властивостями.

Завдання дослідження: на основі літературних джерел інформації, огляду патентів і авторських свідоцтв провести аналіз ефективних методів нанесення покриттів, які використовують для покращення триботехнічних властивостей виробів; провести аналіз механізму зносу, пошкодження матеріалу деталей масляних шестеренних насосів при їх експлуатації; розробити спосіб нанесення покриттів на деталі масляного шестеренного насоса, що забезпечить задану працездатність і зносостійкість; визначити особливості формування окислених покриттів і оцінити їх вплив на структуру і зносостійкість; визначити раціональні параметри технологічного процесу окислення, а саме час витримки, концентрацію насичуючого середовища і температуру, які забезпечать підвищення зносостійкості деталей масляного шестеренного насоса; визначити вплив технологічних параметрів окислення на експлуатаційні властивості, а саме

зносостійкість та працездатність; провести експлуатаційні випробування технологічного процесу окислення і оцінити його економічну ефективність.

Об'єкт дослідження - процес формування покриттів з заданими експлуатаційними властивостями.

Предмет дослідження - підвищення зносостійкості деталей масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згоряння.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження, визначені об'єкт та предмет дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність, надано загальну характеристику роботи.

Перший розділ присвячено аналізу умов роботи масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згоряння, виконаний аналітичний огляд стану питання і обґрунтовано вибір напрямку досліджень.

Розглянуто основні недоліки та переваги пропонованих технічних рішень і вибрано найбільш раціональний та науково обґрунтований метод нанесення покриттів, який дозволить підвищити триботехнічні характеристики пар тертя та збільшити ресурс масляного шестеренного насоса. Обґрунтовано, що найбільш відповідає поставленим завданням метод нанесення зносостійкого шару з водних розчинів солей, який дозволяє підвищити зносостійкість, припрацьовуваність деталей, зменшити коефіцієнт тертя, покращити адгезію покриття.

У другому розділі виконаний аналіз властивостей матеріалів, які використовуються для виготовлення деталей масляних шестеренних насосів. Розроблена програма експериментальних досліджень та системний підхід до вибору технології нанесення покриттів на деталі масляних шестеренних насосів. Виконана розробка способу нанесення покриття. Описано обладнання, яке застосовувалося для експериментів, та оптимальні методики досліджень.

У третьому розділі представлені результати розробки теоретичних основ удосконалення методу нанесення покриття. На основі аналізу літературних джерел обрано хімічні елементи, які найбільш позитивно впливають на підвищення експлуатаційних властивостей пар тертя, обґрунтовано утворення покриття з заданими властивостями.

Встановлено, що основними параметрами технологічного процесу нанесення покриттів із водного розчину солей є температура обробки деталей, концентрація солі у водному розчині та час витримки в насичуючому середовищі. Від цих параметрів залежить формування поверхневого шару, а також його триботехнічні властивості.

Представлені результати оптимізації параметрів технологічного процесу, що дозволило визначити діапазон значень параметрів технологічного процесу, за рахунок зміни яких можливо досягти найкращих експлуатаційних та триботехнічних властивостей, а саме утворення оптимальної товщини покриття, мінімальних значень зносу, оптимального часу приробітки, витримки максимального навантаження до утворення задирів. Представлені результати металографічних досліджень утворених покриттів.

У четвертому розділі представлено результати досліджень властивостей покриття, утвореного за новою технологією, в лабораторних умовах. Проведений аналіз впливу одержаних в результаті обробки покриттів на знос, задиростійкість, час приробітки, коефіцієнт тертя. За результатами лабораторних досліджень вибрані оптимальні параметри технологічного процесу формування покриттів за впливом на триботехнічні властивості пар тертя.

П'ятий розділ присвячено висвітленню результатів експлуатаційних іспитів масляних шестеренних насосів після нанесення покриття. Проведено техніко-економічне обґрунтування запропонованого технологічного процесу формування покриттів з заданими властивостями на деталях масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згорання.

Вперше: розроблено інноваційний технологічний процес формування покриттів з використанням водного розчину алюмохромфосфатного зв'язуючого, що дозволить підвищити зносостійкість пар тертя; визначено залежність між величиною зносу і технологічними параметрами нанесення покриттів на чавунних та сталевих деталях: температурою, часом витримки і концентрацією розчину; визначено залежність впливу технологічних параметрів на товщину покриття; розроблено комплексну технологію одночасного формування багат шарового покриття, що базується на послідовному формуванні перехідного шару покриття з різним ступенем легованості на сталевих та чавунних деталях масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згорання.

Удосконалено: технологічний процес виготовлення деталей масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згорання за рахунок розробленої інноваційної технології, що забезпечить підвищення зносостійкості пар тертя масляних шестеренних насосів та їх працездатності.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблена технологія нанесення покриттів, яка складається з окислення у водному розчині алюмохромфосфатного зв'язуючого деталей масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згорання, що забезпечує підвищення зносостійкості та працездатності:

- визначені раціональні параметри розробленої технології, зокрема температуру нагріву деталей, концентрацію насичуючого середовища та часу витримки у цьому середовищі;

- проведено експлуатаційні випробування, які довели, що використання нової технології нанесення покриттів на деталі масляних шестеренних насосів забезпечує їх працездатність протягом усього міжремонтного періоду двигуна;

- результати експлуатаційних випробувань довели, що зносостійкість деталей з покриттям перевищує майже в 2,5 - 3 рази зносостійкість деталей за старою технологією.

За темою дисертації опубліковано 22 наукових праці, в тому числі: 6 статей у фахових наукових виданнях України; 1 стаття що включена до міжнародних наукометричних баз, а саме SCOPUS, 11 праць апробаційного характеру; 3 додаткових; розробка захищена 1 патентом України на винахід.

Результати теоретичних і практичних досліджень впроваджені у навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту при вивченні таких дисциплін, як «Матеріалознавство», «Технологія конструкційних матеріалів», «Матеріалознавство та технологія матеріалів», «Ресурсозберігаючі технології», «Інноваційні ресурсозберігаючі технології», «Організація технологічних процесів».

**Ключові слова:** масляний шестеренний насос, знос, зносостійкість, мікроструктура, триботехнічні властивості, зміцнення, окислення, покриття з заданими експлуатаційними властивостями, параметри технологічного процесу, насичуюче середовище.

### Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Тимофеева Л.А., Проскурина Л.В., Тимофеев С.С. Повышение эксплуатационных характеристик деталей масляного насоса двигателя СМД 60. *Збірник наукових праць НТУ «ХП»*. Високі технології в машинобудуванні. Харків: НТУ «ХП». 2001. №1(4). С. 263 – 265.

2. Патент України на винахід №45841А: МПК В22F3/24. Спосіб хіміко-термічної обробки деталей із металів та сплавів / Тимофеева Л.А., Проскурина Л.В., Тимофеев С.С., Федченко І.І.. Заявник та патентовласник УкрДАЗТ. №2001075170; заявл.19.07.2001; опубл. 15.04.2002, Бюл.№4.

3. Волошина Л.В. Удосконалення технологічного процесу нанесення зносостійких шарів на поверхні пар тертя. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ: Довговічність, надійність, працездатність деталей рухомого*

складу залізниць та спеціальної залізничної техніки. Харків : УкрДАЗТ. 2004. Випуск 61. С.100 – 105.

4. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Підвищення зносостійкості пар тертя нанесенням покриттів із водних розчинів солей. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, Харків : УкрДАЗТ. 2011. Випуск 127. С.131 – 136.

5. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Визначення технологічних параметрів процесу обробки в залежності від експлуатаційних властивостей покриття. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ «ХП». 2012. №66. С. 20 – 23.

6. Волошина Л.В. Визначення та оптимізація параметрів нової технології залежно від заданих властивостей покриття. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, Харків : УкрДАЗТ. 2012. Випуск 134. С. 224 – 229.

7. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В., Гордієнко П.М. Аналіз технологічних параметрів процесу нанесення зносостійкого покриття. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, Харків : УкрДУЗТ. 2017. Випуск 170. С.13 – 19. (НБД Index Copernicus).

Публікації у виданнях інших держав:

8. Тимофеева Л.А., Проскурина Л.В., Остапчук В.Н., Тимофеев С.С. Управление условиями антифрикционности узлов трения. *Журнал: Тяжелое машиностроение*, 2002. №3. С.27 – 28. (індексується в базі Scopus)

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Проскурина Л.В., Тимофеева Л.А. Повышение надежности работы масляных шестеренных насосов. *Инженерия поверхности и ренновация изделий. Материалы 3-й Международной научно-технической конференции*. Киев. 2003. С.201 – 202.

10. Проскурина Л.В. Влияние технологических параметров химико-термической обработки на износостойкость пары трения шестерня - корпус масляного насоса. *Современные проблемы подготовки производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении. Материалы 3-го Международного научно-технического семинара*. Киев. 2003. С.126 – 128.

11. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Підвищення якості пар тертя нанесенням зносостійких покриттів. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика. Материалы 11-й Международной научно-практической конференции*. Киев. 2011. С.151 – 153.

12. Тимофеева Л.А., Федченко І.І., Волошина Л.В. Дослідження впливу поверхневого шару на триботехнічні властивості залізобуглецевих сплавів. *Матеріали 12-ї міжнародної науково-технічної конференції "Інженерія поверхні і реновація виробів" 04-08 червня 2012р.*, м. Ялта, Крим. Київ : АТМ України, 2012. С. 294 – 297.

13. Волошина Л. В. Ресурсозберігаюча технологія нанесення покриттів. *«Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. Тези доповідей 75-ї міжнародної науково-технічної конференції. Збірник наукових праць УкрДАЗТ. Харків : УкрДАЗТ, 2013, Вип. 136, С. 349.

14. Волошина Л. В. Результати металографічного дослідження покриття із водного розчину алюмохромфосфатної солі. *Тези доп. 79-та міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. Харків, 25-27 квіт. 2017р. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Харків : УкрДУЗТ, 2017, Вип. 169 (додаток), С. 138 – 140.

15. Волошина Л. В. До питання дослідження впливу складу покриття на триботехнічні властивості залізобуглецевих сплавів. *Тези доповідей 80-ї міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Харків : УкрДУЗТ, 2018, Вип. 177, С. 93.

16. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Підвищення якості, працездатності масляних шестеренних насосів ДВС. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 18-й Международной научно-практической конференции, 03–07 сентября 2018 г., г. Одесса*. Киев : АТМ Украины, 2018. С.108 – 110.



17. Волошина Л.В. Ресурсозберігаюча технологія формування зносостійких покриттів на деталях рухомого складу. *Тези доповідей II-ї Всеукраїнської конференції „Вагони нового покоління: із XX в XXI сторіччя” Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. Харків : УкрДУЗТ, 2019, Вип. 184 (додаток), С. 42 – 43.

18. Комарова Г.Л., Волошина Л.В. Вплив параметрів обробки на якість формування захисних покриттів. *“Інженерія поверхні і реновація виробів” Матеріали 19-ї міжнародної науково-технічної конференції (20-24 травня 2019р., м. Свалява, Закарпатська обл.)* Київ : АТМ України, 2019, С. 75 – 77.

19. Тимофєєва Л.А., Волошина Л.В. Комплексні дослідження при розробці технологічного процесу підвищення експлуатаційних властивостей деталей масляного шестеренного насосу. *„Інтелектуальні транспортні технології” Матеріали I-ї міжнародної науково-технічної конференції, 24-30 січня 2020р.* Трускавець-Харків : УкрДУЗТ. 2020. С.116 – 117.

Додаткові праці, які відображають результати дисертації:

20. Тимофєєв С.С., Волошина Л.В., Воскобойников Д.Г. Формування покриттів багатофункціонального призначення. *Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Матеріали 19-го Международного научно-технического семинара, 18–22 февраля 2019г. г. Кошице, Slovak Republic*. Киев : АТМ Украины, 2019. С. 208 – 210.

21. Тимофєєва Л.А., Устенко О.В., Цап О.І., Волошина Л.В. Підвищення експлуатаційних показників фрикційних клинів шляхом формування покриттів зі спеціальними властивостями. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, Харків : УкрДУЗТ. 2019. Випуск 185. С.88 – 95. (НБД Index Copernicus)

22. Волошина Л.В., Цап О.І. Дослідження впливу захисних покриттів на експлуатаційні показники фрикційних клинів гасників коливань візків вантажних вагонів. *Качество, стандартизация, контроль: теория и*

*практика: Матеріали 20-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 07–11 вересня 2020 р., м. Одеса. Київ : АТМ України, 2020. С.28 – 30.*

## ABSTRACT

**Voloshyna L.V.** Higher wear resistance of an oil gear pump for tractor diesel engines.– Qualifying scientific work as manuscript.

The thesis for Candidate Degree in Engineering Science of Specialty 05.02.01 “Material Science” (132 Material Science) – Ukrainian State University of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The thesis deals with the scientific problem of increasing wear resistance and efficiency of the components of an oil gear pump of internal combustion engines by means of an innovative multilayer coating forming technology in a single cycle.

The purpose of the thesis is to improve the operational properties of the components of an oil gear pump by developing the technique of applying the coating with specified properties.

The research task is to analyze efficient methods for applying coatings which can improve the tribotechnical properties of products presented in literary sources, patents, and copyrights; to analyze the mechanism of wear and material damage in the components of an oil gear pump in operation; to develop the technique of applying coatings on the components of an oil gear pump, which can provide the specified performance and wear resistance; to determine the special features of the oxy-alloying coating formation and to assess their impact on the structure and wear resistance; to determine the rational parameters of the technological oxy-alloying process, namely, aging time, saturation environment concentration, and temperature increasing the wear resistance of the oil gear pump components; to determine the effect of technological oxy-alloying parameters on the performance properties, such as, wear resistance and performance capability;

and to carry out operating tests on the oxy-alloying process and to evaluate its efficiency.

The object of the study is the formation of coatings with specified operational properties.

The subject matter of the study is a higher wear resistance of the components of an oil gear pump of internal combustion engines.

The Introduction section substantiates the relevance of the topic, describes the purpose and task of the research, defines the object and subject matter of the research, presents the scientific novelty and practical value, and provides the general description of the research.

Section One deals with the analysis of the operating conditions of an oil gear pump of internal combustion engines, the analytical overview of the issue under study, and the substantiation of the choice of the area of research.

The research reveals the main advantages and disadvantages of the proposed technical solutions, and describes the choice of the most rational and scientifically grounded technique for applying coatings, which can improve the tribotechnical characteristics of friction pairs and increase the resource of an oil gear pump. It was proved that the best technique is the application of a wear-resistance coating of aqueous solutions of salts, as it can increase the wear resistance and running-in of the components, reduce the friction coefficient, and improve the coating adhesion.

Section Two provides an analysis of properties of the materials used for producing the oil gear pump components. It presents the experimental research program and the systematic approach to a selection of the coating application technology for the oil gear pump components. The research also deals with the development of the coating application technique. The section describes the equipment used for the experiments, and the optimal research techniques.

Section Three presents the theoretical foundation of the improved coating application technique. The analysis of literary sources made it possible to select the chemical elements which most positively affect the operational properties of

friction pairs, and to substantiate the formation of coatings with the specified properties.

It was found that the main parameters of the technological process of application of aqueous salt solution coatings are treatment temperature, soil concentration, and aging time in the saturation environment. These parameters influence the formation of the surface coating and its tribotechnical properties.

The optimization of the technological parameters made it possible to determine the range of values, a change in which can improve the operational and tribotechnical properties, namely, optimal coating thickness, maximum wear resistance, optimal running-in time, and possibility to bear the maximum loading before surface scoring. The Section presents the results of the metallographic research of the coatings formed.

Section Four gives the results of the research into the properties of the coatings formed with the new technology in the laboratory environment. It also presents the analysis of the impact of these coatings on wear, score resistance, running-in time, and friction coefficient. The results of the laboratory research were used in the choice of the optimal parameters of the technological process of coating formation regarding the tribotechnical properties of the friction pairs.

Section Five is devoted to the results of operational tests on the oil gear pumps after coating application. It presents a feasibility study of the proposed technological process of application of the coatings with specified properties on the component of oil gear pumps of internal combustion engines.

The research presents original development of the innovative technological formation of coatings based on aqueous solution of aluminium-chromium-phosphate binder in order to improve the wear resistance of friction pairs; determination of the dependency between the wear and technological parameters of the coatings applied on cast iron and steel components, such as temperature, aging time, and solution concentration; determination of the dependency between the technological parameters and the coating thickness; substantiation of

simultaneous formation of a multi-layer coating on steel and cast iron components of oil gear pumps with different doping degrees.

The research describes the improved technological process of manufacturing the components of the oil gear pump of internal combustion engines with the application of the developed innovative technology to increase the wear resistance of the friction pairs of oil gear pumps and their efficiency.

The theoretical and experimental research was used for the development of the coating application technology including the oxy-alloying of the components of an oil gear pump of internal combustion engines in the aqueous solution of aluminium-chromium-phosphate binder, which is aimed at higher wear resistance and efficiency:

- determination of the rational parameters of the technology developed, in particular, heating temperature for the components, saturation environment concentration, and aging time in such environment;

- operational tests which have proved that the application of the new coating technology for the oil gear pump components provides the stable operation of the engine during inter-repair periods; and

- the results of the operational tests have demonstrated that the wear resistance of the coated parts almost 2.5 - 3 times as high as the wear resistance of the components treated according to the old technology.

The subject of the thesis was discussed in 22 scientific papers, 6 of which in professional scientific publications of Ukraine and was one included in the international abstract and citation database SCOPUS, 11 scientific conference abstracts, 3 additional, the developments are protected by one patent of Ukraine for invention.

The results of the theoretical and practical research have been integrated into the educational process in the Ukrainian State University of Railway Transport for the disciplines Materials Science, Technology of Structural Materials, Material Science and Material Technology, Resource Saving Technologies, Innovative Resource Saving Technologies, and Organization of Technological Processes.

**Keywords:** oil gear pump, wear, wear resistance, microstructure, tribotechnical properties, strengthening, oxy-alloying, coating with specified performance properties, technological process parameters, saturation environment.

### **List of applicant's publications**

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

1. Timofeeva, L.A., Proskurina, L.V., Timofeev, S.S. Improving the performance of the oil pump parts of the SMD 60 engine. *High technologies in mechanical engineering: Sb. nauch. tr. NTU «KhPI», iss. 1 (4) / Kharkiv polytechnic institute, national tech. un-t.* Kharkiv : NTU «KhPI», 2001. P. 263 – 265.
2. Ukraine, IPC №45841A: B22F3/24. Method of chemical and thermal treatment of metal and alloy parts / Timofeeva, L.A., Proskurina, L.V., Timofeev, S.S., Fedchenko I.I.. Owner UkrSURT. №2001075170; Application.19.07.2001; Publ. 15.04.2002, Bull.№4.
3. Voloshyna L. Improving the technological process of applying wear-resistant layers on the surface of friction pairs. *Sb. nauch. Tr. UkrSART: Durability, reliability, efficiency of details of rolling stock of railways and special railway equipment.* Kharkiv : UkrSART. 2004. Issue 61. P.100 – 105.
4. Timofeeva L., Voloshyna L. Increasing the wear resistance of friction pairs by coating with aqueous solutions of salts. *Sb. nauch. Tr. UkrSART: Durability, reliability, efficiency of details of rolling stock of railways and special railway equipment.* Kharkiv : UkrSART. 2011. Issue 127. P.131 – 136.
5. Timofeeva L., Voloshyna L. Determination of technological parameters of process of treatment depending on operational properties of a covering. *Bulletin of NTU "KhPI". Subject issue: New desicions of modern technologies.* Kharkov: NTU "KhPI". 2012. №66. P. 20 – 23.

6. Voloshyna L. Definition and optimization of parameters of new technology depending on the set properties of a covering. *Sb. nauch. Tr. UkrSART*. Kharkiv : UkrSART. 2012. Issue 134. P. 224 – 229.

7. Timofeeva L., Voloshyna L. Gordienko P. Analysis of technological parameters of process wearproof of coverage. *Sb. nauch. Tr. UkrSURT*. Kharkiv : UkrSURT. 2017. Issue 170. P.13 – 19. (НБД Index Copernicus)

Publications in editions of other countries:

8. Timofeeva, L.A., Proskurina, L.V., Ostapchuk, V.N., Timofeev, S.S. Conditions control of antifriction and friction state of friction units. *Tyazheloe Mashinostroenie*, 2002, (3), P. 27–28. (SCOPUS)

Works certifying the approbation of the dissertation materials:

9. Timofeeva, L.A., Proskurina, L.V. Improving the reliability of oil gear pumps. *Surface Engineering and Product Renovation. Materials of the 3rd International Scientific and Technical Conference*. Kiev. 2003. P.201 – 202.

10. Proskurina, L.V. Influence of technological parameters of chemical-heat treatment on the wear resistance of the friction pair gear - oil pump housing. *Modern problems of production preparation, processing and assembly in mechanical engineering and instrument making. Materials of the 3rd International Scientific and Technical Seminar*. Kiev. 2003. P.126 – 128.

11. Timofeeva L., Voloshyna L. Improving the quality of friction pairs by applying wear-resistant coatings. *Quality, standardization, control: theory and practice: Materials of the 11th International Scientific and Practical Conference*. Kiev. 2011. P.151 – 153.

12. Timofeeva L.A., Fedchenko I.I., Voloshyna L.V. Investigation of the influence of the surface layer on the tribotechnical properties of iron-carbon alloys. *Materials 12th International Scientific and Technical Conference "Surface Engineering and Renovation of Products" June 04-08, 2012, Yalta, Crimea*. Kiev : ATM Ukraine, 2012, P. 294 – 297.

13. Voloshyna L.V. Resource-saving technology of drawing coverings. *Abstracts 75th International Scientific and Technical Conference "Development of Scientific and Innovative Activities in Transport". Collection of scientific works.* Kharkiv : UkrSART, 2013, Issue. 136, P. 349.

14. Voloshyna L. Results of metallography research of coverage are from water solution of aluminiumchromephosphate of salt. *Abstracts 79th International Scientific and Technical Conference "Development of Scientific and Innovative Activities in Transport". Kharkiv, April 25-27, 2017. Collection of scientific works.* Kharkiv : UkrSURT, 2017, Issue. 169 (addition), P. 138 – 140.

15. Voloshyna L.V. To question of research of influence of composition of coverage on tribotechnical of property of iron-carbon alloys. *Abstracts 80th International Scientific and Technical Conference "Development of Scientific and Innovative Activities in Transport". Collection of scientific works.* Kharkiv : UkrSURT, 2018, Issue. 177, P. 93.

16. Timofeeva L., Voloshyna L. Improving the quality and efficiency of oil gear pumps of internal combustion engines. *Quality, standardization, control: theory and practice: Materials of the 18th International Scientific and Practical Conference, 03–07 september 2018., Odessa- Kiev : ATM Ukraine, 2018. P.108 – 110.*

17. Voloshyna L. Resource-saving technology forming of wear-resistant coatings at transport details. *Abstracts 2nd All-Ukrainian Conference "New Generation Wagons: from the XX to the XXI Century" Collection of scientific works.* Kharkiv : UkrSURT, 2019, Issue. 184(addition), C. 42 – 43.

18. Komarova G.L., Voloshyna L.V. Influence of processing parameters on the quality of formation of protective coatings. *Materials 19th International Scientific and Technical Conference "Surface Engineering and Renovation of Products" May 20-24, 2019, Svalyava. Kiev : ATM Ukraine, 2019, P. 75 – 77.*

19. Timofeeva L., Voloshyna L. Complex researches in the development of the technological process of improving the operating properties of oil gear pump



parts. *1th International Scientific and Technical Conference «Intellectual transport technology» Abstracts*. Kharkiv : UkrSURT, 2020. P.116 – 117.

Works that additionally reflect the scientific results of the dissertation:

20. Timofeev, S.S., Voloshyna L.V., Voskoboynykov D.G. Formation of multifunctional coatings. *Modern issues of production and repair in industry and transport: Materials of the 19th International Scientific and Technical Seminar, February 18-22., Koschythe, Slovak Republic*. Kiev : ATM Ukraine, 2019. P. 208–210.

21. Timofeeva L.A., Ustenko O.V., Thap O.I., Voloshyna L.V. Increase exploitative indicators of friction wedges by forming coatings with special features. *Collection of scientific works UkrSURT*. Kharkiv : UkrSURT. 2019. Issue 185. P.88 – 95. (Index Copernicus)

22. Voloshyna L., Thap O. Investigation of the influence of protective coatings on operating indicators of friction wedges frequencies vibration dampers of bogies freight wagons. *Quality, standardization, control: theory and practice: Materials of the 20th International Scientific and Practical Conference, 07–11 september 2020.*, Odessa- Kiev : ATM Ukraine, 2020. P.28 – 30.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	27
1.1 Аналіз умов роботи пари тертя: шестерня – корпус масляного насосу	27
1.2 Матеріали, які застосовуються для виготовлення деталей масляних шестеренних насосів	37
1.3 Основні методи підвищення зносостійкості поверхонь тертя	40
1.4 Висновки до першого розділу	56
РОЗДІЛ 2 ВИБІР МАТЕРІАЛІВ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕННЯ	58
2.1 Аналіз властивостей матеріалів, які застосовуються для виготовлення пари тертя шестерня-корпус	58
2.2 Розробка способу нанесення покриттів	61
2.3 Лабораторне обладнання для нанесення покриттів	63
2.4 Методики визначення зносу пар тертя	65
2.5 Визначення коефіцієнту тертя	68
2.6 Металографічні дослідження зразків	69
2.6.1 Методика проведення рентгеноспектрального флуоресцентного аналізу	70
2.6.2 Дослідження фазового складу зразків	70
2.6.3 Визначення товщини нанесеного поверхневого шару	71
2.7 Висновки до другого розділу	72
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ	74
3.1 Вибір складу насичуючого середовища	74
3.2 Оптимізація параметрів технологічного процесу за допомогою лінійного регресійного аналізу	78

3.3	Визначення технологічних параметрів нової технології в залежності від експлуатаційних властивостей покриття	90
3.4	Результати металографічних досліджень зразків	97
3.4.1	Рентгеноспектральний аналіз зразків	97
3.4.2	Результати проведення дослідження фазового складу зразків	98
3.4.3	Дослідження мікроструктури зразків	101
3.4.4	Визначення товщини утвореного покриття	105
3.5	Висновки до третього розділу	106
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТЯ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ		107
4.1	Дослідження впливу параметрів процесу і насичуючого середовища, на знос пар тертя чавун-сталь	107
4.2	Визначення впливу обробки сплавів у водних розчинах солей на знос пар тертя сталь-сталь	130
4.3	Аналіз впливу одержаних покриттів на утворення задирів на робочих поверхнях пар тертя	140
4.4	Визначення коефіцієнту тертя	146
4.5	Висновки до четвертого розділу	151
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАСЛЯНИХ ШЕСТЕРЕННИХ НАСОСІВ. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ		153
5.1	Стендові іспити масляних шестеренних насосів	153
5.2	Розрахунок економічного ефекту від нової технології нанесення покриттів	157
5.3	Висновки до п'ятого розділу	162
ВИСНОВКИ		163
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		166
ДОДАТКИ		189

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В сучасних складних умовах, в яких перебуває машинобудування України, задача підвищення строку служби деталей машин і агрегатів, їх довговічності і надійності набуває дуже важливого значення. Якість машин, спеціального обладнання та пристроїв у значній мірі визначається ресурсом їх роботи, недостатнім для більшої частини технічних систем, що виготовляються та експлуатуються на даний момент. Ресурс багатьох машин зумовлений низькою зносостійкістю рухомих спряжень та деталей тертя. В зв'язку з цим пошуки і розробка нових технологій, які забезпечать збільшення строку служби деталей тертя, стає першочерговим науковим завданням.

Як показали результати експлуатаційних досліджень пари тертя шестерня - корпус масляного шестеренного насосу двигунів СМД-60, -62, -64, найчастіше його елементи виходять з ладу через знос шестерень і внутрішніх поверхонь корпусу, що сприяє підвищенню витікання масла, за рахунок збільшення зазору в парі тертя, а також масляне "голодування" деталей і вузлів двигуна в цілому із-за зменшення об'єму подачі змащувальних матеріалів.

Реновація поверхні пов'язана із значними витратами, що полягають у розбиранні двигуна, перевірці масляного насоса на забезпечення рівня подачі, розбиранні насоса, дефектації, вибракуванні і відновленні деталей масляного насоса. Тому підвищення зносостійкості розглянутої пари тертя є актуальною науковою проблемою. Вирішити дану проблему можна за рахунок нанесення зносостійкого покриття на шестерні і внутрішні поверхні корпусу.

У більшості випадків техніка виходить з ладу внаслідок зносу навантажених деталей, насамперед - вузлів тертя: руйнується тільки робоча поверхня деталі; яку можна відновити нанесенням шару матеріалу зі

спеціальними властивостями. Широке застосування покриттів обумовлене різноманіттям матеріалів, які можна наносити, а це дає можливість моделювання широкого діапазону властивостей контактуючих поверхонь, способів нанесення, дозволяє економити дорогі матеріали і забезпечує високу ефективність.

Застосування захисних покриттів - кардинальне і економічно ефективне рішення проблем збільшення питомої потужності, надійності і довговічності сучасних машин і механізмів. Захисні покриття не тільки дозволяють заощаджувати метал, збільшувати довговічність конструкцій, економно витратити енергоресурси, але й дають можливість створювати принципово нові вироби необхідні для створення сучасної техніки.

У зв'язку з цим тема дисертації є актуальною і зорієнтована на вирішення наукового завдання з розробки технології формування покриттів на деталях масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згорання, яка забезпечує підвищення зносостійкості та працездатності.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження за темою дисертаційної роботи виконані відповідно до Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.05.2018 р. № 430-р), Стратегічних пріоритетних напрямів інноваційної діяльності на 2011-2021 роки, згідно Закону України № 2519-IV від 09.10.2010 р. «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» за пріоритетним напрямком розвитку науки і техніки «Новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі». Окремі дослідження за темою дисертаційної роботи виконані відповідно до тематики науково-дослідних робіт за темами: «Розробка технології комплексної механічної обробки для деталей транспортного призначення» (ДР№0115U006512); «Розробка нового складу ріжучого інструменту для обробки твердих матеріалів» (ДР№0115U006511).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення експлуатаційних властивостей деталей масляних шестеренних насосів за рахунок розробки способу нанесення покриття з заданими властивостями.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі наукові та практичні завдання:

- на основі літературних джерел інформації, огляду патентів і авторських свідоцтв провести аналіз ефективних методів нанесення покриттів, які використовують для покращення триботехнічних властивостей виробів;
- провести аналіз механізму зносу, пошкодження матеріалу деталей масляних шестеренних насосів при їх експлуатації;
- розробити спосіб нанесення покриттів на деталі масляного шестеренного насосу, що забезпечить задану працездатність і зносостійкість;
- визначити особливості формування окислегованих покриттів і оцінити їх вплив на структуру і зносостійкість;
- визначити раціональні параметри технологічного процесу окислегування, а саме час витримки, концентрацію насичуючого середовища і температуру, які забезпечать підвищення зносостійкості деталей масляного шестеренного насосу;
- визначити вплив технологічних параметрів окислегування на експлуатаційні властивості, а саме зносостійкість та працездатність;
- провести експлуатаційні випробування технологічного процесу окислегування і оцінити його економічну ефективність.

**Об'єкт дослідження** – процес формування покриттів з заданими експлуатаційними властивостями.

**Предмет дослідження** - підвищення зносостійкості деталей масляних шестеренних насосів двигунів внутрішнього згоряння.

**Методи дослідження.** В роботі при виконанні експериментальних досліджень використано обладнання для триботехнічних випробувань, для

вивчення структурно-фазового складу покриття використовувалися металографічні методи, метод оптичної мікроскопії, методика рентгеноспектрального флуоресцентного аналізу, рентгенівський метод дослідження фазового складу. Достовірність результатів, одержаних в роботі, підтверджується використанням експериментально-технічних положень при математичному плануванні експерименту.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в наступному.

У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання щодо підвищення зносостійкості та працездатності деталей масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згоряння за рахунок розроблення інноваційної технології формування багатошарового покриття в одному технологічному циклі.

*Вперше:*

- розроблено інноваційний технологічний процес формування покриттів з використанням водного розчину алюмохромфосфатного зв'язуючого, що дозволить підвищити зносостійкість пар тертя;

- визначено залежність між величиною зносу і технологічними параметрами нанесення покриттів на чавунних та сталевих деталях: температурою, часом витримки і концентрацією розчину;

- визначено залежність впливу технологічних параметрів на товщину покриття;

- розроблено комплексну технологію одночасного формування багатошарового покриття, що базується на послідовному формуванні перехідного шару покриття з різним ступенем легованості на сталевих та чавунних деталях масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згоряння.

*Удосконалено:* технологічний процес формування покриттів багатофункціонального призначення в одному технологічному циклі на деталях масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згоряння, що забезпечить підвищення їх зносостійкості та працездатності.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблена технологія нанесення покриттів, яка складається з окислення у водному розчині алюмохромфосфатного зв'язуючого деталей масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згоряння, що забезпечує підвищення зносостійкості та працездатності:

- визначені раціональні параметри розробленої технології, зокрема температуру нагріву деталей, концентрацію насичуючого середовища та час витримки у цьому середовищі;

- проведено експлуатаційні випробування, які довели, що використання нової технології нанесення покриттів на деталі масляних шестеренних насосів забезпечує їх працездатність протягом усього міжремонтного періоду двигуна;

- результати експлуатаційних випробувань довели, що зносостійкість деталей з покриттям перевищує майже в 2,5 - 3 рази зносостійкість деталей за базовою технологією.

Результати теоретичних і практичних досліджень впроваджені у навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту при вивченні таких дисциплін, як «Матеріалознавство», «Технологія конструкційних матеріалів», «Нові матеріали та технології виготовлення і відновлення деталей», «Ресурсозберігаючі технології».

**Особистий внесок здобувача.** Експериментальні та теоретичні дослідження, що виносяться до захисту, отримані автором самостійно та викладенні у роботах [1-22]. У наукових роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: планування та виконання експериментів [1,2,4,5,7-9,11,12,16,18,20-22], обґрунтована нова технологія одержання покриттів та підвищення зносостійкості деталей з залізобетонних сплавів [1,4,5,9,11]; встановлений вплив способу та параметрів нанесення покриттів на досягнення заданих властивостей [7,8,16,19]; експериментальне дослідження мікроструктури та властивостей покриттів сформованих на зразках із чавуну та сталі після окислення [5,7,12]; експериментальні



дослідження впливу технологічних параметрів нанесення покриття при запропонованій технології окислення, а також попереднього стану чавуну та сталі на ефективність формування покриттів з заданими властивостями та вибір оптимальних параметрів обробки [7,8]; теоретичні дослідження впливу хімічного складу покриттів на можливість формування зносостійких покриттів на залізобетонних сплавах [1,2,4]; експериментальні дослідження фазових та структурних перетворень в поверхневих шарах чавуну та сталі, а також у шарах покриття, сформованого у результаті окислення із водного розчину алюмохромфосфатного зв'язуючого [12,18]; експериментальні дослідження впливу хімічного складу покриття та технологічних параметрів формування покриття на триботехнічні властивості поверхонь тертя [5,7,8, 19-22].

**Апробація результатів досліджень.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях у період з 2001 по 2020 р.р.: 1-й Міжнародній науково-технічній конференції "Інженерія поверхні і реновація виробів" (м. Феодосія, Київ: АТМ України, 2001 р.); 2-й Міжнародній науково-технічній конференції "Інженерія поверхні і реновація виробів" (м. Ялта, Київ: АТМ України, 2002р.), 3-ому Міжнародному науково-технічному семінарі «Сучасні проблеми підготовки виробництва, обробки і зборки в машинобудуванні і приладобудуванні» (м. Свалява, Карпати, АТМ України, 2003р.); 3-й Міжнародній науково-технічній конференції "Інженерія поверхні і реновація виробів" (м. Ялта, Київ: АТМ України, 2003р.); 11-й Міжнародній науково-практичній конференції „Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика”(м. Ялта, Київ: АТМ України, 2011р.); 12-й Міжнародній науково-технічній конференції "Інженерія поверхні і реновація виробів" (м. Ялта, Крим, Київ: АТМ України, 2012р.), 79-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків, УкрДУЗТ, 25-27 квіт. 2017р.); 80-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності

на транспорті» (Харків, УкрДУЗТ, квіт. 2018р.); 18-й міжнародній науково-практичній конференції „Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика” (м. Одеса. Київ: АТМ України, 2018); 19-му Міжнародному науково-технічному семінарі „Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості і на транспорті”(г. Кошице, Slovak Republic – Київ: АТМ України, 2019); 19-й Міжнародній науково-технічній конференції "Інженерія поверхні і реновація виробів" (м. Свалява, Київ: АТМ України, 2019) з опублікуванням тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій; II-й Всеукраїнській конференції „Вагони нового покоління: із ХХ в ХХІ сторіччя”(м. Харків: УкрДУЗТ, 2019); 19-та міжнародна науково-технічна конференція "Інженерія поверхні і реновація виробів" (20-24 травня 2019р., м. Свалява, Закарпатська обл. Київ: АТМ України, 2019); I-а міжнародна науково-технічна конференція „Інтелектуальні транспортні технології” (24-30 січня 2020р. Трускавець-Харків: УкрДУЗТ); 20-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Якість, стандартизація, контроль: теорія і практика» (07–11 вересня 2020 р., м. Одеса. – Київ: АТМ України).

Основні положення дисертації доповідалися на кафедрі „Якість, стандартизація, сертифікація та технології виготовлення матеріалів” в рамках науково-технічної конференції УкрДУЗТ з 2001 по 2020 р.р.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 22 наукових працях, в тому числі: 6 статей у фахових наукових виданнях України; 1 стаття у виданні, що включено до міжнародних наукометричних баз, а саме SCOPUS; 11 праць апробаційного характеру; 3 додаткових. Розробка захищена 1 патентом України на винахід (Додаток Б).

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів з висновками, загальних висновків по роботі, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 195 сторінок, у тому числі 165 сторінок основного тексту, 13 таблиць, 91 рисунок, списку використаних джерел із 217 найменувань на 23 сторінках, 7 сторінок додатків.

## РОЗДІЛ 1

## СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Аналіз умов роботи пари тертя: шестерня-корпус масляного насосу

Статистичні дані причин виходу із ладу різноманітних машин, механізмів у машинобудуванні свідчать, що в 85 – 95% випадків відмови відбуваються завдяки зносу деталей вузлів тертя. В зв'язку з цим важливе значення набуває розробка зносостійких матеріалів або технологій впливу на поверхні тертя для підвищення їх зносостійкості. До таких машин відноситься і масляний шестеренний насос дизельних двигунів. Підвищення його надійності та довговічності є важливою задачею машинобудування. Відмови в роботі масляних шестеренних насосів ведуть до підвищених зносів всіх деталей дизельного двигуна, викликають тривалі простої, значні витрати запасних частин, а також збільшення витрат на обслуговування та ремонт [1-6].

Масляний шестеренний насос є одним із важливих вузлів змащувальної системи дизельних двигунів і служить для забору масла з нижньої кришки картера і подачі його до деталей двигуна, що труться [7].

Шестеренний насос відноситься до групи зубчатих насосів, з робочими органами у вигляді шестерень, які забезпечують герметичне замикання робочої камери і передають крутячий момент. За характером процесу витіснення ці насоси відносяться до класу роторно-обертальних машин з переносом витісненого об'єму рідини із всмоктуючої порожнини насосу в нагнітальну, при чому витіснителі створюють лише обертальний рух, а переміщення витісняємої рідини відбувається в площині, перпендикулярній осі обертання шестерень [8-9].

Найбільш розповсюдженими є насоси з шестернями зовнішнього зачеплення, який складається з пари зчеплених циліндричних шестерень, що

розміщаються в щільно охоплюючому їх корпусі [7-8]. Корпус насосу має канали в місцях входу в зачеплення і виходу з нього, через які відбувається підведення і відведення рідини (рис. 1.1, а).

При обертанні шестерень рідина, яка знаходиться у впадинах зубів, переноситься із камери  $d$  всмоктування в камеру  $c$  нагнітання, яка утворена корпусом насосу і зубами  $a_1, b_1, a_2, b_2$ . Поверхні зубів  $a_1, a_2$ , що омиваються рідиною під тиском  $p_2$ , витісняють при обертанні шестерень більше рідини, ніж може вміститися в просторі, який звільняється зубами, що зачіплюються,  $b_1$  та  $b_2$ . Різниця об'ємів, що описуються робочими поверхнями цих двох пар зубів, витісняється в нагнітальну лінію насосу.

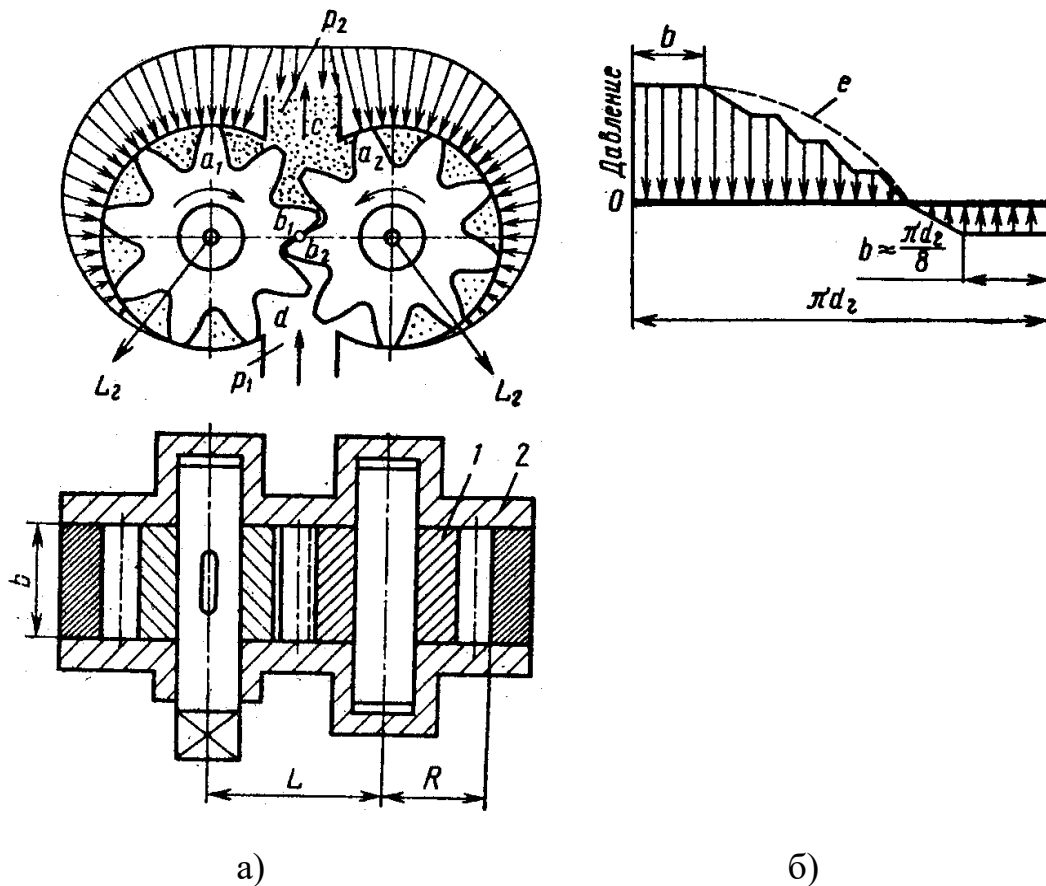


Рисунок 1.1 – Схема шестеренного насосу (а) та графік навантаження шестерень (б) [7]

Широке поширення в машинобудуванні набули одно та багатосекційні шестеренні насоси, принцип дії яких майже однаковий [7-9]. Насос приводиться в дію через шестерні колінчатого вала і шестерню, закріплену

на валу ведучих шестерень сегментною шпонкою. Насос фіксують штифтами на кришці першого корінного підшипника.

У процесі експлуатації масло засмічується продуктами окислення, полімеризації, конденсації самого мастила, забруднюється нерозчинними продуктами, що утворилися в результаті корозії металу і зносу змащуваних поверхонь, пилом, який попадає з атмосфери, а також забрудненнями, які залишилися після виготовлення і ремонту машини (пісок, окалина від зварювання, стружка, притиральна паста й ін.). Весь цей комплекс веде до збільшення зносу трибоспряжень і в першу чергу деталей масляного насоса [10-11].

Робота насоса на забрудненому маслі сприяє інтенсивному абразивному зносу його деталей.

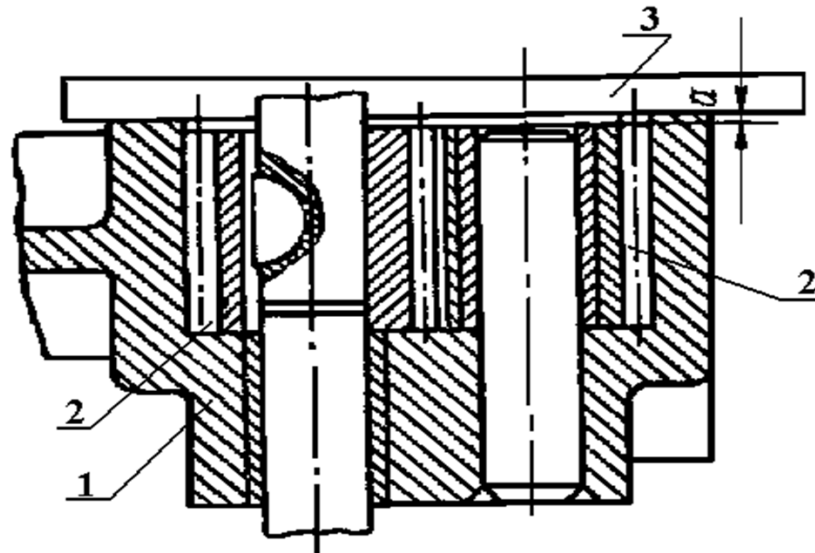
Деталі насосів піддаються також гідроерозійному зносу. Гідроерозія відбувається як від кавітуючої дії рідини, так і від звичайних ударів, при яких кожна частка рідини діє локалізовано, а при високих швидкостях поводить себе як тверде тіло, що веде до виникнення мікроударних впливів і руйнування поверхонь деталей насосів [12-13].

Одна з причин недостатньої надійності і довговічності насосів полягає в порушенні правил експлуатації і технічного обслуговування обслуговуючим персоналом (механіками, машиністами, ремонтниками). До таких порушень відносяться: засмічення робочої рідини механічними домішками; несвоєчасне очищення фільтрів, сапунів і масляних баків; нерегулярна заміна робочої рідини і т.д., а також неякісне виконання капітального ремонту на ремонтних підприємствах.

Частки забруднень неорганічного походження мають, як правило, дуже високу твердість, що значно перевищує твердість робочих поверхонь більшості деталей тертя машин. Твердість утвореної частки зносу у 1,7 рази більше твердості металу [13]. Фільтруючі елементи в системі змащення не забезпечують відсутність в маслі часток, максимальний розмір яких не перевищує величини номінальної тонкості засобів очищення.

Встановлено, що зниження працездатності і вихід з ладу шестеренних масляних насосів відбувається в основному за рахунок зносу стінок корпуса і голівок зубів нагнітальних шестерень, торців шестерень і кришки масляного насоса, зносу зубів нагнітальних шестерень по окружності голівок. Це приводить до підвищення витоків масла внаслідок збільшення радіального зазору між вершинами зубів і стінками корпуса, торцевого зазору між торцями шестерень і кришкою масляного насоса, бічного зазору між зубами шестерень і отже до зниження продуктивності масляного шестеренного насоса [7, 9, 13].

Продуктивність насосу різко знижується при зростанні торцевого зазору  $a$  (рис.1.2), внаслідок зносу поверхонь тертя нагнітальних шестерень.



1 - корпус насосу; 2 - шестерня насосу; 3 - лінійка;  $a$  - торцевий зазор

Рисунок 1.2 – Торцевий зазор між торцями шестерень і кришкою масляного насоса [7]

Зуби нагнітальних шестерень зношуються по товщині, що приводить до збільшення бічного зазору  $a$  між зубами шестерень (рис 1.3).

Зуби нагнітальних шестерень зношуються і по окружності голівок. У процесі роботи масляного насоса, голівки зубів нагнітальних шестерень притискаються до циліндричних стінок корпуса, що приводить до зносу цих

стінок і збільшенню радіального зазору  $b$  між вершинами зубів і стінками корпусу [7].

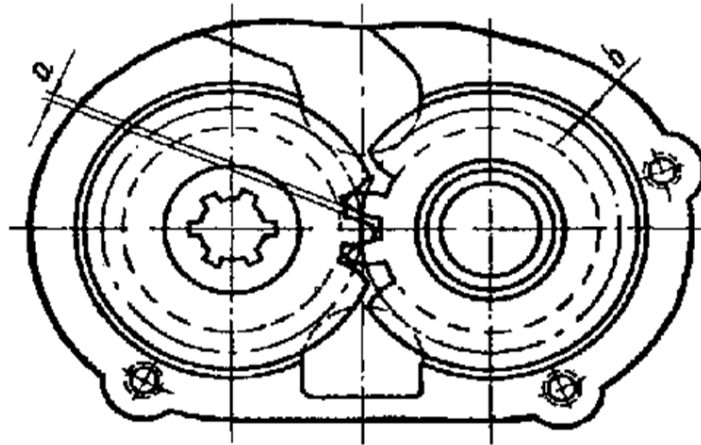


Рисунок 1.3 – Бічний зазор  $a$  між зубами шестерень і радіальний зазор  $b$  між вершинами зубів і стінками корпусу насосу [7]

Використання в гідросистемах мастил, що були у вживанні, без попередньої перевірки їх на вміст механічних домішок і води, а також мастил, марка і характеристики яких не відповідають вимогам технічної документації машини, приводить до засмічення фільтрів і жиклерів, зависанню золотників і клапанів, що входять до складу гідросистеми, швидкому зносу її вузлів у т.ч. і насосу. Робота насосу під навантаженням при низьких температурах робочої рідини (підвищена в'язкість) також веде до швидкого зносу насосу (робоча рідина повинна бути попередньо прогріта на холостих оборотах насосу до  $15^{\circ}\text{C}$ ). При несвоєчасній заміні мастила його в'язкість зменшується, що приводить до погіршення умов змащення насоса і його заклинювання [7-13].

Для масляних шестеренних насосів згідно з [8], контролюється коефіцієнт подачі  $K_d$ . Критерієм граничного стану насосу є зниження величини коефіцієнту подачі  $K_d$  більше ніж на 20%.

Існує ряд причин відмов шестеренних насосів.

Кавітація у всмоктувальній порожнині насоса веде до виникнення вібрації, шуму при роботі насосу, піноутворення в баці, підвищеного зносу деталей насоса, втрати продуктивності.

Найчастіше причиною відмови насосу є абразивний знос, викликаний дрібними частками. Ознакою абразивного зносу зазвичай є поступове зниження продуктивності масляних насосів внаслідок збільшення витікань через зазори між деталями насосу [14].

Дрібні частки забруднення пилу у системі змащення викликають знос робочих поверхонь усіх деталей двигуна внутрішнього згорання. Забруднення проникають через зношені ущільнення. Дрібні частки, що викликають абразивний знос, зазвичай невидимі неозброєним оком. Вони мають діаметр не більш 40 мкм. Мастило, у якому присутні такі частки, може виглядати чистим і одночасно містити достатню кількість абразивних часток, щоб викликати поломку насосу.

Зовнішні прояви абразивного зносу, викликаного присутністю в мастилі дрібних часток, приведені на рис.1.4 основних робочих деталей насосів.

На торці шестерень, у зонах основи зубів, з'являється матова поверхня, схожа на слід піскоструминної обробки. Причиною є потік забрудненої робочої рідини в мастильних канавках.

Поверхня цапфи шестерень є матовою, наче від полірування тонким наждаковим папером. Причиною є вдавнення в поверхню дрібних абразивних часток, що знаходяться в робочій рідині.

Торцеві поверхні втулок набувають матовий вигляд, схожий на слід піскоструминної обробки (рис.1.5).

Для порівняння, у місцях контакту з гумовотехнічними виробами видно ділянки, що не піддавалися впливу робочої рідини, забрудненої дрібними абразивними частками (рис.1.6).

Робоча рідина, забруднена дрібними абразивними частинками, додає доріжці вигляд, як після піскоструминної обробки. Це явище спостерігається тільки на впускній стороні насосу (рис.1.6).



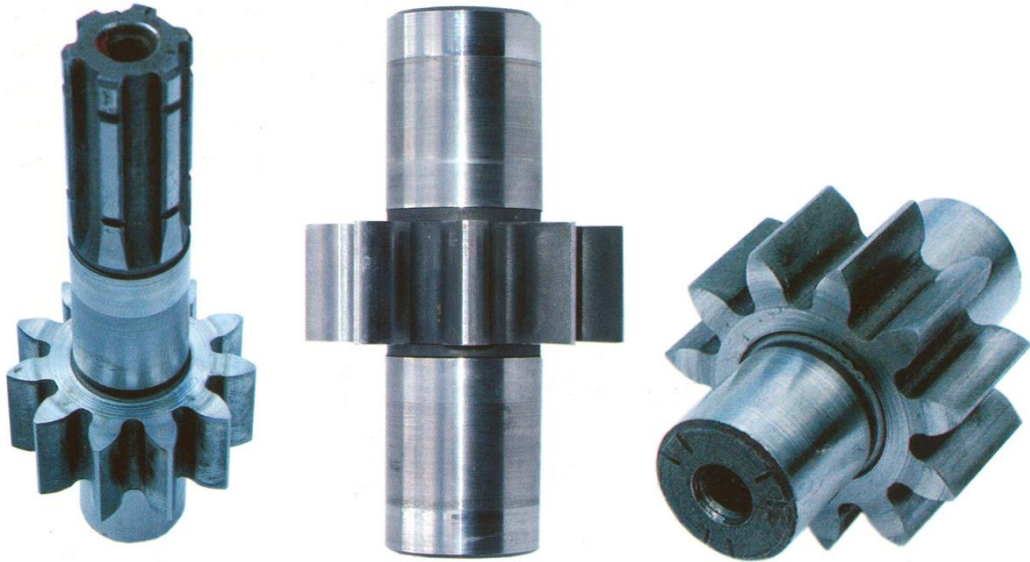


Рисунок 1.4 – Абразивний знос викликаний дрібними частками на торцях шестерень [14]



Рисунок 1.5 – Торцеві поверхні втулок зі слідами абразивного зносу[14]



Рисунок 1.6 – Корпус насоса зі слідами абразивного зносу[14]

Ущільнення врізається у вал. Дрібні абразивні частки проникають під манжету, утворюючи канавки на поверхні валу (рис.1.7).

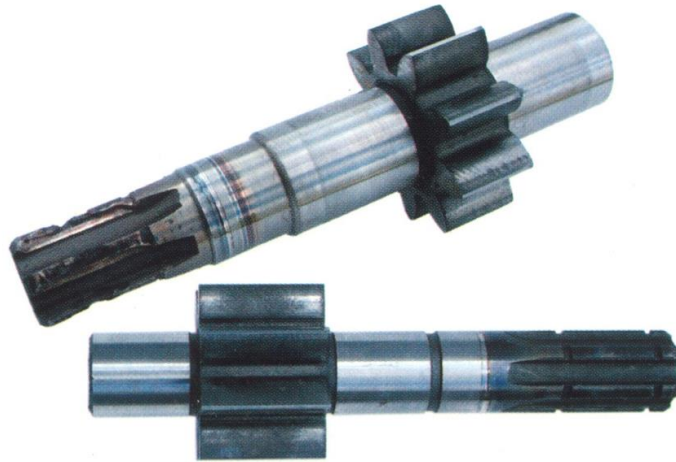


Рисунок 1.7 – Канавки на поверхні валу[14]

Наявність металевих забруднень зазвичай викликано зносом частин системи змащування або деталей двигуна. У залежності від їх кількості, металеві частки викликають поступову досить швидку відмову насосу.

На uszkodження металевими частками вказує наявність подряпин різної ширини і глибини на робочих поверхнях деталей насосу [7-14].

На опорній поверхні валу (цапфи) шестерень наявні численні тонкі канавки (рис.1.8). Ступінь uszkodження визначається наступними факторами: кількістю забруднень у системі, робочим тиском.



Рисунок 1.8 – Поверхні валу шестерень [14]

Аерація і кавітація розглядаються разом, тому що вони впливають на систему однаково. В обох випадках присутність парів мастила або бульбашок

повітря в мастилі приводить до ушкодження насосу. Цей тип відмови зустрічається рідко. Повітря може проникнути в систему через нещільне з'єднання усмоктувального трубопроводу або в результаті турбулентності мастила в баці, викликаної зливом мастила назад у бак вище поверхні масла в баці. Це відбувається, якщо усередині бака є витікання рідини або якщо труби усередині бака пошкоджені [14].

Утворення і вибух бульбашок пари в мастилі відбувається зазвичай в результаті обмеження потоку робочої рідини у всмоктувальній магістралі насоса. Висока температура мастила також сприяє кавітації.

Аерація і кавітація викликають ерозію й утворення ямок на робочих поверхнях деталей насоса. Вибух бульбашок повітря або пари відбувається при їх стисканні тиском, який досягає тиску нагнітання. Зусилля вибуху зриває метал з робочої поверхні корпусу насоса, шестерень, приводить до збільшення зносів робочих поверхонь.

Причина утворення слідів ерозії на торці втулки - повітряні бульбашки в робочій рідині або недостатня кількість робочої рідини на всмоктуванні (рис.1.9).



Рисунок 1.9 – Сліди ерозії на торці втулки [14]

Завищена температура у місці контакту викликає чорніння шестерень (рис.1.10), а також підвищення твердості ущільнень. При короткочасному завищенні температури ці результати спостерігаються тільки якщо температура досягає 150°C. Причиною завищення температури зазвичай

буває заїдання або занадто низький тиск спрацьовування запобіжного клапана. Якщо запобіжний клапан у результаті заїдання не повертається в нейтральне положення, це приводить до постійного скидання мастила на злив і швидкий перегрів системи.

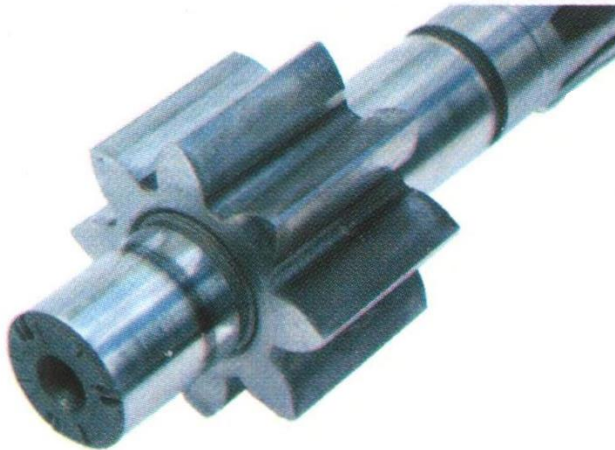


Рисунок 1.10 – Завищена температура робочої рідини  
(чорна смуга на цапфі шестерні) [14]

Існує дві причини завищення тиску [14]:

- відмова запобіжного клапана, що викликає один сильний імпульс і негайну аварію;
- завищений тиск спрацьовування запобіжного клапана, що веде до багаторазового утворення надмірних піків тиску. В обох випадках ушкодження однакові.

Утворення тріщин у корпусі, поломка валу можуть бути викликані як несправністю запобіжного клапана, так і багаторазовими імпульсами підвищеного тиску [14].

Таким чином, стабільна робота масляних шестеренних насосів залежить від багатьох факторів таких як: якість мастильних матеріалів, якість обслуговування гідромашини та операцій ремонту, але на перший план виходять вид матеріалу, з яких виготовлені деталі в контакті, також якість обробки поверхонь тертя.

## 1.2 Матеріали, які застосовуються для виготовлення деталей масляних шестеренних насосів

Процес зношування охоплює сукупність складних явищ, що відбуваються при взаємодії поверхневих шарів металу зі зношуючим середовищем в певних умовах температури та тиску [15-16]. Всі компоненти цього процесу, які включають і метал і зношуюче середовище, і зовнішні умови, при яких зношування здійснюється, взаємно пов'язані і кожен з них впливає на кінцевий результат - процес зношування і величину зносу. Тому дуже важливо знайти шляхи оптимізації цих параметрів, що забезпечують відносно процесу зношування одержання найменшої величини зносу і, отже, збільшення терміну служби, як окремих деталей, так і машин і агрегатів у цілому [17].

Працездатність пар тертя в більшості випадків залежить від матеріалів та якості поверхонь, які сформовані в процесі виготовлення деталей [18-19].

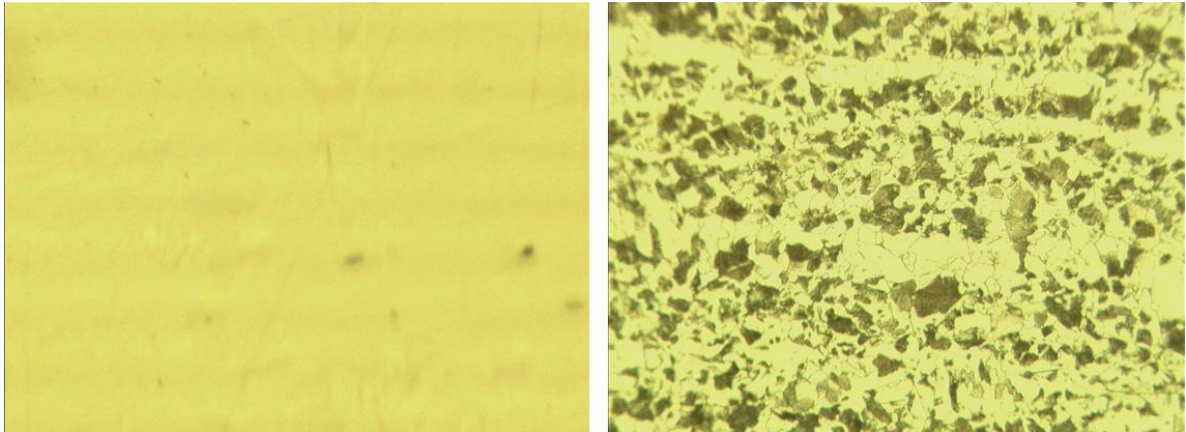
Для забезпечення стабільної роботи шестеренного масляного насоса при виготовленні нагнітальних шестерень застосовуються хромисті сталі, наприклад, сталь 40X [20]. Хімічний склад хромистої сталі марки 40X наведений у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад хромистої сталі 40X [21]

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	Cu, %	S, %	P, %
				не більше			
1	2	3	4	5	6	7	8
0,34 - 0,44	0,17 - 0,37	0,50 - 0,80	0,80 - 1,10	0,30	0,30	0,035	0,035

Хром вводять до складу сталі для поліпшення механічних властивостей за рахунок його впливу на механічні властивості фериту, дисперсність карбідної фази, прогартовуваність, розмір зерна. Хром, розчиняючись у

фериті, зміцнює його. При вмісті хрому в сталі до 1% підвищується ударна в'язкість. Також хром сприяє деякому підвищенню порогу холодноламкості [21]. На рисунку 1.11 наведено зображення мікроструктури сталі 40Х до та після травлення.



а) до травлення ( $\times 400$ )

б) після травлення ( $\times 200$ )

Рисунок 1.11 – Мікроструктура сталі нагнітальних шестерень

Для забезпечення властивостей, необхідних для експлуатації шестерень, проводять термічну обробку сталі 40Х - гартування в маслі і високий відпуск ( $550 - 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Параметри термічної обробки та одержувані механічні властивості сталі 40Х наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Термічна обробка та механічні властивості сталі 40Х [21]

Гартування		Відпуск		Межа течу- чості, $\sigma_t$ Н/мм <sup>2</sup>	Тимчасови й опір, $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Відносне подов- ження, $\delta$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
темпе- ратура, $^{\circ}\text{C}$	середя охолод- ження	темпе- ратура, $^{\circ}\text{C}$	середя охолод- ження					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
860 $\pm$ 15	масло	550 - 650	вода або масло	785	980	10	45	59

Хромиста поліпшувана сталь 40Х застосовується після нормалізації і поліпшення, поверхневого зміцнення токами високої частоти і хіміко-термічної обробки для виготовлення осей, валів, шестерень, пальців, втулок

та інших навантажених деталей, що працюють при середніх і високих питомих тисках і швидкостях при відсутності ударних навантажень [22-23]. Сталь 40Х схильна до відпускної крихкості; флокеночутлива.

При підвищенні температури механічні властивості сталі 40Х змінюються: тимчасовий опір  $\sigma_b$  зменшується, відносне подовження  $\delta$  та відносне звуження  $\psi$  підвищуються, ударна в'язкість КСУ знижується [21].

Корпус шестеренного насосу відливається із сірого чавуну СЧ20, хімічний склад якого наведено в таблиці 1.3 [24-26].

Елементи, що входять до складу сірого чавуну впливають на умови графітизації, кількість графітних включень, структуру металевої основи і, як наслідок, властивості чавуна.

Таблиця 1.3 – Хімічний склад чавуну [26]

С, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	S, %	P, %
				не більше	
1	2	3	4	5	6
3,20 - 3,50	1,60 - 1,80	0,60 - 0,80	0,10	0,12	0,20

Чим вище концентрація вуглецю, тим більше виділень графіту в чавуні і тим нижчі його механічні властивості. Кремній має сильну графітизуючу дію; сприяє виділенню графіту в процесі затвердіння чавуну і розкладанню цементиту, що виділився. Марганець ускладнює графітизацію чавуну, не на багато покращує його механічні властивості [25].

Основною особливістю мікроструктури сірого чавуна (рис. 1.12.), що визначає фізико-механічні властивості, є наявність пластинчастого графіту. Завдяки пластинчастому графіту в сірому чавуні поєднуються антифрикційні властивості, висока зносостійкість, низька чутливість до концентраторів напружень [26].

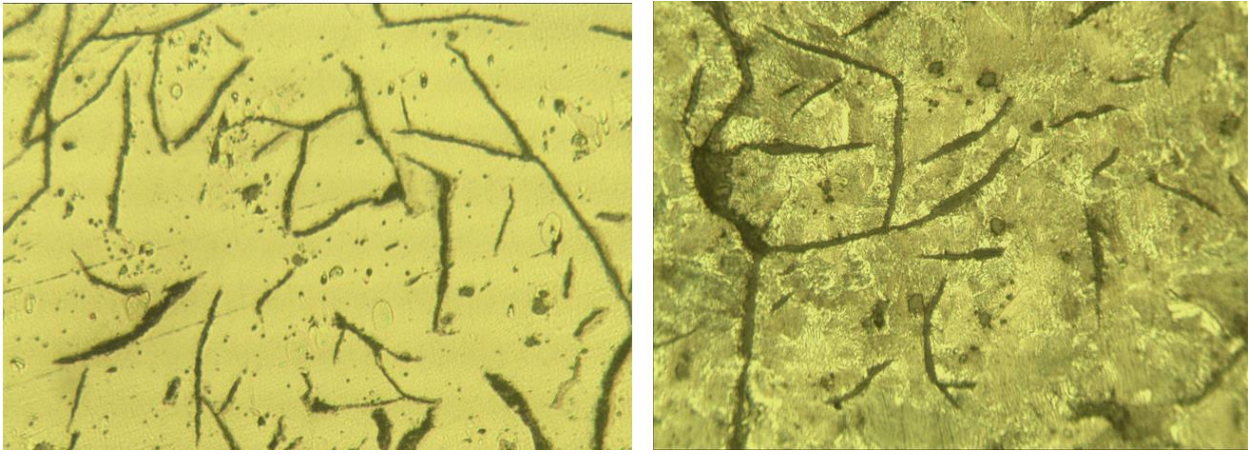
а) до травлення ( $\times 200$ )б) після травлення ( $\times 200$ )

Рисунок 1.12 – Мікроструктура сірого чавуна корпусу шестеренного насосу

На теперішній час для забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей відливки із сірого чавуну піддають термічній обробці. Використовують низький відпал ( $560^{\circ}\text{C}$ ) для зняття внутрішніх напружень і стабілізації розмірів, нормалізацію або гартування з відпуском для підвищення механічних властивостей і зносостійкості [27-28].

### 1.3 Основні методи підвищення зносостійкості поверхонь тертя

Проведений аналіз літературних джерел та патентної інформації показав, що на Україні, в країнах СНД і за кордоном роботи з підвищення працездатності масляних насосів велися в наступних напрямках [13, 29-39]:

1. Удосконалення елементів ущільнення торцевих і радіальних зазорів шестеренних насосів, що приводить до підвищення коефіцієнту подачі насосу.
2. Додавання до мастильного матеріалу (моторного мастила) різних з'єднань, що забезпечують значне зниження тертя спряжених пар, а також інтенсивності їх зношування [39].



3. Підвищення зносостійкості за допомогою розробки та застосування нових способів нанесення зносостійких шарів.

Аналізуючи розвиток конструкцій масляних насосів за патентними матеріалами, можна відзначити, що надходить значна кількість патентів на удосконалення елементів ущільнення торцевих і радіальних зазорів і інших конструктивних рішень, на зниження втрат на тертя і підвищення коефіцієнту подачі насосів.

Деякі патенти стосуються методів ущільнення радіальних і торцевих зазорів шестеренних насосів [40].

Відома конструкція насосу [41], відмінною рисою, якої є те, що в корпусі насосу встановлюються плити, що прилягають до торців шестерень у зоні зачеплення зубів і притискаються пружиною. Радіальний зазор регулюється рухомими підпружиненими елементами, причому ущільнення здійснюється тільки в обмеженій зоні.

Недоліком такого рішення є ускладнення конструкції масляного насосу і як наслідок підвищення його вартості від збільшення кількості елементів, що входять до його складу, ускладнення обслуговування та збільшення розбірних і ремонтних операцій.

Мається ряд патентів, що захищають конструкції з ущільненням радіального зазору тільки в секторі розташування двох-трьох зубів на виході в зону нагнітання [41].

У роботі [41] для забезпечення постійності радіального зазору в процесі тривалої експлуатації, крім підпружинених елементів, пропонується вершини зубів виконувати зі зносостійкого матеріалу - карбїду вольфраму.

Для ущільнення торців шестерень [41] був розроблений гідромеханічний пристрій, що забезпечує мінімальний торцевий зазор тільки в обмеженій зоні.

Заслугує на увагу розроблена в роботі [41] конструкція шестеренного насосу з двома всмоктувальними отворами в корпусі, через кожний з яких подається мастило в загальну систему від окремих джерел у заданому співвідношенні.

Істотним недоліком розглянутих вище методів є складність конструктивних рішень, що веде до ускладнення технологічного процесу виробництва масляних насосів, додаткова витрата матеріальних і трудових ресурсів на виконання елементів ущільнень суттєво збільшить вартість насосів, ускладнить операції розбирання, збирання. Встановлення додаткових елементів приведе до збільшення ваги насосу. Дія додаткових елементів спрямована лише на обмежену зону гідромашини, що не є доцільним.

Останнім часом доведено, що на довговічність машин і механізмів впливають не тільки технологічні і конструктивні фактори. У значній мірі впливає оптимальність розроблених трибологічних заходів, реалізованих при виробництві й експлуатації техніки, що дозволяють поліпшити приробітку спряжених деталей, знизити тертя і їх зноси і тим самим істотно поліпшити техніко-економічні показники [42].

Багатьма експериментальними дослідженнями [43-45] були отримані дані про можливість зміни коефіцієнту тертя і зносостійкості при випробуванні одних і тих самих поєднань пар тертя завдяки використанню різних мастил, до складу яких входять багатофункціональні присадки.

За своїм призначенням присадки можуть бути антифрикційними, фрикційними, протизносними, протизадирними. За хімічним складом вони, в основному, являють собою хромо-, сірко-фосформістячі з'єднання [44].

Ефективність і факт дії присадок залежить від температури (з підвищенням температури в зоні контакту, що свідчить про порушення нормального процесу зношування, починають протікати реакції між присадкою і металом), від матеріалу спряжених деталей, адсорбційної активності й інших факторів.

Однак основна складність, як показали дослідження, полягає в тому, що далеко не завжди вдається забезпечити своєчасну доставку присадки, з урахуванням малої концентрації її, у зону тертя, де зароджуються відхилення від нормального процесу зношування.

Встановлено, що в процесі тертя, змащування і зношування приймають участь також поверхневі шари деталей. На межі метал-масло-метал відбуваються складні фізико-хімічні процеси, які впливають на довговічність деталей тертя. Тому підбір або розробка оптимального технологічного процесу створення або впливу на поверхневі шари в залежності від виду та режиму тертя дозволить впливати на триботехнічні властивості з'єднань в цілому [46-47].

Відомо, що в деяких випадках (деталі на експорт та ремонтний фонд) робочі поверхні масляних шестеренних насосів піддавалися хімічному оксидуванню [35]. Процес хімічного оксидування складається з обробки деталей в нагрітих розчинах їдкого натру з додаванням окислювачів – азотнокислого та азотистокислого натрію. Такий процес рекомендований для чавунних та сталевих деталей, які працюють в маслі, в масляному тумані, в атмосфері з періодично відновлюваним змащенням, а також в паливі, яке не містить води. Недоліками цієї технології є висока температура процесу обробки (близько 1350°C) нездатність плівок, які утворюються в результаті хімічного оксидування, тривалий час захистити від корозії, а тим паче від зношування.

Існує безліч різних шляхів одержання зносо- і корозійностійких захисних покриттів напилюванням, наплавленням, хіміко-термічною обробкою, PVD, CVD і іншими методами [48-51]. Однією з основних задач при одержанні захисних покриттів є спрямований вплив на властивості робочої поверхні, що досягається необхідним хімічним складом і структурою захисного покриття [52-54].

Класифікація промислово застосовуваних процесів створення покриттів [55] показує, яка створена велика кількість методів поверхневого зміцнення і способів їх реалізації. Кожний з цих методів дає, як правило тільки один певний ефект, що приводить до покращення якоїсь із властивостей основного матеріалу.

Відомий спосіб електродугового напилення [56-58], при якому розплавлені дрібні частки матеріалу, що напилюють на основу, можна одержати шляхом пропущення дроту або порошку через киснево-ацетиленове полум'я з наступним осадженням на холодну основу.

Недоліком методу електродугового напилювання є перегрів і окислювання речовини напилюваного матеріалу при малих швидкостях подачі дротового електрода в зону газо-термічного диспергування. Крім того, велика кількість теплоти, що виділяється при горінні електричної дуги, приводить до значного вигорання легуючих елементів, що входять у напилюваний сплав (наприклад, вміст вуглецю в матеріалі покриття знижується на 40 - 60 %, а кремнію і марганцю на 10 - 15%).

Плазмове газо-термічне покриття [57-59] відрізняється від інших технологічних газо-термічних покриттів поліпшеними експлуатаційними показниками, але сама можливість нанесення плазмового покриття і його експлуатаційна добротність реалізується тільки в умовах сучасного виробництва з високим рівнем культури прогресивних технологій, що беруть участь у технологічному ланцюжку плазмового напилювання.

Перевагами плазмового нанесення покриттів є висока продуктивність, широка гама нанесених матеріалів, можливість одержання комплексних, а також багатошарових покриттів, використання для відновлення розмірів деталей з великим зносом [60-62].

Поряд з перевагами існують і недоліки даного методу, такі як низька міцність зчеплення з основою, висока пористість, дороге обладнання, малий ресурс плазмотронів, нагрів і короблення деталей, висока енергоємність, необхідність спеціальних заходів для охорони праці і навколишнього середовища, значний рівень залишкових напруг у покритті, зниження втомної міцності деталей на 10 - 40%, неможливість або складність використання дрібнодисперсних порошків [58].

За допомогою детонаційного напилювання [63] наносяться зносостійкі покриття з найрізноманітніших матеріалів на металеві і неметалічні вироби.

Сутність процесу детонаційного напилювання полягає у використанні енергії детонаційного згоряння газових сумішей для нагрівання і надання високої швидкості (до 1000 м/с) часткам порошку матеріалу, що наноситься. Нагрівання часток і прискорення здійснюється продуктами детонації. При детонаційному напилюванні висока швидкість часток приводить до того, що взаємодія часток з напилюваною поверхнею відбувається при імпульсному тиску, на порядок перевищуючому тиск, що має місце при плазмовому напилюванні.

Детонаційні покриття застосовуються для підвищення зносостійкості і жаростійкості поверхонь, для захисту від корозії, для надання магнітних властивостей [64].

Як показало практичне застосування, перевагами детонаційних покриттів є можливість використання дрібнодисперсних порошоків внаслідок високих швидкостей руху часток, низька пористість покриттів і висока міцність їх зчеплення з основою, мале нагрівання зміцнюваної деталі (менше 200 °С), широка номенклатура матеріалів, що наносяться, можливість одержання багатошарових і композиційних покриттів [58, 66].

Недоліком цієї технології є високий рівень шуму при роботі установки, а також необхідність спеціальних боксів, додаткові заходи безпеки внаслідок використання пальних газів, порівняно висока вартість обладнання, складність відпрацювання режимів і відтворення умов напилювання.

Недоліками будь-якого методу газо-термічного напилювання, що використовує для нанесення покриттів порошкові матеріали, є складність забезпечення стабільності властивостей і належного рівня якості покриттів, одержуваних з багато компонентних механічних порошоків, що викликано сегрегацією компонентів при змішуванні і транспортуванні суміші із дозуючих пристроїв у струмінь, а також сегрегацією порошкових часток у процесі самого напилювання. Сегрегація приводить до нерівномірності формування структури, збільшенню пористості, зниженню міцності й експлуатаційних характеристик покриттів. Стабільність подачі напилюваного

матеріалу залежить від конструкції дозуючого пристрою і, як правило, перевищує 2%. Нерівномірність розподілу порошкових часток у потоці продуктів згоряння робочих газів або плазмового струменю приводить до зниження характеристик міцності покриттів [65-70].

В даний час у залежності від конкретно розв'язуваних технологічних задач застосовуються різні вакуумні методи нанесення покриттів термічним випарюванням, іонним розпиленням, активованим реакційним випарюванням, іонним осадженням, електронно-променевим плазмовим напилюванням, конденсацією з іонним бомбардуванням, іонно-променевим модифікуванням, а також осадженням покриттів з газової фази у вакуумі [71-75].

Є кілька різновидів вакуумного напилювання: термічне напилювання - випарювання матеріалу у вакуумі і його конденсації на виробі, який зміцнюється, іонне розпилення - розпилення мішені з матеріалу, що наноситься іонним бомбардуванням і осадження часток, що утворилися, на поверхні деталей, іонно-термічне нанесення - випарювання матеріалу, що наноситься, електронним променем або іншим способом, іонізація пари, що утворилася, і її прискорення електростатичним полем у напрямку деталей, які зміцнюються, з наступним осадженням на них, нанесення покриттів із плазми електродугового розряду - випарювання матеріалу катодною плямою вакуумної дуги потужнострумовевого низьковольтного розряду і конденсація його на деталях, які зміцнюються. В усіх випадках може використовуватися реактивний газ (азот, кисень, метан, ацетилен і ін.), взаємодіючий з випаруваним або розпиленим матеріалом з утворенням хімічних сполук, що конденсуються на деталях (реактивне напилювання) [76-87].

Технологічні фактори й умови нанесення покриттів (залежать від способу вакуумного напилювання) для методу КІБ (конденсація покриттів із плазмової фази у вакуумі з іонним бомбардуванням поверхні) [58,77], найбільш широко застосовуваного в машинобудуванні включають температуру підложки, тиск реактивного газу, потенціал на підложці, сила

струму дуги, тип і склад реактивного газу, умови переміщення заготовок у камері.

Продуктивність залежить від числа і розмірів виробів, що поміщаються у вакуумну камеру, необхідної товщини покриття і швидкості осадження. Для покриттів, одержуваних способом КІБ на установках типу "Булат", швидкість осадження покриття складає 3-15мкм/год [58,78].

Обробка поверхні після нанесення покриття складається з хіміко-термічної обробки (карбідізація) для покриттів, одержуваних термічним напилюванням, алмазного вигладжування і вібровигладжування.

Переваги нанесення покриттів включають широку номенклатуру матеріалів для нанесення, високу міцність зчеплення з основою, екологічну чистоту, порівняно високу продуктивність, можливість одержання багат шарових і композиційних покриттів.

Варто звернути увагу також і на недоліки технології, такі як підвищенні вимоги до якості очищення поверхонь, висока вартість і складність застосовуваного обладнання, висока енергоємність [58].

Наплавлення широко й ефективно застосовується, наприклад, у дорожно-будівельному, сільськогосподарському машинобудуванні для зміцнення деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного зношування. Наплавлення застосовується не тільки при виготовленні виробів, але й у ремонтній справі для відновлення зношених деталей [88-94].

Високу твердість і зносостійкість одержують при легуванні наплавленого металу марганцем, бором, вольфрамом, молібденом, хромом і іншими елементами, але в процесі наплавлення частина елементів губиться внаслідок окислювання, випарювання, і розбризкування.

У процесі наплавлення відбувається розплавлювання деякої частини основного металу виробу і перемішування з наплавленим металом. Це приводить до зміни хімічного складу, фізичних і механічних властивостей наплавлюваного металу і до погіршення його експлуатаційних якостей. При

плавці основний метал піддається значному тепловому впливу, що викликає істотні структурні зміни [88].

Все більш широко застосовуються спеціальні способи наплавлення - електрошлакове, плазмове, струмами високої частоти й ін. [88, 94]

Спосіб плазмового наплавлення забезпечує мінімальне проплавлення основного і наплавлюваного металів і мінімальний перехід елементів основного металу в метал наплавлення, що забезпечує високу надійність і працездатність виробу в цілому. Особливістю плазмового наплавлення є можливість наплавлення тугоплавких матеріалів і незначна глибина проплавлення. Можливість поєднання різнорідних металів при мінімальному напавленні забезпечує задані фізико-механічні властивості напавленого металу, дозволяє скоротити витрати коштовних матеріалів. Недоліками плазмового наплавлення є висока температура процесу, а також велика вартість захисних газів [77-78].

Плазмове наплавлення застосовується для нанесення жароміцних матеріалів, наплавлення антифрикційних матеріалів на поверхню тіл обертання й ін.[90].

Сутність електроіскрового легування (ЕІЛ) полягає в тому, що при іскровому розряді в газовому середовищі переважно руйнується матеріал анода і продукти ерозії переносяться на катод [95]. При раціональному виборі матеріалу анода на поверхні катода (деталі) у результаті обробки утвориться зміцнений шар високої твердості і зносостійкості. На поверхні металу утвориться зносостійкий шар, структура якого нагадує структуру антифрикційних сплавів: гнізда дрібнодисперсних карбідів включені в порівняно м'яку основу. Цей перенесений матеріал електрода легує метал деталі і, з'єднуючи хімічно з дисоційованим атомарним азотом повітря, вуглецем і матеріалом деталі, утворює дифузійний зносостійкий зміцнений шар. При цьому в шарі виникають складні хімічні сполуки, високостійкі нітриди, карбонітриди, а також гартівні структури. Глибина термічного



впливу на матеріал деталі дуже невелика (0,8-1,0) мм. Відсоток витривалості (опір втоми) деталі практично не знижується. [77]

Разом з тим електроіскрове легування вирізняється і рядом недоліків, головним з яких є формування у багатьох випадках неприпустимого рівня остаточних напружень розтягнення та неприйнятної шорсткості поверхні [59, 96]. Крім того, твердість зміцнених поверхневих шарів виявляється меншою вихідної, що пояснюється високою дефектністю поверхневих шарів, їх термічним знеміцненням та потребує проведення операцій фінішної обробки.

Методи нанесення покриттів хімічним осадженням з газової фази в розрідженій атмосфері. До зазначеної групи варто віднести методи хімічного осадження покриттів з парогазової фази (методи ХОП), що одержали у світовій практиці назву CVD (Chemical Vapor Deposition) [77, 97-98].

Методи ХОП широко використовуються для нанесення покриттів на основі карбідів, нітридів, карбонітридів титану на багатогранні пластини, що не переточуються [99]. На основний метал осаджуються карбіди, нітриди титана й окис алюмінію. По всій площині поверхні основного матеріалу, утвориться рівномірна плівка покриття. Швидкість осадження складає кілька мікрон за годину. Зчеплення покриття залежить від взаємної розчинності обох матеріалів і чистоти поверхні, що покривається. Товщина покриття 3-10 мкм.

Недоліком при методі CVD є досить висока температура нагрівання підложки (до 1000°C), тому він має обмежене застосування (для нанесення покриттів на різальний інструмент із твердого сплаву).

Нанесення гальванопокриттів. Для відновлення деталей машин у даний час широко застосовують електролітичні способи нарощування [50,99-100]. Сутність процесу електролізу полягає в тім, що якщо у водянні розчини деяких солей кислот, лугів - електролітів - помістити два електроди (анод і катод) і підключити їх до джерела струму, то буде протікати електрохімічна реакція. Метал, що виділяється на катоді, використовують для відновлення деталей шляхом нарощування зношених поверхонь.

Перевагами методу хімічного осадження є висока продуктивність, недороге і нескладне технологічне обладнання, можливість одержання рівномірних по товщині, багат шарових і композиційних покриттів із широким діапазоном твердості, забезпечується висока зносостійкість електролітичного металу, відсутність нагрівання і короблення деталей, багатократне використання застосовуваних для нарощування електролітів після відповідної обробки [58-59].

Недоліки методу - зниження опору утоми деталей на 15 - 20 %, токсичність електролітів і забруднення навколишнього середовища, порівняно невисока міцність зчеплення з основою, великий цикл підготовчих операцій перед осадженням металу [58-59].

Зносостійкі хромові покриття наносяться для підвищення зносостійкості різних деталей тертя, інструмента, покриття деталей і штампів, для відновлення розмірів, зношених або бракованих деталей [77-78].

Електролітичний хром має ряд переваг, а саме: високою зносостійкістю (у 5-8 разів вище, ніж в електролітичного заліза); низьким коефіцієнтом тертя (у 1,8-2 рази нижче, ніж у сталі); високою хімічною стійкістю, жаростійкістю - 1230°C; осаджуваністю практично на всі машинобудівні метали.

Спосіб відновлення деталей хромуванням має істотні недоліки. При товщині шару хрому більше 0,3 мм зчеплення його з основним металом деталі набагато гірше, ніж при нанесенні більш тонких шарів. Процес хромування дуже повільний: шар товщиною 0,015-0,03 мм відкладається протягом години. Тому недоцільно хромувати деталі з великим зносом. Також шар хрому механічно важко обробляється. Процес обробки деталей дорогий, тому що вимагає великих витрат електроенергії і часу. Крім того, хромові солі є дефіцитним матеріалом [58].

Одним зі зносостійких матеріалів є залізо і його сплави з вуглецем, марганцем, нікелем, фосфором і іншими металами. Основна область застосування покриттів на основі заліза - відновлення зношених сталевих виробів [101-102]. На відміну від хромування, застосовуваного для тієї ж мети,

залізнення відрізняється більшою швидкістю осадження, можливістю одержання товстих (до 3-5 мм) шарів металу, що осаджується, не токсичністю процесу.

Для нанесення зносостійких покриттів, головним чином, застосовують хлоридні електроліти. З хлоридних електролітів з аскорбіновою кислотою можна одержати пористі залізні покриття, що мають велику маслоємність і забезпечують гарну припрацьовуваність і працездатність [102-103].

Одним з недоліків електролітичного заліза є крихкість осаду, що підвищується при зниженні температури електроліту і підвищеному вмісті водню.

Для захисту деталей від корозії та підвищення їх зносостійкості використовують також процес хімічного нанесення фосфатної плівки, який називається фосфатуванням. Процес фосфатування полягає в обробці його поверхні фосфорнокислими розчинами. В результаті цієї обробки, на металевій поверхні, утворюється суцільна плівка фосфатів різних металів, з кристалічною або аморфною структурою [102]. Утворюються тонкі, добре зчеплені з основою плівки нерозчинних у воді фосфорнокислих з'єднань. Товщина фосфатного покриття становить, лише від 1 до 5 мкм.

На сьогодні найширше застосування одержав препарат для фосфатування „Мажеф”, який містить марганець, залізо, фосфорну кислоту. Фосфатна плівка при використанні даного препарату має високі захисні властивості.

Процес одержання фосфатної плівки з використанням даного препарату має свої недоліки: високі температури, вузький робочий інтервал температур, тривалість операції, наводнення сталі (через сильне виділення водню). Щоб знизити наводнення зменшують тривалість процесу.

Нанесення покриттів конденсацією з'єднань, які утворюються при хімічній взаємодії речовин, що знаходяться в газовій фазі [102].

Перевагами покриттів утворених конденсацією є висока якість нанесених покриттів і міцність їх зчеплення з основою.

Недоліки покриття складаються у високій температурі нагрівання виробів (300-1200°C) при нанесенні покриттів, що обмежує сферу застосування способу, робота з пожежонебезпечними і агресивними газами.

Як показали дослідження, для підвищення надійності і працездатності деталей, що працюють в умовах тертя, ефективним методом зміцнення деталей є поверхневе легування [104-112], тобто цілеспрямована зміна хімічного складу приповерхневих шарів металу для досягнення тих або інших цілей. Поверхневе легування може здійснюватися дифузійним насиченням металу із середовища визначеного складу (хіміко-термічна обробка), методами поверхневого плавлення з уведенням необхідних компонентів (лазерне легування, електроерозійне зміцнення, плазмове й електронно-променеве легування, іонна імплантація) [113-119].

Поверхневе легування має ряд переваг у порівнянні з нанесенням покриттів. Головне з них - винятково висока міцність зчеплення з основою, оскільки границя матеріалу з легованим шаром має дифузійний характер [119-120].

Легування в більшості випадків супроводжується синтезом хімічних сполук (інтерметалідів, карбідів, боридів, силіцидів і ін.), що визначають властивості зміцненого шару. Відомо, наприклад, що збільшення вмісту хрому підвищує корозійну стійкість сталі, чому сприяє пасивуюча і захисна роль окису хрому; добавки алюмінію збільшують жаростійкість [58,102,112].

Найбільш дослідженим способом поверхневого легування є хіміко-термічна обробка, яка може мати різне призначення [33,48,55,59,106,112].

Як показали дослідження [111-112], для підвищення зносостійкості в машинобудуванні застосовується цементация, азотування, борування, хромування, молібденування, ваннадіювання, вольфрамуювання, фосфатування та інші.

Найбільш часто для зміцнення деталей машин застосовують цементацию і нітроцементацию.

Процес цементації звичайно здійснюється в інтервалі температур 860-960°C. Тривалість витримки в залежності від складу цементуємої сталі, способу цементації (газова цементація; у твердому карбюраторі; рідинна) і необхідної глибини шару, що коливається в межах від 0,15 до 2,5 мм, складає від 1 до 30 годин [122-125].

Нітроцементація внаслідок своїх переваг перед газовою цементацією в багатьох випадках її витісняє. Основні переваги нітроцементації і ціанування, крім більшої швидкості насичення, складаються в можливості одержання більш зносостійкого (і теплостійкого) шару завдяки наявності в ньому азоту, меншому росту зерна і меншій деформації деталей унаслідок меншої тривалості і більш низької температури процесу [126].

Вакуумна цементація перед іншими видами цементації має ряд переваг: мала тривалість процесу; високий коефіцієнт масовіддачі; відсутність газо-підготовчої установки; зменшення питомої витрати електроенергії і технологічного газу; відсутність внутрішнього окислювання; висока культура виробництва і велика мобільність обладнання (пуск і установка займають кілька хвилин). Однак цьому процесу властивий і ряд недоліків: перенасичення поверхні вуглецем (аж до утворення карбідного шару); утворення великого зерна, незважаючи на фазову перекристалізацію після цементації, що знижує механічні властивості оброблюваних деталей [102].

У машинобудуванні для деталей, що працюють в умовах зношування і циклічних навантажень, широко застосовується азотування при 520-600°C в атмосфері аміаку [102]. Азотуванню можуть піддаватися всі конструкційні, поліпшувані мартенситностаріючі, корозійно-стійкі, жароміцні й інструментальні сталі. Тривалість витримки в залежності від типу сталі, і необхідної глибини шару складає 20-100 годин.

Для прискорення процесу азотування в роботі [127] пропонується проводити попереднє окислювання поверхневих шарів деталей в інтервалі температур 550 - 620 °C протягом 5- 10 хвилин в атмосфері парів води безпосередньо перед азотуванням.

Після оксидування атмосферу парів води заміняли на аміак зі ступенем дисоціації 25 - 45 % і, не змінюючи температуру печі, проводили азотування. Після закінчення процесу деталі охолоджували до 180 - 200°C у печі, а потім в маслі. Результати проведених досліджень показали, що попереднє оксидування на протязі 5 - 10 хвилин дозволяє прискорити азотування на 30 - 50% за рахунок формування тонких оксидних плівок, що легко відновлюються у атмосфері, яка містить водень, в процесі азотування, утворити атомно-чисту поверхню з гарною адсорбційною здатністю, але зі збільшенням тривалості азотування ефективність попереднього оксидування зменшується [127-128].

Велика ефективність застосування азотування в порівнянні з цементацією в ряді випадків обумовлена більш високою зносостійкістю (при невеликій величині припустимого зносу), теплостійкістю і корозійною стійкістю азотованої сталі. У той же час азотований шар характеризується відносно більшою крихкістю. Зносостійкість азотованої сталі в 1,5-4 рази вище зносостійкості загартованих високовуглецевих і цементованих сталей [59,129].

У промисловості знайшло застосування і дифузійне хромування. Одержуваний після хромування сталі карбідний шар має високу твердість (HV 1500 і 2000) зносостійкість. Хромова сталь характеризується високою корозійною стійкістю, підвищеною жароміцністю й ерозійною стійкістю в ряді середовищ [58-59].

Процес дифузійного хромування в залежності, від марки оброблюваної сталі і способу насичення, може здійснюватися в інтервалі температур 800-1300°C.

Хромування може бути рекомендоване для деталей, що працюють в умовах зношування (сухе тертя, тертя з мастильним матеріалом, абразивне, гідроабразивне зношування та ін.), а також корозії і окислювання при високих температурах.

Аналіз використовуваних методів зміцнення робочої поверхні (азотування, сульфидування, сульфоціанування й ін.) показують, що вони

трудомісткі, тривалі, вимагають застосування шкідливих і дефіцитних хімікатів і складного обладнання [108]. Так, наприклад, поверхневі шари, отримані при азотуванні, підвищують зносостійкість, але погано припрацьовуються через високу твердість, що приводить до викришування азотованого шару в процесі експлуатації [109]. При фосфатуванні поліпшується припрацьовуваність, але не забезпечується необхідна зносостійкість чавуна. Сульфідкування гарантує чавуну антифрикційні властивості, але ці шари не можуть тривалий час протистояти високим навантаженням, при яких працюють багато деталей [109].

Основний недолік традиційних методів ХТО - велика тривалість технологічного процесу, можливість одержання внутрішнього окислювання дифузійного шару, не завжди задовільна якість поверхні після ХТО.

При іонній імплантації іони нанесеного матеріалу впроваджуються в поверхневий шар матеріалу основи. Найбільш розповсюдженим імплантатом, що викликає збільшення опору зносу є іони азоту [102].

Перспективним є створення на робочих поверхнях деталей тонких плівок матеріалів з підвищеними фізико-хімічними і механічними характеристиками [130-133]. Нанесення на матеріали одношарових і багатошарових тонких плівок з металів і їх з'єднань дозволяє створити вироби з унікальними електрофізичними, теплофізичними і фізико-механічними властивостями. Вибираючи матеріал покриття і технологічні режими його нанесення, можна змінювати в широких межах основні поверхневі властивості: твердість, коефіцієнт тертя, теплопровідність і електричну провідність, коефіцієнт відображення, зносостійкість і корозійну стійкість, при цьому зберігаючи високі властивості матеріалу основи.

Серед сучасних методів термохімічного впливу на залізовуглецеві сплави для підвищення триботехнічних властивостей матеріалів, найбільш екологічно чистим, фінішним процесом, є паротермічне оксидування [134], тому що в якості насичуючого середовища використовується перегріта водяна пара.

За даними [135] оксидні захисні плівки застосовуються в порошковій металургії, при одержанні електроізоляційних покриттів для підвищення стійкості ріжучого інструмента, підвищення антикорозійної стійкості, зниження періоду припрацювання і підвищення зносостійкості спряжених деталей.

Сутність методу [134] полягає в обробці сталевих і чавунних деталей перегрітою парою при температурі 500 - 600°C, тиску пари до 0,1 МПа і витримці 1- 2 години. Товщина оксидної плівки, що утвориться в результаті обробки, приблизно дорівнює 6 мкм. Оксидна плівка сприяє припрацюванню, зменшує імовірність виникнення задирів і збільшує зносостійкість деталей. Метод простий і не вимагає складного дорогого обладнання і не шкідливий для обслуговуючого персоналу.

Важливим фактором при одержанні оксидної плівки є температурний режим обробки виробу. За даними [136] при температурі нижче 575°C в звичайних умовах утвориться плівка з іншим фазовим складом і морфологією, при температурі 450°C процес парооксидування протікає дуже слабо і при 400°C припиняється.

#### 1.4 Висновки до першого розділу

1. Проаналізовано умови роботи пари тертя шестерня - корпус масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згорання. Встановлено, що зниження працездатності і вихід з ладу шестеренних масляних насосів відбувається за рахунок зносу стінок корпуса і голівок зубів нагнітальних шестерень, торців шестерень і кришки масляного насоса, зносу зубів нагнітальних шестерень по окружності голівок.

2. Виявлено, що роботи з підвищення працездатності масляних шестеренних насосів велися в трьох напрямках: удосконалення конструкції,



покращення складу мастильних матеріалів, застосування технологій нанесення покриттів. Зроблено висновок, що найперспективнішим напрямком підвищення зносостійкості деталей масляних шестеренних насосів є формування захисних покриттів.

3. Проаналізовано існуючі методи підвищення триботехнічних властивостей пар тертя та виявлено, що вони не є оптимальними для пари шестерня - корпус: - використовувані для робочих поверхонь методи поверхневої обробки, такі як загартування за допомогою струмів високої частоти, хімічне оксидування, є трудомісткими, досить тривалими, потребують застосування складного і дорогого обладнання; - азотування дає можливість одержувати поверхневі шари з більш високою зносостійкістю, теплостійкістю і корозійною стійкістю азотованої сталі, але азотований шар характеризується відносно більшою крихкістю; - паротермічне оксидування підвищує протизадирні властивості та зносостійкість чавунів, не потребує складного обладнання, застосування спеціальних хімічних сполук, є безпечним для робітників. Недоліком є суворі вимоги щодо температурних режимів при обробці, та недостатньо високі антифрикційні властивості поверхонь в парах тертя сталь-чавун.

4. Зроблено висновок, що враховуючи простоту та екологічну безпечність паротермічного оксидування на його основі розробити новий технологічний процес обробки робочих поверхонь, підібравши оптимальний склад елементів насичуючого середовища, який дозволив би подовжити строк експлуатації масляних шестеренних насосів за рахунок створення поверхневого шару з заданими властивостями. Необхідно розробити такий спосіб обробки поверхонь, який з одного боку, дозволив би знизити коефіцієнт тертя, зменшити знос, поліпшити припрацювання спряжених деталей, а також, був би технологічним, екологічно чистим і одночасно забезпечував би економію енергетичних і матеріальних ресурсів.

## РОЗДІЛ 2

### ВИБІР МАТЕРІАЛІВ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1 Аналіз властивостей матеріалів, які застосовуються для виготовлення пари тертя шестерня-корпус

Як показав огляд літературних джерел [7, 10, 12, 13] приблизно 80% вузлів, що качають, застосовуваних у гідросистемах транспорту, мають конструкцію шестеренного типу. Переваги шестеренних насосів у тому, що вони мають просту конструкцію - дві шестерні і корпус забезпечують роботу всієї гідросистеми. Мінімум технологічних операцій затрачених на виготовлення таких насосів забезпечує значне збереження матеріальних енергетичних і трудових ресурсів. Термін служби шестеренного насоса залежить від його робочих характеристик. З робіт [7, 13, 14] відомо, що зниження продуктивності шестеренних насосів відбувається за рахунок збільшення обсягу витоків через зазори між корпусом і шестернями. Зазори збільшуються в процесі зношування стінок корпуса в спряженні з голівками зубів нагнітальних шестерень, торців шестерень і кришки насоса, зубів шестерень у спряженні один з одним.

Комплексні дослідження при розробці нового технологічного процесу підвищення експлуатаційних властивостей деталей масляного шестеренного насоса представлені діаграмою Ісікави (рис.2.1) [137]. Діаграма висвітлює роботи і методики експериментальних і теоретичних досліджень, метою яких є підвищення експлуатаційних властивостей деталей масляних шестеренних насосів за рахунок розробки способу нанесення покриття з заданими властивостями.

В теперішній час при виготовленні шестерень і корпусів масляних шестеренних насосів тракторних дизельних двигун застосовуються хромисті сталі, сірі чавуни.

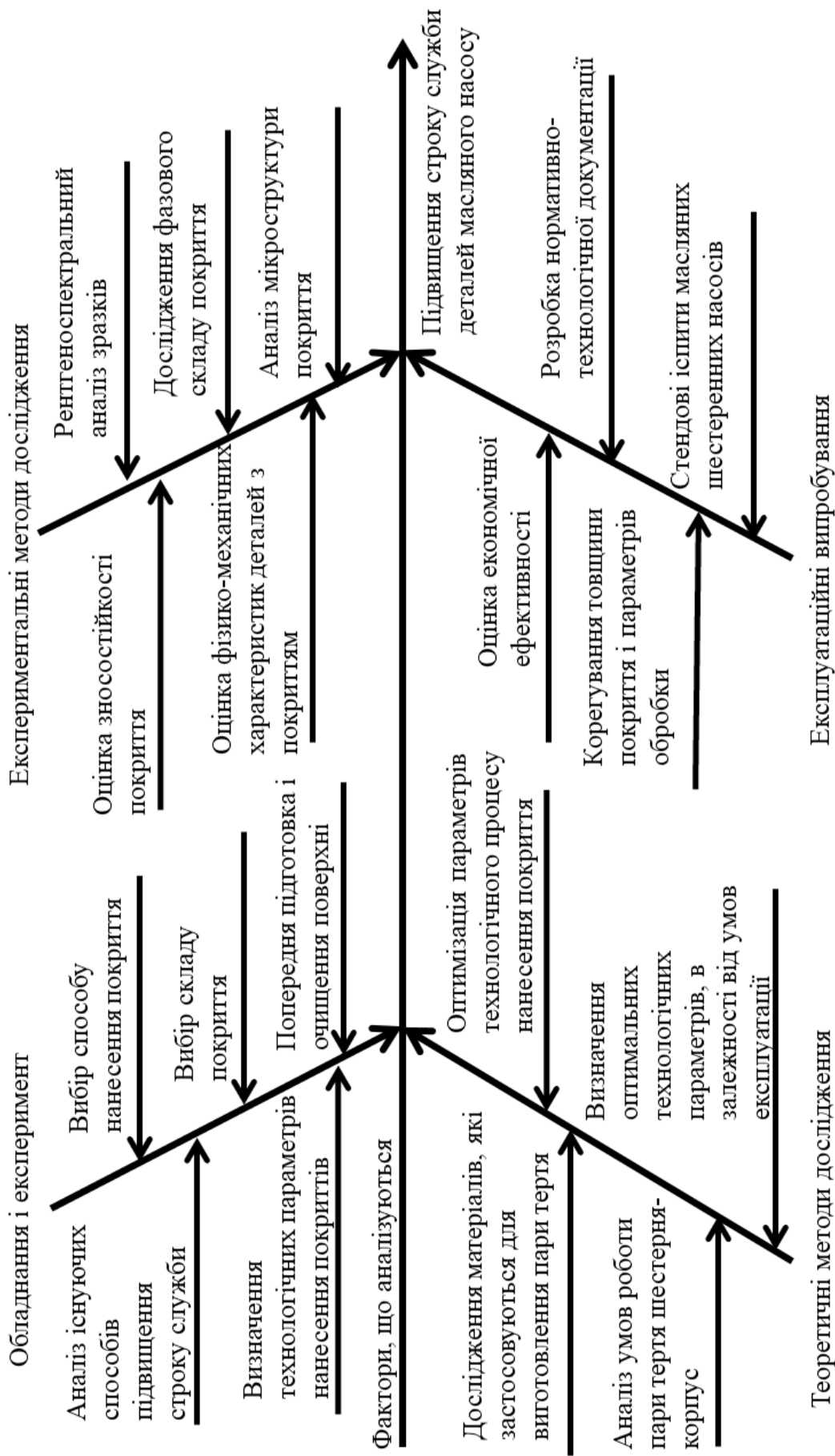


Рисунок 2.1 – Комплексні дослідження при розробці нового технологічного процесу підвищення експлуатаційних властивостей деталей масляного шестеренного насосу

Для забезпечення властивостей, необхідних для експлуатації шестерень, проводять термічну обробку сталі 40Х - загартування в маслі і високий відпуск. Перетворення при температурі 590 – 640 °С дає відстань між пластинками фериту і цементиту  $3 \cdot 10^{-7}$  -  $4 \cdot 10^{-7}$  м; таку перлітну структуру називають сорбіт - суміш фериту і дисперсних сферовидних часточок цементиту. Частки карбідів у структурі сорбіту відпуску мають зернисту будову. Утворення зернистих структур поліпшує механічні властивості сталі. Сорбіт має гарну пластичність і в'язкість[21].

Ударна в'язкість сталі 40Х з підвищенням температури відпуску теж підвищується; пропорційно зростають відносно подовження та відносно звуження [21]. Умовна межа текучості, тимчасовий опір та твердість з підвищенням температури відпуску сталі 40Х зменшуються [138].

Розподіл графіту істотно впливає на службові властивості: зносостійкість, стійкість проти задирів. Наявність у мікроструктурі фосфідної евтектики і евтектичного цементиту підвищують зносостійкість чавуна. Фізико-механічні і службові властивості чавуна визначаються особливостями мікроструктури, що оцінюють за [139].

При терті сірого чавуна в парі з іншим матеріалом проявляються його специфічні антифрикційні властивості, пов'язані з наявністю в структурі пластинчастого графіту. Графіт при терті частково викришується і відіграє роль твердого мастила. Тому навіть при сухому терті пара працює без інтенсивного зносу при досить високих швидкостях і навантаженнях [25].

При терті із мастилом графітові включення вбирають мастило, мастило утримується також і у порожнинах від графіту, який викришився, що дозволяє зберегти режим тертя із мастилом і в періоди „масляного голодування”.

У зоні тертя графітові пори, при певному співвідношенні між розмірами графіту і абразивної частинки, „поглинають” абразивні часточки, знижуючи темп абразивного зносу [26].

Зносостійкість сірого чавуна залежить від структури. Вплив структури проявляється в різній степені при різних умовах тертя. Перлітна структура металевої основи (незагартованого) чавуна є найбільш зносостійкою. Чим дисперсніше перліт, тим менше знос; а ферит у кількості понад 5 - 15 % знижує твердість і зносостійкість чавуна, його антизадирні властивості [25].

Вплив фериту на знос сірого чавуна наведено в [26]. Як видно з графіка, зі збільшенням кількості фериту у структурі чавунів знос теж зростає.

Графіт з розміром пластин 125 - 200 мкм забезпечує максимум зносостійкості чавуна станин верстатів при терті із мастилом, забрудненим абразивом [25].

Включення фосфідної евтектики підвищують зносостійкість і антизадирні властивості чавуна. Цей вплив проявляється при вмісті фосфору більше 0,25%.

З вище наведеного можна зробити висновок, що хоча термічна обробка і забезпечує необхідну структуру сталі 40Х і сірого чавуна, для підвищення зносостійкості доцільно застосовувати різні методи нанесення покриттів, що веде до покращення експлуатаційних властивостей пар тертя.

Перед нанесенням покриття на сталь 40Х і сірий чавун проводився добір експериментальних зразків шляхом перевірки на відповідність їх елементного складу і показників фізико-механічних властивостей значенням, регламентованим [140] і [141].

## 2.2 Розробка способу нанесення покриттів

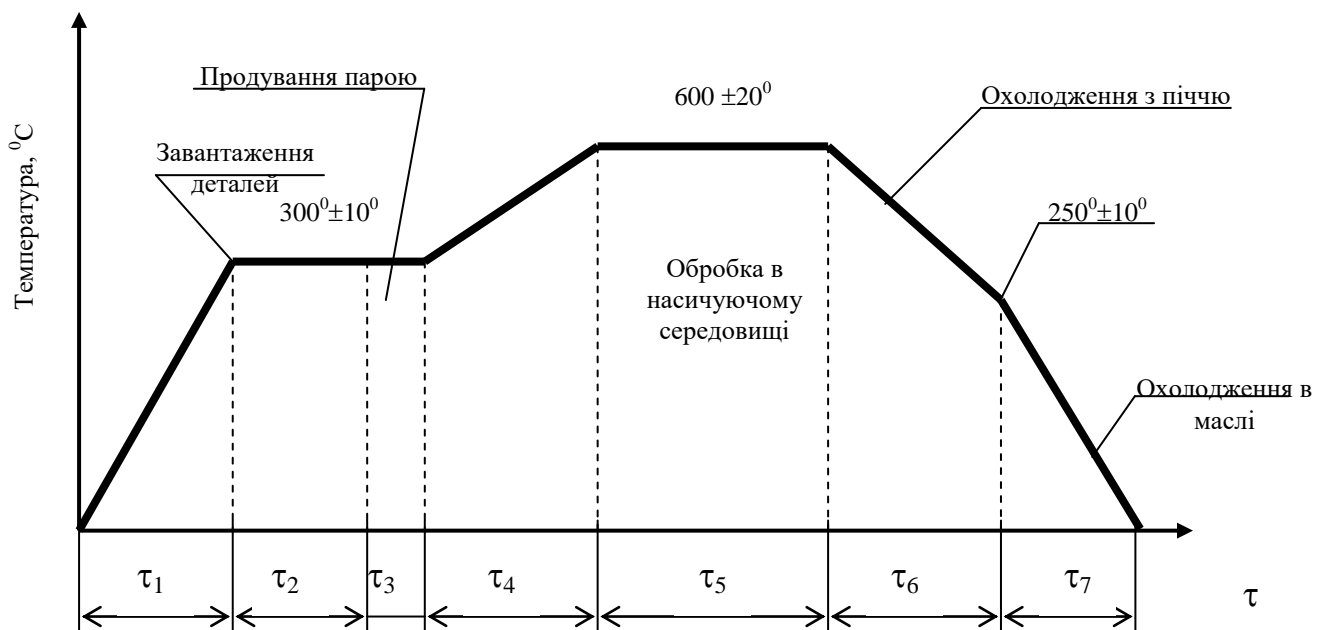
**Аналіз методів [142], що використовуються для зміцнення робочої поверхні, показує, що вони трудомісткі, тривалі, вимагають застосування шкідливих і дефіцитних хімікатів і складного обладнання.**

Так, наприклад, поверхневі шари, отримані при азотуванні, підвищують зносостійкість, але погано припрацьовуються через високу твердість, що приводить до викришування азотованого шару в процесі експлуатації. При фосфатуванні поліпшується припрацьовуваність, але не забезпечується необхідна зносостійкість чавуна. Сульфідкування гарантує чавунові антифрикційні властивості, але ці шари не можуть тривалий час протистояти високим навантаженням, при яких працюють основна маса деталей.

Як базова обробка обрана технологія парооксидування [134,136], сутність якої в тому, що чавуни обробляються в атмосфері перегрітої водяної пари у діапазоні температур 450 - 650°C. Цей технологічний процес простий та екологічно чистий, але не забезпечує задані експлуатаційні властивості робочих поверхонь деталей масляного шестеренного насосу.

Відома у світовій практиці машинобудування обробка в паро-газовому середовищі із водних розчинів солей [143], як ефективний спосіб підвищення деяких триботехнічних властивостей деталей.

Технологічний процес обробки в паро-газовому середовищі із водних розчинів солей (рис.2.2) складається з наступних операцій: приготування водного розчину солі необхідної концентрації, контролю розчину на



## Рисунок 2.2 – Схема технологічного процесу обробки в паро-газовому середовищі із водних розчинів солей

кислотність середовища, прогрівання печі до температури завантаження деталей, завантаження деталей, вихід печі на температуру обробки, обробка деталей в насичуючому середовищі, охолодження печі разом з деталями до певної температури, потім охолодження в маслі [144].

Раніше проведеними дослідженнями на машинах тертя за схемою диск - колодка було встановлено, що якщо поверхні тертя обробити в середовищі перегрітої пари, яке насичене хімічними сполуками, то при іспитах в порівнянні з необробленими поверхнями знижуються коефіцієнт тертя і знос зразків, в цілому покращуються триботехнічні властивості [143-145].

Тому, поставлене завдання удосконалення технології виготовлення деталей масляного шестеренного насосу системи змащування тракторних двигунів за рахунок розробки нової технології поверхневого зміцнення, може бути вирішена шляхом обробки робочих поверхонь у паро-газовому середовищі, склад якого потрібно обрати з огляду на покращення триботехнічних властивостей [146], а саме зниження коефіцієнту тертя, підвищення зносостійкості, задиростійкості, зниження шорсткості поверхні, покращення припрацювання деталей.

### 2.3 Лабораторне обладнання для нанесення покриттів

У сучасному машинобудуванні для хіміко-термічної обробки поверхонь деталей застосовуються різні типи пічного обладнання. З огляду на досвід, накопичений ученими - спеціалістами в області обробки сплавів у паро-газових середовищах [134-136, 143-144] у роботі для вирішення поставлених задач використовували піч для хіміко-термічної обробки з вертикальним розташуванням робочого циліндра [147]. Така піч має ряд

переваг у порівнянні з печами з горизонтально розташованою робочою камерою при даному виді обробки: забезпечується рівномірний тепловий режим по всьому об'єму робочого циліндра; зберігається постійна температура при подачі водного розчину, рівномірне охолодження зразків.

Схема лабораторної печі для запропонованої хіміко-термічної обробки представлена на рисунку 2.3., вона включає наступні елементи: 1 - ємність з робочою рідиною; 2 - вентиль, що регулює подачу середовища для обробки у робочу камеру; 3 - трубка для підведення насичуючого середовища; 4 - манометр; 5 - трубка для відведення газів з робочої камери; 6 - випускний вентиль; 7 - кришка печі; 8 - робочий циліндр; 9 - футеровка печі; 9 - нагрівальні елементи; 11 - індикатор температур; 12 - термопара. У кришку печі вмонтовані гачки для підвішування оброблюваних зразків.

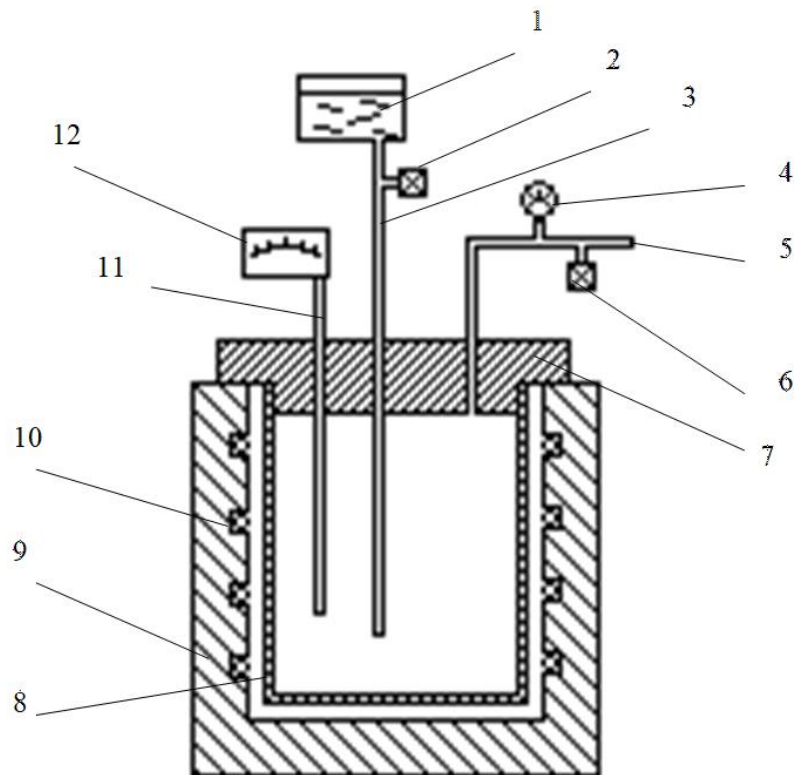


Рисунок 2.3 – Схема лабораторної печі для запропонованої обробки [147]

Лабораторна піч для хіміко-термічної обробки працювала наступним чином. Піч нагрівали до необхідної температури. Піднімали кришку печі 7 і



проводили завантаження зразків у робочу камеру. Герметично закривали кришку. Розміщені в робочому циліндрі зразки нагрівали до заданої температури.

Температуру контролювали термopарою 12. Готували розчин і заливали його в ємність 1. Після досягнення заданої температури в робочій камері відкривали вентиль 2 і проводили обробку в паро-газовому середовищі.

Після необхідного часу витримки вентиль 2 закривали, припиняючи подачу розчину. Піч вимкнували і проводили охолодження зразків за заданими режимами.

#### 2.4 Методики визначення зносу пар тертя

Матеріали, які застосовуються у вузлах тертя, характеризуються [148]:

- а) за їх геометричними, фізичними та механічними характеристиками;
- б) за трибологічними властивостями в трибоспряженнях;
- в) за результатами досліджень пар тертя.

Взаємозв'язок результатів представлених видів досліджень не завжди є однозначним. Основна причина цього обумовлена особливістю природи тертя. Трибологічні властивості матеріалів залежать не тільки від їх з'єднання в парі тертя, а і від зовнішніх умов трибопроцесу, в тому числі і від конструкції вузла тертя [149-150].

В зв'язку з цим важливе значення мають експериментальні дослідження, які дозволяють встановити закономірності загального виду для найважливіших трибологічних характеристик матеріалів – коефіцієнта тертя та зносостійкості [151].

З метою встановлення впливу обробки поверхонь за новою запропонованою технологією на антифрикційні і протизносні властивості

матеріалів пар тертя, були проведені іспити на універсальній машині тертя МІ. Машина МІ призначена для випробування металів на знос та визначення антифрикційних властивостей при терті ковзанні. Перевагами застосування цієї машини тертя є автоматизм, надійність дії реєструючих пристроїв, простота використання та загальна надійність конструкції [152-154].

Число оборотів шпинделя 200 - 220 об/хв. Машина обладнана приладом для фіксування моменту тертя й інтегратором для відліку сумарної роботи тертя. Лічильник дає безпосередній відлік роботи тертя між зразками.

Поводження покриттів при терті ковзанні в широкому діапазоні навантажень, дослідження впливу покриття на величину роботи тертя, зміна величини моменту і коефіцієнта тертя, а також спостереження за схоплюванням і руйнуванням поверхні при терті найбільш доцільно проводити на машині тертя "МІ".

На машині МІ застосовувалася схема іспитів „колодка – диск” (рис.2.4), яка забезпечує умови тертя наближені до експлуатаційних умов роботи пари шестерня-корпус. Перед іспитами машина тарувалася за методикою, що викладена в [154]. Зразки випробувалися при навантаженні і працювали в парі при терті ковзанні: диск обертався, колодка нерухома.

Сталеві і чавунні зразки для одержання вихідних значень зносів і коефіцієнта тертя після механічної обробки були піддані термічній обробці. Режими термічної обробки були прийняті відповідно до режимів, що застосовуються для матеріалів пари тертя шестерня - корпус масляного насоса [21, 25-26]. Сталеві і чавунні зразки, що використовувалися для встановлення впливу нового способу обробки після механічної обробки були піддані хіміко-термічній обробці замість термічної.

Режими іспитів на машині тертя МІ для всіх зразків тертя були прийняті наступні:

1. припрацювання зразків із краплею масла при навантаженні рівному вазі каретки (28 кгс) 15 хв.;

2. іспит при навантаженнях від 50 кгс до 200 кгс (від 490 Н до 1961Н) на протязі 10 годин.

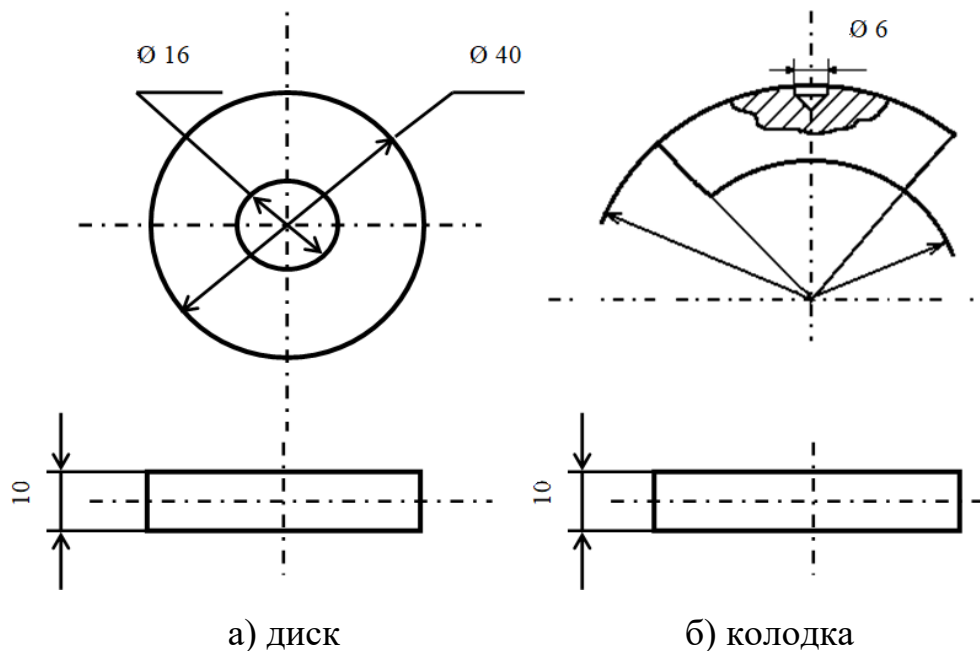


Рисунок 2.4 – Зразки для проведення іспитів на машині тертя

Діаметр роликів склав 40 мм, ширина - 10 мм (рис. 2.4), ширина колодки 10 мм, частота обертання ролика 200 об/хв. Змащення зразків при іспитах в умовах граничного тертя здійснювалися промасленням у ванночці з мастилом, а потім постановкою на машину тертя. Змащення зразків при терті в маслі здійснювалася зануренням їх на глибину 8 - 10 мм в мастило, залите у ванночку.

У процесі іспитів фіксувалися момент сил тертя за допомогою лінійки, що входить в комплект машини тертя, кількість оборотів диска.

З метою вимірювання зносу широко застосовуються наступні способи: зважування (гравіметричний), вимірювання (мікрометричний), ферографічний, різні види датчиків, штучних баз, радіоактивних ізотопів [152-154]. В даній роботі для визначення зносу досліджуваних зразків використовували гравіметричний метод, при якому знос встановлювався зважуванням на аналітичних терезах. Знос зразків визначався шляхом встановлення втрати ними ваги за період іспитів. Зважування проводилося на

аналітичних терезах ВЛА - 200гМ із точністю  $\pm 0,00005$  г, повторність зважування прийнята рівною трьом.

Повторність іспитів на машині тертя МІ кожного варіанта обробки для даного поєднання матеріалів пар тертя була обрана рівною трьом.

Критерієм зносостійкості прийнята зміна втрати ваги у часі [155-156].

Як показує практика, незважаючи на велику кількість наявних у даний час критеріїв закінчення приробітки, немає стандартних методів оцінки припрацьовуваності машинобудівних матеріалів [156-158].

Завершення процесу приробітки може бути експериментально зафіксоване по стабілізації моменту (коефіцієнта) тертя, температури тертя, величину яких можна безпосередньо проконтролювати протягом усього часу приробітки.

Критерієм припрацьовуваності служив момент часу, після якого спостерігалася стала рівномірна втрата ваги випробуваних зразків.

Для оцінки задиростійкості оброблених поверхонь було прийняте навантаження, при якому з'являються задирки, і відбувається різке зростання величини моменту тертя [156-159].

## 2.5 Визначення коефіцієнту тертя

Під час проведення іспитів зразків без покриття та з покриттям на визначення їх зносостійкості використовували машину тертя обладнану приладом для фіксування моменту тертя, який замірявся і фіксувався на протязі всього часу дослідів. Що дало змогу визначити коефіцієнт тертя досліджуваних матеріалів.

Коефіцієнт тертя досліджуваних зразків визначався за середнім значенням моменту тертя за формулою [160]:

$$K_{mp} = \frac{M_{mp}}{P \cdot R} \quad (2.1)$$

де  $M_{mp}$  – середнє значення моменту тертя, Н·м

$P$  – навантаження на зразки, обране під час іспитів, Н

$R$  – радіус зразка, який використовувався під час іспитів, м.

## 2.6 Металографічні дослідження зразків

В теперішній час, з розвитком триботехнічного матеріалознавства виникає ряд нових проблем аналізу структури і властивостей поверхонь, прогнозування їх експлуатаційних характеристик. Хімічний склад і характер упорядкування атомів і молекул поверхневих шарів становлять найбільший інтерес для дослідження [161].

До найбільш розповсюджених методів руйнівного аналізу відносяться створення поперечного або косоного шліфа, пошаровий аналіз із застосуванням механічного, хімічного, електролітичного або іонного полірування. Найважливішим недоліком перерахованих методів є вплив обробки на структуру поверхні. У результаті можливий перерозподіл дислокаційної щільності, переважне віднесення тих чи інших компонентів матеріалів складного хімічного складу, розвиток поверхневої сегрегації. Нерідко обробка приводить до неприпустимо сильного забруднення поверхні [162-165].

В наш час відомо кілька десятків методів проведення аналізу структури поверхневих шарів. Основна відмінність цих методів полягає в типі використовуваних для зондування часток і відповідно типі фіксуємого вторинного випромінювання, що несе інформацію про будову твердого тіла. Однак більшість перерахованих у [164-169] методів вимагає використання дорогого і унікального обладнання.

Найбільше практичне значення набули різні модифікації рентгеноструктурного аналізу для дослідження поверхонь тертя.

### 2.6.1 Методика рентгеноспектрального флуоресцентного аналізу

При виконанні дослідження вимірювання спектрів рентгенівської флуоресценції проводилося на скануючому вакуумному кристал-дифракційному спектрометрі "Спрут"- В (виробництво АТ Укррентген, Україна) у діапазоні довжин хвиль  $0,4 \div 11 \text{ \AA}$ , що відповідає діапазону хімічних елементів від Mg (№12) до U (№92). Джерелом первинного випромінювання служила рентгенівська трубка БС-22 з анодом прострельного типу зі срібла. В якості кристалів аналізаторів застосовувалися високоорієнтований пірографіт і багат шарове рентгенівське дзеркало Мо-В<sub>4</sub>С з періодом  $H=29 \text{ \AA}$ . Проточно-пропорційний лічильник оснащений надтонким вакуумно-щільним вікном виробництва фірми Amptek (США).

Кількісні вимірювання вмісту хімічних елементів виконані шляхом порівняння зі стандартними зразками чавунів і сталей при нормуванні спектра по лінії основного елемента (Fe). Час набору спектра 10-15 хвилин, площа зони знімання інформації  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ .

Вимірювання проводилися на двох ділянках кожної зони. Вихідною ділянкою прийнята ділянка з пласкою поверхнею на кожному зразку, а ввігнута поверхня колодки або опукла поверхня диска - робочі зони.

### 2.6.2 Дослідження фазового складу зразків

Для проведення дослідження фазового складу покриттів використовувався рентгенівський метод [163, 169]. Сутність методу полягає в тому, що пучок електронів попадаючи на поверхню зразка і взаємодіючи з

його атомами, генерує рентгенівські випромінювання. Вимірюючи довжину хвиль і інтенсивність цього випромінювання, визначаємо, які елементи присутні на поверхні зразків.

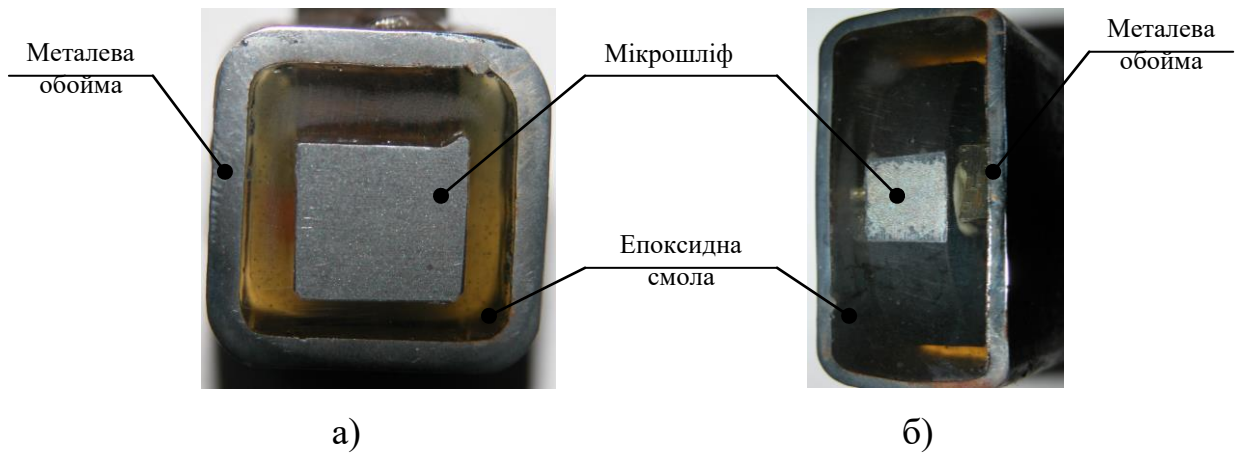
Дослідження фазового складу зразків виконано на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4. Використовувалося фільтроване (V-фільтр)  $K_{\alpha 1,2}$  – випромінювання Cr - анода,  $I_{\text{дек}}=32$  кV;  $I_{\text{анд}}=25$  mA. Діапазон кутів сканування  $2\theta=6^{\circ}$ - $120^{\circ}$ . Запис дифракційної картини проводився на діаграмну стрічку потенціометра КСП-4. Швидкість руху лічильника -  $2^{\circ}/\text{хв}$ . Швидкість руху діаграмної стрічки 10 мм/хв.

### 2.6.3 Визначення товщини нанесеного поверхневого шару

Для визначення товщини поверхневого шару в роботі використовувався мікротвердомір ПМТ-3. Товщина поверхневого шару під мікроскопом вимірялася за допомогою окуляра-мікрометра на приготованих шліфах. Перед вимірюванням товщини визначалася ціна поділки окуляра-мікрометра для даного об'єктива. Товщина шару на зразках приймалася за середнім значенням 3 вимірювань.

Металографічні дослідження проводилися на поперечних та косих шліфах. Для збереження нанесеного шару краї зразків необхідно захистити, щоб уникнути руйнування та виполірування покриттів. Відомі різні способи фіксування зразків: затискання за допомогою струбцин та заливання епоксидними смолами [163, 170-173]. При використанні струбцин краї мікрошліфів завалювалися, покриття вишліфовувалося, що унеможливило проведення подальшого аналізу. Враховуючи передбачену невелику товщину шару, а також досвід накопичений в області металографії, було прийнято рішення, від використання струбцин відмовитися. Натомість скористатися способом заливання епоксидними смолами в металевій обоймі (рис. 2.5). Перевагами такого способу приготування шліфів є збереження країв

зразків, а також при поліруванні часточки алмазних паст не могли проникнути між зразком і епоксидною смолою і забруднити поверхню.



а) прямий мікрошліф на колодці, б) косий мікрошліф на диску

Рисунок 2.5 – Загальний вигляд шліфів приготованих для мікроаналізу

Підготовлені таким способом шліфи піддавалися шліфуванню алмазними кругами, після чого виконувалося полірування за допомогою алмазних паст нанесених на фільтрувальний папір. Операцію полірування проводили зі зниженням номера використовуваних абразивів, до зникнення всіх рисок і одержання дзеркальної поверхні мікрошліфа. Після зміни номера пасти, змінювався напрямок полірування шліфа на  $90^\circ$  і обробка тривала до зникнення рисок попереднього полірування. Операції проводили так, щоб шліфи не нагрівались вище  $50^\circ\text{C}$ . Якість виготовлення шліфів перевірялась на мікроскопі МИМ-8.

Дослідження шліфів проводилося як на не травлених поверхнях та після протравлювання зануренням в 4%-вому розчині азотної кислоти.

## 2.7 Висновки до другого розділу

1. На основі аналізу патентно-конструкторських та науково-технічних джерел запропоновані комплексні дослідження при розробці



нового технологічного процесу підвищення експлуатаційних властивостей деталей масляного шестеренного насосу представлені діаграмою Ісікави. Вибрані матеріали для проведення дослідження: сталь 40Х та сірий чавун СЧ20. Проведений аналіз їх вихідних структур та властивостей, виконаний добір експериментальних зразків.

2. Запропонований спосіб нанесення покриттів - обробка перегрітою парою водних розчинів солей, як ефективний спосіб підвищення триботехнічних властивостей деталей. Технологічний процес формування покриття складається з наступних операцій: приготування водного розчину солі необхідної концентрації, контролю розчину на кислотність середовища, прогрівання печі до температури завантаження деталей, завантаження деталей, вихід печі на температуру обробки, обробка деталей в насичуючому середовищі, охолодження печі разом з деталями до певної температури, потім охолодження в маслі.

3. З огляду на досвід, накопичений ученими - спеціалістами в області обробки сплавів у паро-газових середовищах у роботі для вирішення поставлених завдань пропонується використовувати піч для хіміко-термічної обробки з вертикальним розташуванням робочого циліндра.

4. З метою встановлення впливу утворених покриттів за новою запропонованою технологією на антифрикційні і протизносні властивості матеріалів пар тертя, вирішено провести іспити на універсальній машині тертя МІ. Для визначення зносу досліджуваних зразків пропонується використовувати гравіметричний метод, при якому знос встановлювався зважуванням на аналітичних терезах.

Обґрунтовані методики проведення досліджень: металографічний аналіз, методика визначення товщини покриття за допомогою мікротвердоміру ПМТ-3, методика визначення фазового складу покриття рентгенівським методом та методика рентгеноспектрального флуоресцентного аналізу для кількісних вимірювань вмісту хімічних елементів.

## РОЗДІЛ 3

### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТЯ

#### 3.1 Вибір складу насичуючого середовища

Розвиток нових галузей промисловості і безперервний прогрес техніки вимагають нових високоміцних і стійких матеріалів. В багатьох практично важливих випадках виявляється достатнім надійно захистити тільки зовнішню поверхню деталей, тому в промисловості широко застосовується захист поверхневого шару деталей зносостійкими покриттями. В останні роки все більшу увагу привертають дифузійні захисні покриття, які наносяться на сталь, чавун, та інші матеріали з метою запобігання зношуванню в спряжених деталях [174-177].

Дифузійні покриття мають суттєві переваги в порівнянні з іншими видами покриттів, тому що міцність зв'язку їх з основним металом в результаті проникнення речовини, що наноситься, в кристалічну решітку оброблюваного матеріалу значно перевищує міцність зв'язку інших видів покриттів. Крім того, поступове зниження концентрації нанесеної речовини по глибині покриття створює менш різку зміну властивостей при переході від основного матеріалу до зовнішньої поверхні дифузійного шару [175].

Широка розповсюдженість процесів дифузії і участь цих процесів в більшості важливих технологічних операцій визначається молекулярно-кінетичною природою дифузії, тим, що в основі цього процесу лежить теплова рухомість атомів твердого тіла.

Переміщення атомів, що виникає в результаті їх теплової рухомості, обумовлюють можливість протікання процесів дифузії в металах та сплавах. Ті атоми, періодичні зміщення яких під впливом теплових коливань досягають значних амплітуд, можуть покинути свої місця в кристалічній

решітці, втрачаючи при цьому надлишок енергії. Вільні місця які утворюються таким чином в кристалічній решітці можуть бути зайняті або атомами основного металу, або атомами дифундууючої речовини [176].

Утворення дифузійних покриттів, які наносяться на поверхню основного металу, займає одне із головних місць в загальній системі заходів по захисту металу від зносу [178-183]. При утворенні дифузійних шарів спостерігається проникнення речовини, яка наноситься, в глибину покриваємого металу і тим більше чим вище температура і тривалість процесу дифузії. В поверхневих шарах покриваємого металу спостерігається при цьому утворення нових фаз – хімічних сполук або твердих розчинів.

Дослідження [175] також показали, що можливість утворення дифузійних покриттів на залізі та залізовуглецевих сплавах визначається передусім різницею в розмірах атомних діаметрів заліза і речовини, що наноситься. В випадку дифузії в покриваємий метал елементів, які мають менший атомний діаметр порівняно з атомним діаметром заліза або з більшим розміром атомного діаметра, але не перевищуючим атомний діаметр заліза більше ніж на 15 – 16%, напруження, які виникають в кристалічній решітці заліза не перевищують межі її пружної стійкості. При різниці в розмірах атомних діаметрів, що перевищують 15 – 16%, кристалічна решітка металу розчинника втрачає стійкість, що і визначає неможливість дифузійного проникнення таких великих атомів в решітку металу-розчинника.

Крім співвідношення в розмірах атомних діаметрів заліза та речовини що наноситься, для утворення дифузійних покриттів важливе значення має наявність безпосереднього контакту між поверхнею заліза та елементу, що наноситься, а також достатня розчинність дифундууючого елементу в залізі при кімнатній і більш високій температурі. Таким чином, дослідження дифузійних покриттів [175] повністю підтвердили, що для протікання процесу утворення дифузійних покриттів необхідні наступні фізико-хімічні умови: атомний діаметр дифундууючої речовини не повинен перевищувати

атомного діаметру заліза більше ніж на 15 – 16%. Якщо атомний діаметр елемента, який наноситься менше ніж у заліза, то протікання процесу утворення дифузійного покриття можливо; елемент, який наноситься повинен мати розчинність в залізі при кімнатній та підвищеній температурі.

Крім того, для протікання процесу дифузії необхідно забезпечити металевий контакт між залізом і елементом, який наноситься.

З точки зору підвищення зносостійкості та покращення триботехнічних властивостей, на даний час значну увагу приділяють тим, покриттям, до складу яких входять такі елементи як хром, алюміній, фосфор.

В таблиці 3.1 на основі проведеного аналізу досліджень [174-177] наведені дані про можливість утворення певними елементами дифузійних покриттів на залізі та його сплавах.

Таблиця 3.1 – Основні дані, які характеризують можливість утворення елементами дифузійних покриттів

Елемент	Група	Атом- ний діа- метр, Å	Різниця атомних діамет- рів, %	Розчинність елементів в залізі, вес. %		Чи утворює елемент дифузійне покриття
				при кімнатній температу- рі	при високій темпера- турі	
1	2	3	4	5	6	7
Алюмі- ній	III	2,80	10	32,0	35,0 (1232 <sup>0</sup> C)	Утворює
Фосфор	V	2,2	-13	1,0	2,8 (1050 <sup>0</sup> C)	-
Хром	IV	2,57	1,5	100	100	Утворює

Із літературних джерел [179] відомо, що взагалі, розчинність елементів підвищується з підвищенням температури, але з таблиці 3.1 бачимо, що розчинність алюмінію та фосфору мало залежить від температури, а розчинність хрому взагалі не залежить від температури і залишається незмінною як при кімнатній температурі так і при її збільшенні. Як наслідок,

якщо застосовувати ці елементи в якості вихідних в процесі утворення дифузійних покриттів, то навіть при кімнатних температурах зберігається можливість для утворення дифузійних шарів вказаних елементів на поверхні заліза.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти лінійного розширення елементів [175, 184-185]

Елемент	Атомний діаметр,	Коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha_{\text{роз}} \cdot 10^{-6}$
1	2	3
Залізо	2,54	11,5
Алюміній	2,80	23,1 (від 0 до 100 °С)
Хром	2,57	8,4 (від 0 до 100 °С)

З вище наведених даних можна зробити висновок, що оптимальним складом для насичуючого середовища була б наявність в ньому таких елементів як алюміній, хром, фосфор. Однак, одночасно в одному технологічному циклі забезпечити присутність алюмінію, хрому та фосфору було неможливо. Цього можна досягнути за рахунок того, що перераховані вище елементи входять до складу однієї речовини. Із літературних джерел відомо, що в якості зв'язуючого матеріалу при виробництві вогнетривких виробів в керамічній, металургійній, а також в промисловості будівельних матеріалів застосовується алюмохромфосфатне зв'язуюче (АХФЗ) (табл. 3.3) [186]. Зв'язуюче алюмохромфосфатне за [186] являє собою водний розчин кислих фосфорнокислих солей алюмінію та трьохвалентного хрому. Хімічна формула  $\text{CrAl}_3(\text{H}_2\text{PO}_4)_x$ . Має вигляд рідини темно-зеленого кольору. Наявність відновника (формальдегіду) виключає присутність шестивалентного хрому.

Враховуючи досвід накопичений в машинобудуванні, позитивного впливу на зносостійкість пар тертя таких елементів як алюміній, хром та з'єднань утворених на основі цих елементів [180-181,187], використання

алюмохромфосфатного зв'язуючого в якості насичуючого середовища є перспективним [188].

Таблиця 3.3 – Фізико-хімічні показники алюмохромфатного з'язуючого

Марка	АХФЗ (алюмохромфосфатне) $\text{CrAl}_3(\text{H}_2\text{PO}_4)_{8,8-9,6}$	МИКЗ (мінеральне кисле зв'язуюче) $\text{CrAl}_3(\text{H}_2\text{PO}_4)_{5,4}$
1	2	3
Масова частка, %		
Al (в перерахунку на $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	6,5-9	-
Cr (в перерахунку на $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )	3,5-4,5	8,5 – 9,7
Al+Cr	-	13,5 – 14,5
Фосфатів (в перерахунку на $\text{P}_2\text{O}_5$ )	35 - 39	33 - 36
Сульфатів (в перерахунку на $\text{SO}_4$ ) не більше	0,5	-
Втрати маси при прожарюванні, %	47 - 55	47 - 51
Густина, $\text{г/м}^3 \cdot 10^{-3}$	1,6 – 1,75	1,55 – 1,65
Масова частка формальдегіду, %	не більше – 0,2	не більше – 0,2

### 3.2 Оптимізація параметрів технологічного процесу за допомогою лінійного регресійного аналізу

Основними параметрами технологічного процесу нанесення покриттів із водного розчину солей, як показав аналіз літературних джерел [143-144], є температура обробки деталей, концентрація солі у водному розчині та час витримки в насичуючому середовищі. Від цих параметрів залежить формування поверхневого шару, а також його триботехнічні властивості.

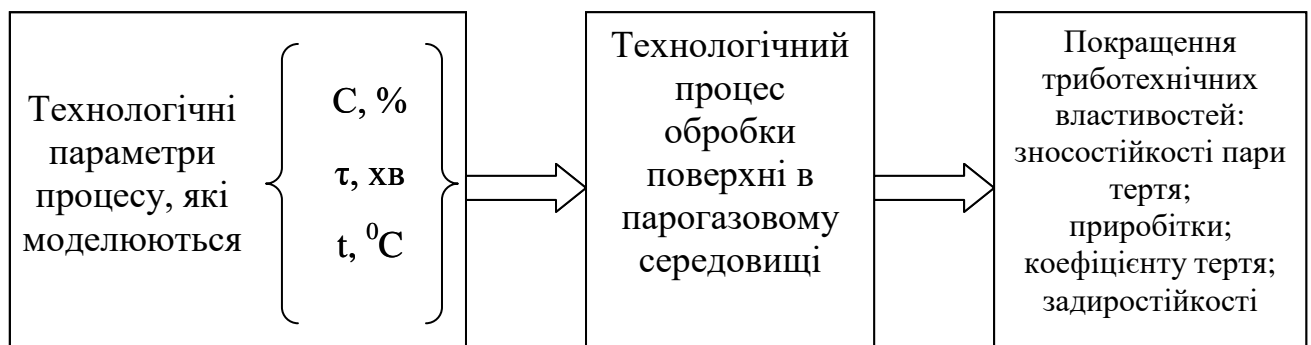
Як було виявлено за попередніми дослідженнями, коли концентрація солі у водному розчині наближається до нуля, зносостійкість зменшується, в той же час концентрація солі більше 20% веде до відшарування покриття.

Тривалість витримки при обробці дуже важлива, так як недостатній час на обробку не дозволяє повноцінно утворитися дифузійному шару, від якого залежать властивості поверхні контакту пар тертя, а також утворити необхідну товщину покриття, для збільшення зносостійкості. При надмірному часі витримки утворюється занадто товстий шар покриття, погіршується адгезія покриття з підложкою, і зменшення коефіцієнту лінійного розширення покриття веде до відшарування останнього при підвищенні температури в зоні контакту.

Технологічні параметри процесу обробки деталей варіювалися в межах:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\% \leq C \leq 20\% \\ 10 \text{ хв} \leq \tau \leq 100 \text{ хв} \\ 250^{\circ}\text{C} \leq t \leq 700^{\circ}\text{C} \end{array} \right.$$

На рисунку 3.1 наведена схема моделі технологічного процесу нанесення покриття



C - концентрація алюмохромфосфатного зв'язуючого в водному розчині, %;

τ – тривалість обробки поверхні, хв;

t – температура технологічного процесу, °C

Рисунок 3.1 – Схема моделі технологічного процесу нанесення покриття

Пропонується застосування водного розчину алюмохромфосфатного зв'язуючого (АХФЗ) з використанням технології обробки деталей у парогазовому середовищі для підвищення триботехнічних властивостей пари тертя шестерня - корпус масляного насоса системи змащення двигунів внутрішнього згоряння [189-191].

Відомо, що технологічні параметри впливають на формування поверхневого шару [192]. Для визначення оптимальних параметрів нового способу нанесення покриття, в залежності від експлуатаційних умов роботи пари шестерня - корпус масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згоряння, були змодельовані данні властивостей покриття в залежності від параметрів технологічного процесу.

Моделювання [193-194] дозволило визначити діапазон значень параметрів технологічного процесу, за рахунок зміни яких можливо досягти найкращих експлуатаційних та триботехнічних властивостей, а саме утворення оптимальної товщини покриття, мінімальних значень зносу, оптимального часу приробітки, витримки максимального навантаження до утворення задирів (табл. 3.4 – 3.6).

Таблиця 3.4 – Вплив степені концентрації алюмохромфосфатного з'єднання на властивості поверхні (зносу, товщина шару, коефіцієнт тертя)

Показник № п/п	Концентрація, С, %	Знос, І, г	Товщина шару, h, мкм	Коефіцієнт тертя
1	2	3	4	5
1	0	0,32235	0	0,1
2	2	0,07445	20	0,04
3	4	0,0696	23	0,038
4	6	0,06475	23	0,033
5	8	0,0599	27	0,03
6	10	0,05505	30	0,03
7	12	0,05855	30	0,03
8	14	0,06605	31	0,031
9	16	0,06955	30	0,031
10	18	0,07205	29	0,033
11	20	0,09255	28	0,033



Таблиця 3.5 – Вплив температури обробки на властивості поверхні (знос, товщина шару, коефіцієнт тертя)

Показник	Температура, t, °C	Знос, I, г	Товщина шару, h, мкм	Коефіцієнт тертя
№ п/п				
1	2	3	4	5
1	250	0,0932	20	0,054
2	300	0,08775	23	0,045
3	350	0,0823	23	0,037
4	400	0,07685	25	0,033
5	450	0,0714	25	0,031
6	500	0,06595	27	0,031
7	550	0,0605	30	0,03
8	600	0,05505	30	0,03
9	650	0,076	30	0,03
10	700	0,1015	35	0,035

Таблиця 3.6 – Вплив часу витримки в насичуючому середовищі на властивості поверхні (знос, товщина шару, коефіцієнт тертя)

Показник	Час витримки, τ, хв	Знос, I, г	Товщина шару, h, мкм	Коефіцієнт тертя
№ п/п				
1	2	3	4	5
1	0	0,32235	0	0,1
2	10	0,257	15	0,046
3	20	0,19165	25	0,043
4	30	0,0763	30	0,032
5	40	0,05505	30	0,03
6	50	0,0509	30	0,03
7	60	0,0604	29	0,034
8	70	0,0728	35	0,042
9	80	0,085	30	0,048
10	90	0,08	40	0,048
11	100	0,1025	35	0,049

Після проведення експериментальних досліджень отримані статистичні ряди двох значень, що поєднуються функцією виду  $y = f(x)$ . Кожному значенню функції  $y_1, \dots, y_n$  відповідає визначене значення аргументу  $x_1, \dots, x_n$ .

Для проведення регресійного аналізу необхідно на основі експериментальних даних підібрати емпіричні алгебраїчні вирази в межах

вимірних значень аргументу  $x_1 \dots x_n$  і оцінити припустимо при цьому похибку.

Рівняння наближеної регресії будемо шукати у вигляді наступного поліному:

$$\bar{y}(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_m \cdot x^m = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i \cdot x^i \quad (3.1)$$

де  $m$  - ступінь поліному.

Коефіцієнти  $a_0, a_1 \dots a_m$  є оцінками відповідних теоретичних коефіцієнтів істинного рівняння регресії:

$$m_{x/y} = \varphi(x) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \beta_2 \cdot x^2 + \dots + \beta_m \cdot x^m = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot x^i \quad (3.2)$$

Найкращі результати при визначенні значень коефіцієнтів  $a_0, a_1 \dots a_m$  дає використання методу найменших квадратів. Суть цього методу полягає в тому, що значення коефіцієнтів знаходяться із умови, що сума квадратів відхилення вимірних величин від розрахункових приймає найменше значення:

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - \bar{y}(x_i)]^2 = \min \quad (3.3)$$

Знаходження коефіцієнтів рівняння (3.1) у цьому випадку пов'язано з задачею визначення мінімуму функції багатьох перемінних:

$$\bar{y}(x) = f(x, a_0, a_1, \dots, a_m) \quad (3.4)$$

Якщо  $S$  приймає мінімальне значення, то повинні виконуватися умови:

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 0, \frac{\partial S}{\partial a_1} = 0 \dots \frac{\partial S}{\partial a_m} = 0 \quad (3.5)$$

що відповідає наступній системі рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n 2 \cdot [y_i - \bar{y}(x_i)] \cdot \frac{\partial \bar{y}(x_i)}{\partial a_0} = 0, \\ \sum_{i=1}^n 2 \cdot [y_i - \bar{y}(x_i)] \cdot \frac{\partial \bar{y}(x_i)}{\partial a_1} = 0, \\ \dots, \\ \sum_{i=1}^n 2 \cdot [y_i - \bar{y}(x_i)] \cdot \frac{\partial \bar{y}(x_i)}{\partial a_m} = 0. \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Перетворимо систему рівнянь (3.6):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n y_i \cdot \frac{\partial \bar{y}(x_i)}{\partial a_0} - \sum_{i=1}^n \bar{y}(x_i) \cdot \frac{\partial \bar{y}(x_i)}{\partial a_0} = 0, \\ \sum_{i=1}^n y_i \cdot \frac{\partial \bar{y}(x_i)}{\partial a_1} - \sum_{i=1}^n \bar{y}(x_i) \cdot \frac{\partial \bar{y}(x_i)}{\partial a_1} = 0, \\ \dots, \\ \sum_{i=1}^n y_i \cdot \frac{\partial \bar{y}(x_i)}{\partial a_m} - \sum_{i=1}^n \bar{y}(x_i) \cdot \frac{\partial \bar{y}(x_i)}{\partial a_m} = 0, \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Кількість рівнянь у системі (3.7) дорівнює кількості невідомих коефіцієнтів у рівнянні (3.1), тобто вона є системою нормальних рівнянь.

Точність регресійної апроксимації оцінюється сумарною відносною похибкою в %:

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \bar{y}(x_i)|}{y_i}}{n} \cdot 100 \quad (3.8)$$

Регресійний аналіз виконаний за допомогою ПЕОМ [195-196]. Результати обчислення коефіцієнтів регресійного полінома і точність апроксимації наведені в табл. 3.7 і на рис. 3.2 - 3.10.

Таблиця 3.7 – Результати регресійного аналізу впливу параметрів нової технології на властивості покриття

Залежність *	Значення коефіцієнтів поліному $\bar{y}(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_m \cdot x^m$						Відносна похибка, %
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	
$J = f(C)$	0,063	0,0012	$-3,706 \cdot 10^{-3}$	$3,919 \cdot 10^{-4}$	$-1,695 \cdot 10^{-5}$	$2,622 \cdot 10^{-7}$	0,041
$J = f(\tau)$	0,321	$-5,498 \cdot 10^{-4}$	$-6,701 \cdot 10^{-4}$	$2,045 \cdot 10^{-5}$	$-2,219 \cdot 10^{-7}$	$8,277 \cdot 10^{-10}$	0,401
$J = f(t)$	0,396	$-3,411 \cdot 10^{-3}$	$1,514 \cdot 10^{-5}$	$-3,312 \cdot 10^{-8}$	$3,442 \cdot 10^{-11}$	$-1,35 \cdot 10^{-14}$	0,029
$h = f(C)$	22,6	-3,34	1,324	-0,151	$-7,186 \cdot 10^{-3}$	$1,242 \cdot 10^{-4}$	0,028
$h = f(\tau)$	-4,6	2,542	-0,066	$7,137 \cdot 10^{-4}$	$-2,931 \cdot 10^{-6}$	$1,282 \cdot 10^{-9}$	$7,076 \cdot 10^{-4}$
$h = f(t)$	-690,722	8,403	-0,039	$8,686 \cdot 10^{-5}$	$-9,244 \cdot 10^{-8}$	$3,774 \cdot 10^{-11}$	0,12
$f_{mp} = f(C)$	0,098	-0,041	$9,338 \cdot 10^{-3}$	$-9,627 \cdot 10^{-4}$	$4,556 \cdot 10^{-5}$	$-8,013 \cdot 10^{-7}$	0,31
$f_{mp} = f(\tau)$	0,098	$-6,742 \cdot 10^{-3}$	$2,674 \cdot 10^{-4}$	$-5,216 \cdot 10^{-6}$	$4,993 \cdot 10^{-8}$	$1,827 \cdot 10^{-10}$	0,501
$f_{mp} = f(t)$	-0,151	$3,27 \cdot 10^{-3}$	$-1,81 \cdot 10^{-5}$	$4,474 \cdot 10^{-8}$	$-5,181 \cdot 10^{-11}$	$2,297 \cdot 10^{-14}$	$3,453 \cdot 10^{-3}$

\*  $J$  – знос, г;  $h$  – товщина покриття, мкм;  $f_{mp}$  – коефіцієнт тертя;  $\tau$  – час витримки в насичуючому середовищі, хв.;  $C$  – степінь концентрації алюмохромфосфатного з'єднання в розчині, %;  $t$  – температура обробки, °С

Проведений аналіз представлених на рис. 3.2 - 3.10 графіків, переконливо показав, що технологічні параметри (температура, час витримки, концентрація розчину), істотно впливають на якість поверхні оброблюваних деталей, а саме на знос, товщину покриття, коефіцієнт тертя [197-199]. На графіках залежності зносу від технологічних параметрів (рис. 3.2 -3.4) мінімальне значення зносу пари тертя знаходиться в межах 0,0509 – 0,05505 при відповідних значеннях параметрів технологічного процесу: час витримки 40-50 хв., концентрація АХФЗ 8-10%, температура насичення 550-650.

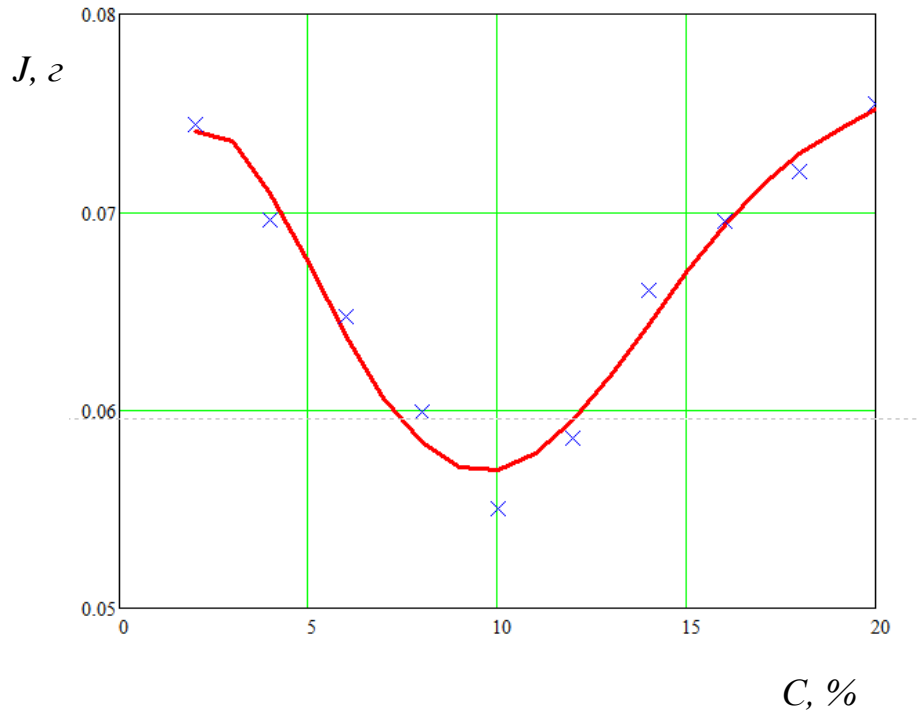


Рисунок 3.2 – Регресійний аналіз залежності зносу  $J, g$  від ступеня концентрації розчину  $C, \%$

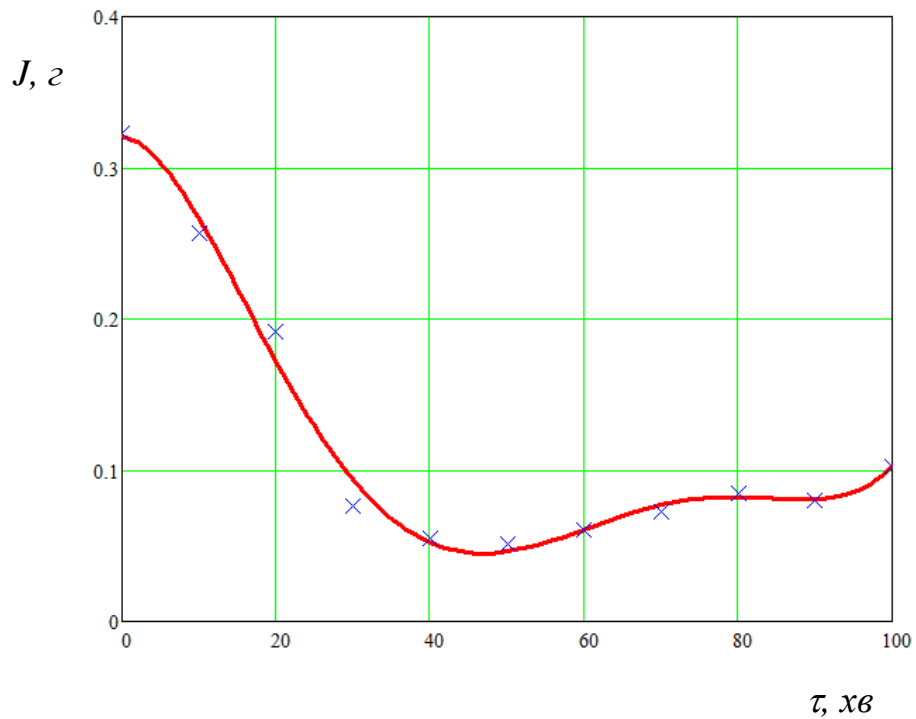


Рисунок 3.3 – Регресійний аналіз залежності зносу  $J, g$  від часу витримки в насичуючому середовищі  $\tau, хв$

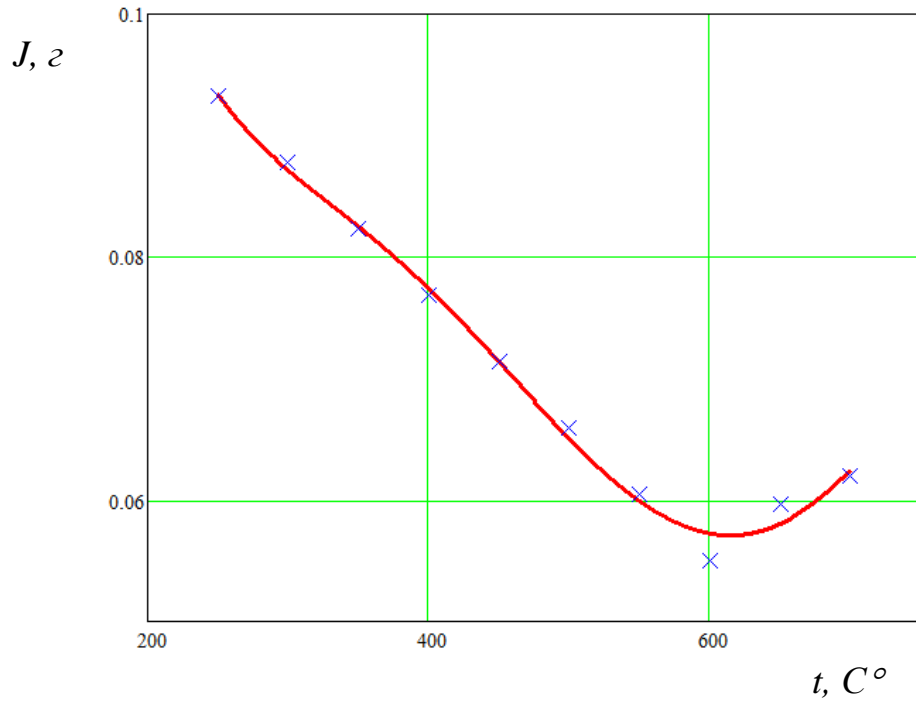


Рисунок 3.4 – Регресійний аналіз залежності зносу  $J, z$  від температури обробки  $t, C^\circ$

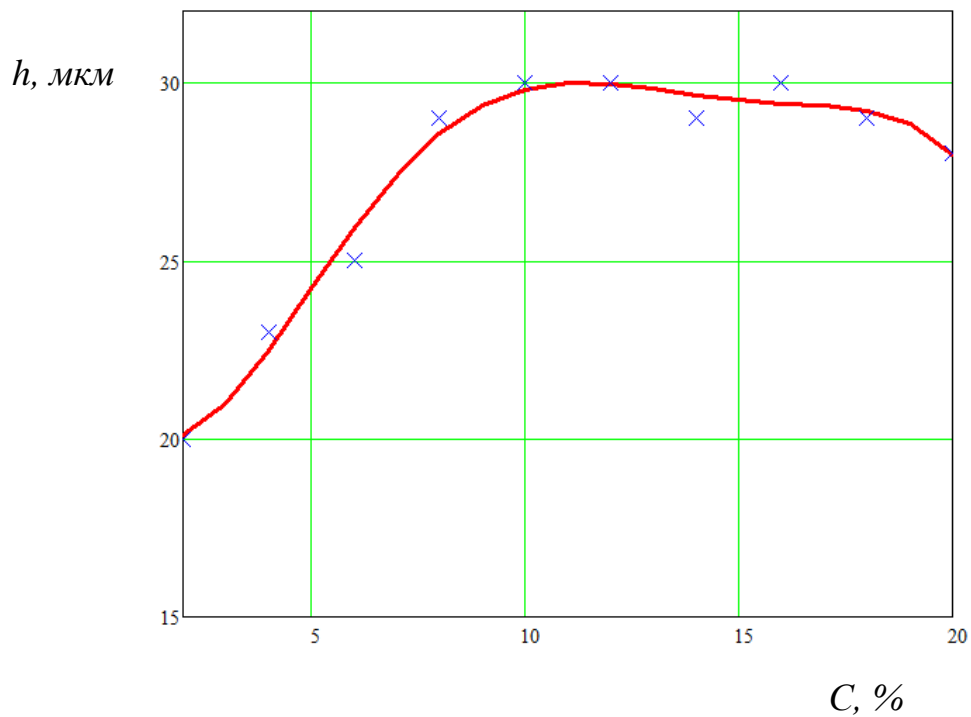


Рисунок 3.5 – Регресійний аналіз залежності товщини покриття  $h, мкм$  від степені концентрації розчину  $C, \%$

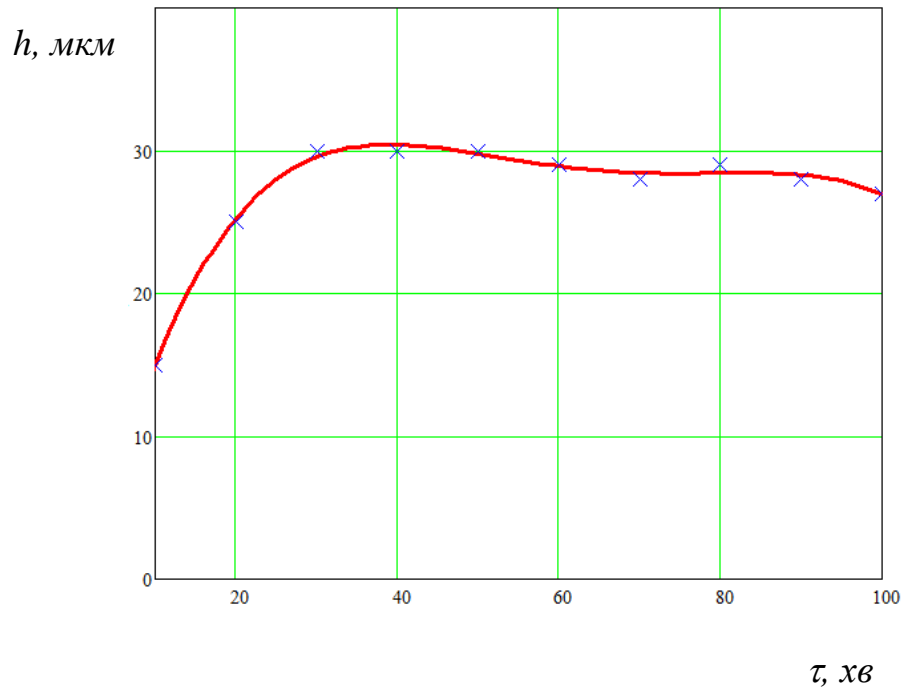


Рисунок 3.6 – Регресійний аналіз залежності товщини покриття  $h$ , мкм від часу витримки в насичуючому середовищі  $\tau$ , хв

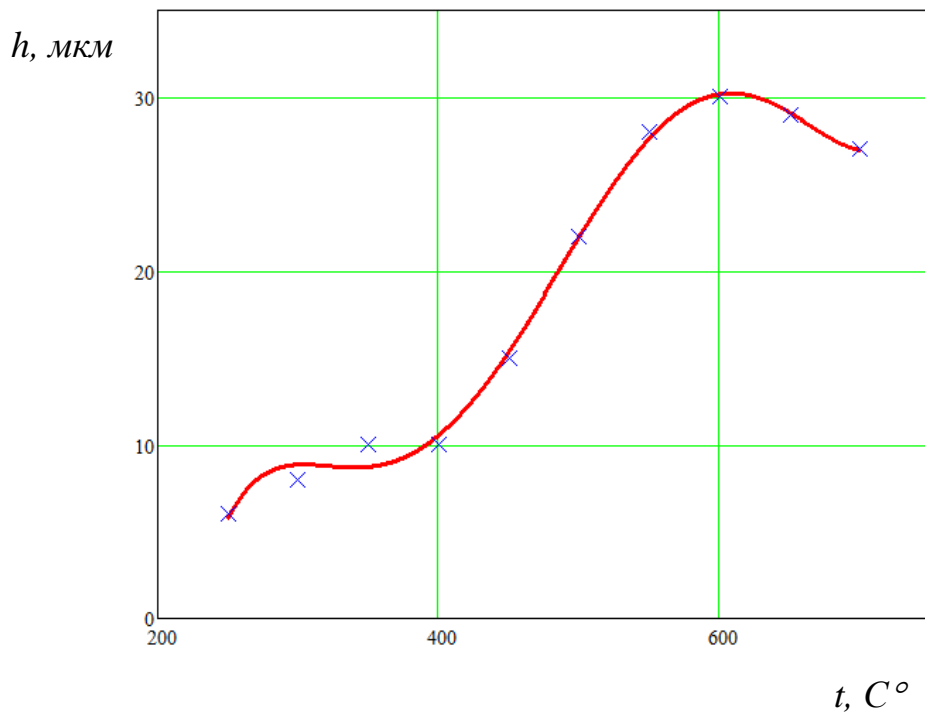


Рисунок 3.7 – Регресійний аналіз залежності товщини покриття  $h$ , мкм від температури обробки  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$

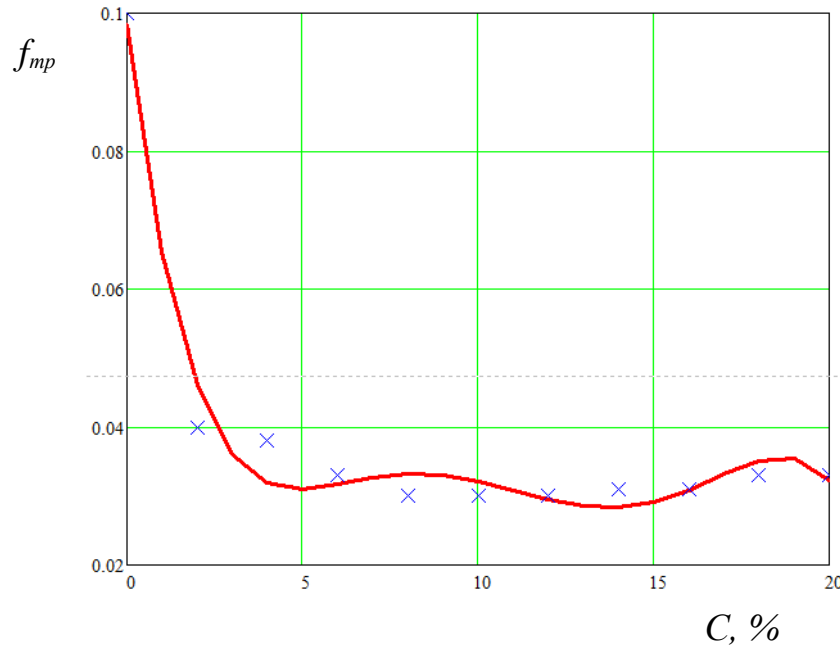


Рисунок 3.8 – Регресійний аналіз залежності коефіцієнту тертя  $f_{mp}$  від степені концентрації розчину  $C, \%$

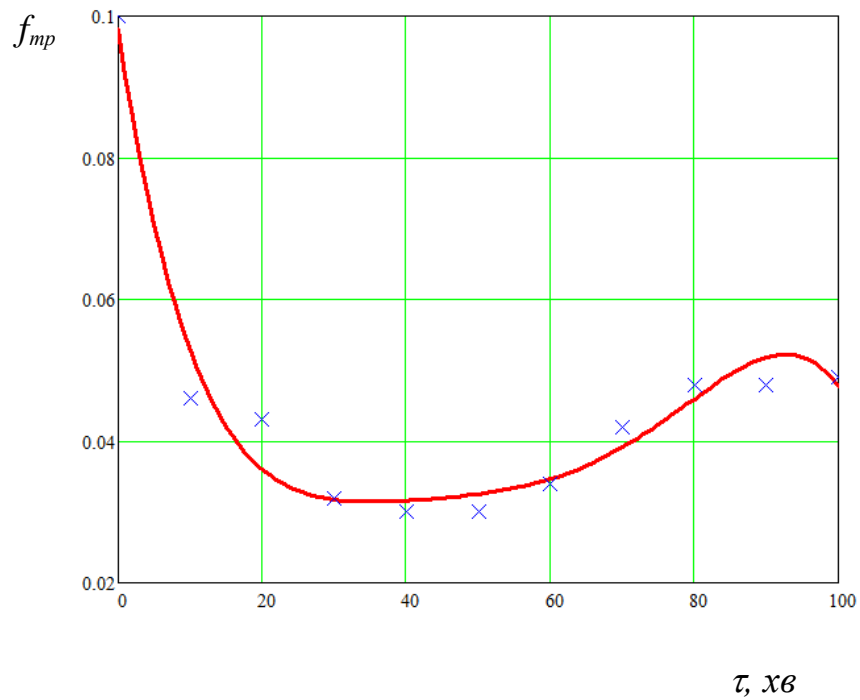


Рисунок 3.9 – Регресійний аналіз залежності коефіцієнту тертя  $f_{mp}$  від часу витримки в насичуючому середовищі  $\tau, \text{хв}$



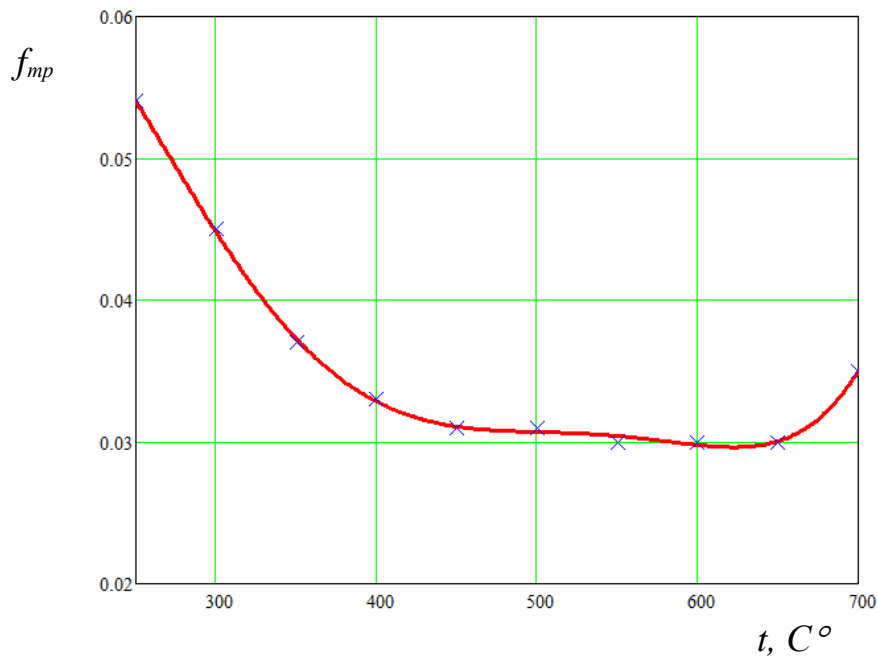


Рисунок 3.10 – Регресійний аналіз залежності коефіцієнту тертя  $f_{mp}$  від температури обробки  $t, C^{\circ}$

На рис. 3.5 – 3.7 представлена залежність товщини покриття від технологічних параметрів, з яких видно, що оптимальна товщина 28-30 мкм забезпечується при значеннях часу витримки в насичуючому середовищі 30-50 хв., концентрації солі 8-14% і температури насичуючого середовища 550-650 °С.

Залежність коефіцієнту тертя від технологічних параметрів (рис. 3.8 – 3.10) показує, що мінімальне значення коефіцієнту тертя знаходиться у межах 0,03 - 0,033 і відповідних значеннях часу обробки зразків 30-50 хв., концентрації АХФЗ 6-20%, температури середовища 400-650 °С.

Підсумовуючи результати дослідження впливу технологічних параметрів нової технології на якість поверхні можна зробити висновок, що мінімальний знос та коефіцієнт тертя деталей шестерня – корпус масляних шестеренних насосів двигунів внутрішнього згорання забезпечується при наступних параметрах технологічного процесу, а саме: температури насичуючого середовища  $600 \pm 20$  °С; часу витримки в насичуючому середовищі 40-50 хв.; концентрації в насичуючому середовищі 8 - 12%

алюмохромфосфатного з'єднання в водному розчині. При цих технологічних параметрах забезпечується оптимальна товщина покриття 30 мкм [197-199].

Таким чином, проведений аналіз дозволяє прогнозувати зміни триботехнічних властивостей поверхні в залежності від параметрів нового технологічного процесу.

### 3.3 Визначення технологічних параметрів нової технології в залежності від експлуатаційних властивостей покриття

Для визначення параметрів технології нанесення покриттів із парогазового середовища, утвореного водним розчином алюмохромфосфатного з'єднання було проведено моделювання експлуатаційних властивостей покриття в залежності від двох технологічних параметрів запропонованого процесу обробки за допомогою програми Statistica [197]. Моделювання дозволило визначити як за рахунок зміни параметрів технологічного процесу впливати на знос, товщину покриття, коефіцієнт тертя робочих поверхонь (рис.3.11 – 3.19).

Використовуючи процедури множинної регресії визначено та обґрунтовано оптимальні параметри технологічного процесу нанесення покриття відповідні необхідним триботехнічним властивостям деталей тертя масляних шестеренних насосів ДВЗ. Множинна регресія складається в проведенні аналізу зв'язку між кількома незалежними змінними, наприклад, концентрація солі в насичуючому середовищі, температура насичення, час витримки в насичуючому середовищі і залежної змінної, наприклад, зносу, коефіцієнту тертя, товщини покриття. Множинна регресія дозволить визначити, які предиктори (незалежні змінні) найкращі для зменшення зносу, зменшення коефіцієнту тертя, та утворення оптимальної товщини покриття.

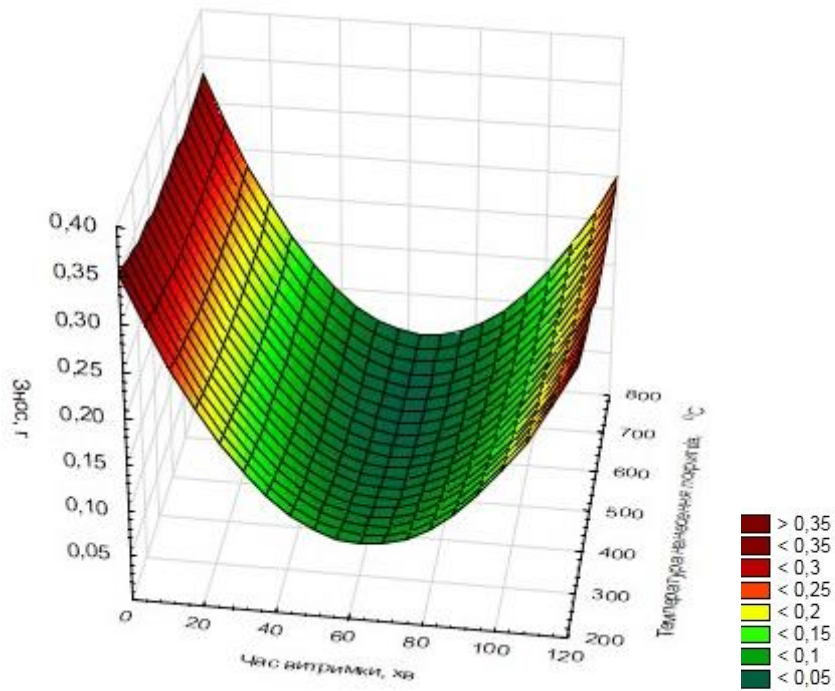


Рисунок 3.11 – Залежність зносу  $J, g$  від часу витримки в насичуючому середовищі  $\tau, хв$  та температури обробки  $t, C^{\circ}$

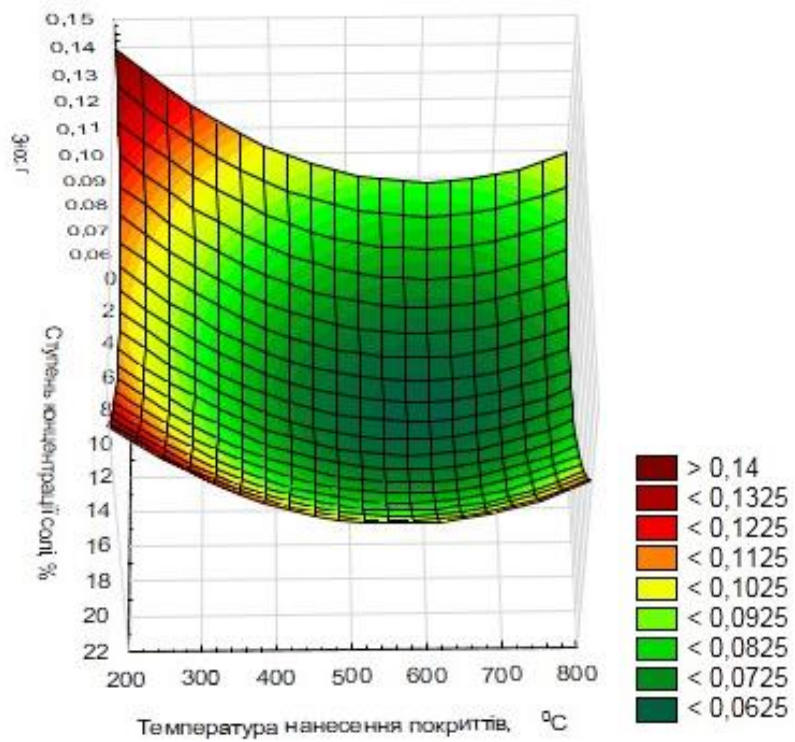


Рисунок 3.12 – Залежність зносу  $J, g$  від ступеня концентрації розчину  $C, \%$  та температури обробки  $t, C^{\circ}$

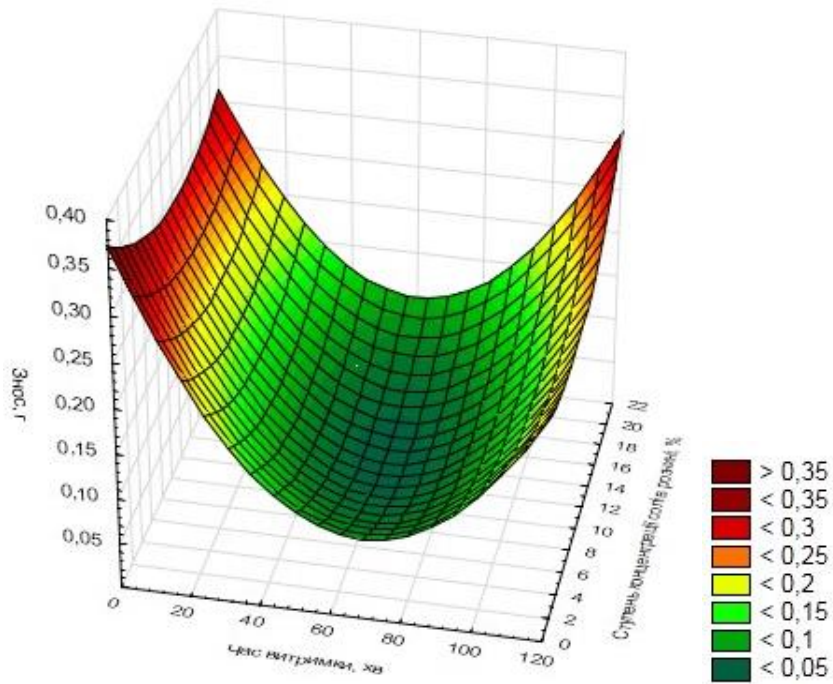


Рисунок 3.13 – Залежність зносу  $J$ , г від часу витримки в насичуючому середовищі  $\tau$ , хв та ступеня концентрації розчину  $C$ , %

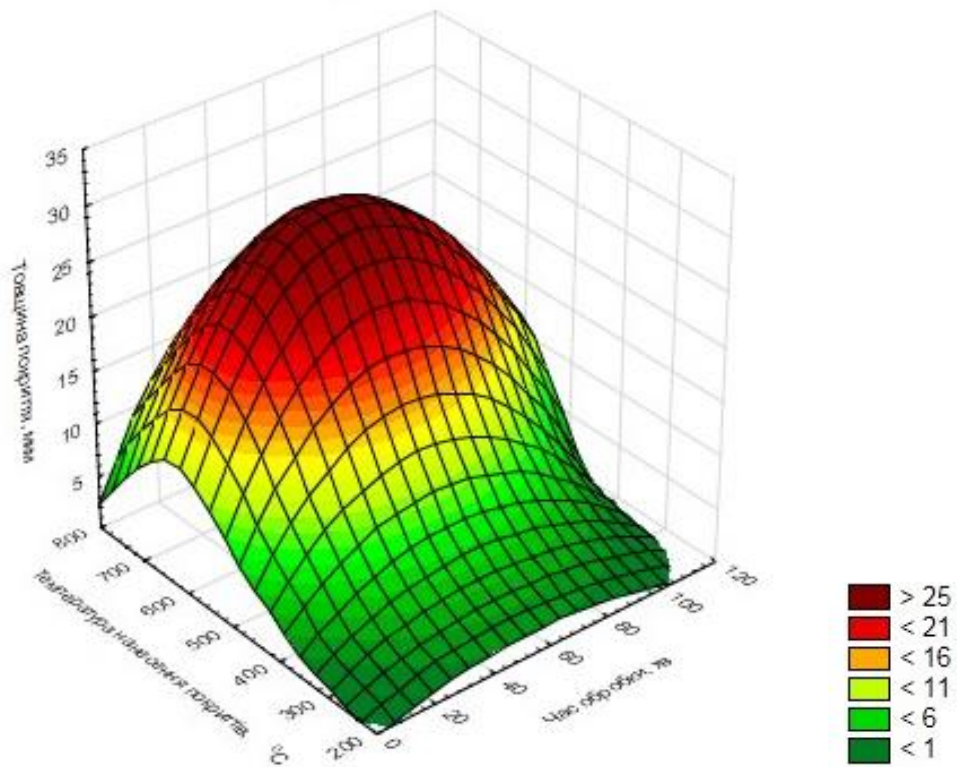


Рисунок 3.14 – Залежність товщини покриття  $h$ , мкм від температури обробки  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$  та часу витримки в насичуючому середовищі  $\tau$ , хв.

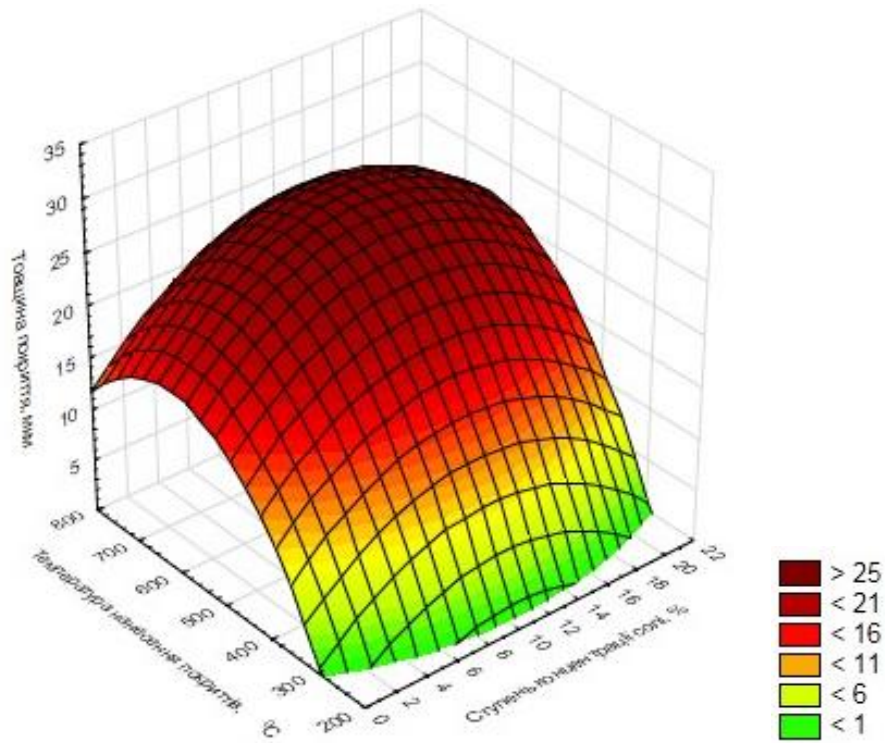


Рисунок 3.15 – Залежність товщини покриття  $h$ , мкм від температури обробки  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$  та ступеня концентрації розчину  $C$ , %

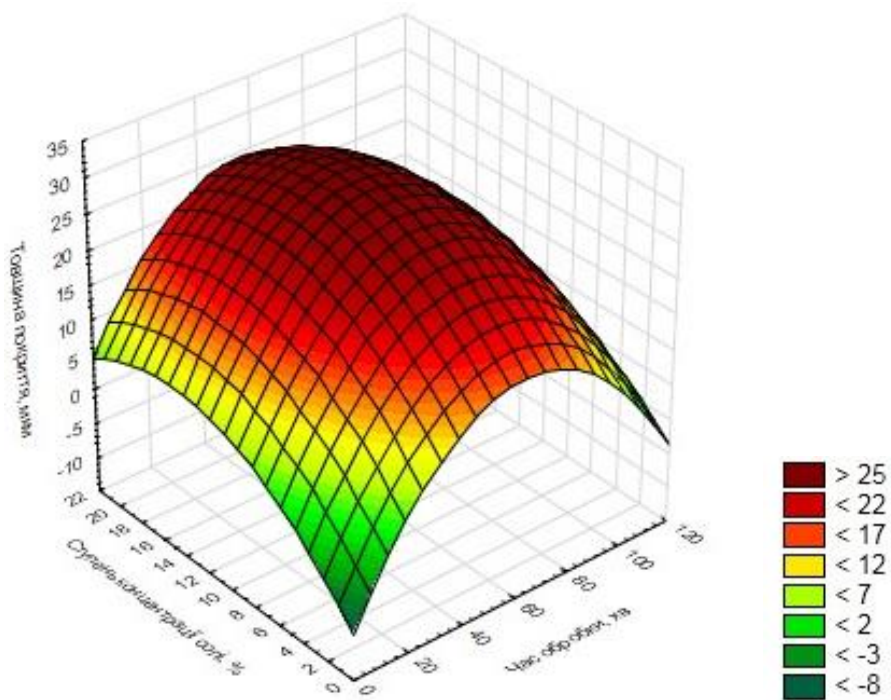


Рисунок 3.16 – Залежність товщини покриття  $h$ , мкм від ступеня концентрації розчину  $C$ , % та часу витримки в насичуючому середовищі  $\tau$ , хв

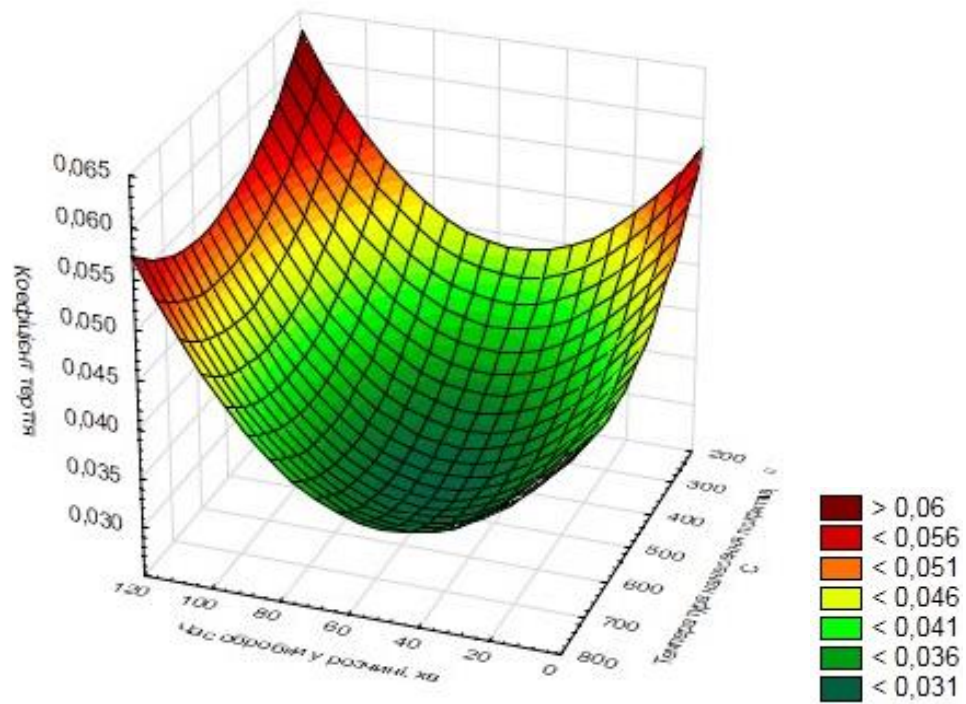


Рисунок 3.17 – Залежність коефіцієнту тертя  $f_{tr}$  від температури обробки  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$  та часу витримки в насичуючому середовищі  $\tau$ , хв.

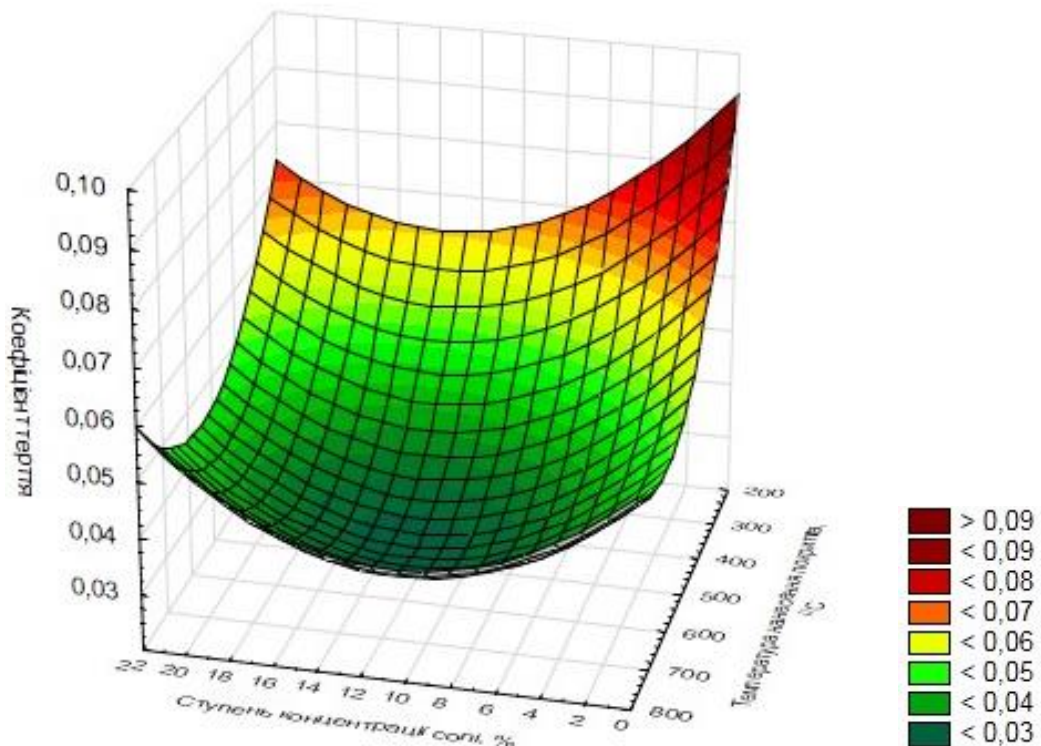


Рисунок 3.18 – Залежність коефіцієнту тертя  $f_{tr}$  від температури обробки  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$  та ступеня концентрації розчину  $C$ , %

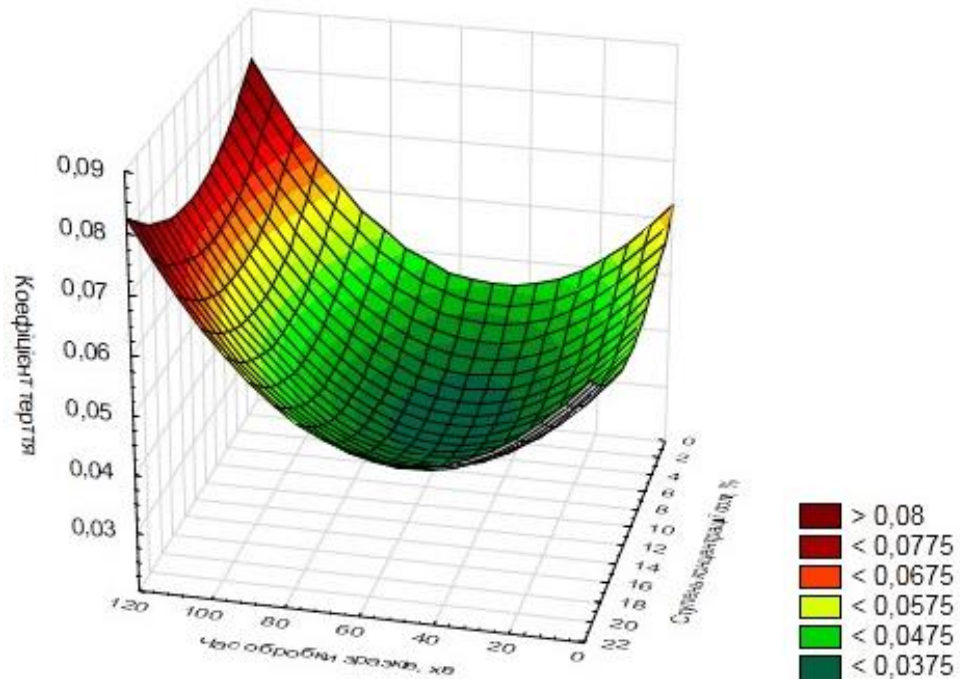


Рисунок 3.19 – Залежність коефіцієнту тертя  $f_{tr}$  від часу витримки в насичуючому середовищі  $\tau$ , хв та ступеня концентрації розчину  $C$ , %

В результаті аналізу одержані регресійні рівняння залежності:

зносу  $J$  від незалежних змінних часу обробки в середовищі  $\tau$  та температури витримки  $t$

$$J(\tau, t) = 0,3936 - 0,0083 \cdot \tau - 0,0003 \cdot t + 6,5483 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2 - 2,6835 \cdot 10^{-7} \cdot \tau t + 2,154 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \quad (3.9)$$

зносу  $J$  від незалежних змінних температури витримки  $t$  та концентрації АХФЗ в насичуючому середовищі  $C$

$$J(t, C) = 0,2017 - 0,0064 \cdot t - 0,0004 \cdot C + 0,0003 \cdot t^2 + 1,3129 \cdot 10^{-6} \cdot t \cdot C + 3,0182 \cdot 10^{-7} \cdot C^2 \quad (3.10)$$

зносу  $J$  від незалежних змінних часу обробки в середовищі  $\tau$  та концентрації АХФЗ в насичуючому середовищі  $C$

$$J(\tau, C) = 0,3732 - 0,0082 \cdot \tau - 0,0124 \cdot C + 5,9566 \cdot 10^{-5} \cdot \tau^2 + 4,9533 \cdot 10^{-5} \cdot \tau \cdot C + 0,0004 \cdot C^2 \quad (3.11)$$

товщини покриття  $h$  від незалежних змінних температури витримки  $t$  та часу обробки в середовищі  $\tau$

$$h(\tau, t) = -30,0767 + 0,3457 \cdot \tau + 0,1056 \cdot t - 0,0034 \cdot \tau^2 + 6,2222 \cdot 10^{-5} \cdot \tau t - 5,3939 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 \quad (3.12)$$

товщини покриття  $h$  від незалежних змінних температури витримки  $t$  та концентрації АХФЗ в насичуючому середовищі  $C$

$$h(C, t) = -43,8522 + 1,268 \cdot C + 0,1991 \cdot t - 0,0647 \cdot C^2 + 0,0006 \cdot C \cdot t - 0,0002 \cdot t^2 \quad (3.13)$$

товщини покриття  $h$  від незалежних змінних часу обробки в середовищі  $\tau$  та концентрації АХФЗ в насичуючому середовищі  $C$

$$h(\tau, C) = -873944 + 0,7727 \cdot \tau + 2,3086 \cdot C - 0,0061 \cdot \tau^2 - 0,0035 \cdot \tau C - 0,078 \cdot C^2 \quad (3.14)$$

коефіцієнту тертя  $f_{mp}$  від незалежних змінних температури витримки  $t$  та часу обробки в середовищі  $\tau$

$$f_{mp}(t, \tau) = 0,0742 - 0,0005 \cdot t - 0,0001 \cdot \tau + 4,5038 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 8,6538 \cdot 10^{-8} \cdot t \cdot \tau + 8,2727 \cdot 10^{-8} \cdot \tau^2 \quad (3.15)$$

коефіцієнту тертя  $f_{mp}$  від незалежних змінних температури витримки  $t$  та концентрації АХФЗ в насичуючому середовищі  $C$

$$f_{mp}(t, C) = 0,1434 - 0,0046 \cdot t - 0,0003 \cdot C + 0,0002 \cdot t^2 + 1,701 \cdot 10^{-6} \cdot t \cdot C + 2,401 \cdot 10^{-7} \cdot C^2 \quad (3.16)$$

коефіцієнту тертя  $f_{mp}$  від незалежних змінних часу обробки в середовищі  $\tau$  та концентрації АХФЗ в насичуючому середовищі  $C$

$$f_{mp}(\tau, C) = 0,0626 - 0,0007 \cdot \tau - 0,0019 \cdot C + 7,178 \cdot 10^{-6} \cdot \tau^2 + 3,3058 \cdot 10^{-8} \cdot \tau C + 8,6364 \cdot 10^{-5} \cdot C^2 \quad (3.17)$$



Проводячи аналіз одержаних в ході моделювання залежностей, визначили, що оптимальні триботехнічні властивості (рис.3.11 – 3.13) пари тертя шестерня – корпус масляного шестеренного насосу системи змащування двигунів внутрішнього згоряння, забезпечується застосуванням нової технології поверхневої обробки, коли технологічні параметри становитимуть: температура обробки в насичуючому середовищі  $600^{\circ}\text{C}$ , час витримки в насичуючому середовищі 40 хв., концентрація алюмохромфосфатного з'єднання 10% у водному розчині [199].

Таким чином, згідно проведених досліджень оптимальними параметрами способу нанесення покриття прийнято концентрацію алюмохромфосфатного з'єднання 10%, температуру  $600\pm 20^{\circ}\text{C}$ , час витримки в насичуючому середовищі 40 хвилин. Для дослідження впливу даного способу на формування захисних покриттів була проведена обробка за вище наведеними параметрами на зразках виготовлених із сірого чавуну, і сталі 40Х, що використовуються для виготовлення пари тертя шестерня - корпус.

### 3.4 Результати металографічних досліджень зразків

#### 3.4.1 Рентгеноспектральний аналіз зразків

При виконанні дослідження вимірювання спектрів рентгенівської флуоресценції проводилося на скануючому вакуумному кристал-дифракційному спектрометрі "Спрут"- В. Результати проведеного рентгеноспектрального аналізу поверхонь зразків виготовлених із чавуна, сталі до та після проведення обробки в насичуючому середовищі (табл. 3.8) показали збільшення елементного складу хрому майже в 2,5 рази, також на поверхні з'явилися фосфор та алюміній.

Таблиця 3.8 – Результати рентгеноспектрального аналізу

Показники	Si	Cr	Mn	Cu	S	P	Al
Елементний склад поверхні зразка до обробки	1,14	0,12	0,75	0,14	0,25	-	-
Елементний склад поверхні чавуна після обробки в розчині алюмохромофосфатної солі	0,06	<u>0,29</u>	0,87	0,11	-	<u>0,89</u>	<u>0,36</u>

Таблиця 3.9 – Результати рентгеноспектрального аналізу поверхні зразків з покриттям після тертя

Найменування елементу	Al	Si	P	S	Cr	Mn
Диск (чавун) – бокова поверхня	0,5	1,04	1,37	0,25	0,47	0,59
Диск (чавун) – поверхня тертя	0,5	1,10	1,12	0,98	0,34	0,45
Колодка (сталь) – бокова поверхня	0,2	0,84	0,1	0,15	0,73	0,67
Колодка (сталь) – поверхня тертя	0,6	1,03	0,31	0,3	0,55	0,67

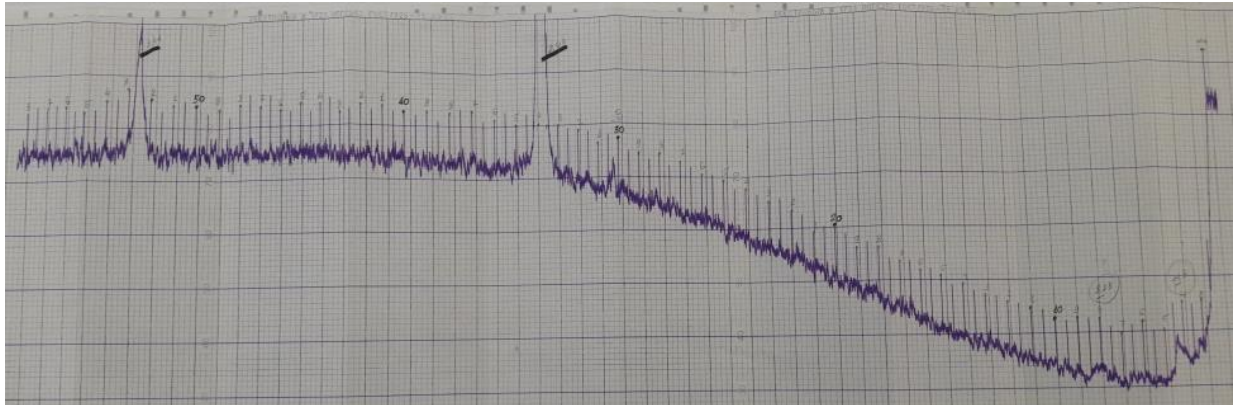
#### 3.4.2 Результати проведення дослідження фазового складу зразків

Дослідження фазового складу покриттів виконано на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4. На (рис.3.20) наведено рентгенограми дослідження фазового складу.

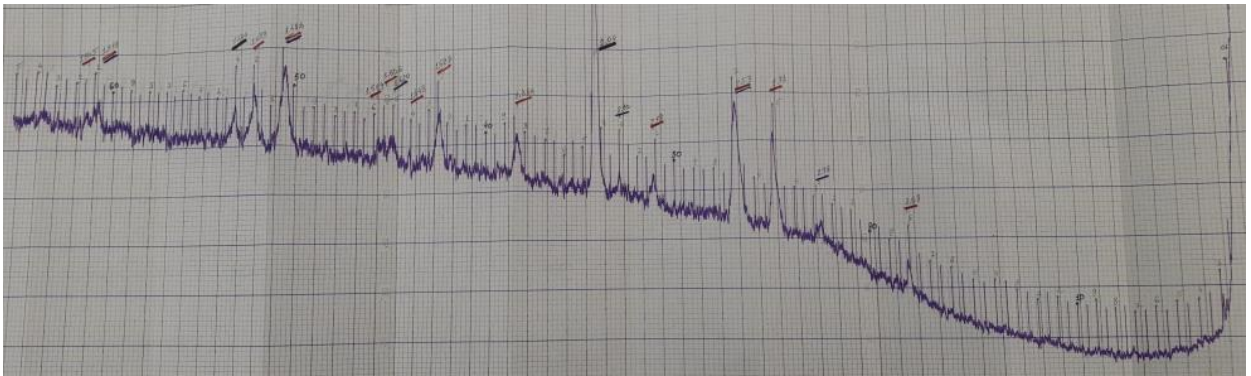
На рентгенограмі від робочої поверхні контртіла спостерігаються дифракційні максимуми від  $\alpha$ -Fe. Сліди інших фаз відсутні.

У першу чергу потрібно звернути увагу на рентгенограму зняту з бічної поверхні ролика (чавун), тому що вона знята в оптимальних умовах і не має викривлення за рахунок дефокусування. Насамперед, варто звернути

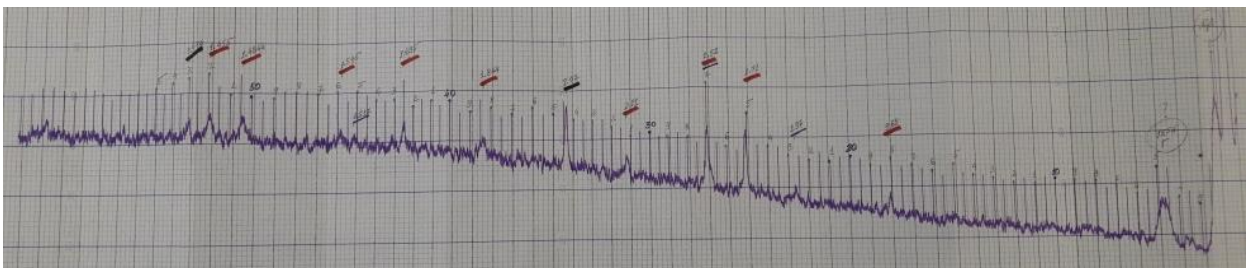
увагу на фон, який збільшується з ростом кута дифракції, що характерно для матеріалів, які мають значну частку аморфної складової.



а) робоча поверхня колодки (сталь 40Х)



б) робоча поверхня ролика (сірий чавун)



в) бокова поверхня ролика (сірий чавун)

Рисунок 3.20 – Рентгенограми дослідження фазового складу зразків з покриттям

Дифракційні максимуми на рентгенограмах від робочої і бокової поверхні ролика практично ідентичні.

Основними фазами (кристалічними) в обох випадках є  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Враховуючи хімічний склад покриття не можна виключити наявність фази  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ , яка за своїми параметрами дуже близька до  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Сліди  $\alpha\text{-Fe}$  також спостерігаються на цих рентгенограмах. Це швидше за усе випромінювання від основи зразка. Сліди інших кристалічних фаз, практично, відсутні.

З вище викладеного можна зробити висновки:

- покриття зразка має аморфну структуру;
- у процесі нанесення покриття відбуваються процеси сприятливі утворенню оксидів ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) і шпинелей ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) [200-201].

Особливістю формування таких покриттів є те що, структура покриття складається з декількох зон (рис.3.21):

Покриття формується на основі зустрічної дифузії - ефект Кіркендалла [203].

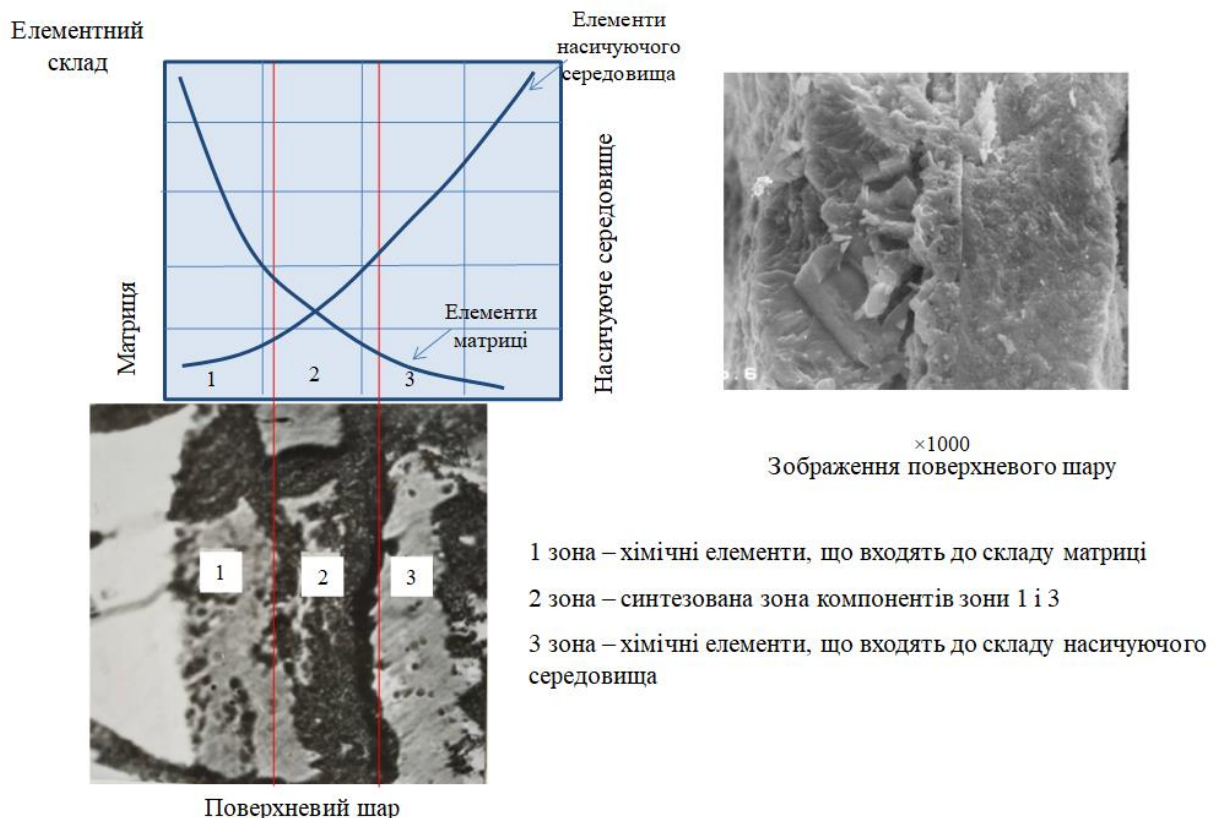


Рисунок 3.21 – Схема розподілення хімічних елементів по товщині поверхневого шару

1 зона - утворюється безпосередньо біля матриці і складається з хімічних елементів, що входять до складу матриці. Беручи до уваги дані рентгеноспектрального аналізу її склад можна інтерпретувати як суміш оксидів заліза.

2 зона – синтезована зона компонентів зони 1 і 3. Має явно виражену кристалічну будову і характеризується певною направленістю – стовбчаста структура.

3 зона – містить хімічні елементи, що входять до складу насичуючого середовища. Ця зона має крупнозернисту рівновісну структуру [202].

### 3.4.3 Дослідження мікроструктури зразків

На виготовлених шліфах проводилося дослідження структури сталі 40X та чавуну СЧ20 (рис.3.22 – 3.27). На рисунку 3.22, де наведена мікроструктура чавуну з покриттям на прямому шліфі до травлення при збільшеннях у 200, 630 та 1000 разів, бачимо поверхневий шар зразка, а також покриття світло сірого кольору, які мають чітку межу між собою. Вивчаючи графітові включення, які виходять на поверхню зразка, варто звернути увагу на те, що покриття проникає в поверхневий шар зразка навколо графітових пластин, а значить що є перехідний шар між покриттям і основним металом. Це дає можливість вважати, що за рахунок взаємодії покриття з графітом збільшується адгезія покриття з основним металом, та збільшується шар, який веде до покращення триботехнічних властивостей поверхні [204].

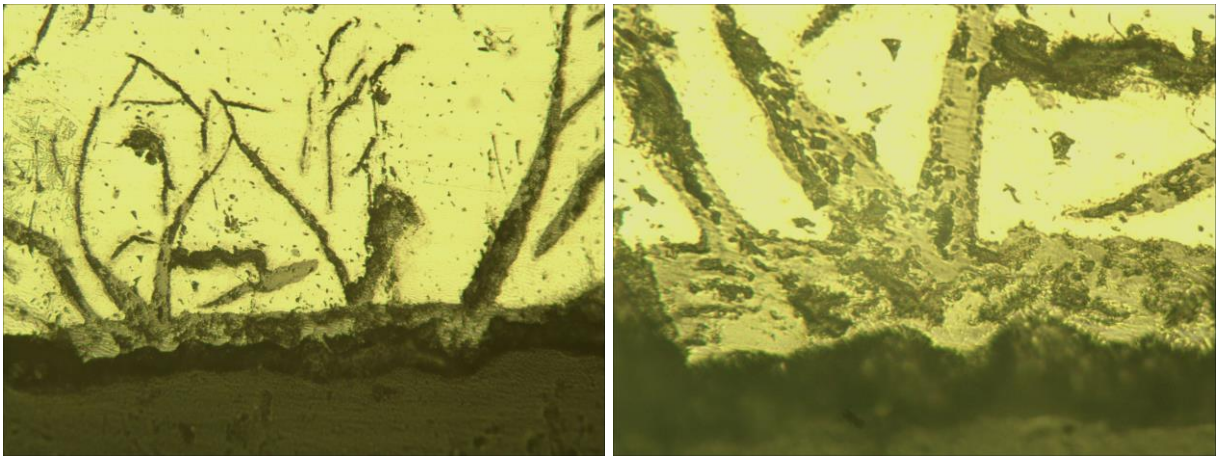
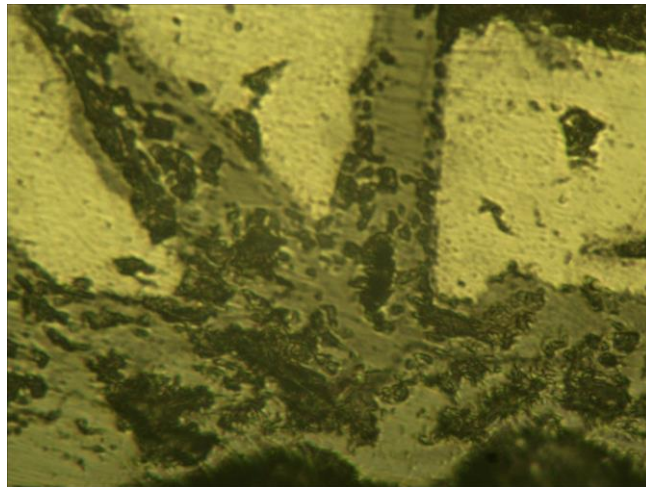
а)  $\times 200$ б)  $\times 630$ в)  $\times 1000$ 

Рисунок 3.22 – Мікроструктура прямих шліфів чавуну з покриттям до травлення

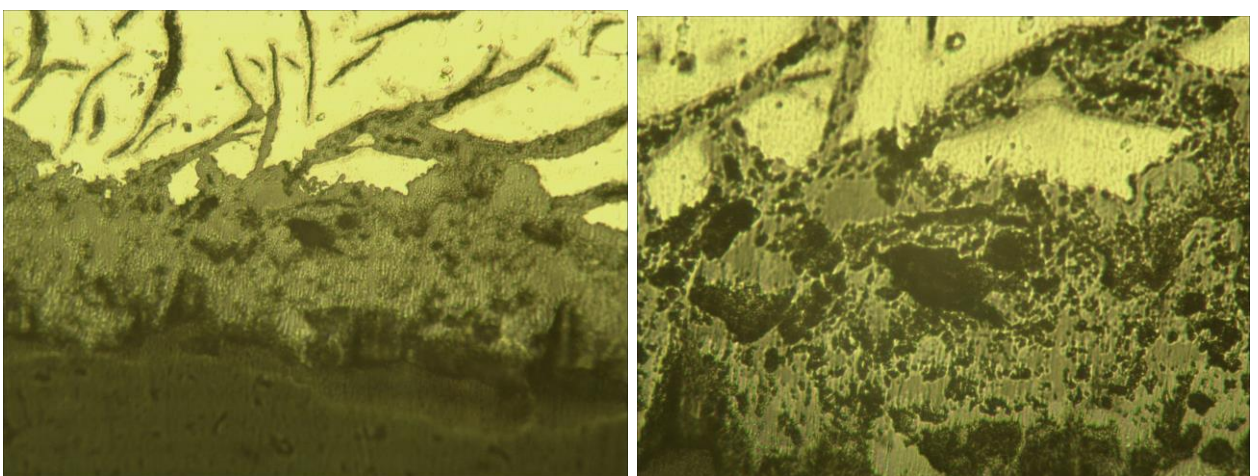
а)  $\times 200$ б)  $\times 400$ 

Рисунок 3.23 – Мікроструктура косих шліфів чавуну з покриттям до травлення

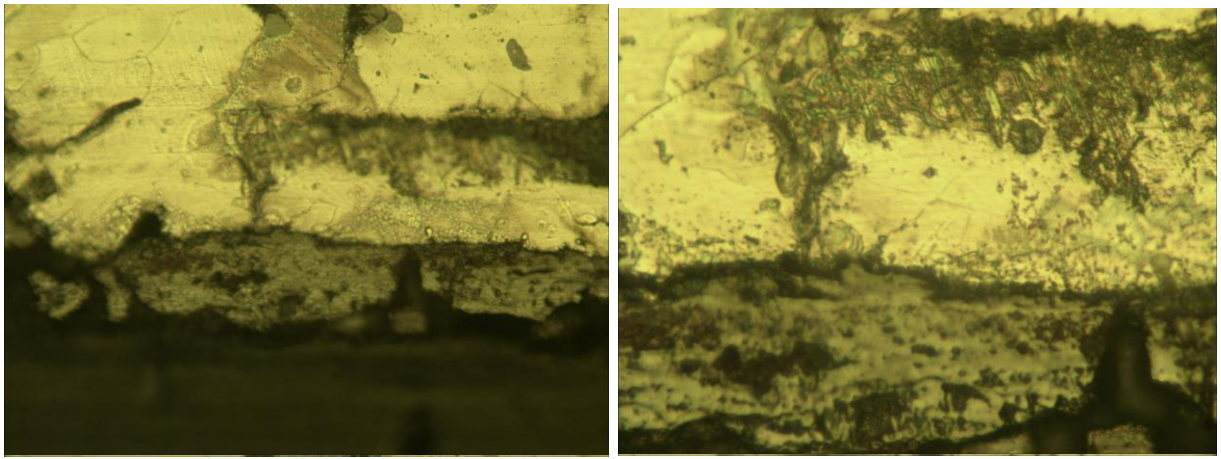
а)  $\times 400$ б)  $\times 630$ 

Рисунок 3.24 – Мікроструктура прямих шліфів чавуну з покриттям після травлення

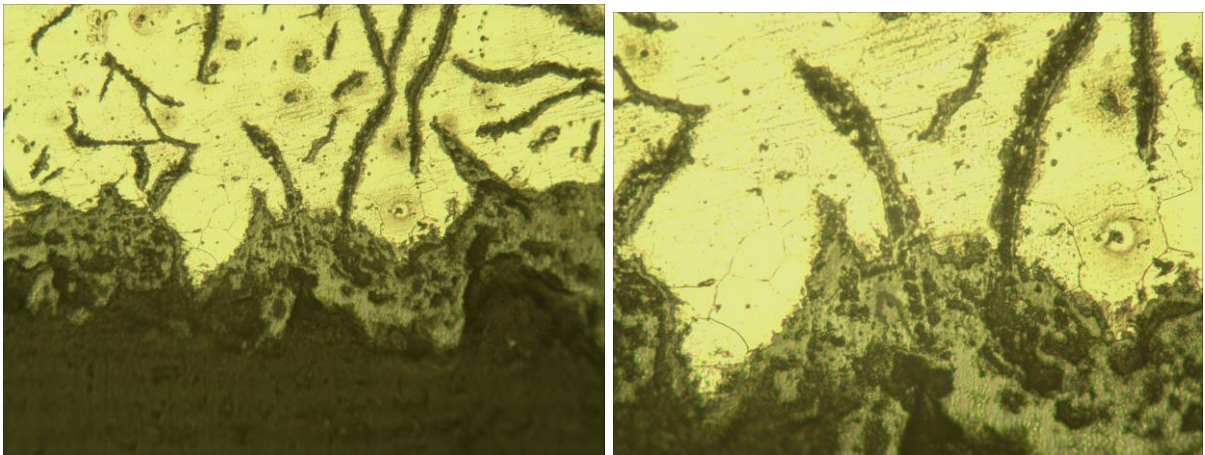
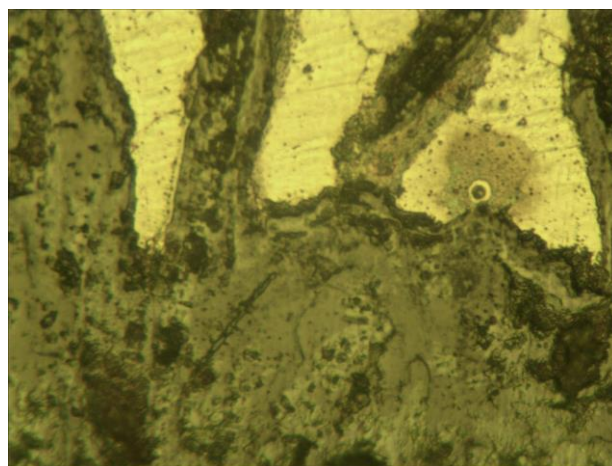
а)  $\times 200$ б)  $\times 400$ в)  $\times 630$ 

Рисунок 3.25 – Мікроструктура косих шліфів чавуну з покриттям після травлення

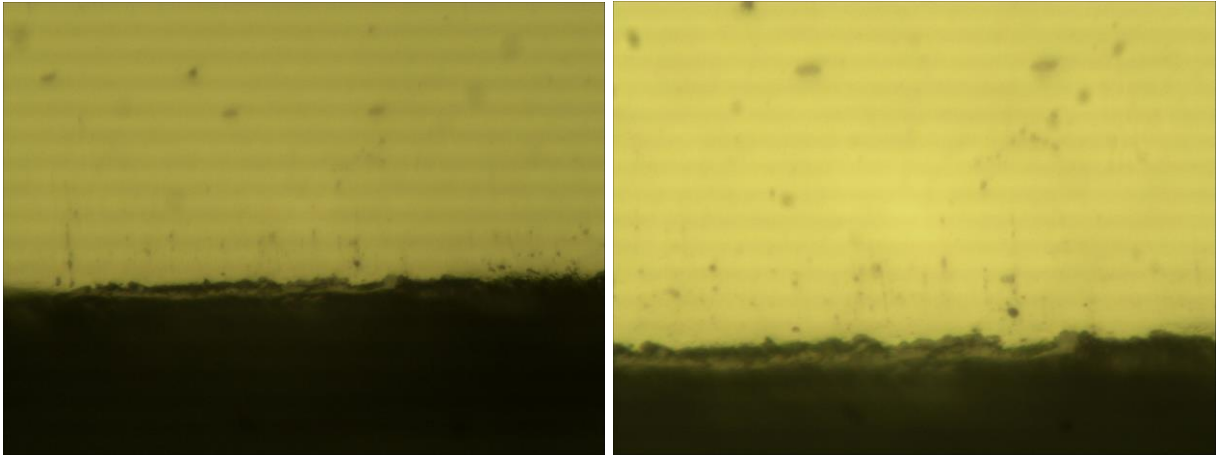
а)  $\times 630$ б)  $\times 1000$ 

Рисунок 3.26 – Мікроструктура шліфів сталі з покриттям до травлення

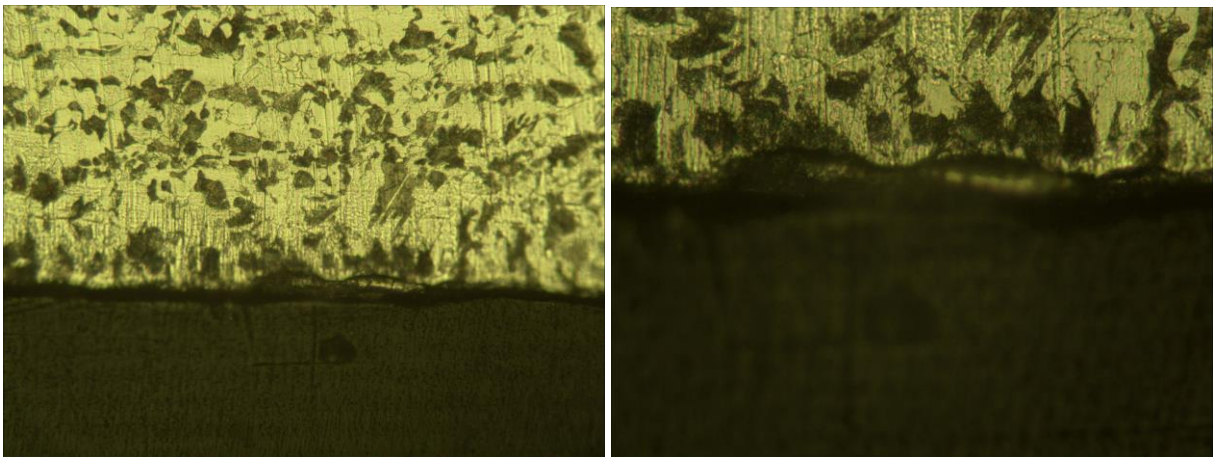
а)  $\times 400$ б)  $\times 630$ 

Рисунок 3.27 – Мікроструктура шліфів сталі з покриттям після травлення



### 3.4.4 Визначення товщини утвореного покриття

Визначення товщини нанесеного поверхневого шару проводилося на косих мікрошліфах за допомогою приладу для вимірювання твердості ПМТ-3. На рисунку 3.28 зображена мікроструктура зразка виготовленого із чавуну СЧ20 з нанесеним покриттям.

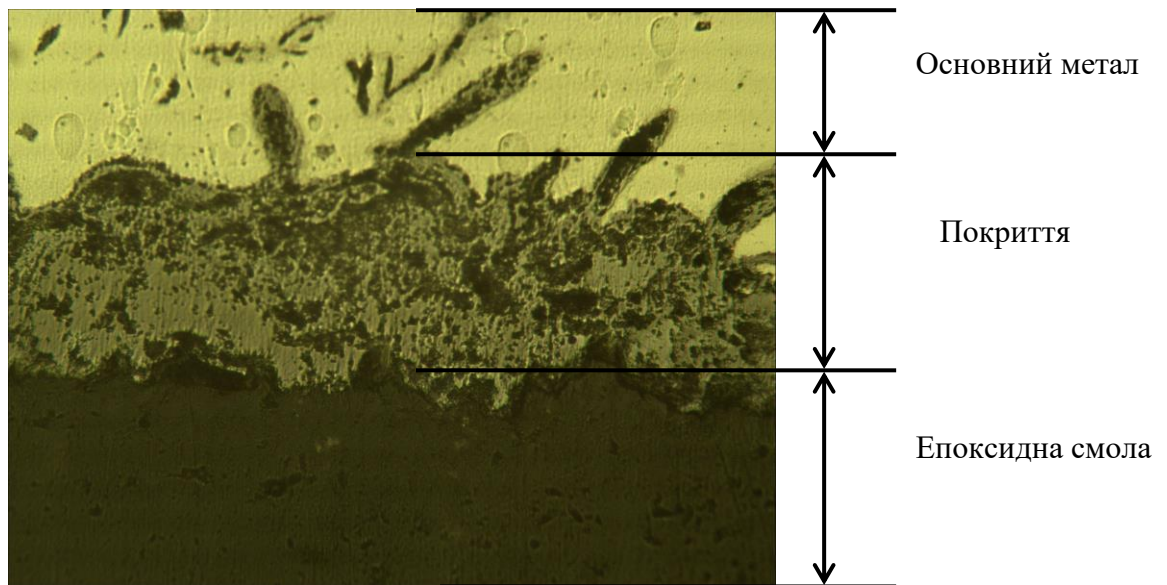


Рисунок 3.28 – Структура на косому мікрошліфі (диск – чавун)

Товщина замірялася послідовно в різних точках поверхні зразків, потім перераховувалися показники одержані в результаті вимірювання в мікрометри – це були показники товщини покриття на косому мікрошліфі. Після чого одержані значення товщини на косих зразках перераховувалися в реальні товщини покриттів.

В результаті вимірювання та розрахунків середня товщина покриття склала 30 мкм, що як показали дослідження достатньо для забезпечення заданих властивостей [205-206].

### 3.5 Висновки до третього розділу

1. Обраний та обґрунтований склад насичуючого середовища: водний розчин алюмохромфосфатного з'єднання.

2. Виконана оптимізація параметрів технологічного процесу нанесення покриття: за допомогою моделювання визначені оптимальні параметри обробки такі, як концентрація алюмохромфосфатного з'єднання у водному розчині, температура нанесення покриттів та час витримки в насичуючому середовищі. Підсумовуючи результати дослідження впливу технологічних параметрів нової технології на якість поверхні можна зробити висновок, що мінімальний знос та коефіцієнт тертя деталей шестерня – корпус масляних шестеренних насосів двигунів внутрішнього згоряння забезпечується при наступних параметрах технологічного процесу, а саме: температури насичуючого середовища  $600 \pm 20$  °С; часу витримки в насичуючому середовищі 40-50 хв.; концентрації в насичуючому середовищі 8 - 12% алюмохромфосфатного з'єднання в водному розчині.

3. Одержані результати металографічних досліджень, які доводять що після насичення поверхні у водному розчині алюмохромфосфатного з'єднання, збільшується елементний склад хрому майже в 2,5 рази, також на поверхні з'явилися фосфор та алюміній. Фазовий аналіз засвідчив, що покриття зразка має аморфну структуру, та у процесі нанесення покриття відбуваються процеси сприятливі утворенню оксидів ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) і шпінелей ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

4. Виконані вимірювання та розрахунки товщини утвореного шару покриття. Середня товщина покриття склала 30 мкм, що як показали дослідження достатньо для забезпечення заданих експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей масляного шестеренного насосу.

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТЯ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

#### 4.1 Дослідження впливу параметрів процесу і насичуючого середовища, на знос пар тертя чавун-сталь

Процес зношування деталей машин охоплює сукупність складних явищ, що відбуваються при взаємодії поверхневих шарів матеріалу зі зношуючим середовищем у визначених конкретних, специфічних умовах експлуатації. Усі компоненти цього процесу, що включають і метал, і зношуюче середовище, та зовнішні умови, за якими здійснюється зношування, взаємозалежні і кожний з них окремо і у взаємодії з іншими факторами впливає на кінцевий результат – процес спрацьовування та величину зносу [15-18].

Для проведення дослідження зносостійкості на машині тертя, виготовлялися зразки у формі диска та колодки (рис. 2.5). Матеріалом для дисків було обрано сірий чавун, який за своїм хімічним складом, структурою, механічними властивостями відповідає чавуну, з якого виготовляють корпуси масляних шестеренних насосів для двигунів внутрішнього згорання. Колодки виготовлялися із сталі 40Х, яка за своїм хімічним складом, структурою, механічними властивостями відповідає сталі, з якої виготовляють ведучі та ведені шестірні масляних насосів.

Умови проведення дослідження на знос обиралися наближені до умов роботи масляних шестеренних насосів. Дослідженням було передбачено одержання характеристик зносу в залежності від часу випробування, порівняння характеру і величин зносу зразків до нанесення та після нанесення покриття, а також в залежності від навантаження зразків. Вивчення поведінки при терті зразків оброблених при різних режимах

нанесення покриття, з метою встановлення оптимальних параметрів нанесення [207].

Для кожного варіанту порівняльних випробувань бралися по три пари зразків. Оцінка зносу проводилася методом зважування зразків на аналітичних терезах ВЛА-200. Випробування проводилися в маслі М10Г2, при навантаженні від 490 Н до 1961Н на машині тертя МИ.

Перед дослідом зразки промивались бензином, висушувалися і зважувалися на аналітичних терезах з точністю до 0,00005г. Наступне зважування проводилося через кожні 120 хв., а також одночасно фіксувався стан поверхні візуальним методом.

На рисунку 4.1 наведено графік залежності зносу пари тертя: диск-чавун без покриття і колодка-сталь без покриття, від часу випробування при навантаженні 490Н. Крива 1 характеризує знос сталеві колодки в грамах, а крива 2 – знос чавунного диска.

Проведений аналіз кривих показує, що більш інтенсивно в парі тертя зношується сталевий зразок (крива 1, рис. 4.1). За перші чотири години експерименту зразки колодка – сталь дали знос 0,26378г. Після чого відбувається зменшення інтенсивності зношування і за наступні шість годин знос зразка склав 0,00117 г. З одержаних результатів можемо зробити висновок, що припрацювання зразка становило біля чотирьох годин.

Поверхня зони тертя зразків колодка - сталь при кожному зважуванні була блискучою, полірованою, шорсткість візуально зменшилася, слідів механічної обробки не залишилося, задири відсутні.

Крива 2 (рис. 4.1) характеризує знос зразків диск-чавун без покриття. Проаналізувавши графік, важко виділити період припрацювання для вихідних зразків диск-чавун. Крива зносу має лінійну залежність. Знос зразків за шість годин експерименту становить 0,0458 г, а за весь час дослідів 0,0574г.

На поверхні зони тертя зразків диск-чавун без покриття візуально спостерігається зменшення шорсткості, поверхня має сірий тьмянний колір, задири відсутні.

Порівнявши знос вихідних сталевих зразків з чавунними можна зробити висновок, що чавунні диски дали знос у 4,6 рази менший ніж сталеві колодки.

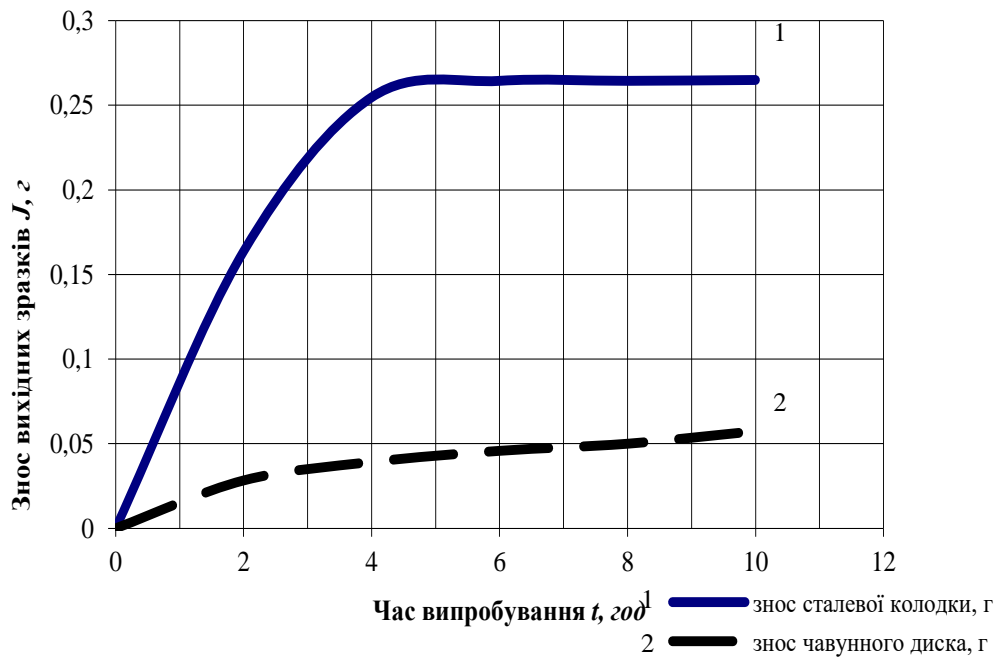


Рисунок 4.1 – Залежність зносу вихідних зразків від часу випробування при навантаженні 490 Н

Знос сталеві колодки (крива 1, рис.4.2) при навантаженні 980Н стабілізувався через 6 годин і склав 0,4722г, можна зробити висновок, виходячи з кривої 1, що при цьому закінчився період припрацювання. За весь період експерименту знос сталеві колодки склав 0,4826г. Поверхня вихідного сталевого зразка після кожного зважування була блискучою, без слідів рисок та задирів.

Чавунний диск дав знос за 10 годин досліду на 0,0775 г (крива 2, рис.4.2). Порівнявши знос вихідного диска-чавуна із зносом вихідної колодки-сталі, можна зробити висновок, що чавунний зразок зносився менше у 6,2 рази ніж сталевий.

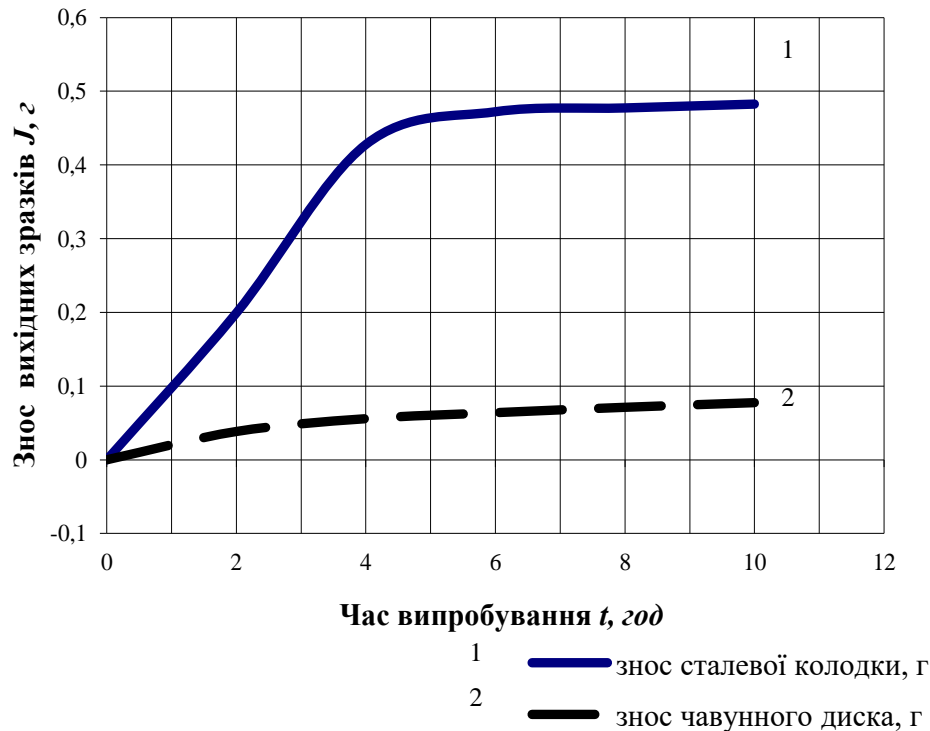


Рисунок 4.2 – Залежність зносу вихідних зразків від часу випробування при навантаженні 980 Н

Проаналізувавши криву 2 (рис.4.2), дійшли висновку, що маємо лінійну залежність зносу від часу випробування. Знос відбувається поступово рівномірно, тому важко виділити період припрацювання. На поверхні тертя вихідних чавунних зразків візуально спостерігається зменшення шорсткості, порівняно із зразками до початку дослідів, поверхня тьмяно сірого кольору, рівномірно зношена, задири не спостерігаються.

З підвищенням навантаження знос сталевих та чавунних зразків підвищився в 1,9 та 5,5 разів відповідно (рис.4.3).

Проаналізувавши дані кривої 1, які показують знос вихідного сталевих зразка, можна зробити висновок, що після шести годин припрацювання, настає короткий період стабільного зносу, а потім спостерігається аварійний знос. За шість годин зразок колодка-сталь дав знос на 0,69375 г, а за десять годин знос склав 0,93765 г.

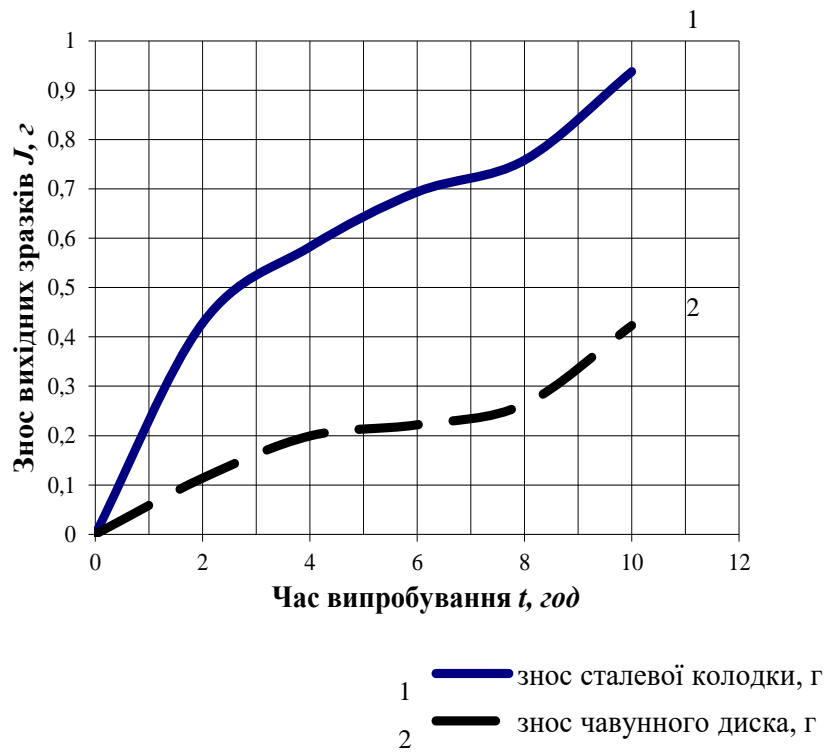


Рисунок 4.3 – Залежність зносу вихідних зразків від часу випробування при навантаженні 1961Н



Рисунок 4.4 – Поверхні тертя вихідних зразків

Чавунні зразки без покриття (крива 2, рис.4.3) припрацювалися за чотири години, але через вісім годин з початку експерименту починається аварійний знос зразків. Зразки диск-чавун без покриття дали знос за чотири години 0,1993 г, за вісім годин - 0,2635 г, та за десять годин 0,4232г.

Порівнявши дані зносу сталевих та чавунних зразків можна зробити висновок, що сталеві зразки вихідні при навантаженні 1961 Н зношуються у 2,2 рази швидше ніж вихідні чавунні.

На зразки диск-чавун та колодка-сталь наносимо покриття із парогазового середовища водного розчину алюмохромфосфатного зв'язуючого. Оброблені таким чином зразки, промивались бензином, висушувались і зважувались на аналітичних терезах.

Крива 1 характеризує знос зразків колодка-сталь з покриттям (рис.4.5). Як видно з графіка сталеві зразки зношуються більш інтенсивно перші чотири години експерименту, зразки втратили за цей період 0,0445 г. Можна зробити висновок, що чотири години триває період припрацювання. Потім настає фаза більш рівномірного зносу. За десять годин експерименту зразки показали знос, який дорівнює 0,0543г.

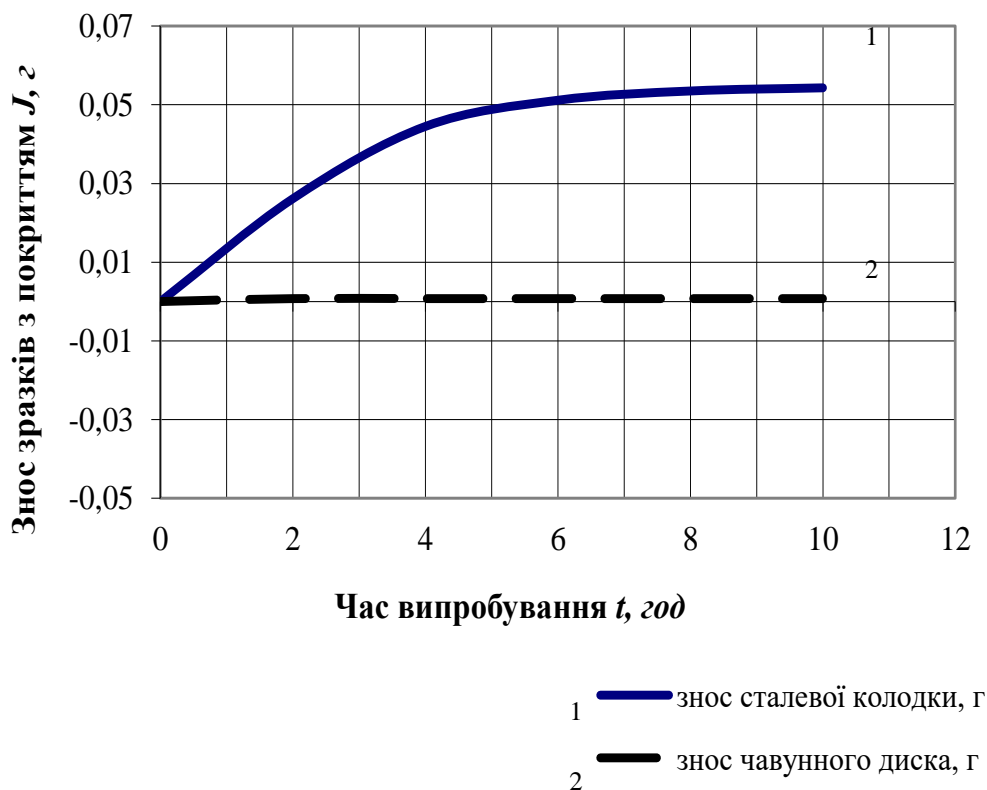


Рисунок 4.5 – Залежність зносу зразків з покриттям від часу випробування при навантаженні 490Н



Після кожного зважування на поверхні тертя сталевих зразків з покриттям спостерігалася блискуча, рівномірно зношена, гладка поверхня, яка не містить слідів рисок та задирів.

Проаналізувавши криву 2 (рис.4.5), яка відповідає зносу зразків диск-чавун з покриттям, можна зробити висновок, що період припрацювання цих зразків становить дві години, а потім спостерігається період беззносності, який триває до кінця експерименту. За десять годин дослідження чавунні зразки дали знос 0,00075г, що у 72,4 раз менше ніж сталеві зразки у цій же парі тертя. Поверхня тертя чавунних зразків виглядала рівномірно припрацьованою, гладкою, без слідів рисок та задирів.

Крива 1 (рис.4.6.) показує, що знос зразків колодка-сталь з покриттям при навантаженні 980Н стабілізується через шість годин експерименту, тобто можна зробити висновок про закінчення періоду припрацювання. За шість годин сталеві зразки з покриттям дали знос 0,1752г, за десять годин знос становив 0,1846 г. Поверхня тертя сталевих зразків була блискучою, рівномірно припрацьованою, без слідів рисок та задирів.

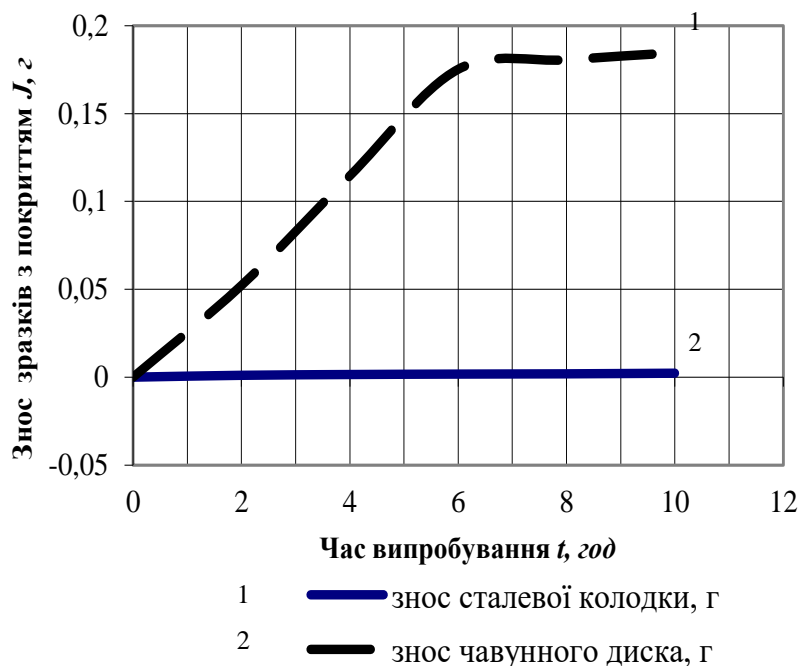


Рисунок 4.6 – Залежність зносу зразків з покриттям від часу випробування при навантаженні 980 Н

Зразки диск-чавун з покриттям (крива 2, рис.4.6) пройшли період припрацювання за перші дві години експерименту, потім спостерігається стабілізація зносу. Знос чавунних зразків з покриттям за перші дві години склав 0,00105 г, за десять годин експерименту 0,00225г, що у 82 рази менше ніж у сталевих зразків з покриттям у цій же парі тертя. У чавунних зразків на поверхні тертя не спостерігалось слідів рисок та задирів.

При навантаженні 1961 Н, як видно з даних кривої 1 (рис.4.7) сталеві зразки з покриттям за перші шість годин дають знос 0,29628 г, за десять годин втрачають 0,30325 г. Можна зробити висновок, що при навантаженні 1961Н сталеві зразки з покриттям припрацьовуються за шість годин.

Візуальний огляд показав, що зразки колодка-сталь з покриттям мають гладку поліровану поверхню з металевим блиском, задири відсутні (рис.4.8).

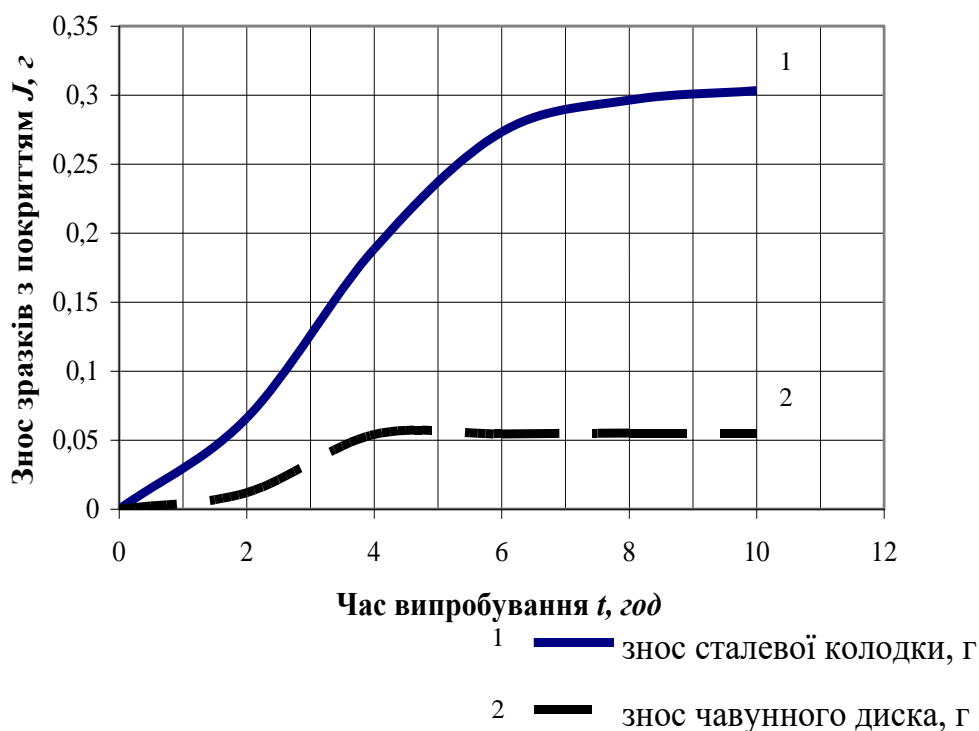


Рисунок 4.7 – Залежність зносу зразків з покриттям від часу випробування при навантаженні 1961 Н

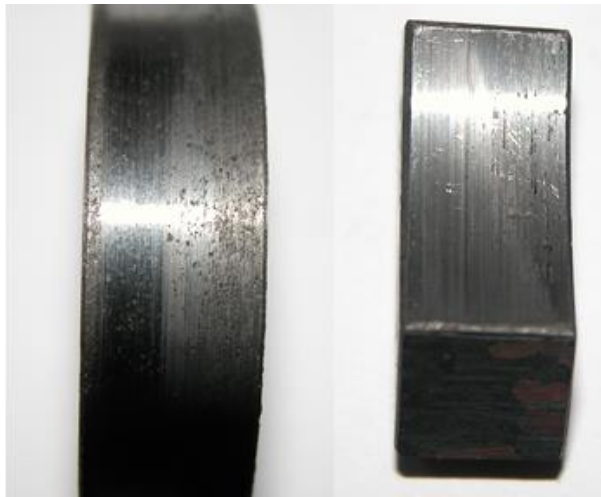


Рисунок 4.8 – Поверхня тертя зразків з покриттям

Період припрацювання чавунних зразків з покриттям, як бачимо з кривої 2 (рис.4.7) тривав чотири години, знос за цей період склав 0,0541 г, а за десять годин експерименту 0,0552 г.

Поверхня тертя чавунних зразків з покриттям має матовий сірий колір, виглядає рівномірно припрацьованою, гладкою, без слідів рисок та задирів (рис.4.8).

Для дослідження триботехнічних характеристик покриття в різних умовах експлуатації, було заплановано дослідити на зносостійкість пари тертя, у яких один зразок був оброблений за запропонованою технологією нанесення шару із водного розчину АХФЗ, а інший залишився без покриття.

Аналіз кривої 1 (рис.4.9) показав, що припрацювання сталевих зразків з покриттям відбулося за перші чотири години експерименту. Знос сталевих зразків з покриттям склав 0,2025 г за чотири години, та 0,22105г за десять годин експерименту.

Поверхня тертя зразків колодка-сталь гладка, з металевим блиском, задири відсутні.

Припрацювання чавунних зразків без покриття (крива 2, рис.4.9) тривало до восьми годин, після чого знос стабілізувався. Після шести годин випробувань чавунні зразки втратили 0,21775 г, а за десять годин – 0,2191г.

При візуальному огляді, чавунні зразки мали гладку поверхню тертя, з тьмяним металевим блиском, сірого кольору, задири і риски не спостерігалися.

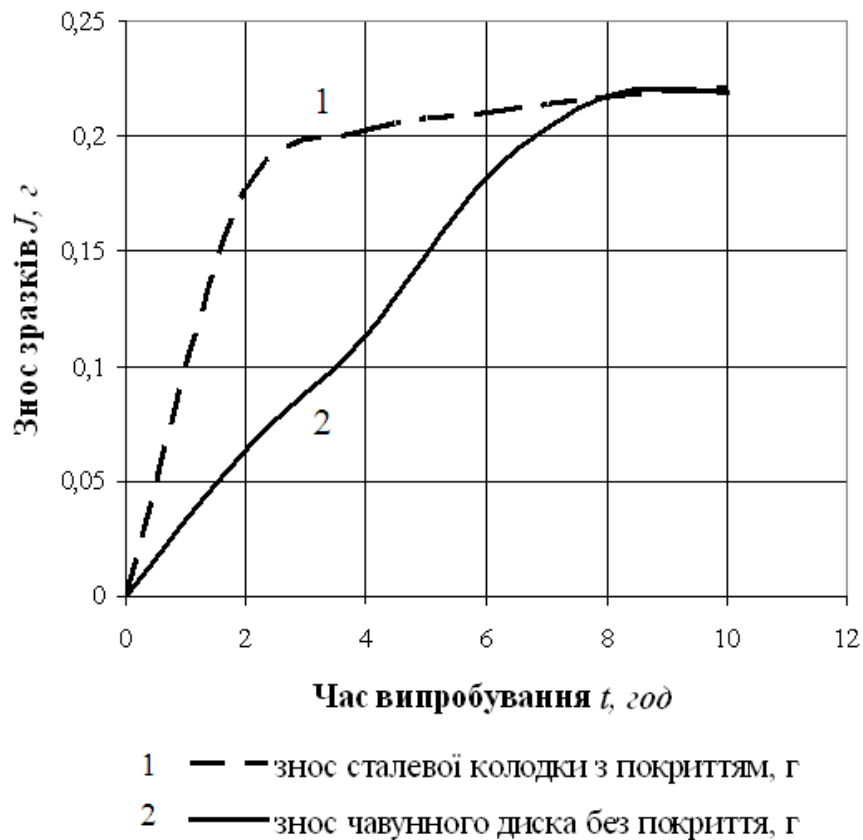


Рисунок 4.9 – Залежність зносу зразків від часу випробування при навантаженні 490Н

Знос сталевих зразків з покриттям при навантаженні 980Н (крива 1, рис.4.10) через дві години випробування склав 0,2823г, за десять годин експерименту зразки дали знос 0,3166 г. Знос сталевих зразків з покриттям відбувається більш рівномірно після двох годин з початку експерименту. З наведених даних можна зробити висновок, що припрацювання зразка колодка-сталь відбулося на протязі перших двох годин.

Посилаючись на проведені візуальні спостереження, сталеві зразки з покриттям в комбінованій парі тертя мають гладку поверхню з металевим блиском, рівномірно припрацьовану, задири відсутні.

Крива 2 (рис.4.10) характеризує знос зразків диск-чавун без покриття в комбінованій парі. Аналіз графіку показав, що період припрацювання

чавунних зразків тривав шість годин. Знос чавунних зразків без покриття за шість годин становив 0,2956 г, а за десять годин експерименту зразки втратили 0,30125г. Поверхня тертя чавунних зразків була гладкою, з тьмяним блиском, сірого кольору, задири відсутні.

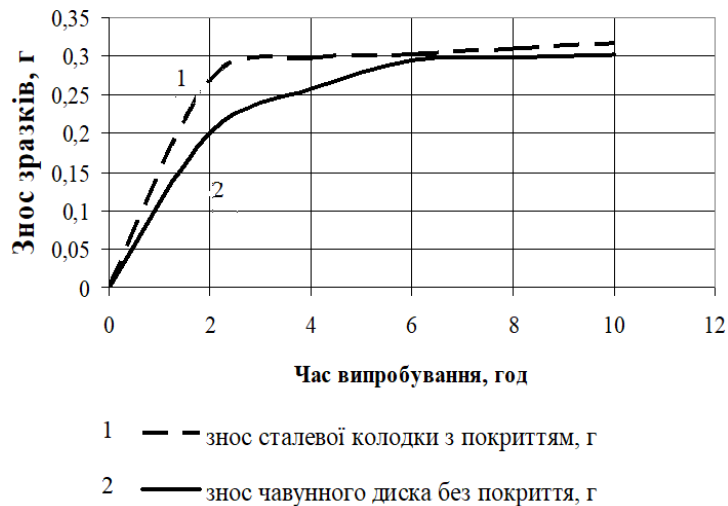


Рисунок 4.10 – Залежність зносу зразків від часу випробування при навантаженні 980Н

Після випробування при навантаженні 1961 Н сталеві зразки з покриттям (крива 1, рис.4.11) втратили 0,6255г, а чавунні зразки без покриття (крива 2, рис.4.11) – 0,68365 г. Припрацювання сталевих зразків тривало вісім годин.

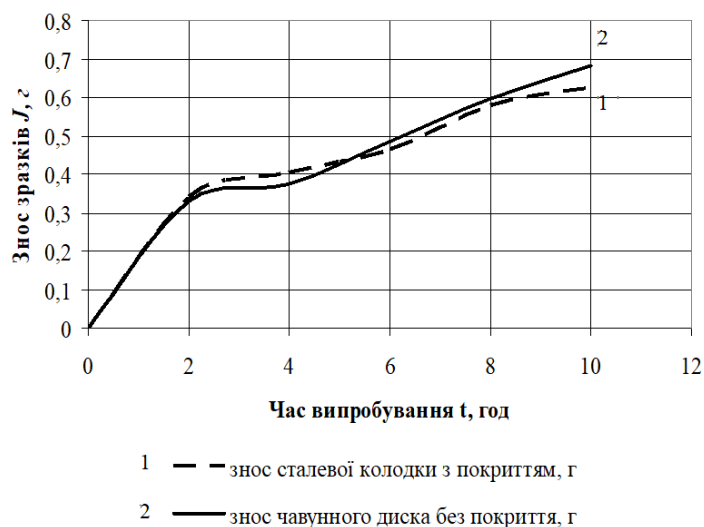


Рисунок 4.11 – Залежність зносу зразків від часу випробування при навантаженні 1961 Н

Поверхня тертя сталевих зразків була гладкою, з металевим блиском, задири відсутні. Чавунні зразки мали рівномірно зношену поверхню тертя з тьмяним металевим блиском, сірого кольору, задири відсутні (рис.4.12).



Рисунок 4.12 – Поверхня тертя зразків колодка-сталь з покриттям, диск-чавун без покриття

Аналогічні дослідження були проведені при іншій підготовці пар тертя: зразок колодка-сталь без покриття, зразок диск-чавун з покриттям (рис.4.13).

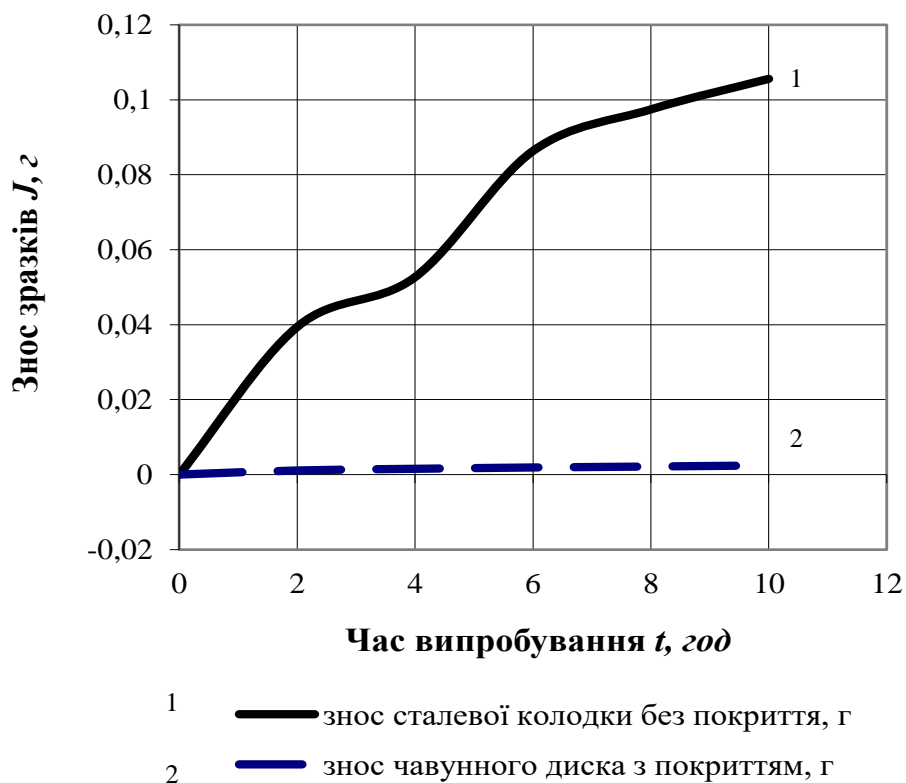


Рисунок 4.13 – Залежність зносу зразків від часу випробування при навантаженні 490Н

Знос сталевго зразка без покриття при навантаженні 490Н (крива 1, рис. 4.13) за час експерименту склав 0,10565г, а чавунного зразка з покриттям (крива 2, рис.4.13) становив 0,00245 г. Припрацювання сталевго зразка відбулося за шість годин. Чавунний зразок припрацювався за дві години.

Сталевий зразок мав гладку поверхню з металевим блиском, слідів рисок та задирів не виявлено. Поверхня чавунного зразка була рівномірно припрацьована, гладка, без видимих рисок та задирів.

Сталевий зразок без покриття при навантаженні 980 Н (крива 1, рис.4.14) за час експерименту дав знос 0,2662г, знос чавунного зразка з покриттям (крива 2, рис.4.14) склав 0,00385г.

Після двох годин випробувань поверхні припрацювалися. Поверхня тертя сталевго зразка гладка з металевим блиском, задери відсутні. Чавунний зразок мав гладку поверхню сірого кольору, задери та риси відсутні.

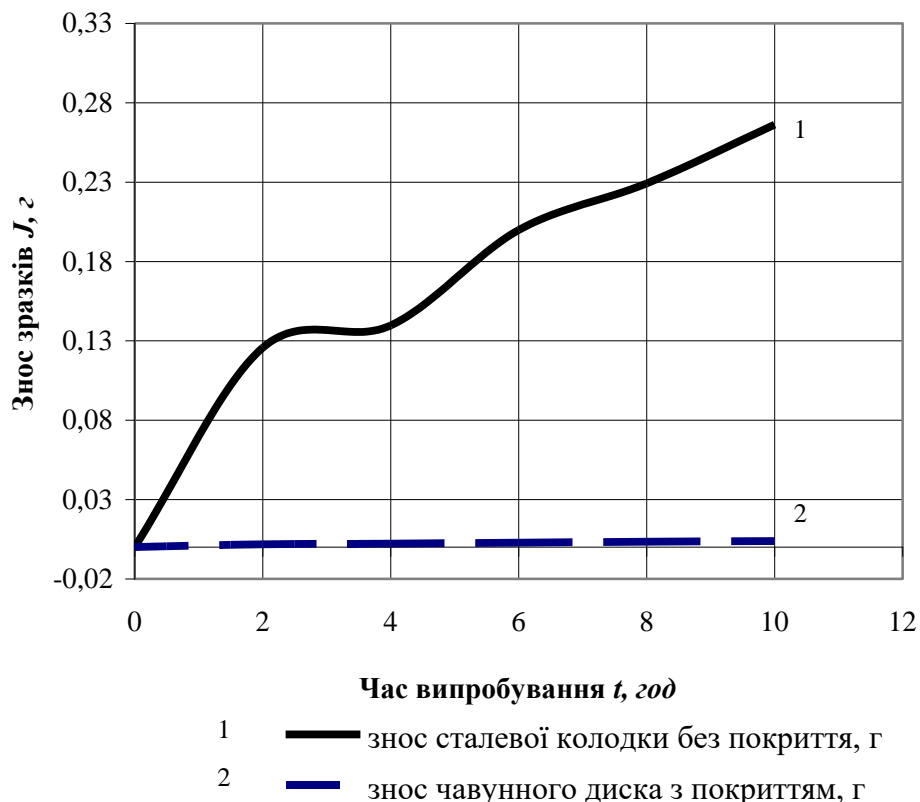


Рисунок 4.14 – Залежність зносу зразків від часу випробування при навантаженні 980 Н

Графік залежності зносу зразків: колодка-сталь без покриття та диск-чавун з покриттям від часу випробування при навантаженні 1961 Н зображено на рисунку 4.15.

Знос сталевого зразка без покриття (крива 1, рис.4.15) за час експерименту при навантаженні 1961Н склав 0,42500г. Чавунний зразок з покриттям (крива 2, рис.4.15) дав знос за весь період випробування 0,01205г.

Після двох годин випробування поверхні зразків припрацювались. Сталевий зразок мав гладку поліровану поверхню, з металевим блиском. Зразок диск-чавун з покриттям мали гладку поверхню, сірого кольору, з тьмяним металевим блиском, задири відсутні (рис.4.16).

Для дослідження і співставлення результатів експерименту на знос приведемо загальні графіки залежності зносу зразків від часу випробування при різних навантаженнях.

Аналізуючи криві зображені на рисунку 4.17, можна зробити висновок, що при навантаженні 490 Н найбільший знос дають вихідні сталеві зразки (крива 1, рис. 4.17), при цьому вихідні чавунні зразки (крива 2, рис. 4.17), які працювали з ними в парі, зношуються значно менше. Після нанесення покриття на сталеві та чавунні зразки, можна спостерігати, що знос сталевих зразків з покриттям (крива 3, рис. 4.17) у 4,9 рази зменшився порівняно зі зносом сталевих зразків без покриття (крива 1, рис. 4.17). Чавун з покриттям з цієї ж пари тертя (крива 4, рис. 4.17) дав знос у 76,5 разів менший ніж чавуни без покриття у комбінованій парі з вихідними зразками (крива 2, рис. 4.17).

У комбінованій парі тертя (пара 1), знос сталеві колодки з покриттям (крива 5, рис. 4.17), зменшився порівняно з вихідним зразком (крива 1, рис. 4.17) у 1,2 рази, проте збільшився у 4,1 рази порівняно зі сталлю з покриттям (крива 3, рис. 4.17), де у парі тертя працюють обидва зразки з покриттям.

Чавунний зразок без покриття (крива 6, рис. 4.17), у цій же комбінованій парі тертя (пара 1), дав знос у 3,8 рази більший ніж чавунний зразок без покриття з вихідної пари (крива 2, рис. 4.17), а також у 292 рази



більший ніж знос чавунного зразка з покриттям (крива 4, рис. 4.17) з пари тертя, де обидва зразки з покриттям.

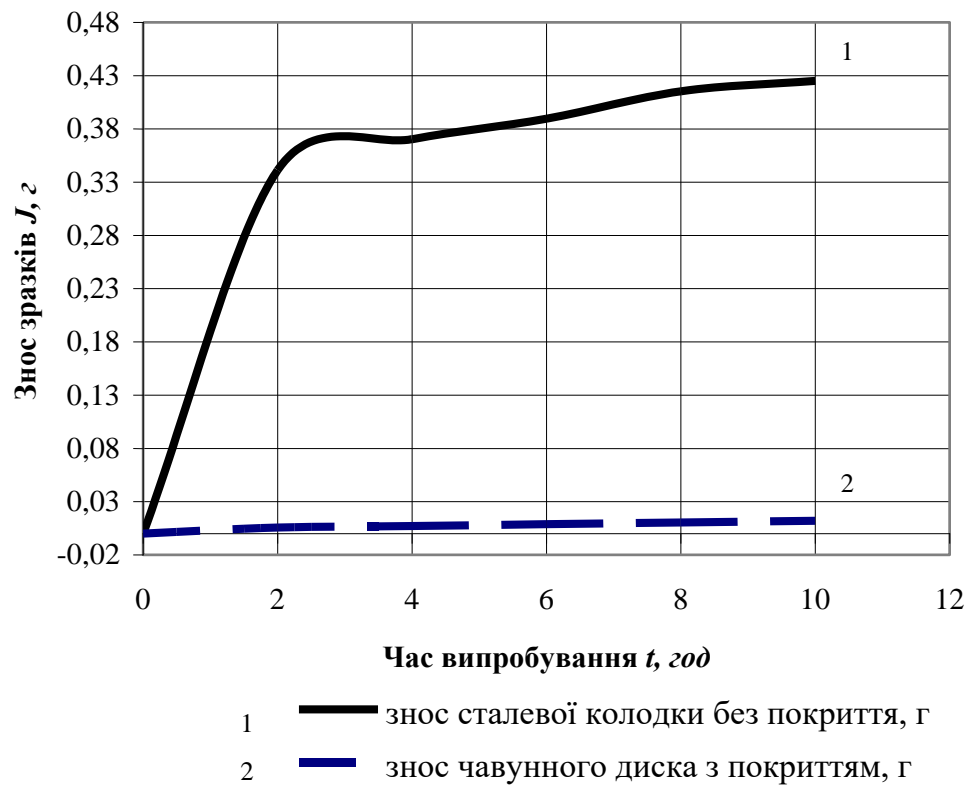


Рисунок 4.15 – Залежність зносу зразків від часу випробування при навантаженні 1961 Н



Рисунок 4.16 – Поверхня тертя зразків колодки-сталь без покриття, диск-чавун з покриттям

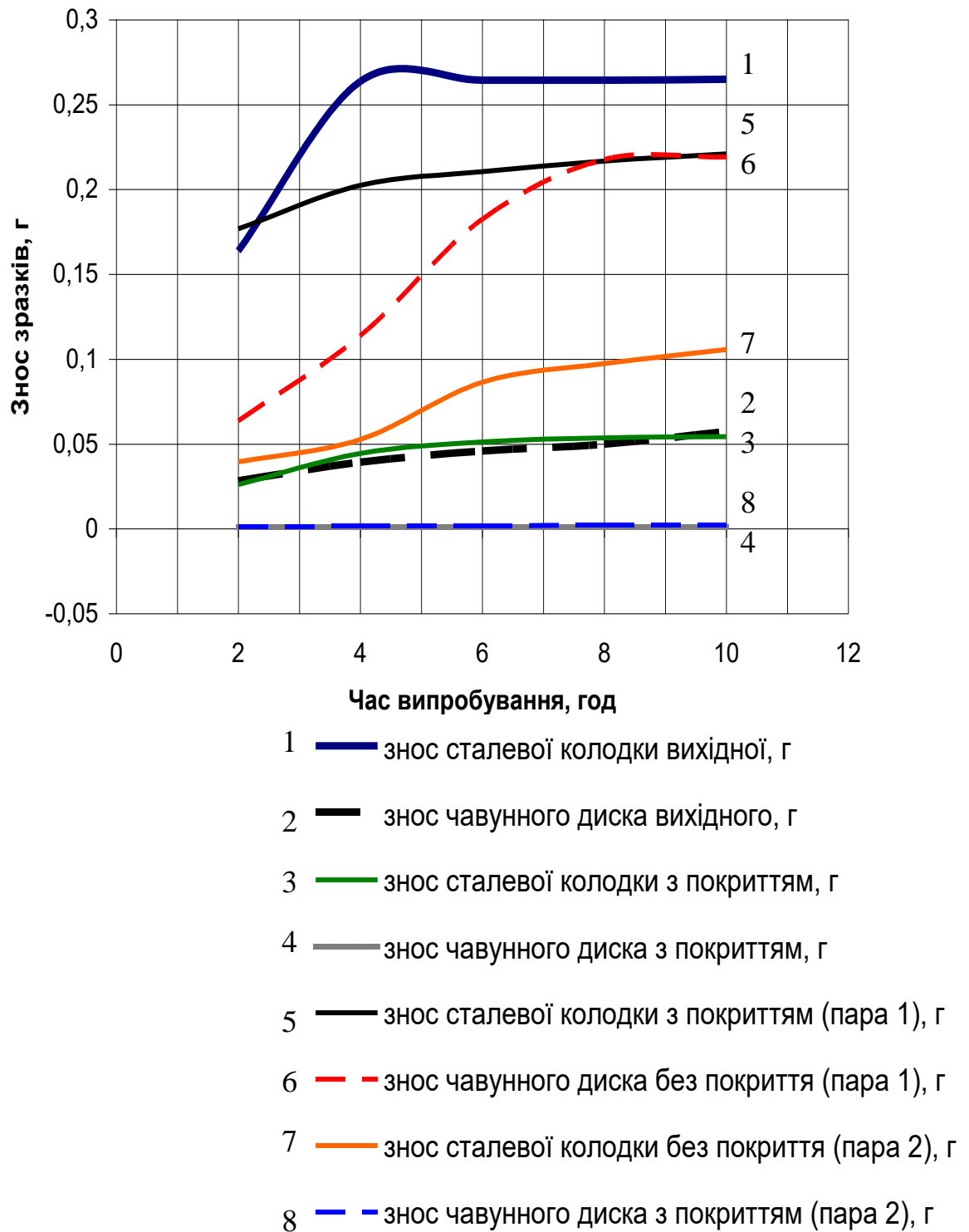


Рисунок 4.17 – Залежність зносу зразків від часу випробування при навантаженні 490 Н

У комбінованій парі тертя (пара 2), сталевий зразок без покриття (крива 7, рис. 4.17) дав менший знос у 2,5 рази порівняно з вихідним сталевим зразком (крива 1, рис. 4.17), також дав менший знос порівняно зі зносом

сталевого зразка з покриттям (крива 5, рис. 4.17) із комбінованої пари 1 у 2,1 рази. Але, знос цієї ж сталеві колодки без покриття (крива 7, рис. 4.17) збільшився у 1,9 рази порівняно із даними зносів сталеві колодки з покриттям (крива 3, рис. 4.17) з пари тертя, де обидва зразки з покриттям.

Результати зносів чавунного диска з покриттям (крива 8, рис. 4.17) із комбінованої пари 2, свідчать проте, що знос зразків порівняно із вихідними чавунними зразками (крива 2, рис. 4.17) зменшився у 23,4 рази, також дав менший знос порівняно із чавунним зразком, із комбінованої пари 1, у 89,4 рази. Як показали результати випробувань, знос чавунного зразка з покриттям (крива 8, рис. 4.17), збільшився у 3,3 рази порівняно зі зносом чавунного зразка з покриттям (крива 4, рис. 4.17) з пари тертя, де обидва зразки з покриттям.

При навантаженні 980 Н, сталеві зразки з покриттям (крива 3, рис. 4.18) дають зменшення зносу у 2,6 рази порівняно з вихідним сталевим зразком (крива 1, рис. 4.18), також зменшується знос порівняно зі сталеві колодкою з покриттям з комбінованої пари 1 (крива 5, рис. 4.18) у 1,7 рази, та порівняно зі сталеві колодкою без покриття з комбінованої пари 2 (крива 7, рис. 4.18) знос зменшується у 1,4 рази.

У комбінованій парі 1, знос сталеві колодки з покриттям (крива 5, рис. 4.18) у 1,5 рази зменшився порівняно з вихідним сталевим зразком (крива 1, рис. 4.18). Що стосується комбінованої пари 2, то знос сталеві зразка без покриття (крива 7, рис. 4.18) зменшився у 1,8 рази порівняно з вихідним сталевим зразком (крива 1, рис. 4.18). Порівнюючи між собою комбіновану пару 1 та 2, можна зробити висновок, що сталеві колодка без покриття (крива 7, рис. 3. 4.18) дала знос у 1,2 рази менший ніж сталеві колодка з покриттям (крива 5, рис. 4.18).

Порівнюючи результати випробування на знос чавуна з покриттям (крива 4, рис. 4.18) з результатами випробування на знос вихідних зразків чавуна (крива 2 рис. 4.18), можна зробити висновок, що знос чавуна з покриттям зменшився у 33,4 рази.

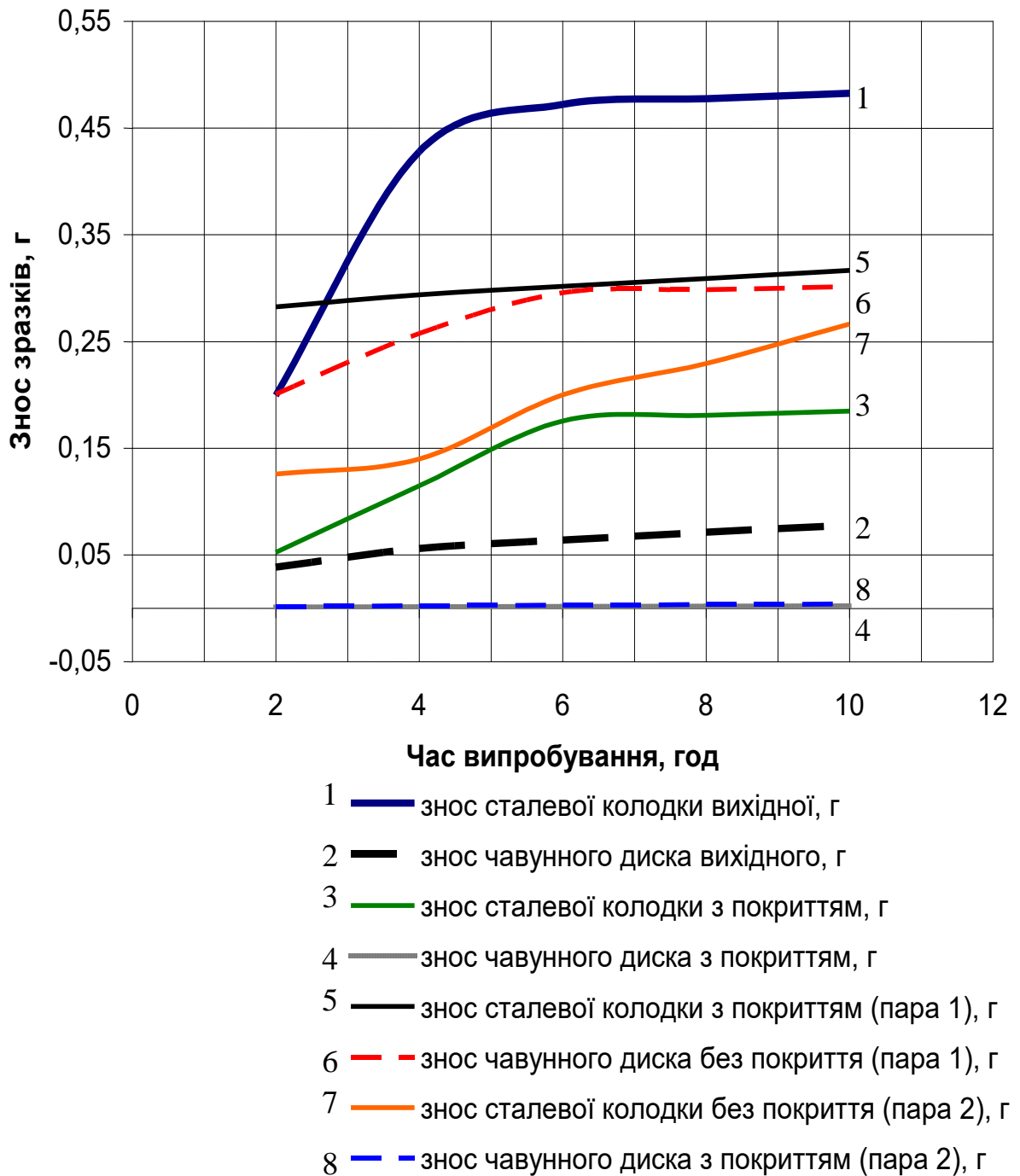


Рисунок 4.18 – Залежність зносу зразків від часу випробування при навантаженні 980 Н

Якщо порівнювати результати показників зносу чавуна з покриттям (крива 4, рис. 4.18) з результатами зносів чавунного диска без покриття з комбінованої пари 1 (крива 6, рис. 4.18), то видно, що показники зносу чавунного зразка з покриттям зменшуються у 133,9 рази. Знос чавунного зразка з покриттям (крива 4, рис. 4.18) зменшується у 1,7 рази порівняно із

зносом чавунного зразка з покриттям із комбінованої пари 2 (крива 8, рис. 4.18).

Чавунні зразки без покриття у комбінованій парі 1 (крива 6, рис. 4.18) дали знос у 3,9 рази більший ніж вихідні чавунні зразки (крива 2, рис. 4.18). У комбінованій парі 2, знос чавунних зразків з покриттям (крива 8, рис. 4.18) зменшився порівняно з вихідними зразками (крива 2, рис. 4.18) у 20, 1 рази. Порівнюючи між собою комбіновану пару 1 та 2, можна зробити висновок, що чавунний диск з покриттям (крива 8, рис. 4.18) дав знос у 78,2 рази менший ніж чавунний диск без покриття (крива 6, рис. 4.18).

Значення зносу сталеві колодки з покриттям при навантаженні 1961Н (крива 3, рис. 4.19) після випробування, зменшилися у 3,1 рази порівняно зі значеннями зносів вихідних сталевих зразків (крива 1, рис. 4.19), знос зменшився у 2,1 рази порівняно зі сталевим зразком з покриттям з комбінованої пари 1 (крива 5, рис. 4.19), а також зменшилися порівняно зі сталевими зразками без покриття із комбінованої пари 2 (крива 7, рис. 4.19) у 1,4 рази.

У комбінованій парі 1, знос сталевих зразків з покриттям (крива 5, рис. 4.19) становив у 1,5 рази менше, ніж у вихідних сталевих зразках (крива 1, рис. 4.19). Сталеві зразки без покриття із комбінованої пари 2 (крива 7, рис. 4.19) дали знос менший у 2,2 рази, порівняно з вихідними сталевими зразками (крива 1, рис. 4.19).

Знос чавунних зразків з покриттям (крива 4, рис. 4.19) зменшився у 7,7 рази порівняно з вихідними чавунними зразками (крива 2, рис. 4.19), зменшився у 12,4 рази, ніж знос чавунного диска без покриття із комбінованої пари 1 (крива 6, рис. 4.19). Але, чавунні зразки з покриттям (крива 4, рис. 4.19) дали більший знос у 4,6 рази, ніж чавунні зразки з покриттям із комбінованої пари 2 (крива 8, рис. 4.19).

У комбінованій парі 1, чавунні зразки без покриття (крива 6, рис. 4.19) дали знос більший ніж вихідні зразки (крива 2, рис. 4.19) у 1,6 рази. Знос чавунних зразків з покриттям у комбінованій парі 2 (крива 8, рис. 4.19)

становить менше у 35,1 рази, ніж у чавунного вихідного зразка (крива 2, рис. 4.19).

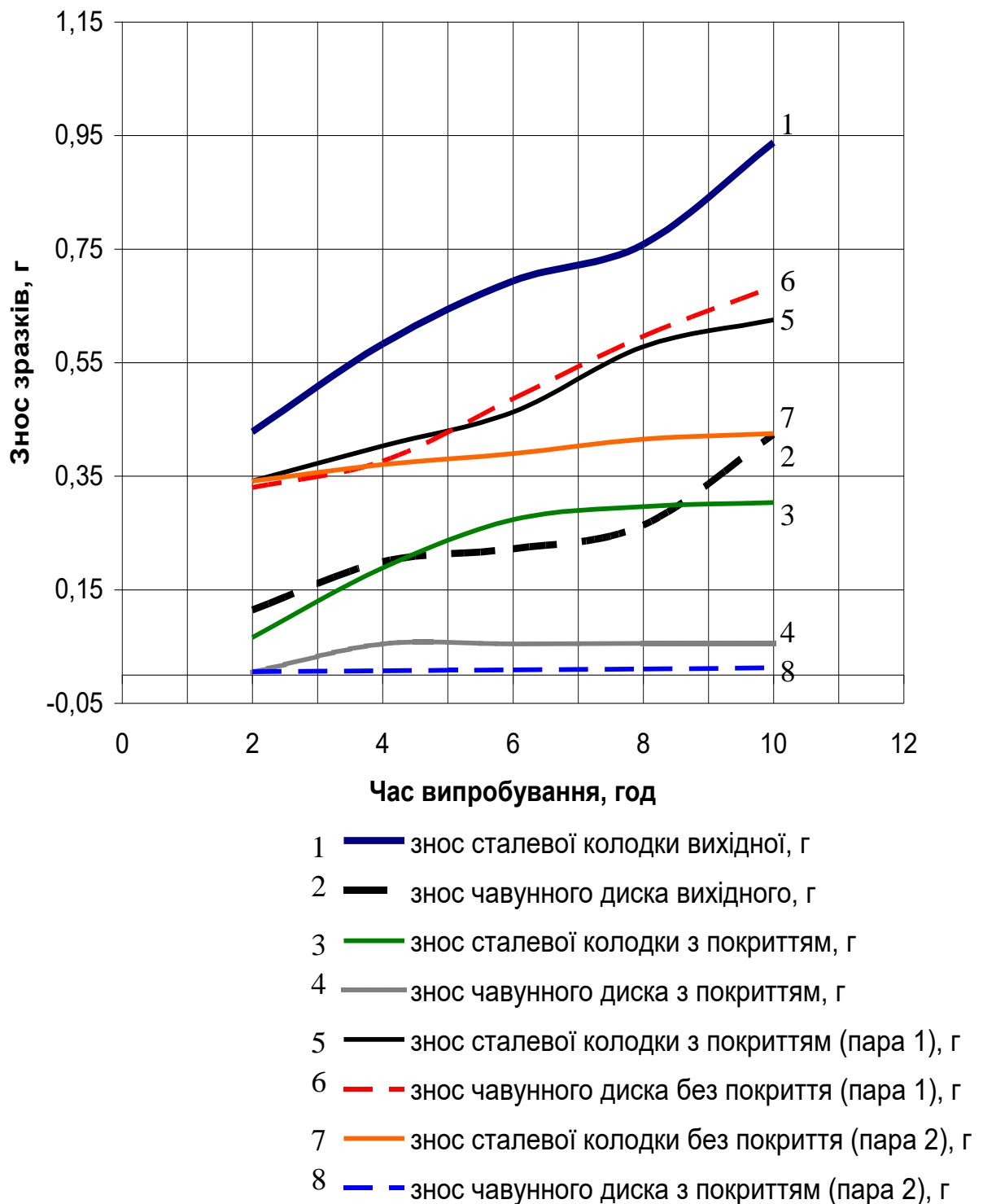
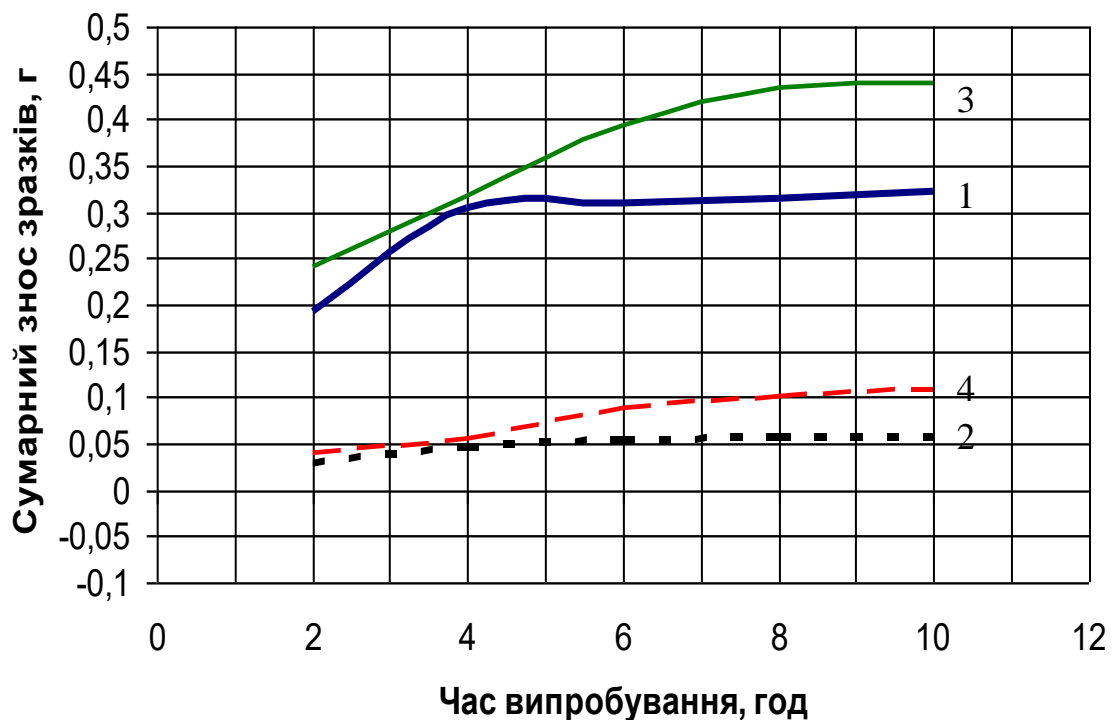


Рисунок 4.19 – Залежність зносу зразків від часу випробування при навантаженні 1961 Н

Аналіз кривих сумарного зносу зразків від часу випробування при навантаженні 490 Н показав, що сумарний знос зразків з покриттям (крива 2, рис. 4.20) найменший, тобто у 5,9 разів менший ніж сумарний знос зразків без покриття (крива 1, рис. 4.20), у 8 разів менший ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям-чавун без покриття” (крива 3, рис. 4.20), а також, у 1,96 рази менший порівняно із сумарним зносом пари тертя „сталь без покриття-чавун з покриттям” (крива 4, рис. 4.20).

Сумарний знос вихідних зразків (крива 1, рис. 4.20) менший у 1,4 рази ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям-чавун без покриття” (крива 3, рис. 4.20), а також, у 5,9 разів більший ніж сумарний знос пари тертя „сталь без покриття-чавун з покриттям” (крива 4, рис. 4.20).



- 1 — сумарний знос вихідних зразків
- 2 — сумарний знос зразків з покриттям
- 3 — сумарний знос пари тертя: сталь з покриттям-чавун без покриття
- 4 — сумарний знос пари тертя: сталь без покриття-чавун з покриттям

Рисунок 4.20 – Залежність сумарного зносу зразків від часу випробування при навантаженні 490 Н

Показники сумарного зносу зразків при навантаженні 980 Н показали, що сумарний знос зразків з покриттям (крива 2, рис. 4.21) менший у 3 рази ніж сумарний знос зразків без покриття (крива 1, рис. 4.21), у 3,3 рази менший ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям-чавун без покриття” (крива 3, рис. 4.21), а також, у 1,4 рази менший порівняно із сумарним зносом пари тертя „сталь без покриття-чавун з покриттям” (крива 4, рис. 4.21).

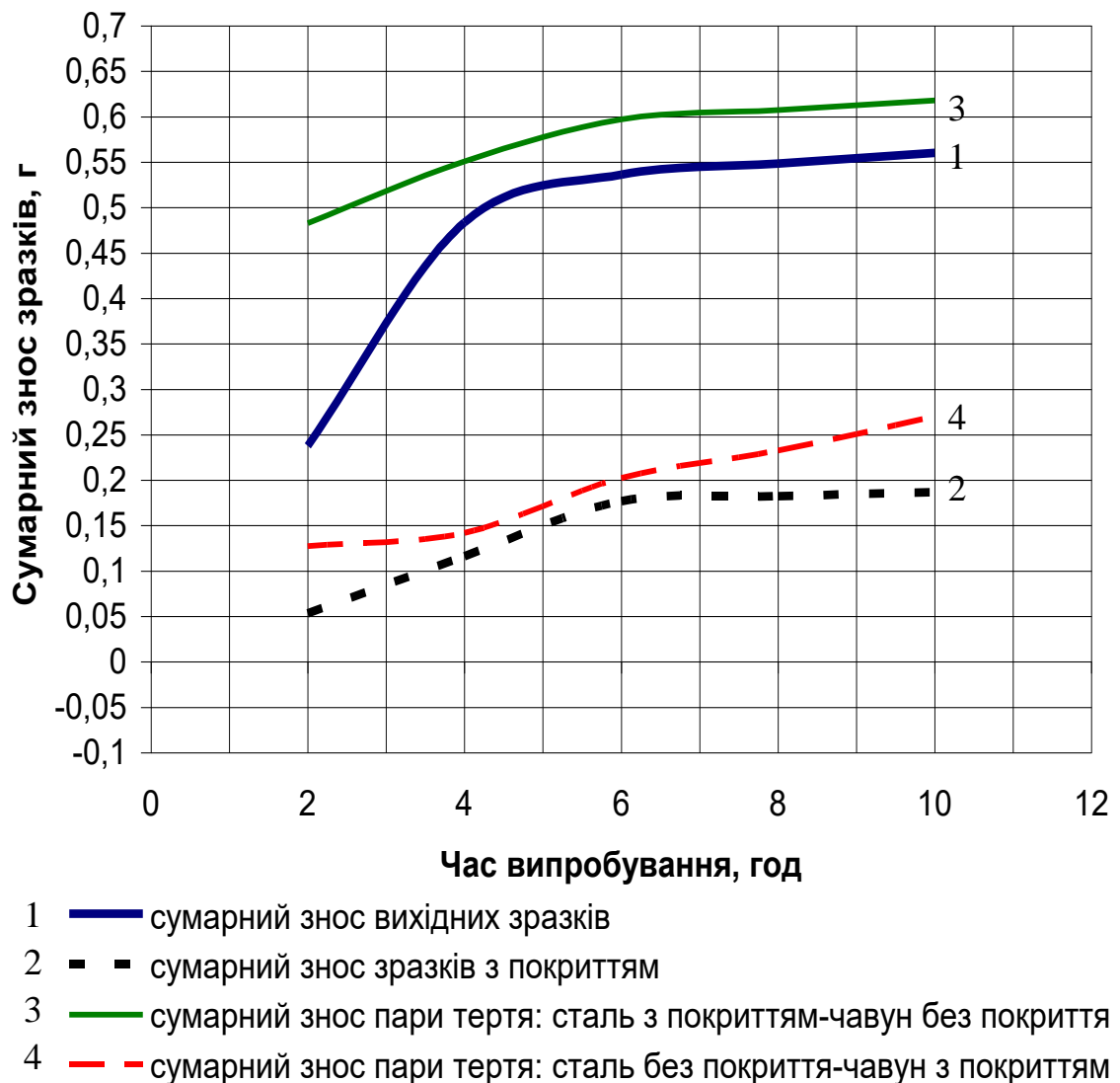
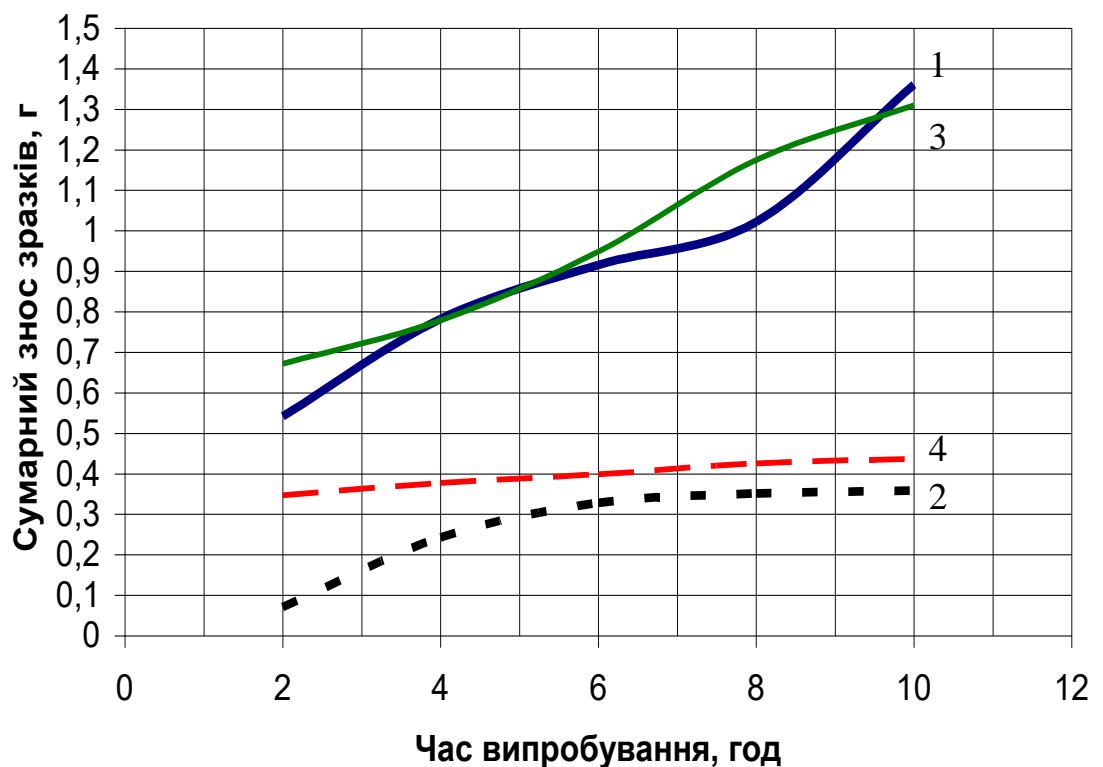


Рисунок 4.21 – Залежність сумарного зносу зразків від часу випробування при навантаженні 980 Н



Сумарний знос вихідних зразків (крива 1, рис. 4.21) менший у 1,1 рази ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям-чавун без покриття” (крива 3, рис. 4.21), а також, у 2 рази більший ніж сумарний знос пари тертя „сталь без покриття-чавун з покриттям” (крива 4, рис. 4.21).

Зразки з покриттям при навантаженні 1961 Н (крива 2, рис. 4.22) дали сумарний знос менший у 3,8 рази ніж сумарний знос вихідних зразків (крива 1, рис. 4.22), у 3,7 рази менший ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям-чавун без покриття” (крива 3, рис. 4.22), а також, у 1,2 рази менший порівняно із сумарним зносом пари тертя „сталь без покриття-чавун з покриттям” (крива 4, рис. 4.22).



- 1 — сумарний знос вихідних зразків
- 2 — сумарний знос зразків з покриттям
- 3 — сумарний знос пари тертя: сталь з покриттям-чавун без покриття
- 4 — сумарний знос пари тертя: сталь без покриття-чавун з покриттям

Рисунок 4.22 – Залежність сумарного зносу зразків від часу випробування при навантаженні 1961 Н

Сумарний знос вихідних зразків (крива 1, рис. 4.22) більший у 1,04 рази ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям-чавун без покриття” (крива 3, рис. 4.22), а також, у 3,1 рази більший ніж сумарний знос пари тертя „сталь без покриття-чавун з покриттям” (крива 4, рис. 4.22).

#### 4.2 Визначення впливу обробки сплавів у водних розчинах солей на знос пар тертя сталь-сталь

При роботі масляного шестеренного насосу відбувається контакт не тільки шестерні з корпусом насосу, але й шестерні з шестернею. Тобто працює пара тертя сталь 40Х по сталі 40Х. Для того, щоб визначити вплив запропонованої обробки на пару тертя ведуча шестерня - ведена шестерня виготовили зразки зі сталі 40Х, які за формою і розмірами відповідають схемі приведений на рис. 2.5. Сталеві зразки досліджувалися на триботехнічні властивості до нанесення покриття та після нанесення покриття на обидва зразки у діапазоні навантажень від 490Н до 1961Н на машині тертя МИ.

Після випробування при навантаженні 490 Н (рис. 4.23), вихідні зразки диск-сталь за 1,4 години дали знос 0,619 г, за такий же період вихідні зразки колодка-сталь зносилися на 1,025 г, що у 1,66 рази більше. Через 80 хвилин з початку випробування на поверхні тертя з'явилися риси, задири, вириви. Почався катастрофічний знос обох зразків, в результаті чого експеримент було припинено.

Аналізуючи криву 1 (рис. 4.23), знос сталевого диска без покриття відбувався за лінійним законом. Знос сталеві колодки без покриття (крива 2, рис. 4.23) спочатку швидко стабілізувався, але через годину почав стрімко збільшуватися.

На рисунку 4.24 наведена залежність зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь без покриття від часу випробування при навантаженні 980 Н.

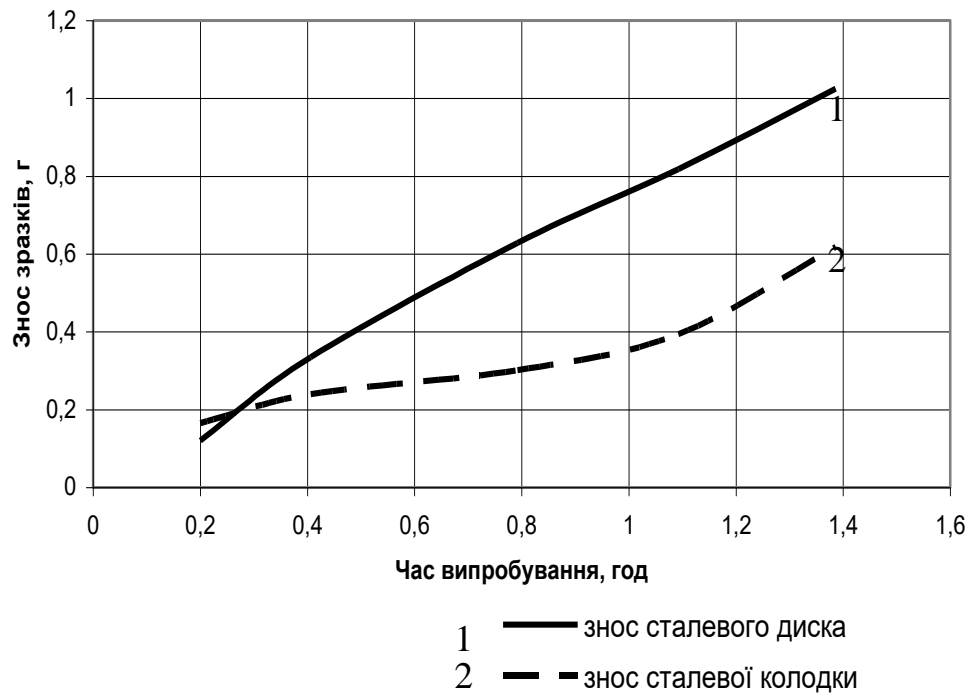


Рисунок 4.23 – Залежність зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь без покриття від часу випробування при навантаженні 490 Н

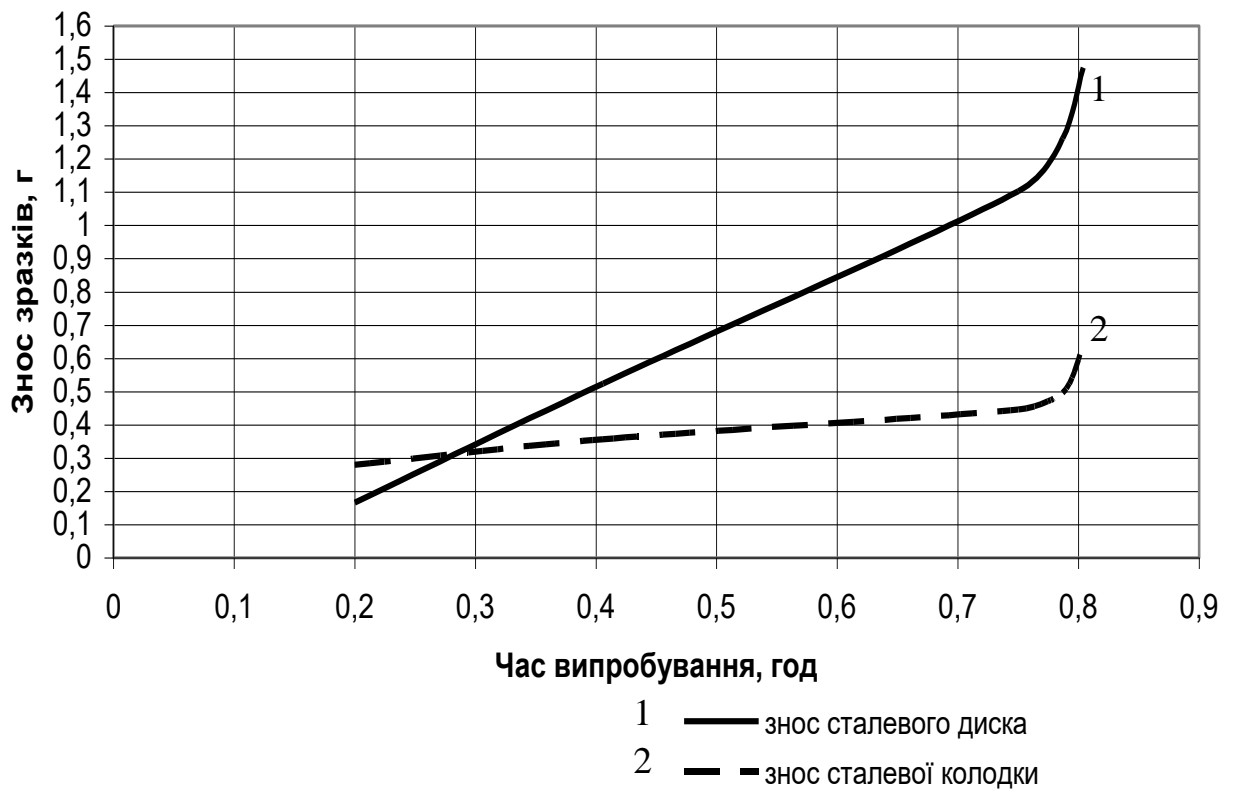


Рисунок 4.24 – Залежність зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь без покриття від часу випробування при навантаженні 980 Н

У вихідних зразків диск-сталь та колодка-сталь (рис. 4.24) при навантаженні 980 Н почався катастрофічний знос через 45 хвилин після початку експерименту. На поверхні зразків спостерігались задири, риски, відбулося підвищення шорсткості.

За період експерименту зразки дали такий знос: диск-сталь на 1,47 г, колодка-сталь на 0,63, що у 2,33 рази менше. Аналізуючи криві 1 та 2 (рис.4.24), можна зробити висновок, що криві зносу в обох випадках, мають прямо пропорційну залежність.

Тривалість експерименту при навантаженні на зразки 1961 Н (рис. 4.25) склала 0,2 години, після чого почався катастрофічний знос зразків. При візуальному огляді на поверхні вихідних зразків диск-сталь та колодка-сталь спостерігалося утворення глибоких рисок, задирів, виривів, підвищення шорсткості поверхні (рис. 4.25). За час експерименту зразки зносилися: диск-сталь на 1,025 г, колодка-сталь на 0,823 г, що у 1,25 рази менше.

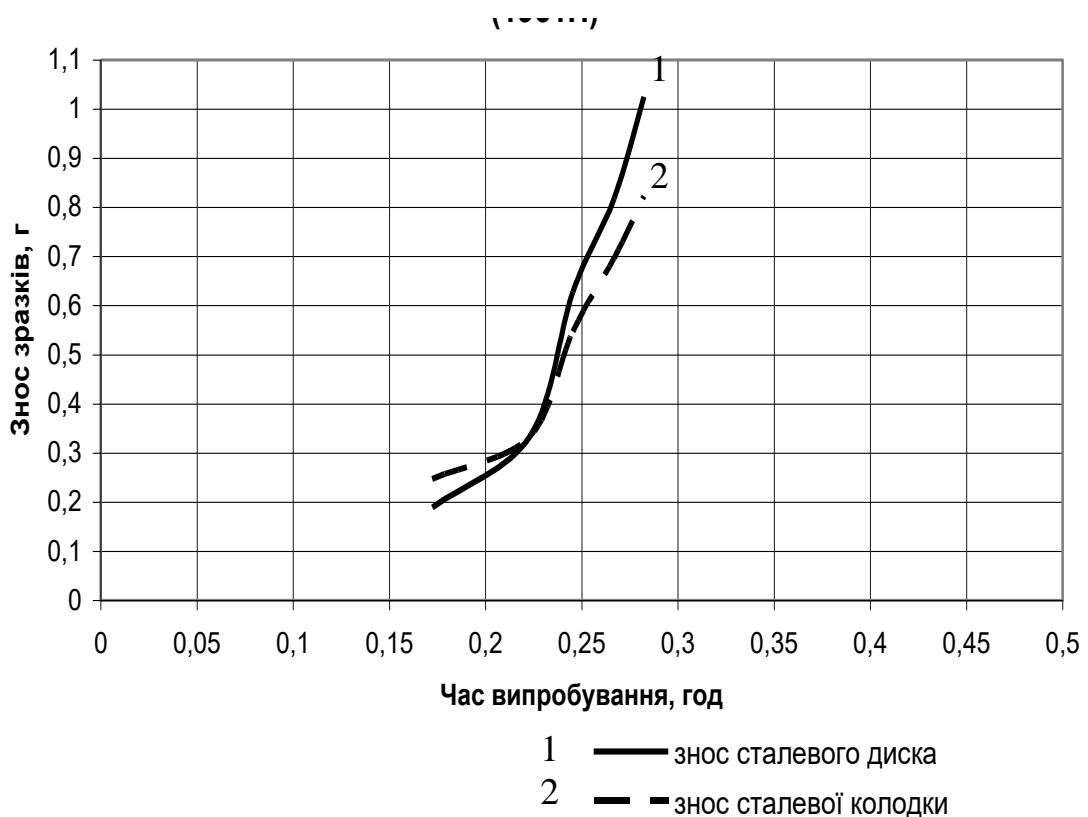


Рисунок 4.25 – Залежність зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь без покриття від часу випробування при навантаженні 1961 Н



Рисунок 4.26 – Поверхня тертя диск-сталь та колодка-сталь без покриття

Для дослідження впливу покриттів на знос, зразки диск-сталь та колодка-сталь були оброблені в парагазовому середовищі, яке складається із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання. Після чого проводилися випробування на машині тертя при навантаженні від 490Н до 1961Н.

Тривалість експерименту при навантаженні на зразки диск-сталь та колодка-сталь 490 Н склала 10 годин. При візуальному огляді поверхня тертя зразків диск-сталь та колодка-сталь з покриттям виглядала рівномірно припрацьованою, з металевим блиском, гладкою, без утворення рисок, задирів, виривів. За час експерименту зразки з покриттям зносилися: диск-сталь на 0,00215 г (рис. 4.27, крива 1), колодка-сталь на 0,1112 г (рис. 4.27, крива 2), що у 51,72 рази більше. Аналізуючи процес зносу зразків у часі по кривим (рис. 4.27) можна зробити висновок, що знос сталевого диска швидко стабілізувався і змінювався на протязі експерименту незначно. Вище сказане свідчить про швидке закінчення процесу припрацювання. Знос сталевій колодки з покриттям стабілізувався за дві години після початку експерименту, цей же час приймаємо як період процесу припрацювання.

Знос сталевих зразків з покриттям за десять годин експерименту при навантаженні 980Н (рис. 4.28) становив: диска-сталь (крива 1) 0,0052г за весь час експерименту, колодка-сталь (крива 2) 0,1185г, що у 22,79 рази більше порівняно з колодкою з цієї ж пари тертя.

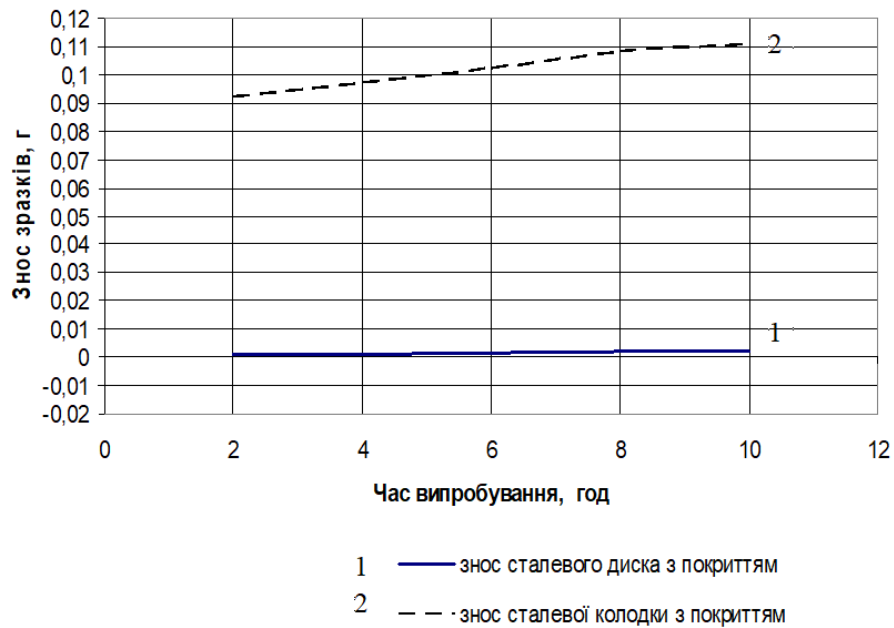


Рисунок 4.27 – Залежність зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь з покриттям від часу випробування при навантаженні 490 Н

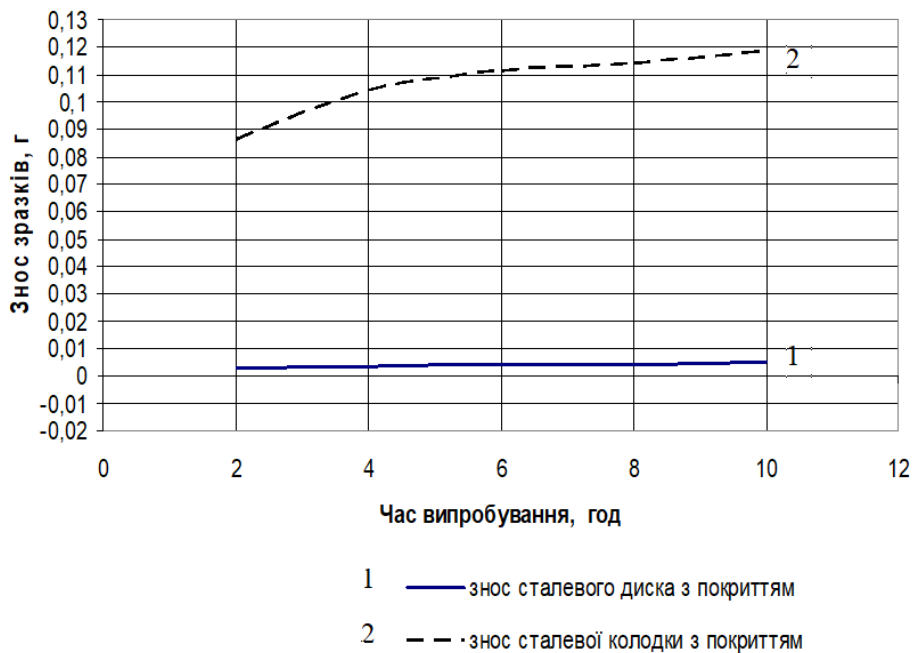


Рисунок 4.28 – Залежність зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь з покриттям від часу випробування при навантаженні 980 Н

Знос сталевго диска з покриттям (рис. 4.28, крива 1) при навантаженні 980Н швидко стабілізувався, що свідчить про перехід від процесу припрацювання до експлуатаційного процесу. Знос сталевї колодки з покриттям при навантаженні 980 Н (рис. 4.28, крива 2) відбувався більш

інтенсивно на протязі чотирьох годин. Цей період можна виділити як період припрацювання, після чого знос стабілізувався і проходив досить повільно.

Аналіз залежності зносу сталевих зразків з покриттям при навантаженні 1961Н показав, що знос зразків диск-сталь з покриттям (рис.4.29, крива 1) становить за 10 годин експерименту 0,098г.

Зразки колодка-сталь з покриттям (рис. 4.29, крива 2) за весь час експерименту дали знос 0,38355г, що у 3,91 рази більше ніж диск-сталь з цієї ж пари тертя.

Знос зразка диск-сталь (рис. 4.29) швидко стабілізувався і за весь час експерименту мав не значну зміну. Знос зразка колодка-сталь з покриттям мав лінійну залежність, виявити період припрацювання в такому випадку важко.

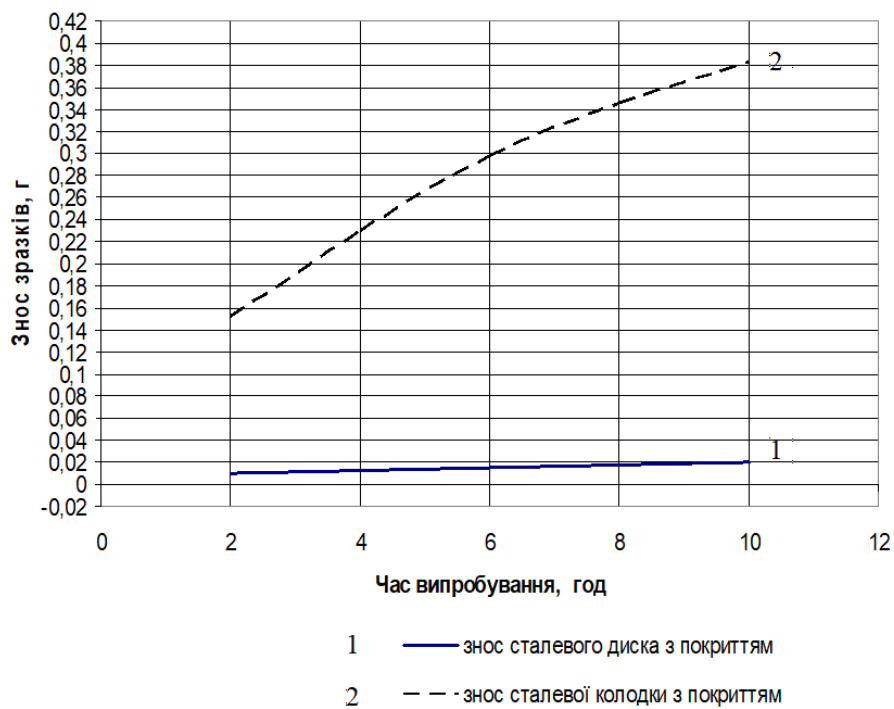


Рисунок 4.29 – Залежність зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь з покриттям від часу випробування при навантаженні 1961 Н

На рисунку 4.31 на загальному графіку наведено залежності зносу вихідних сталевих зразків та сталевих зразків з покриттям при навантаженні 490Н.



Рисунок 4.30 – Поверхня тертя зразків диск-сталь та колодка-сталь з покриттям

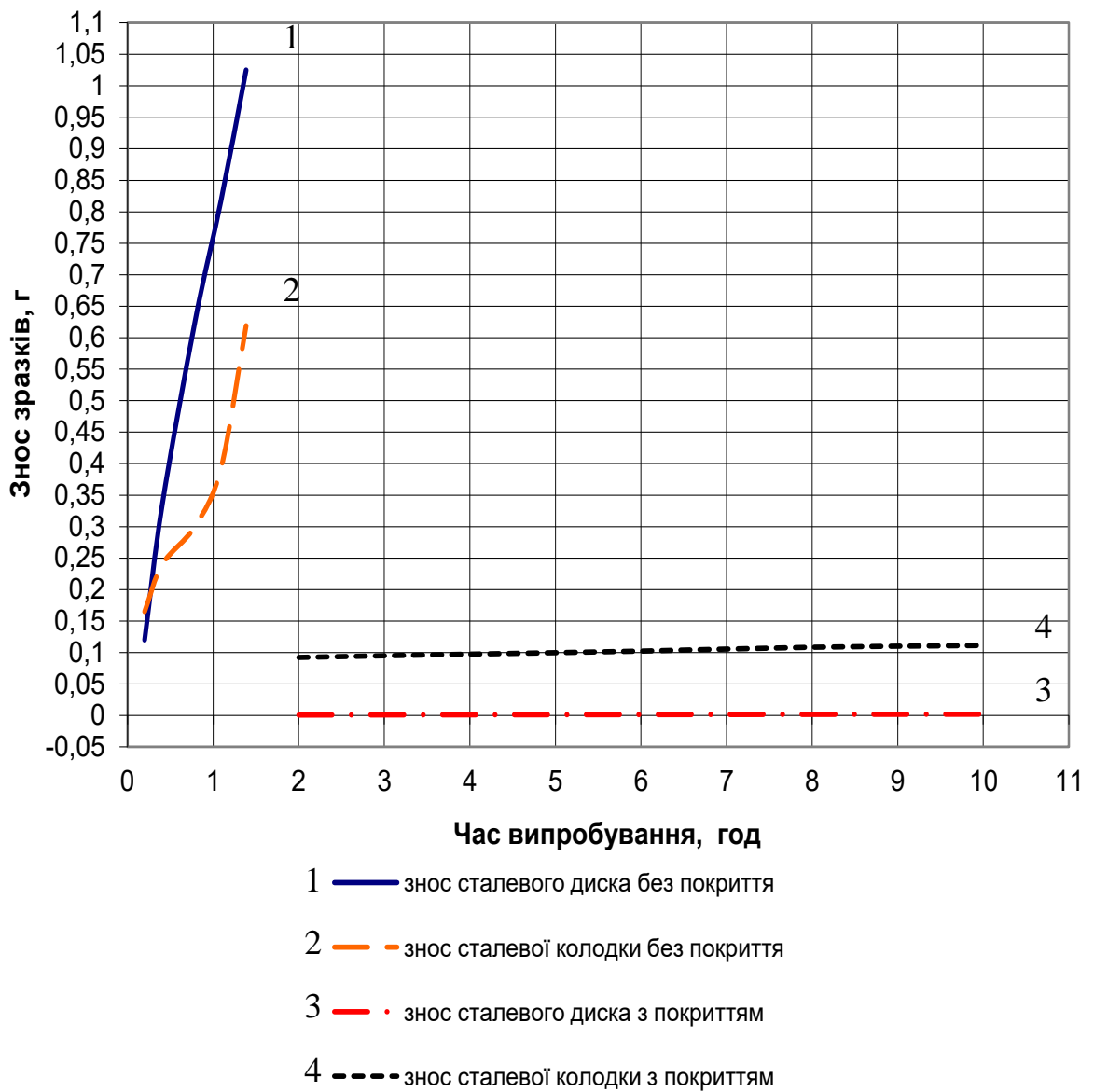


Рисунок 4.31 – Залежність зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь від часу випробування при навантаженні 490 Н



Порівнюючи залежності можна зробити висновок, що при навантаженні 490Н знос сталевих зразків без покриття (рис. 4.31, криві 1, 2) відбуваються стрімко вже з першої хвилини випробування, а натомість знос сталевих зразків з покриттям (рис. 4.31, криві 3, 4) триває рівномірно, майже не змінюється на протязі всього експерименту.

При збільшенні навантаження до 980Н сталеві зразки без покриття (рис.4.32, крива 1, 2) витримують ще менший час до утворення задирів і початку катастрофічного зносу, який починається через 0,8 год. Порівняно зі зразками без покриття сталеві зразки з покриттям (рис. 4.32, крива 3, 4) рівномірно зношуються на протязі 10 годин експерименту.

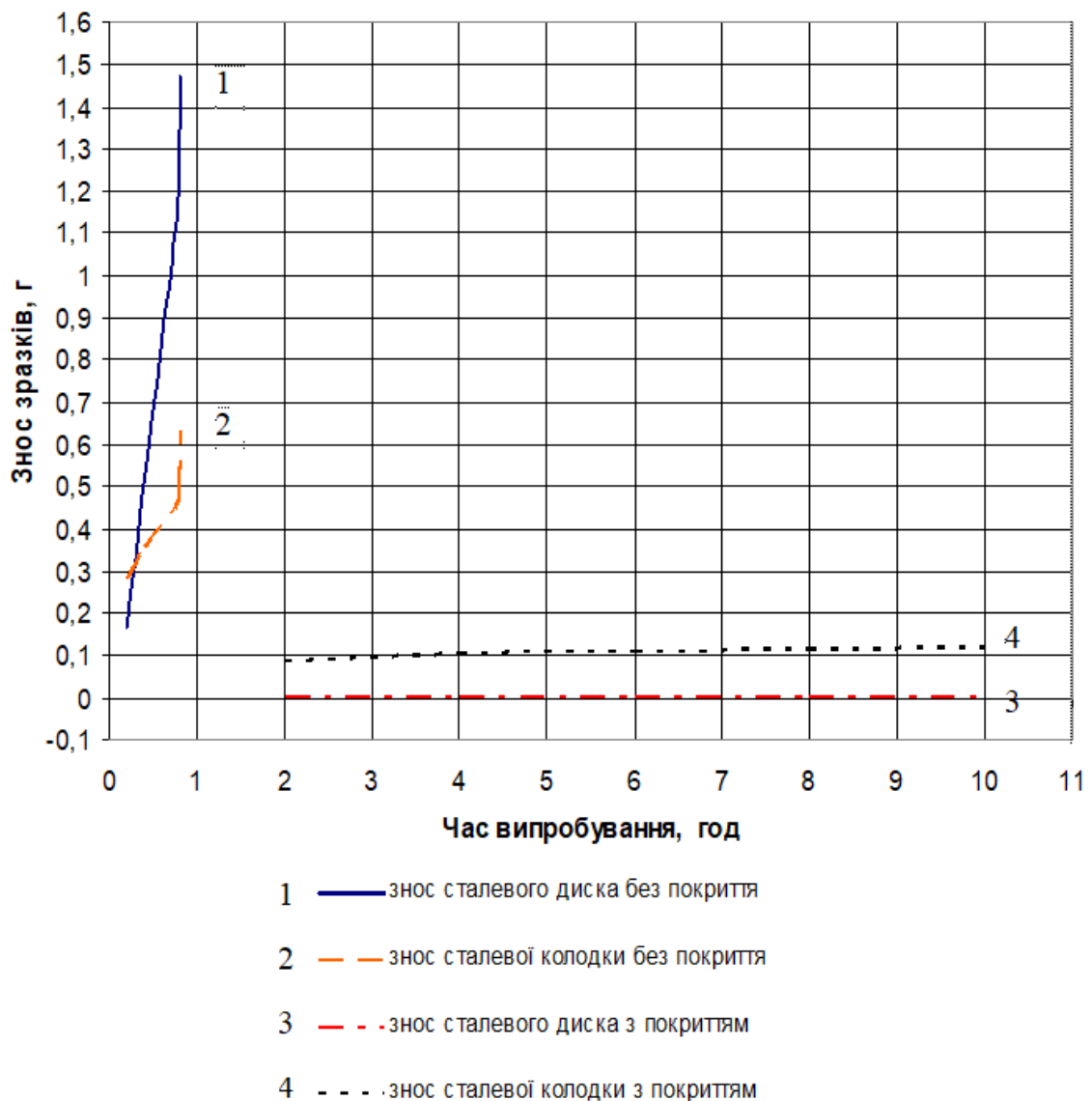


Рисунок 4.32 – Залежність зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь від часу випробування при навантаженні 980 Н

При збільшенні навантаження до 1961Н катастрофічний знос зразків без покриття (рис. 4.33, крива 1, 2) починається вже з першої хвилини експерименту, спостерігаються утворення задирів та схвачувань на поверхні тертя через 0,28 годин з початку експерименту. Зразки з покриттям (рис. 4.33, крива 3, 4) при збільшенні навантаження дають збільшення зносу, але працюють всі 10 годин експерименту без утворення рисок та задирів на поверхнях тертя.

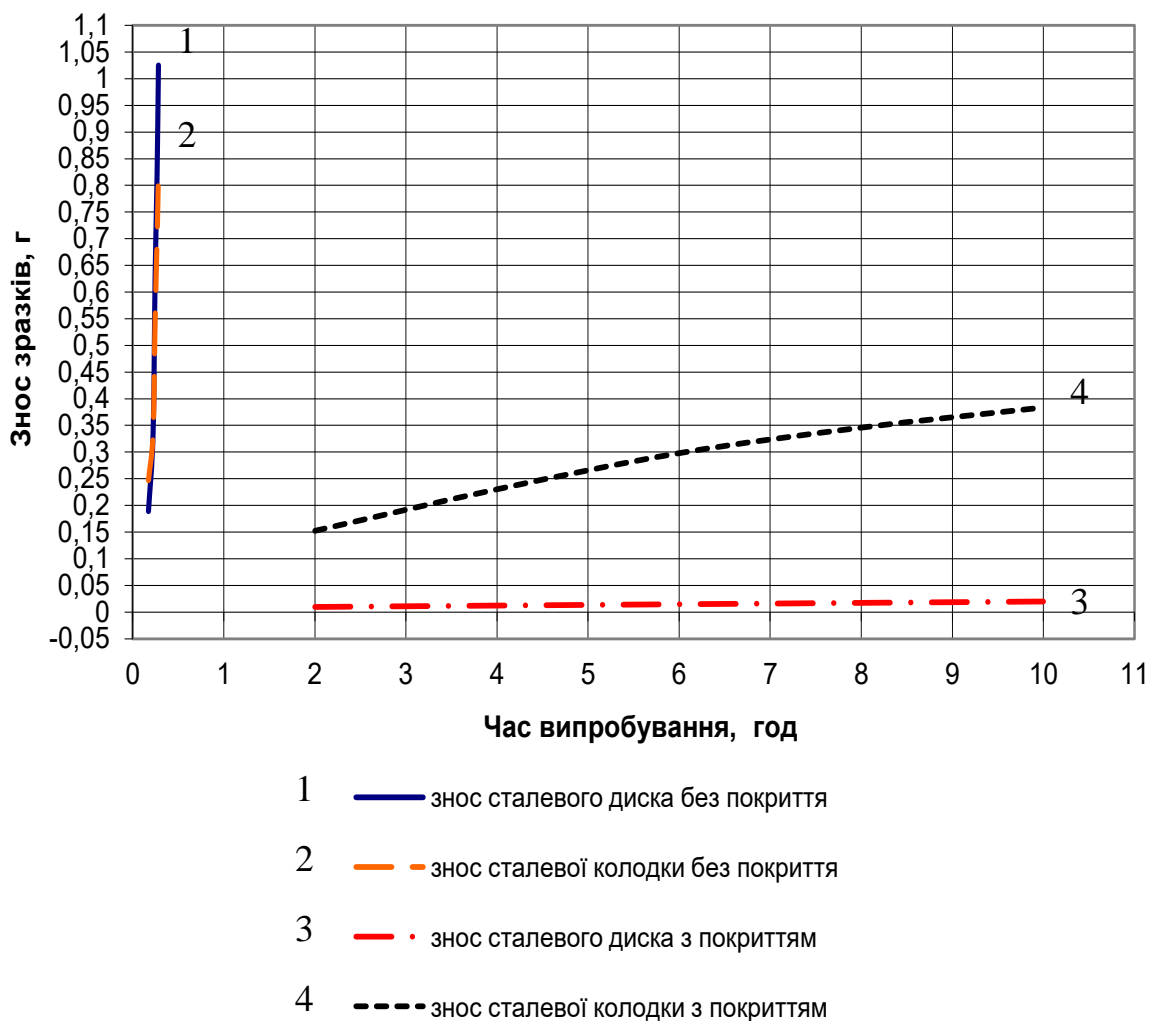


Рисунок 4.33 – Залежність зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь від часу випробування при навантаженні 1961 Н

За проведеним аналізом залежностей сумарних зносів сталевих зразків без покриття та з покриттям (рис. 4.34) можна зробити висновок, що найменший знос дають зразки з покриттям при навантаженні 490Н.

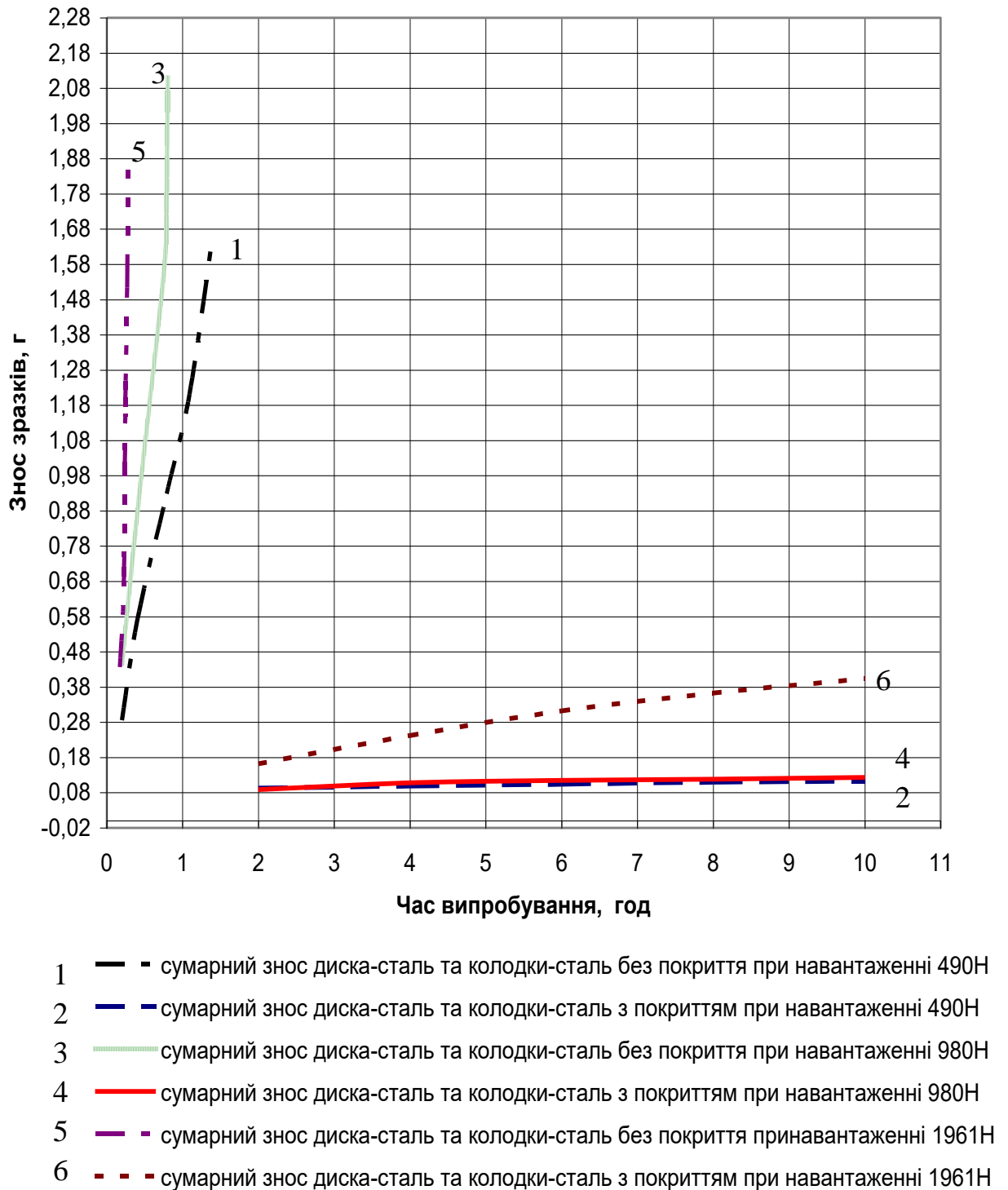


Рисунок 4.34 – Залежність сумарного зносу зразків диск-сталь та колодка-сталь від часу випробування при навантаженні від 490 Н до 1961Н

Але зі збільшенням навантаження зразки з покриттям дають менший знос ніж зразки без покриття при найменшому навантаженні. Якщо порівнювати тривалість роботи зразків з покриттям та без покриття, можна

зробити висновок, що зразки з покриттям (рис. 4.34, крива 2, 4, 6) мають тривалість роботи без задирів схвачувань майже в 10 разів більше ніж зразки без покриття (рис. 4.34, крива 1, 3, 5)

4.3 Аналіз впливу одержаних покриттів на утворення задирів на робочих поверхнях пар тертя

За характеристику задиростійкості приймали максимальне навантаження на пару тертя, при якому відбувалося утворення задирів на робочих поверхнях зразків. Випробування проводилися на зразках із сталі 40X та сірого чавуна на машині тертя МІ-1 при навантаженнях від 490 Н до 1961Н при постійному часі випробування.

На рисунку 4.35 представлено залежність зносу вихідних зразків від навантаження при постійному часі випробування. Залежність зносу сталеві колодки без покриття прямо пропорційна підвищенню навантаження на зразки. Знос чавунного диска при початкових навантаженнях мав незначне підвищення, але зі збільшенням навантаження на зразки почав стрімко зростати. При максимальному навантаженні 1961 Н сталеві зразки без покриття (рис. 4.35, крива 1) зносилися у 2,22 рази більше ніж чавунні зразки без покриття (рис. 4.35, крива 2).

Знос сталеві колодки з покриттям (рис. 4.36, крива 1) при початкових навантаженнях стрімко збільшувався, при збільшенні навантаження знос зростав більш рівномірно. Залежність зносу чавунного диска з покриттям (рис. 4.36, крива 2) при початкових навантаженнях суттєво не змінювалася, але при підвищенні навантаження на зразки знос почав зростати.

При максимальному навантаженні 1961 Н сталеві зразки з покриттям дали знос у 5,49 разів більше ніж чавунні зразки з покриттям (рис. 4.36).

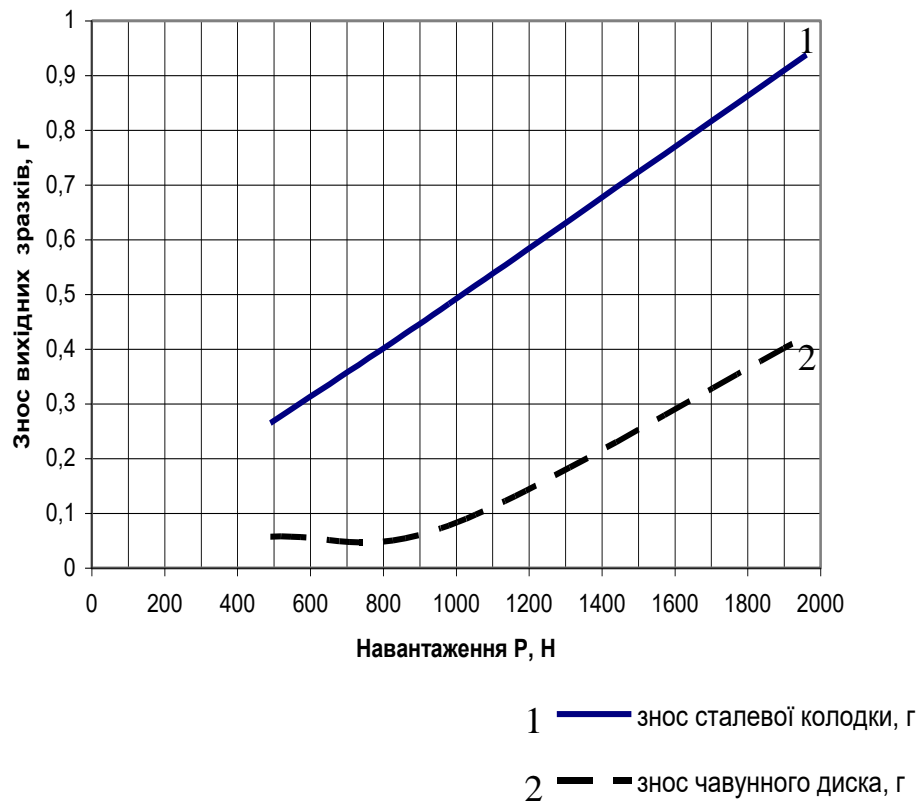


Рисунок 4.35 – Залежність зносу зразків вихідних від навантаження при постійному часі випробування

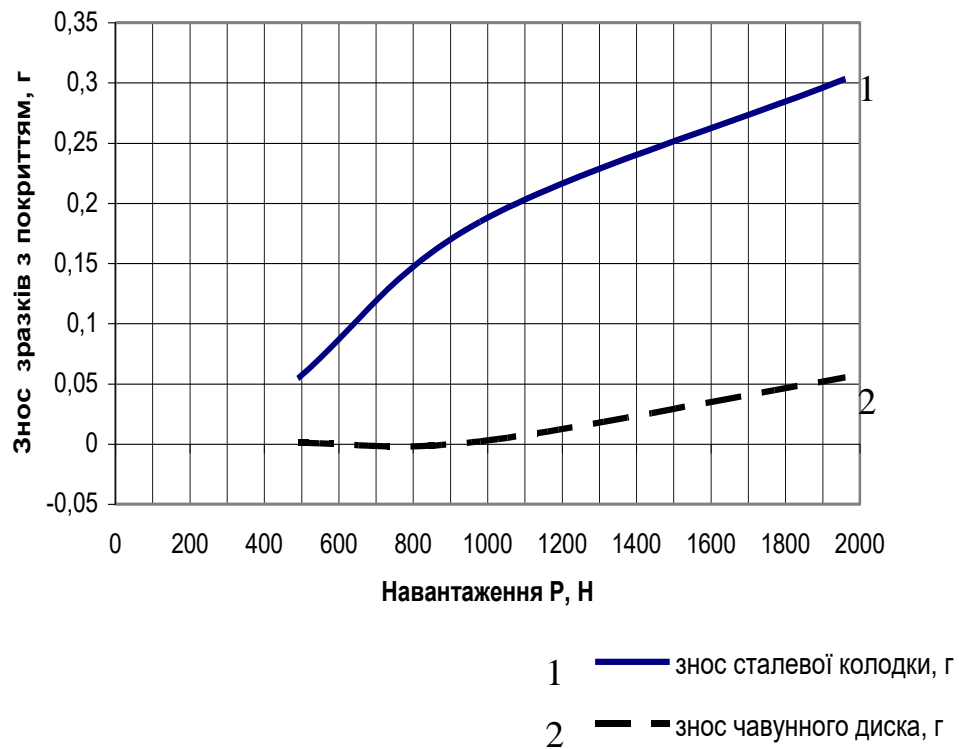


Рисунок 4.36 – Залежність зносу зразків з покриттям від навантаження при постійному часі випробування

Знос зразків колодка-сталь з покриттям та диск чавун без покриття (рис.4.37) відбувався майже пропорційно зростанню навантаження на зразки.

Зразки колодка-сталь (рис. 4.37, крива 1) з покриттям дали знос у 1,09 рази менший при максимальному навантаженні ніж диск-чавун без покриття (рис. 4.37, крива 2).

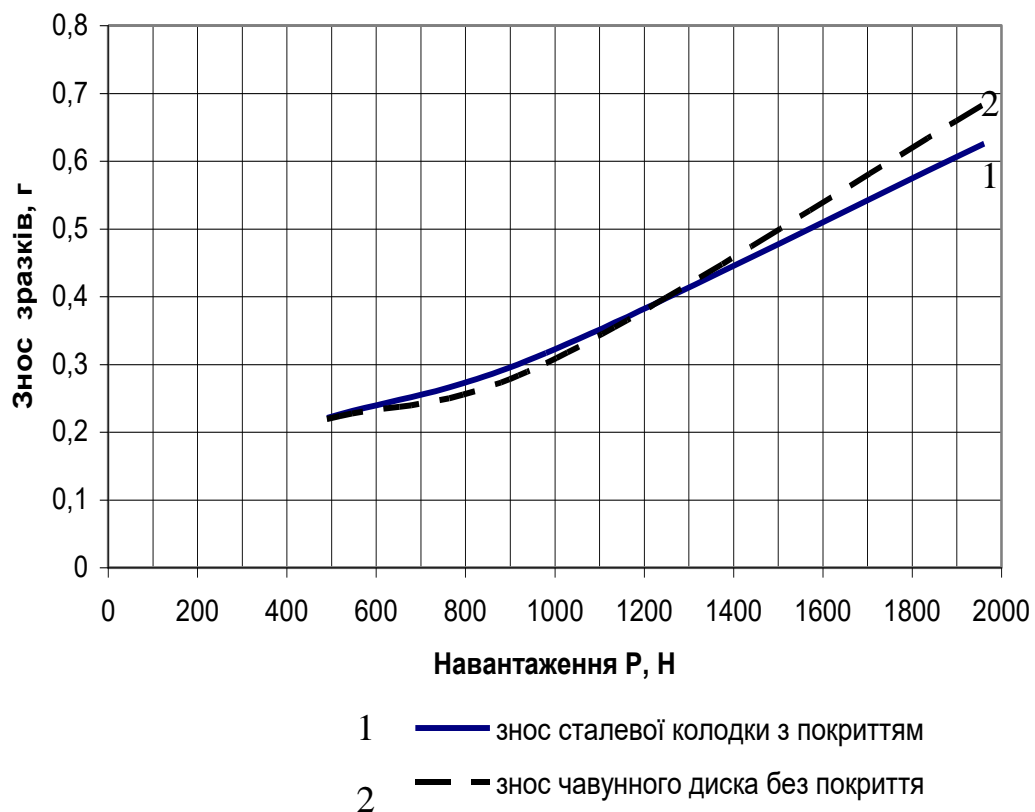


Рисунок 4.37 – Залежність зносу зразків колодка-сталь з покриттям, диск-чавун без покриття від навантаження при постійному часі випробування

При випробуванні на знос пари тертя колодка-сталь без покриття та диск-чавун з покриттям залежність зносу сталевих зразків без покриття мала пропорційний характер і збільшувалася при збільшенні навантаження на зразки (рис. 4.38, крива 1). Залежність зносу чавунних зразків з покриттям змінювалася при збільшенні навантаження незначно (рис. 4.38, крива 2). Зразки колодка-сталь без покриття дали знос у 35,27 рази більший при максимальному навантаженні ніж диск-чавун з покриттям.

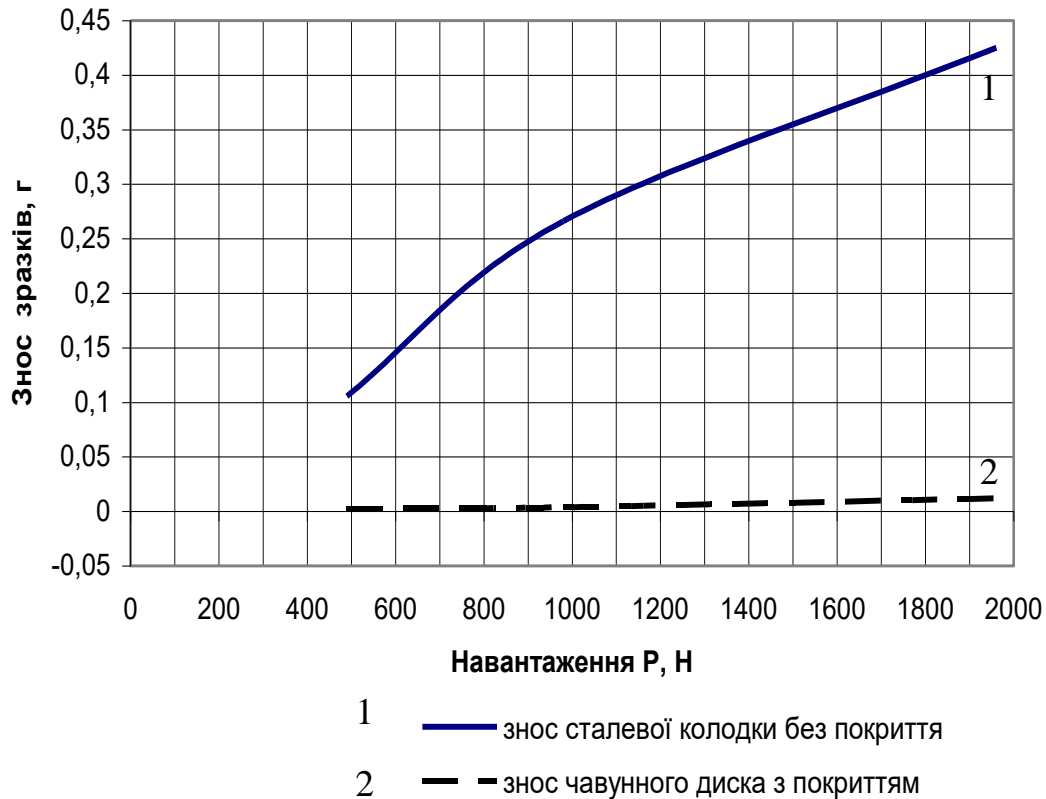


Рисунок 4.38 – Залежність зносу зразків колодка-сталь без покриття, диск-чавун з покриттям від навантаження при постійному часі випробування

Порівнюючи зноси сталевих зразків з різних пар тертя, можна зробити висновок, що найменший знос при найбільшому навантаженні 1961Н дали зразки колодка-сталь з покриттям (рис. 4.39, крива 3) в парі тертя зі зразком диск-чавун з покриттям, найбільший знос при найбільшому навантаженні 1961Н дали сталеві зразки без покриття (рис. 4.39, крива 1) в парі тертя зі зразком диск-чавун без покриття.

Аналізуючи зноси чавунних зразків з різних пар тертя, можна дійти висновку, що найменший знос при найбільшому навантаженні 1961Н дали зразки диск-чавун з покриттям (рис. 4.39, крива 8) в парі тертя із зразком колодка-сталь без покриття. Найбільший знос при найбільшому навантаженні дали зразки диск-чавун без покриття (рис. 4.39, крива 6) в парі тертя із зразком колодка-сталь з покриттям.

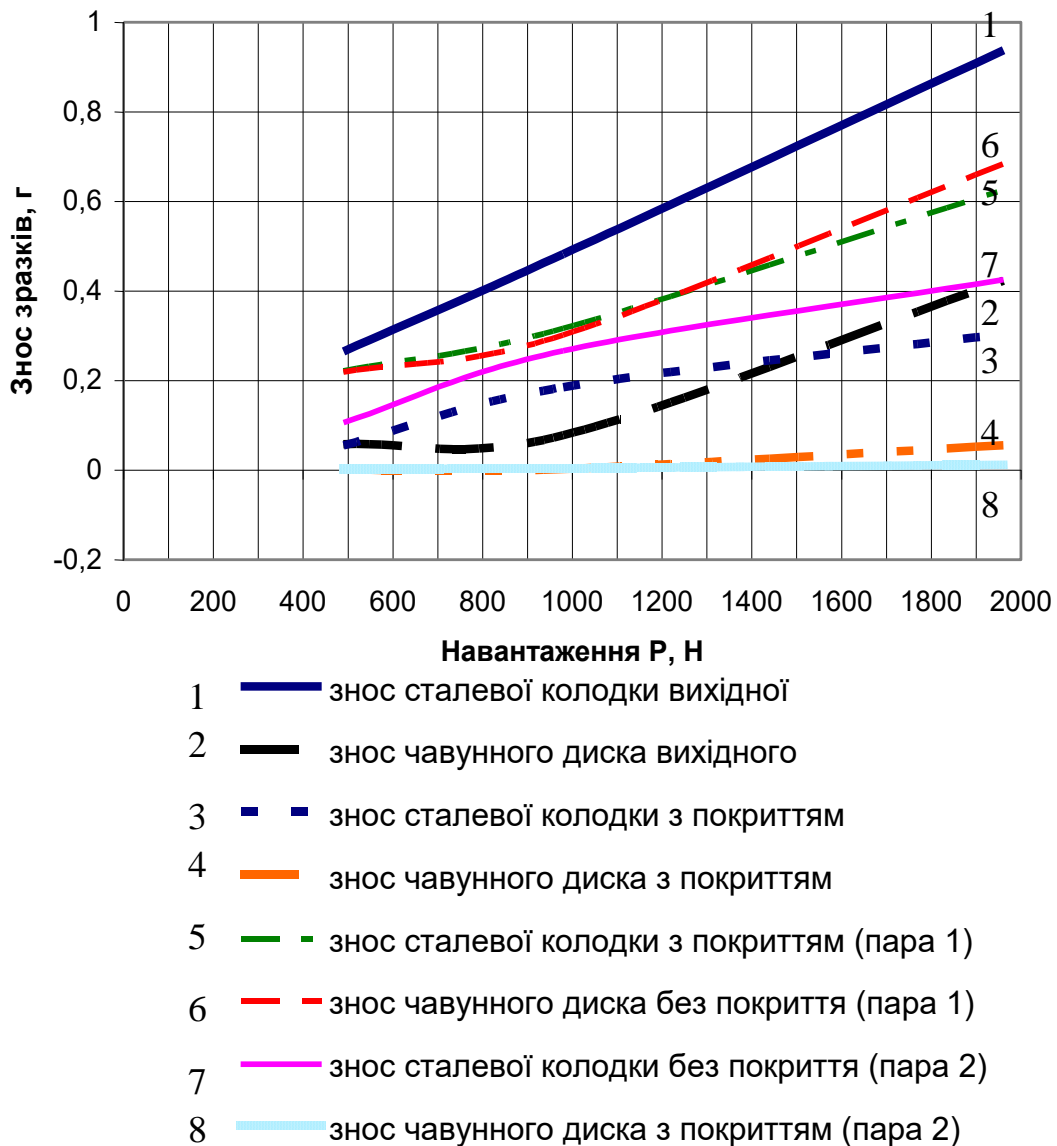


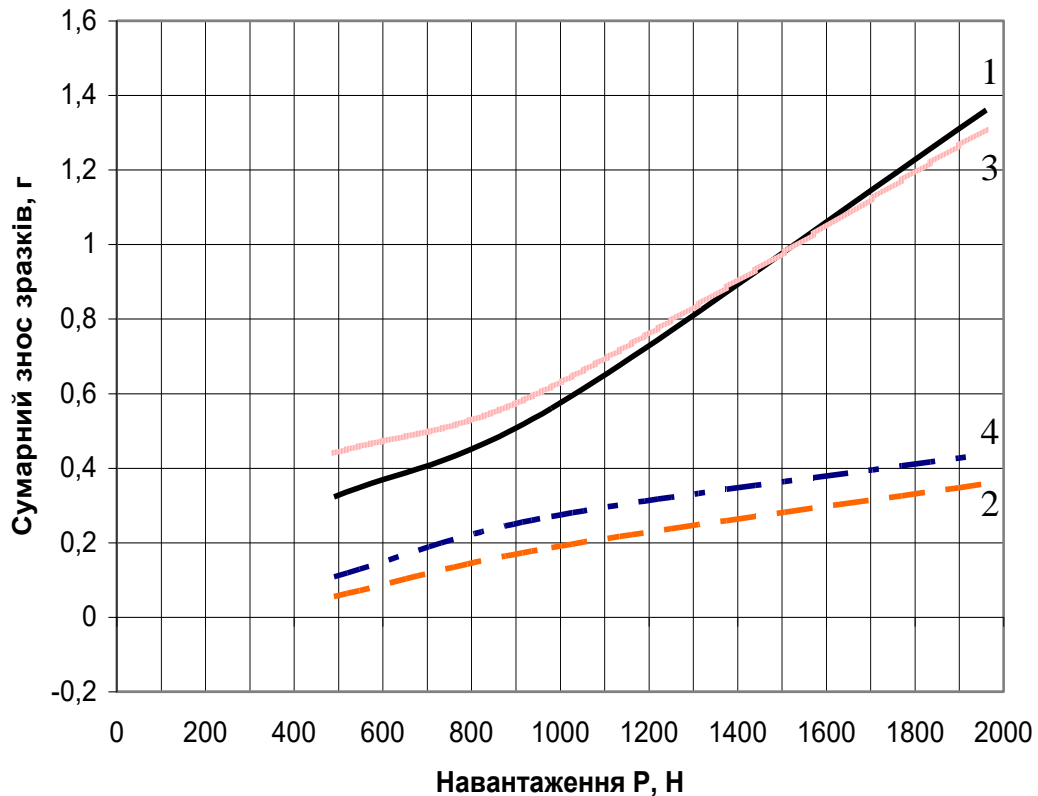
Рисунок 4.39 – Залежність зносу зразків від навантаження при постійному часі випробування

Порівнюючи сумарні зноси різних пар тертя (рис. 4.40) можна зробити висновок, що найбільший сумарний знос при навантаженні 1961Н дали зразки без покриття (рис. 4.40, крива 1). Найменший сумарний знос при навантаженні 1961Н дали зразки з покриттям (рис. 4.40, крива 2).

Сумарний знос зразків з покриттям (рис. 4.40, крива 2) при максимальному навантаженні у 1,2 рази менший ніж сумарний знос зразків сталь без покриття чавун з покриттям (рис. 4.40, крива 4), у 3,65 рази менший ніж сумарний знос зразків сталь з покриттям чавун без покриття (рис. 4.40,



крива 3), а також у 3,8 рази менший ніж сумарний знос зразків без покриття (рис. 4.40, крива 1).



- 1 — Сумарний знос вихідних зразків
- 2 — Сумарний знос зразків з покриттям
- 3 — Сумарний знос зразків сталь з покриттям, чавун без покриття
- 4 — Сумарний знос зразків сталь без покриття, чавун з покриттям

Рисунок 4.40 – Залежність сумарного зносу зразків від навантаження при постійному часі випробування

Сумарний знос зразків сталь без покриття чавун з покриттям (рис. 4.40, крива 4) відносно навантаження у 3 рази менший ніж сумарний знос зразків сталь з покриттям і чавун без покриття (рис. 4.40, крива 3), а також у 3,11 рази менший ніж сумарний знос зразків без покриття (рис. 4.40, крива 1).

#### 4.4 Визначення коефіцієнту тертя

За одержаними, в ході проведення дослідів на знос, даними значення моменту тертя за формулою (2.1) виконані підрахунки коефіцієнту тертя, що дало змогу побудувати графіки залежності коефіцієнту тертя від часу випробування при навантаженні 490 Н наведені на рисунку 4.41.

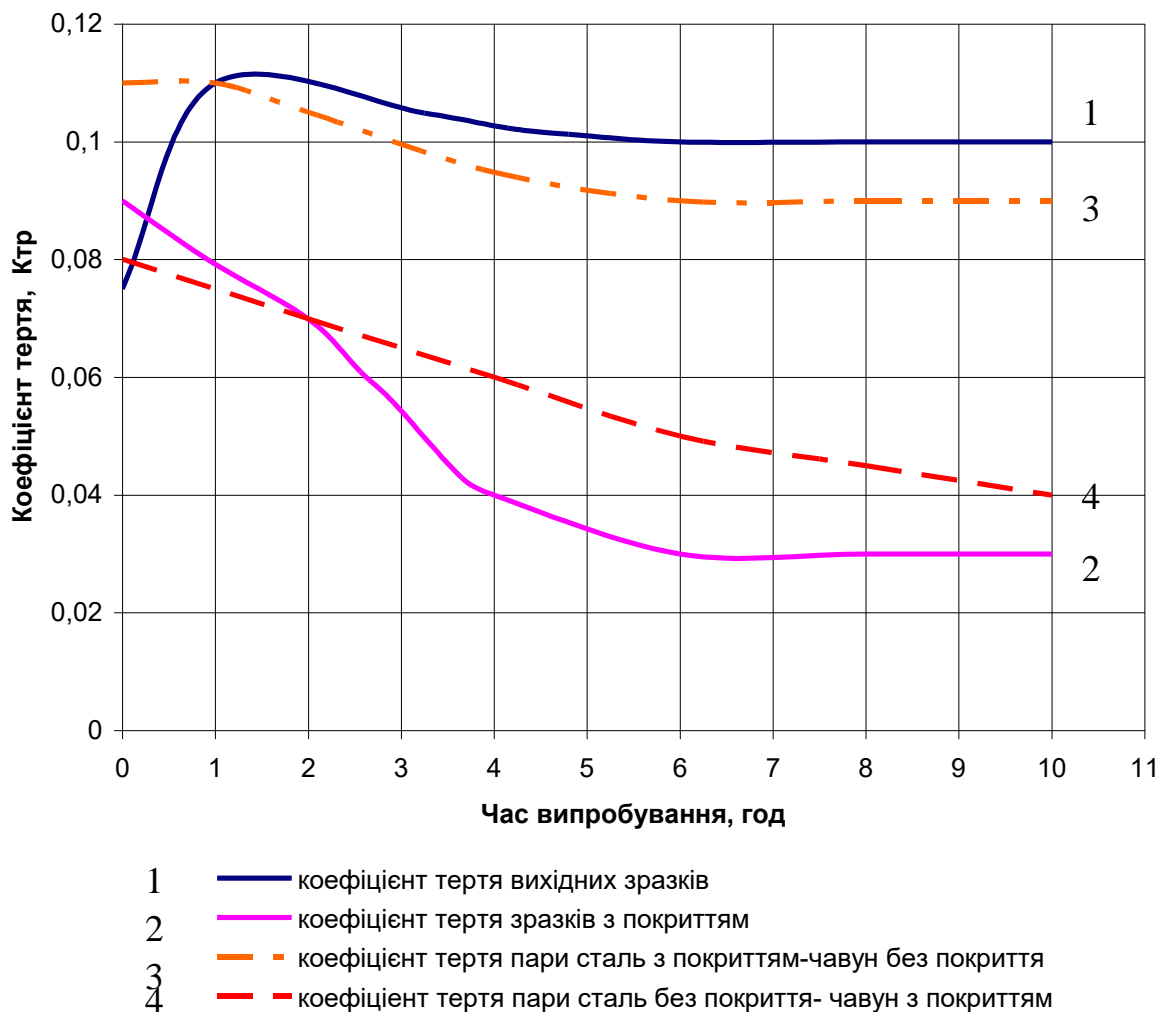


Рисунок 4.41 – Залежність коефіцієнту тертя від часу випробування при навантаженні 490Н

Аналізуючи значення кривої 1 для необроблених вихідних зразків пари диск-чавун та колодка-сталь при терті зі змащувальним матеріалом і навантаженні 490Н коефіцієнт тертя на початку експерименту стрімко

зростав та становив 0,11, але вже після першої години випробування поступово вирівнявся і стабілізувався, був рівним 0,1.

Коефіцієнт тертя для зразків з покриттям (крива 2, рис. 4.41) стрімко знижувався на протязі перших п'яти годин випробування, а потім стабілізувався і не змінювався до закінчення випробування, дорівнюючи 0,03, що у 3,33 рази менше ніж у зразків без покриття (крива 1, рис. 4.41).

Крива 3 (рис. 4.41) ілюструє, як змінювався коефіцієнт тертя для зразків диск-чавун без покриття та колодка-сталь з покриттям. Спочатку показники коефіцієнта поступово знижувалися, потім після шостої години випробування стабілізувалися і до кінця експерименту дорівнювали 0,09, що у 1,11 рази нижче ніж у зразків без покриття, але у 3 рази вище ніж у пари тертя з покриттям на обох зразках.

Показники коефіцієнта тертя для зразків сталь без покриття - чавун з покриттям (крива 4, рис. 4.41) при навантаженні 490Н стабільно знижувалися і на кінець випробування становили 0,04, що у 2,5 рази менше ніж на необроблених зразках, а також у 2,25 рази менше ніж для зразків сталь з покриттям – чавун без покриття, але у 1,33 рази більше ніж для зразків з покриттям.

Значення коефіцієнту тертя для вихідних зразків (крива 1, рис. 4.42) при збільшенні навантаження на зразки до 980Н спочатку поступово знижувалися, але вже через чотири години від початку експерименту стабілізувалися і до кінця дорівнювали 0,125.

Аналізуючи криву 2 (рис. 4.42), яка відповідає показникам коефіцієнта тертя для зразків з покриттям, виявили, що коефіцієнт знижувався з початку експерименту більш стрімко, але з четвертої години більш вирівнявся і стабілізувався, дорівнюючи 0,065, що у 1,92 рази менше ніж у зразків без покриття.

Пара тертя сталь з покриттям – чавун без покриття (крива 3, рис. 4.42) при навантаженні 980 Н мали показники коефіцієнту тертя найбільш високі, хоча на протязі всього експерименту вони знижувалися і вкінці становили

0,128, що у 1,02 рази більше ніж у зразків без покриття та у 1,96 рази більше ніж у зразків з покриттям.

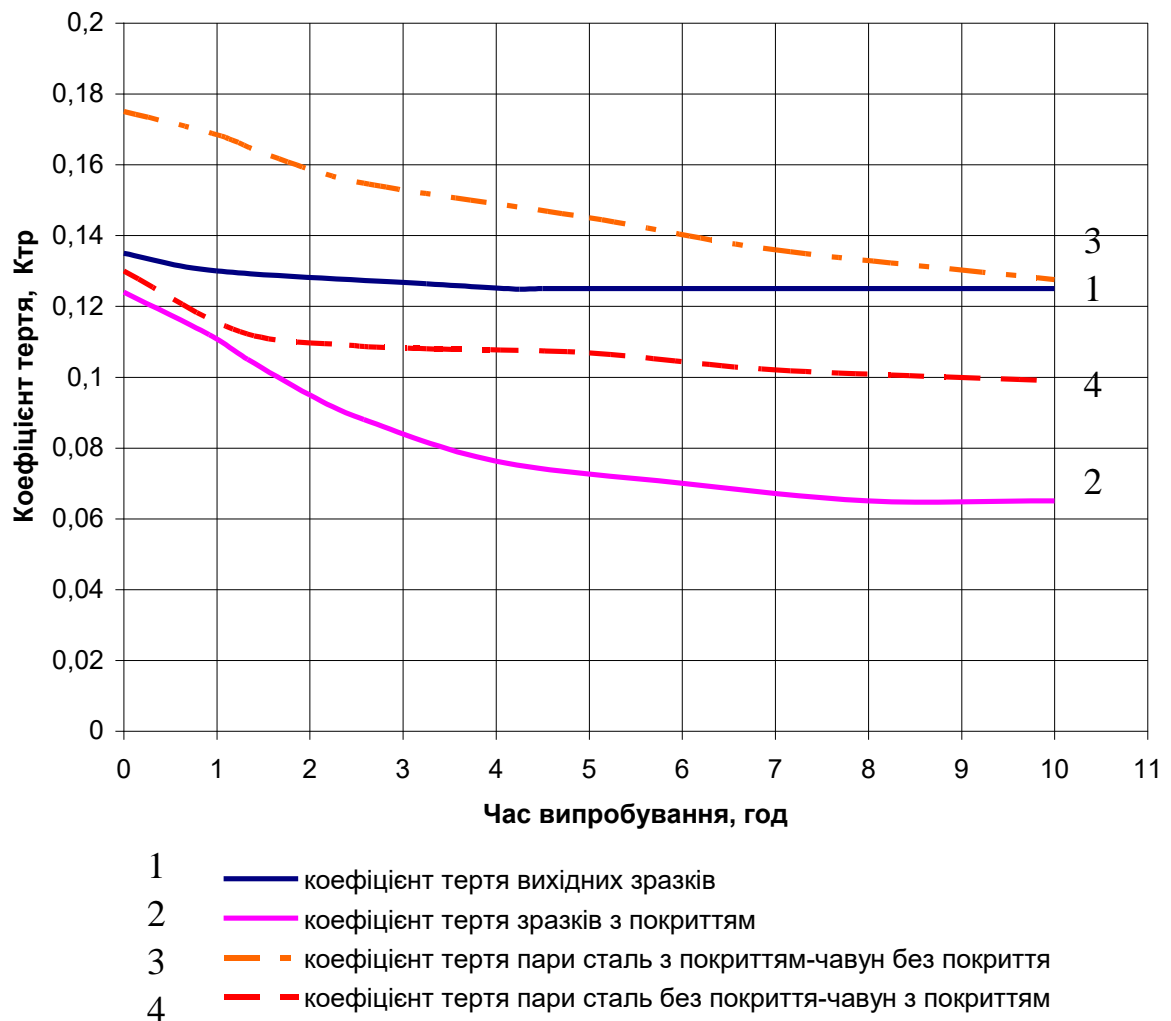


Рисунок 4.42 – Залежність коефіцієнту тертя від часу випробування при навантаженні 980 Н

Зразки сталь без покриття – чавун з покриттям (крива 4, рис. 4.42) мали коефіцієнт тертя, який повільно знижувався на протязі всього випробування і вкінці склав 0,099, що у 1,26 рази менше ніж у зразків без покриття, у 1,28 рази менше ніж у пари тертя сталь з покриттям – чавун без покриття, але у 1,52 рази більше ніж у пари тертя з покриттям.

Зразки без покриття при збільшенні навантаження до 1961Н (крива 1, рис. 4.43) мали коефіцієнт тертя, який на початку випробування поступово

знижувався, стабілізувавшись через 6 годин, до кінця випробування залишався незмінним – 0,1449.

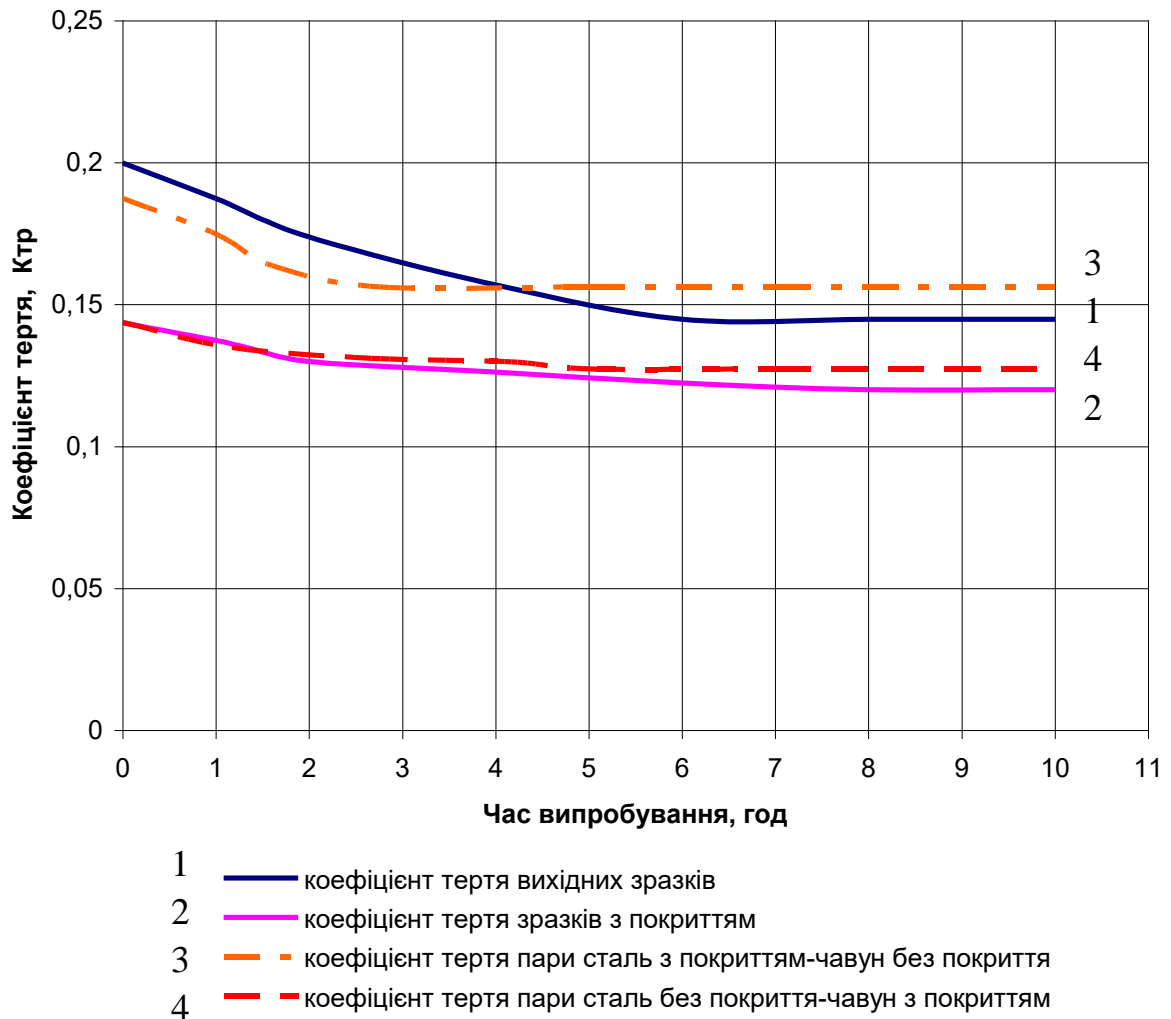


Рисунок 4.43 – Залежність коефіцієнту тертя від часу випробування при навантаженні 1961 Н

Коефіцієнт пари тертя зразків з покриттям (крива 2, рис. 4.43) зменшився за весь час експерименту тільки на три сотих і склав 0,12, що у 1,2 рази менше ніж для зразків без покриття. Для зразків сталь з покриттям – чавун без покриття (крива 3. рис. 4.43) коефіцієнт тертя становив найбільше значення 0,1562, що у 1,07 разів більше ніж для пари тертя без покриття та у 1,3 рази більше ніж для пари тертя з покриттям.

Зразки сталь без покриття – чавун з покриттям (крива 4, рис. 4.43) на протязі всього випробування мали стабільний коефіцієнт тертя, який

змінився лише приблизно на дві сотих, склавши 0,1274, що у 1,13 рази менше ніж у зразків з покриттям, у 1,22 рази менше ніж у пари тертя сталь з покриттям – чавун без покриття та у 1,06 рази більше ніж у зразків з покриттям.

Побудувавши залежності коефіцієнту тертя від часу випробування для різних пар тертя, ми можемо прослідкувати, як змінюється коефіцієнт тертя в залежності від збільшення навантаження на зразки (рис. 4.44).

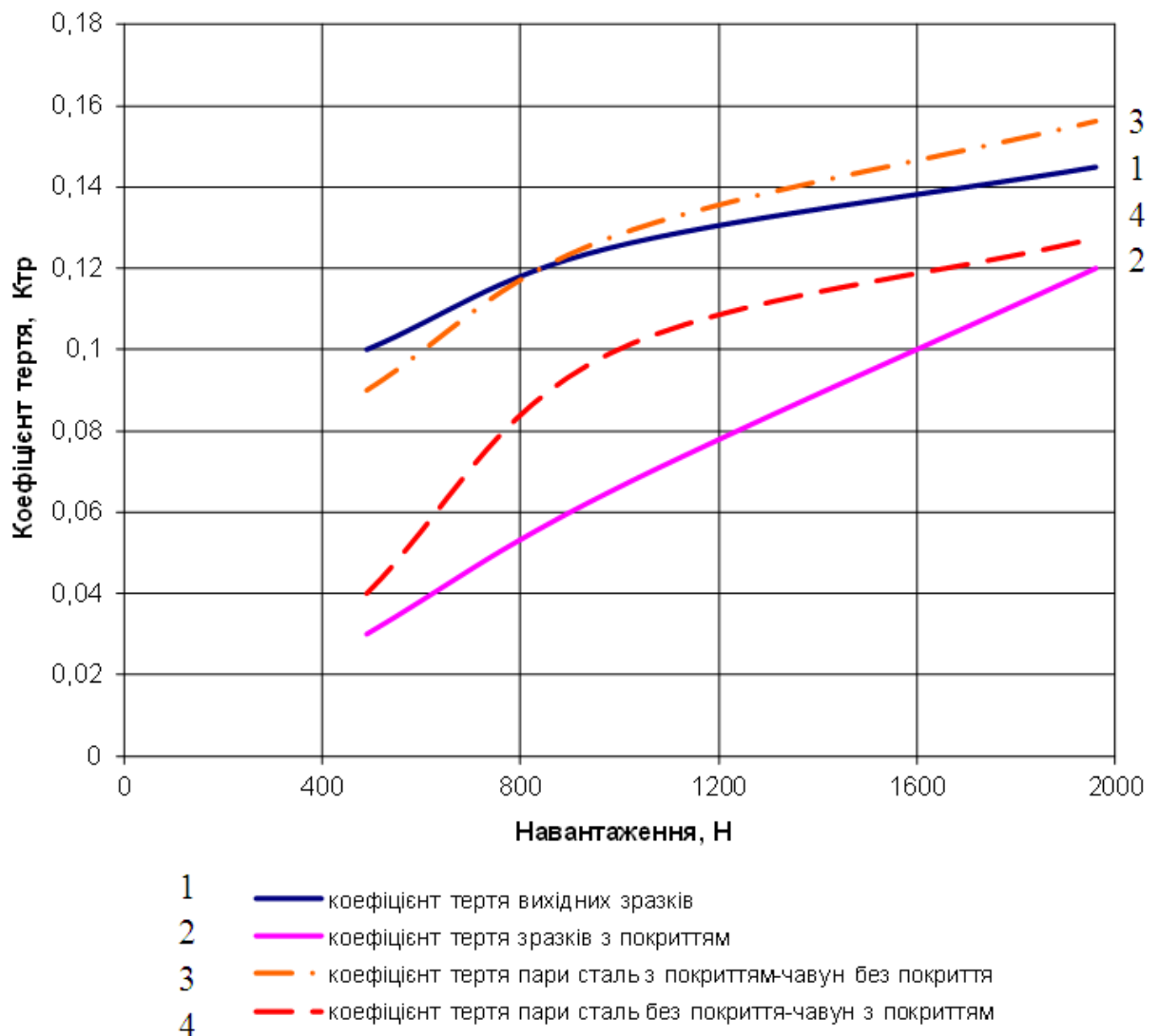


Рисунок 4.44 – Залежність коефіцієнту тертя від навантаження

Для всіх зразків спостерігається пряма залежність коефіцієнту тертя від навантаження (рис. 4.44). Тобто коефіцієнт тертя збільшується при

збільшенні навантаження на зразки, а також різниця в значеннях коефіцієнта тертя для різних пар значно скорочується при більших навантаженнях.

Як бачимо, при меншому навантаженні різниця між значеннями коефіцієнта тертя для зразків з покриттям (крива 2, рис. 4.44) та зразків без покриття (крива 1, рис. 4.44) становила 3 рази, тоді як різниця між цими самими ж зразками при найбільшому навантаженні склала лише 1,2 рази. При найменшому навантаженні найбільший коефіцієнт тертя мали зразки без покриття (крива 1, рис. 4.44) – 0,1, а найменший зразки з покриттям (крива 2, рис. 4.44) – 0,03. При найбільшому навантаженні найбільший показник коефіцієнту тертя мали зразки сталь з покриттям – чавун без покриття (крива 3, рис. 4.44) – 0,1562, а найменший - пара тертя з покриттям (крива 2, рис. 4.44) – 0,12.

#### 4.5 Висновки до четвертого розділу

1. Одержано результати лабораторних випробувань зразків оброблених за технологією насичення у парогазовому середовищі, яке утворене із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання на машині тертя МИ. На основі лабораторних випробувань побудовано залежності зносу, коефіцієнту тертя.

2. Проведено аналіз кривих сумарного зносу зразків від часу випробування при навантаженні 490 Н, який встановив, що сумарний знос зразків з покриттям найменший, тобто у 5,9 разів менший ніж сумарний знос зразків без покриття, у 8 разів менший ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям-чавун без покриття”, а також, у 1,96 рази менший порівняно із сумарним зносом пари тертя „сталь без покриття-чавун з покриттям”.

3. Виявлено, що сумарний знос зразків при навантаженні 980 Н з покриттям менші у 3 рази ніж сумарний знос зразків без покриття, у 3,3 рази

менший ніж сумарний знос пари тертя „сталь з покриттям-чавун без покриття”, а також, у 1,4 рази менший порівняно із сумарним зносом пари тертя „сталь без покриття-чавун з покриттям”. Сумарний знос зразків з покриттям при максимальному навантаженні у 1,2 рази менший ніж сумарний знос зразків сталь без покриття чавун з покриттям, у 3,65 рази менший ніж сумарний знос зразків сталь з покриттям чавун без покриття, а також у 3,8 рази менший ніж сумарний знос зразків без покриття.

4. Одержано значення моменту тертя та виконано підрахунки коефіцієнту тертя, що дало змогу побудувати графіки залежності коефіцієнту тертя від часу випробування. З них видно, що найменші значення коефіцієнту тертя при різних навантаженнях дає пара тертя з покриттям. Коефіцієнт тертя при навантаженні 490Н був у 3,33 рази менший для пари з покриттям ніж вихідних зразків, при навантаженні 980Н менший у 1,92 рази для пари з покриттям ніж вихідних зразків, при навантаженні 1961 Н менший у 1,2 рази для пари з покриттям ніж вихідних зразків. Коефіцієнт тертя збільшується при збільшенні навантаження на зразки, а також різниця в значеннях коефіцієнта тертя для різних пар значно скорочується при більших навантаженнях. Найменше значення коефіцієнту тертя у зразків з покриттям.

5. Зроблено висновок, що оптимальними експлуатаційними параметрами технології нанесення покриттів із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання є: температура обробки в насичуючому середовищі  $t = 590 - 610^{\circ}\text{C}$ ; час витримки в насичуючому середовищі  $\tau = 35-45$  хв.; концентрація алюмохромфосфатного з'єднання у водному розчині  $C=8-12\%$ .



РОЗДІЛ 5  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАСЛЯНИХ  
ШЕСТЕРЕННИХ НАСОСІВ.  
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ НОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ  
НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

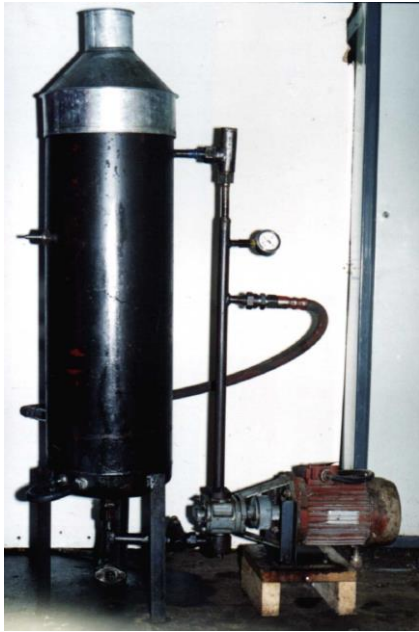
5.1 Стендові іспити масляних насосів

В роботі були проведені експериментальні дослідження властивостей покриття в лабораторних умовах. Визначено вплив параметрів процесу нанесення покриттів і насичуючого середовища на знос пар тертя, задиростійкість, коефіцієнт тертя. В результаті отримані оптимальні параметри технології окислегування із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання: температура обробки в насичуючому середовищі  $t = 590 - 610^{\circ}\text{C}$ ; час витримки в насичуючому середовищі  $\tau = 35-45$  хв.; концентрація алюмохромфосфатного з'єднання у водному розчині  $C=8-12\%$ . Саме ці параметри було використано при нанесенні покриттів на деталі масляного шестеренного насосу для проведення експлуатаційних випробувань.

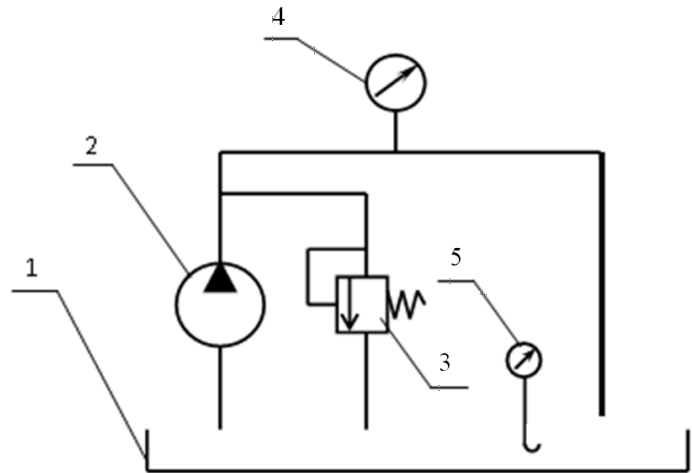
Метою даних експериментальних досліджень було встановлення впливу запропонованого процесу формування покриттів на працездатність та зносостійкість масляних шестеренних насосів.

Для імітації роботи масляного шестеренного насосу змащувальної системи двигунів внутрішнього згорання був застосований спеціальний лабораторний стенд (рис.5.1) [210]. Принцип роботи стенда, як видно з гідравлічної схеми, наведеної на (рис.5.1, б), полягає у тому, що масло з бака 1 за допомогою шестеренного насосу 2 подається до магістральних трубопроводів стенда. Встановлення необхідного перепаду тиску виконується за допомогою регулювання зусилля спрацьовування

запобіжного клапана 4. Тиск у системі контролюється за манометром 5. Після проходження через магістраль масло потрапляє знову до баку.



а) загальний вигляд стану



б) гідравлічна схема стану

1 – бак; 2 – насос; 3 – запобіжний клапан; 4 – манометр; 5 – термометр

Рисунок 5.1 – Лабораторний стенд для імітації роботи масляного шестеренного насоса змащувальної системи ДВЗ [210]

Для контролю температури масла під час роботи стану застосовувався лабораторний термометр 6. Привод насоса 2 здійснювався через муфту від трифазного асинхронного короткозамкненого електродвигуна, що дало можливість забезпечити постійний тиск у системі при роботі стану.

Випробування проводилися у два етапи:

- імітація роботи масляного шестеренного насоса з вихідними параметрами та масляного шестеренного насоса з покриттям на лабораторному стенді (рис.5.1);

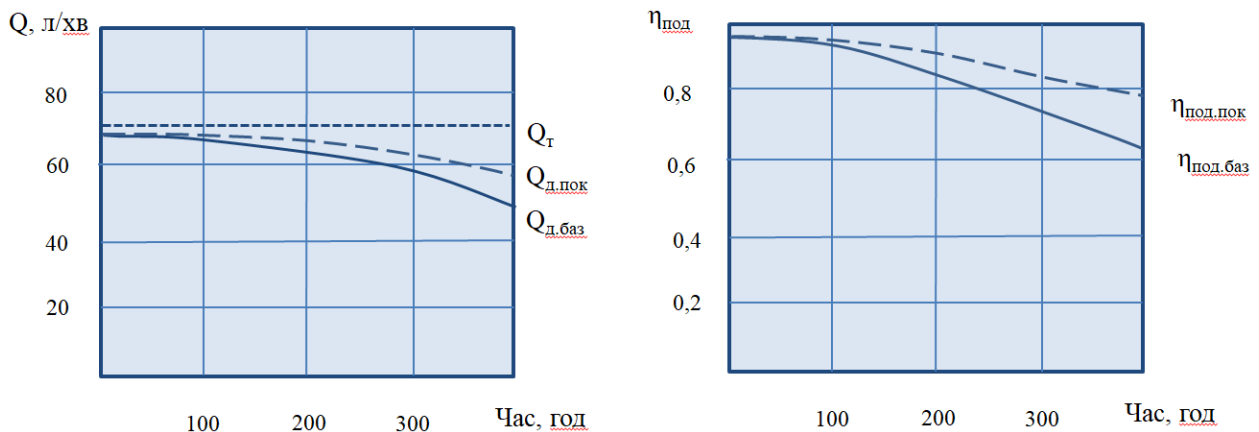
- перевірка показників масляних шестеренних насосів на стенді.

Оскільки в процесі експлуатації транспортного засобу до мастила постійно потрапляють нові часточки зносу і пил, які повністю не видаляються фільтрами системи змащування з мастила, то при проведенні

іспитів шестеренного насосу на стенді до мастила були штучно введені часточки зношення сталі 40Х та чавуну СЧ 20 та кварцовий пил у співвідношенні 1:1 [210-211].

На першому етапі шестеренний насос, як вихідний так і з покриттям, працював 100 годин на чистому мастилі М10Г2, потім ще 200 годин на мастилi з штучно введеними часточками зношення та кварцовим пилом.

На другому етапі проводилися іспити насоса системи змащення двигуна на стенді КИ-27526 [7, 212]. Стендові іспити передбачають перевірку наступних показників [213]: перевірка функціонування; перевірка зовнішньої герметичності; перевірка коефіцієнта подачі (перевіряється на номінальних оборотах і тисках, зазначених на насосі); перевірка продуктивності насосу (рис.5.2).



$Q$  – подача шестеренного насосу, л/хв;

$Q_t$  – теоретична подача шестеренного насосу, л/хв;

$Q_{д.баз}$  – дійсна подача шестеренного насосу за базовою технологією, л/хв;

$Q_{д.пок}$  – дійсна подача шестеренного насосу з покриттям, л/хв

$\eta_{под}$  – коефіцієнт подачі (об'ємний К.К.Д.) шестеренного насосу;

$\eta_{под.баз}$  – коефіцієнт подачі шестеренного насосу за базовою технологією;

$\eta_{под.пок}$  – коефіцієнт подачі шестеренного насосу з покриттям

а) залежність подачі від часу випробування

б) залежність об'ємного К.К.Д. від часу випробування

Рисунок 5.2 – Дослідження експлуатаційних показників масляного шестеренного насосу

Результати іспитів насоса порівнювалися з припустимими по технічним умовам. Вимірювання проводилися не менше трьох разів при тиску обкатувальної суміші в гідравлічній магістралі стенда, рівному максимальному робочому тиску для даного типу масляного насоса[7].

Від величини номінальної подачі шестеренного насосу залежить продуктивність машини, а отже і якісне виконання нею всього технологічного циклу. Критерієм граничного стану насоса є зниження величини коефіцієнта подачі більш ніж на 20 %.

В результаті проведених експериментальних випробувань масляних шестеренних насосів тракторних дизельних двигунів встановлено залежності основних показників, таких як подача та коефіцієнт подачі, від часу випробування для насосів з базовою технологією та насосів з запропонованою технологією обробки в парогазовому середовищі алюмохромфосфатного з'єднання [214-216].

З графіків (рис.5.2) можна зробити висновки, що показник подачі шестеренного насоса обробленого за новою технологією знижується більш повільно і є більшим у 1,16 разів ніж насоса з базовою технологією. Залежність об'ємного К.К.Д. від часу випробування показує, що коефіцієнт подачі шестеренних насосів оброблених за запропонованою технологією окислення в алюмохромфосфатному з'єднанні більший у 1,33 рази ніж у насосів за базовою технологією.

Оскільки показник подачі та коефіцієнт подачі напряму залежать від витоків мастила через зазори в парі тертя шестерня корпус масляного насосу, то можна зробити висновок про підвищення зносостійкості спряжених поверхонь, так як чим нижче знос тим повільніше знижуються показники насосу. Отже, з вище сказаного можна зробити висновок, що доцільно застосовувати технологію формування покриттів окисленням у водному розчині алюмохромфосфатного з'єднання.

## 5.2 Розрахунок економічного ефекту від нової технології нанесення покриттів

Основним шляхом покращення економічних показників роботи машинобудівних підприємства є вдосконалення техніки та технології виробництва, реформування системи матеріально-технічного постачання, оптимізація витрат часу і ресурсів на виконання технологічного процесу та прискорення науково-технічного прогресу. Розрахунок ефективності використання нового методу нанесення покриттів, виконували на основі апробації масляного шестеренного насосу, корпус якого виготовлено із чавуну СЧ20, а шестерні – із сталі 40Х, який використовується у системі мащення тракторних двигунів внутрішнього згорання. Виходячи з результатів виконуваних досліджень та апробації в умовах підприємства оцінили економію витрат при експлуатації таких виробів.

Основним узагальнюючим показником ефективності інноваційних проектів є показник економічного ефекту. Економічний ефект від впровадження інноваційного заходу визначається згідно з умовами використання продукції за розрахунковий період [217].

Сукупний економічний ефект визначається як перевищення вартісної оцінки результатів над вартісною оцінкою сукупних витрат за термін здійснення інноваційного заходу

$$E = P - Z, \quad (5.1)$$

де  $P$  – вартісна оцінка результатів від здійснення інноваційного заходу за розрахунковий період;

$Z$  – вартісна оцінка затрат на здійснення інноваційного заходу за розрахунковий період.

Економічний ефект інноваційного проекту розраховується за установлений відрізок часу, що називається розрахунковим періодом, в роботі прийнято 10 років. Сумарний економічний ефект за роками розрахункового періоду визначається як перевищення сумарної вартісної оцінки результатів інноваційного проекту за розрахунковий період над вартістю оцінок сукупних затрат на здійснення інноваційного проекту за розрахунковий період

$$E_T = \sum_{t=t_n}^{t_k} E_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=t_n}^{t_k} P_t \cdot \alpha_t - \sum_{t=t_n}^{t_k} Z_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=t_n}^{t_k} (P_t - Z_t) \cdot \alpha_t \quad (5.2)$$

де  $P_t$  – вартісна оцінка результатів у  $t$ -ому році розрахункового періоду;

$Z_t$  – вартісна оцінка затрат усіх ресурсів у  $t$ -ому році розрахункового періоду;

$\alpha_t$  – коефіцієнт приведення результатів, затрат економічного ефекту різних років до розрахункового року;

$t_n$  – початковий рік розрахункового періоду;

$t_k$  – кінцевий рік розрахункового періоду.

Визначення економічного ефекту проводиться за умови обов'язкового приведення різнотермінових вартісних оцінок результатів і затрат до єдиного моменту часу – розрахункового року  $t_k$ , за допомогою коефіцієнта приведення  $\alpha_t$ .

Приведення різнотермінових результатів і затрат усіх років періоду реалізації заходу до розрахункового року здійснюється множенням їх вартісної оцінки за кожний рік на коефіцієнт приведення (дисконтування) [217].

Для приведення результатів і затрат будь-якого року до першого року життєвого циклу проекту (при дисконтуванні) застосовується формула

$$\alpha_t = \frac{(1 + E)^t}{[(1 + E)(1 + I) + (1 + R)]^t}, \quad (5.3)$$

де  $E$  – середня річна ставка комерційних банків за депозитними вкладками (дисконтна ставка), в частках одиниці. При 20% річних  $E=0,20$ ;

$R$  – ставка, що враховує ступінь ризику здійснення проекту, в частках одиниці, 10%;

$I$  – середньорічний темп інфляції, що прогнозується в період здійснення проекту,  $I = 17\%$ ;

$t_k$  – кількість років, що віддаляють розрахунковий рік від року, результати і затрати якого приводяться до розрахункового року.

Розрахунок коефіцієнту приведення (дисконтування)

$$\alpha_{2022} = \frac{(1 + 0,2)^0}{[(1 + 0,20) \cdot (1 + 0,17) \cdot (1 + 0,1)]^0} = 1$$

$$\alpha_{2023} = \frac{(1 + 0,2)^1}{[(1 + 0,20) \cdot (1 + 0,17) \cdot (1 + 0,1)]^1} = 0,78$$

$$\alpha_{2024} = \frac{(1 + 0,2)^2}{[(1 + 0,20) \cdot (1 + 0,17) \cdot (1 + 0,1)]^2} = 0,61$$

$$\alpha_{2025} = \frac{(1 + 0,2)^3}{[(1 + 0,20) \cdot (1 + 0,17) \cdot (1 + 0,1)]^3} = 0,47$$

$$\alpha_{2026} = \frac{(1 + 0,2)^4}{[(1 + 0,20) \cdot (1 + 0,17) \cdot (1 + 0,1)]^4} = 0,37$$

$$\alpha_{2027} = \frac{(1 + 0,2)^5}{[(1 + 0,20) \cdot (1 + 0,17) \cdot (1 + 0,1)]^5} = 0,29$$

$$\alpha_{2028} = \frac{(1 + 0,2)^6}{[(1 + 0,20) \cdot (1 + 0,17) \cdot (1 + 0,1)]^6} = 0,22$$

$$\alpha_{2029} = \frac{(1 + 0,2)^7}{[(1 + 0,20) \cdot (1 + 0,17) \cdot (1 + 0,1)]^7} = 0,17$$

$$\alpha_{2030} = \frac{(1 + 0,2)^8}{[(1 + 0,20) \cdot (1 + 0,17) \cdot (1 + 0,1)]^8} = 0,14$$

$$\alpha_{2031} = \frac{(1 + 0,2)^9}{[(1 + 0,20) \cdot (1 + 0,17) \cdot (1 + 0,1)]^9} = 0,11$$

Дані розрахунку коефіцієнту приведення  $\alpha_t$  заносимо до таблиці 5.1.

В результаті застосування нової технології формування покриття окислегуванням із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання на деталях масляних шестеренних насосів двигунів внутрішнього згорання підвищилися експлуатаційні характеристики насосів, а саме показник подачі шестеренного насоса обробленого за новою технологією більший у 1,16 разів ніж насоса з базовою технологією та коефіцієнт подачі шестеренних насосів оброблених за новою технологією більший у 1,33 рази ніж у насосів за базовою технологією. Припускаємо, що на основі підвищення зносостійкості масляних шестеренних насосів на 23% зменшиться програма ремонту масляних шестеренних насосів. Задамося програмою ремонту шестеренних насосів, які експлуатуються за базовою технологією виготовлення 1000 шт., тоді після нанесення покриття та експлуатації насосу до ремонту повернуться лише 770 шт. За даними інформаційних ресурсів вартість ремонту одного масляного шестеренного насосу складає 600 грн., вартість печі для нанесення покриттів обираємо 200 тис.грн. Далі розрахунок економічного ефекту проводимо за методикою наведеною у [217] та зводимо до таблиці 5.1.



Таблиця 5.1 - Розрахунок економічного ефекту від нанесення покриття на деталі масляного шестеренного насосу тракторних дизельних двигунів

Показники	Розрахунковий період									
	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
1. Програма ремонту шестеренних насосів по базовій технології, шт	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
2. Собівартість ремонту одиниці насосу по базовій технології, грн.	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
3. Загальні витрати на програму ремонту насосів по базовій технології, тис. грн.	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00	600,00
4. Одноразові витрати, тис. грн.	200,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5. Програма ремонту шестеренних насосів виготовлених за новою технологією, шт.	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770
6. Собівартість ремонту одиниці насосу виготовленого за новою технологією, грн.	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
7. Річні витрати на ремонт насосів виготовлених за новою технологією, тис. грн.	462,00	462,00	462,00	462,00	462,00	462,00	462,00	462,00	462,00	462,00
8. Ліквідаційне сальдо, тис. грн.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,00
9. Загальні витрати на програму ремонту насосів виготовлених за новою технологією, тис. грн.	662,00	462,00	462,00	462,00	462,00	462,00	462,00	462,00	462,00	442,00
10. Економічний ефект, тис. грн.	-62,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	158
11. Коефіцієнт приведення витрат до облікового року	1,0	0,78	0,61	0,47	0,37	0,29	0,22	0,17	0,14	0,11
12. Економічний ефект з урахуванням коефіцієнту приведення, тис. грн..	-62,00	107,64	84,18	64,86	51,06	40,02	30,36	23,46	19,32	17,38
13. Економічний ефект нарастаючим підсумком, тис.грн.	-62,00	45,64	129,82	194,68	245,74	285,76	316,12	339,58	358,9	376,28

### 5.3 Висновки до п'ятого розділу

1. Побудовано залежності основних показників, таких як подача та коефіцієнт подачі, від часу випробування для насосів з базовою технологією та насосів з запропонованою технологією обробки в парогазовому середовищі алюмохромфосфатного з'єднання.

2. Встановлено, що показник подачі шестеренного насосу обробленого за новою технологією знижується більш повільно і є більшим у 1,16 разів ніж насоса з базовою технологією. Залежність об'ємного К.К.Д. від часу випробування показує, що коефіцієнт подачі шестеренних насосів оброблених за запропонованою технологією окислення в алюмохромфосфатному з'єднанні більший у 1,33 рази ніж у насосів за базовою технологією.

3. Визначено, що оскільки показник подачі та коефіцієнт подачі напряму залежать від витоків мастила через зазори в парі тертя шестерня корпус масляного насосу, то можна зробити висновок про підвищення зносостійкості спряжених поверхонь, так як чим нижче знос тим повільніше знижуються показники насосу.

4. Встановлено доцільність застосування технології формування покриттів окисленням із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання.

5. Представлено результати розрахунку економічного ефекту від впровадження технології формування покриття окисленням із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання на деталях масляних шестеренних насосів, який за десять років розрахункового періоду складе 376,28 тис.грн. При цьому додатково зменшаться витрати на ремонт і обслуговування двигунів внутрішнього згорання в цілому, за рахунок підвищення строку забезпечення продуктивності насосу на високому рівні більш тривалий час.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання щодо підвищення зносостійкості та працездатності деталей масляного шестеренного насосу двигунів внутрішнього згоряння за рахунок розроблення інноваційної технології формування багат шарового покриття в одному технологічному циклі.

За результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Проведено аналіз наукових робіт, присвячених питанням підвищення ресурсних характеристик масляних шестеренних насосів дизельних двигунів зроблено висновок про необхідність подальшого удосконалення технології виготовлення. Представлено результати аналітичного огляду існуючих методів підвищення ресурсу шестеренних насосів та обґрунтовано застосування технології окислегування в водному розчині алюмохромфосфатного з'єднання в якості засобу підвищення експлуатаційних характеристик масляних шестеренних насосів дизельних двигунів. За результатами аналізу досліджень причин зниження працездатності деталей шестеренних насосів та способів нанесення покриттів сформульовано мету роботи та поставлено конкретні завдання для вирішення поставленої мети.

2. Виконано аналіз властивостей матеріалів, які використовуються для виготовлення деталей масляних шестеренних насосів. Розроблена програма експериментальних досліджень та системний підхід до вибору технології нанесення покриттів на деталі масляних шестеренних насосів. Виконана розробка способу нанесення покриття. Описано обладнання, яке застосовувалося для експериментів, та оптимальні методики досліджень.

3. Представлено результати розробки теоретичних основ удосконалення методу нанесення покриття. Обрано хімічні елементи, які

найбільш позитивно впливають на підвищення експлуатаційних властивостей пар тертя, та обґрунтовано утворення покриття з заданими властивостями. Установлено, що оптимальним складом для насичуючого середовища була наявність в ньому таких елементів як алюміній, хром, фосфор. В результаті проведеного аналізу, обрано алюмохромфосфатне зв'язуюче (АХФЗ), до складу якого входять зазначені елементи, для одержання покриття з заданими властивостями на деталях масляного шестеренного насосу.

4. Представлено результати оптимізації параметрів технологічного процесу, що дозволило визначити діапазон значень параметрів технологічного процесу, за рахунок зміни яких можливо досягти найкращих експлуатаційних та триботехнічних властивостей, а саме утворення оптимальної товщини покриття, мінімальних значень зносу, оптимального часу приробітки, витримки максимального навантаження до утворення задирів. Згідно проведених досліджень оптимальними параметрами способу нанесення покриття прийнято концентрацію алюмохромфосфатного насичуючого середовища 10% водного розчину, температуру  $600 \pm 20^\circ \text{C}$ , час витримки в насичуючому середовищі 40 хвилин.

5. Визначено особливість формування окислегованих покриттів, яка заключається в тому, що формується багатошарове покриття в одному технологічному циклі. Нижній шар формується за рахунок дифузії елементів матриці, середній шар перехідна зона, у формуванні якої беруть участь і матеріал підложки і насичуюче середовище, а верхній шар формується за участю елементів насичуючого середовища.

6. Проведено лабораторні дослідження триботехнічних властивостей сформованого покриття, що дозволило оцінити його вплив на зносостійкість, припрацьовуваність, задиростійкість, коефіцієнт тертя спряжених деталей.

7. Розроблено технологію нанесення покриття з заданими експлуатаційними властивостями, яка включає нагрів, окислегування в

насичуючому середовищі, а саме в водному розчині алюмохромфосфатного з'єднання, з наступним охолодженням.

8. Проведено експлуатаційні випробування технологічного процесу окислення. Встановлено, що показник подачі шестеренного насоса обробленого за новою технологією знижується більш повільно і є більшим у 1,16 разів ніж насоса з базовою технологією. Залежність об'ємного К.К.Д. від часу випробування показує, що коефіцієнт подачі шестеренних насосів оброблених за запропонованою технологією окислення в алюмохромфосфатному з'єднанні більший у 1,33 рази ніж у насосів за базовою технологією. Таким чином, встановлено доцільність застосування технології формування покриттів окисленням із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання.

9. Представлено результати розрахунку економічного ефекту від впровадження технології формування покриття окисленням із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання на деталях масляних шестеренних насосів, який за десять років розрахункового періоду складе 376,28 тис.грн. При цьому додатково зменшаться витрати на ремонт і обслуговування двигунів внутрішнього згорання за рахунок підвищення строку забезпечення продуктивності насоса на високому рівні більш тривалий час. Додатково зменшиться знос деталей двигуна із-за відсутності перебоїв з постачанням мастила до поверхонь тертя-зношування, що позитивно вплине на загальний ресурс двигуна.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кернасюк Ю. Потенціал розвитку ринку техніки АПК. *Агробізнес сьогодні*. 2018. Режим доступу: <http://agro-business.com.ua/agro/ekonomichnyi-hektar/item/10881-potentsial-rozvytku-rynku-tekhniku-apk.html>
2. Скоцик В.Є. Формування попиту на ринку сільськогосподарської техніки: сучасний стан та шляхи вирішення. *Інвестиції: практика та досвід*, № 14. 2018. С.14-17.
3. Северный А.Э. Рынок подержанной техники и резерв сохранения технического потенциала в сельском хозяйстве. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2000. №2. С.4-6.
4. Федотов А.В. Теоретические основы функционирования и экономический механизм развития рынка сельскохозяйственной техники. М. : ГНУ ВНИИЭСХ, 2005. 220 с.
5. Іванишин В. В. Тенденції розвитку світового ринку сільськогосподарської техніки. *Ефективна економіка*, № 2, 2012. Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1509>
6. Черноиванов В.И. Основные направления развития технического сервиса в сельском хозяйстве. Материалы научно-практической конференции. М. : ГОСНИТИ, 26-27 октября 1993 г. С.40-46.
7. Тельнов Н. Ф. Ремонт масляных насосов и фильтров тракторных и комбайновых двигателей. М. : Колос. 1968. 119 с.
8. Насоси шестеренні об'ємного гідроприводу. Технічні умови. ГСТУ 3-25-180-97. К. : Мінпром політики України, 1998. 48 с.
9. Юдин Е. М. Шестеренные насосы. М. : Машиностроение, 1964. 236 с.

10. Ермолов Л.С., Науменко О.А., Сідашенко О.І., Шержуков І.Г. Ремонт дизельних двигунів. Довідник. К. : Урожай, 1991. 248 с.
11. Сідашенко О.І., Науменко О.А. Ремонт машин: підручник / під ред. Сідашенко О.І, Поліського А.Л. К. : Урожай. 1994. 400с.
12. Техническое обслуживание и ремонт тракторов Т-150, Т-150К различных модификаций с двигателями СМД, ЯМЗ, ДОЙТЦ [Текст] : учеб. пособие / А. И. Сидашенко, А. А. Науменко, В. К. Аветисян, А. К. Автухов, В. А. Бантковский, Т. С. Скобло [та ін.]; под ред. А. И. Сидашенко, А. А. Науменко. Х. : ООО "Украгроззапчасть", 2002. 380 с.
13. Черновол М.І., Кулешков Ю.В. Основні напрями вдосконалення шестеренних насосів сільськогосподарської техніки. *Вісник аграрної науки*, 2008. № 8. С. 52 - 54.
14. Методика проведения технической экспертизы насосов шестеренных (НШ) производства ПАО «Гидросила» 2018. 40с. Режим доступу: <https://www.hydroсила.com/files/brochure/ru-broshure-18.pdf>
15. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. М. : «Машиностроение», 1984. 280 с.
16. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М. : Машиностроение, 1977. 526 с.
17. Справочник по триботехнике: В 3 т. Т2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / Под общ. Ред. М. Хебды, А.В.Чичинадзе. М. : «Машиностроение», 1990. 416 с.
18. Зозуля В.Д., Шведков Е.Л., Ровинский Д.Я., Браун Э.Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев : Наукова думка, 1990. 264 с.
19. Артемьев Ю.Н. Качество ремонта и надежности машин в сельском хозяйстве. М.: Колос, 1981. 239 с.
20. Стали и сплавы. Марочник./ Под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. М. : Интермет Инжиниринг, 2003. 608 с.

21. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Справочник в пяти томах. Т. 2. Конструкционная сталь / Под общ. ред. д.т.н. проф. Кудрявцева И.В. М. : Машиностроение, 1967. 248с.
22. Козловский И.О. Химико-термическая обработка шестерен. М. : Машиностроение, 1970. 232 с.
23. Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки : Монография. М., 2001. 302с.
24. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки: ГОСТ 1412-85. Переизд. 3-е. Москва. ИПК изд-во стандартов, 2004г. 5с.
25. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Справочник в пяти томах. Т. 4. Чугун. / Под ред. к.т.н. Жукова А.А. и Шермана А.Д. Под общ. ред. д.т.н. проф. Кудрявцева И.В., М. : Машиностроение, 1969. 248с.
26. Чугун: Справ. изд. / Под ред. А.Д.Шермана и А.А. Жукова. – М. : Металургія, 1991. 576с.
27. Дяченко С.С., Дощечкіна І.В., Мовлян А.О., Плешаков Е.І. Матеріалознавство : підручник. Х. : Вид-во ХНАДУ, 2007. 440 с.
28. Сапунов С.В. Материаловедение : учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. Санкт-Петербург : Лань, 2021. 208 с. ISBN 978-5-8114-1793-3.
29. Chernovol M., Kuleshkov Yur., Rudenko T. Krasota M. The main directions of improving technical level of gear pumps of agricultural machines. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Випуск 45. Ч. 2, 2015. С. 168-174. Режим доступа: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/2289>
30. Надежность и ремонт машин. Курчаткин В.В., Тельнов Н.Ф., Ачкасов К.А. и др./ Под ред. Курчаткина В.В. М. : Колос, 2000. 776 с.



31. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. Москва : Техносфера, 2004. 384с. ISBN 5-94836-018-0
32. Сорокин Г.М. Аспекты металловедения в проблеме долговечности машин. *Металловедение и термическая обработка металлов*, №2, 1990, С. 57-60.
33. Черновол М.И. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники: Учеб. Пособие, К. : УМК ВО, 1989. 256с.
34. Ремонт машин та обладнання : підручник / А. І. Сідашенко, О. А. Науменко, Т. С. Скобло, О. В. Тіхонов, М. І. Черновол, З. В. Ружило [та ін.]; за ред. А. І. Сідашенка, О. А. Науменка; ХНТУСГ. Х.: Міськдрук, 2010. 744 с.
35. Черноиванов В.И., Андреев В.П. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин. М. : Колос, 1983. 288с.
36. Турецкий И. В. Совершенствование конструкции масляных насосов дизелей ОАО "ПО АМЗ" : дис.кандидат технических наук : 05.04.02 – Тепловые двигатели. Барнаул. 2006. 145с.
37. Особенности работы и конструкции шестеренного насоса / Ю. В. Кулешков, Т. В. Руденко, М. В. Красота [и др.] *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин* : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кропивницький : ЦНТУ, 2017. Вип. 47, ч. 1. С. 115-124.
38. Тюняев А.В. Совершенствование геометрии шестерен масляного насоса ДВС: Учебное пособие. Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1998. 45 с.
39. Клишин А.Н. Повышение эксплуатационных характеристик ДВС путем использования смазок с ультрадисперсным фторопластом. *Двигатели внутреннего сгорания*, №1, 2006. С.140-150.

40. Поскребышев В.А., Исько А.Б., Аршинов С.С., Тарновский А.И. Техническое решение по снижению торцевых утечек и потерь на трение в шестеренных насосах. *Системы. Методы. Технологии*, 2010. №2. С.122-124.
41. Аистов И.П., Свищёв А.В. Шестеренные насосы для гидрофицированных машин и нефтехимических производств. *Системы. Методы. Технологии*, 2014. № 3 (23). С. 149-152.
42. Хрущов, М. М. [Трение, износ и микротвердость материалов. Избранные работы](#). М. : Красанд, 2012. 512с.
43. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368с.
44. Чичинадзе А. В., Браун Э. Д., Буше Н. А. и др Основы трибологии (трение, износ, смазка) М. : Машиностроение, 2001. 664с.
45. Богданович П.И., Прушак В.Я., Богданович С.П. Трение, смазка и износ в машинах. Учебник. Минск : Тэхналогія, 2011. 527с.
46. Гаркунов Д. Н., Корник П. И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. М. : Изд-во МСХА, 2003. 344 с
47. Мышкин Н. К. Петроковец М. И. Трение, смазка, износ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
48. Токмин А. М., Темных В. И., Свечникова Л. А. Выбор материалов и технологий : учеб. Пособие. М. : Инфа-М, 2014. 235 с.
49. Уланский В.Б., Маняк Л.К. Новые способы упрочнения деталей машин: Справочное пособие. Донецк : Донбасс, 1990. 144с.
50. Елагина О. Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учеб. пособие. Университетская книга. Логос, 2009. 485 с.

51. Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин и др. М. : Высшая школа, 2005. 862 с.
52. Мельник П. И. Технология защитных покрытий. К. : Техника, 1978. 151с.
53. Peter Panjan, Aljaž Drnovšek, Janez Kovač. Tribological aspects related to the morphology of PVD hard coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2018. Vol. 343. P. 138-147.
54. Aharon Inspektor, Paul A. Salvador. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review. *Surface and Coatings Technology*, 2014. Vol. 257. P. 138-153.
55. Харламов Ю.О., Будагьянц Н.А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин: Учебное пособие: В 2-х т. Луганськ: изд.-во Восточнoукраинского национального университета им. В. Даля, 2003. 496 с.
56. Бойцов А.Г., Машков В.Н., Смоленцев В.А., Хворостухин Л.А. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. М. : «Машиностроение», 1991. 144с.
57. Ачкасов А.К. Прогрессивные способы ремонта сельскохозяйственной техники. М.: Колос, 1984. 271 с.
58. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М. : Машиностроение, 1991. 208с.
59. Полевой С. Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение металлов: Справочник. М. : Машиностроение, 1986. 320с.
60. Скобло Т. С., Гончаренко А. А., Марьенко Н. С. Методы повышения технического уровня и качества деталей сельскохозяйственных машин при их восстановлении. *Вісник Харківського нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка*. Х., 2011.

Вип. 110 : Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладн. у ремонтному вир-ві. С. 55-64.

61. Скобло Т. С. Нові напрямки в зміцненні деталей. *Технічне забезп. інновац. технологій АПК* : VII Міжнар. наук.-метод. конф. Х.: ХНТУСГ, 2010. С. 3-7.

62. Сидашенко А. И., Скобло Т. С., Харьяков А. В. Повышение долговечности деталей нанесением износостойких покрытий плазменно-порошковым методом. *Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК* : докл. Междунар. науч.-практ. конф. БГАТУ, 15-18 апр. 2009 г. Минск, 2009. Ч. 1. С. 262-267.

63. Вартелеев С.С., Федько Ю.П., Гиргоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. М. : Машиностроение, 1982. 215 с.

64. Молодык Н.В., Зенкин А.С. Восстановление деталей машин. Справочник. М. : Машиностроение, 1989. 480с.

65. Черноиванов В.И. Методика и рекомендации по восстановлению деталей способами газотермического напыления. М. : ГОСНИТИ, 1983. 62 с.

66. Газотермическое напыление покрытий. Сборник руководящих технических материалов. К. : ИЭС им. Е.О.Патона, 1993. 175 с.

67. Корж В.М., Кузнецов В.Д., Борисов Ю.С., Ющенко К.А. Нанесення покриття: Навчальний посібник/за редакцією акад.. НАН України К.А.Ющенко. К. : Арістей, 2005. 204 с.

68. Корж В.М. Газотермічна обробка матеріалів : Навчальний посібник. К. : «Екотехнологія», 2005. 195с.

69. Корж В.М. Технологія та обладнання для напылення: Навчальний посібник. К. : НМЦВО, 2000. 152 с.

70. Витязь П.А., Ивашко В.С., Манойло Е.Д. и др. Теория и практика газопламенного напыления. М. : Наука и техника, 1993. 295 с.

71. Власов В.М. Работоспособность упрочненных трущихся поверхностей. М. : Машиностроение, 1987. 304с.
72. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин. М. : Машиностроение, 1988. 196 с.
73. Скобло Т.С., Власовец В.М., Мороз В.В. Структура и распределение компонентов в рабочем слое при восстановлении деталей электродуговой металлизацией. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2001, № 12. С. 26-29.
74. Скобло Т. С., Сидашенко А. И., Власовец В. М., Шемет А. В. Разработка технологии восстановления с использованием лазерного луча. *Науковий вісн. Луганського нац. аграр. ун-ту*. Луганськ, 2011. Спец. вип. № 30. С. 249-256.
75. Елизаветин М.А., Сатель Э.А. Технологические способы повышения долговечности машин. М.: Машиностроение, 1989. 399 с.
76. Покрытия и обработка поверхности для защиты от коррозии и износа. Сборник статей под. Ред. Страффорда К.Н., Датты П.К., Гуджена К.Дж., Пер англ/под. Ред. Кудинова, М. : «Металлургия», 1991. 240с.
77. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2 т. Т. 1.- М.: «Л.В.М.- Скрипт», «Машиностроение», 1995. 832 с.:ил.
78. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2 т. Т. 2. М.: «Л.В.М.- Скрипт», «Машиностроение», 1995. 688 с.:ил.
79. Фень Е.К., Пащенко В.Н. Восстановление деталей транспортной техники методом электродугового напыления. *Сварщик*. 2005. №3. С.16-18.
80. Пащенко В.Н., Фень Е.К. Восстановление деталей авиационной техники методом сверхзвукового плазменного напыления. *Сварщик*. 2006. №5. С. 26-28.

81. Фень Е.К. Износо- и жароизносостойкие материалы для сверхзвукового плазменного и электродугового напыления. *Сварщик*. 2011. №1. С.32-35.
82. Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е. и др. Нанесение покрытий плазмой. М. : Наука, 1990. 408 с.
83. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. Учебник для ВУЗов. М. : Металлургия, 1992. 432 с.
84. Коротков В. А. Влияние термической обработки на износостойкость сталей 45 и 40Х. *Вестник машиностроения*. 2016. № 8. С. 48-51.
85. Коротков В. А. Влияние плазменной закалки на износостойкость стали 38ХС. *Трение и износ*. 2017. Т. 38, № 4. С. 346-350.
86. Коротков В. А. Исследование износостойкости легированных сталей, упрочненных плазменной закалкой. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2018. № 5. С. 47-48
87. Коротков В. А. Исследование поверхностного пластического деформирования наплавленного металла. *Вестник машиностроения*. 2014. № 3. С.76-77.
88. Кондратьев Е.Т., Кондратьев В.Е. Восстановление наплавкой деталей сельскохозяйственных машин. М. : Металлургия, 1989. 95 с.
89. Шехтед С.Я., Резницкий А.М. Наплавка металлов. М. : Машиностроение, 1982. 72 с.
90. Авдеев М.В., Воловик Е.А., Ульман И.Е. Технология ремонта машин и оборудования. М. : Агпромиздат, 1986. 247 с.
91. Семчук Г.И. Методы восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственных машин. *Технологический аудит и резервы производства*, № 5/4(13), 2013. С. 57-59. ISSN 2226-3780

92. Авдеев Н.В. Основы технологии материалов покрытий. Учебник для студентов технических вузов. Оренбург, ИПК ОГУ, 2003. 316с.
93. Ткачев В.Н. Методы повышения долговечности сельскохозяйственных машин. М. : Изд-во АО «ТИС», 1993. 211 с.
94. Борисов Ю.С., Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. К. : Техніка, 1986. 223 с.
95. Коротков В. А. Применение электроискровой обработки при ремонте механического оборудования. *Вестник машиностроения*. 2018. № 1. С. 77-81.
96. Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин/ Под ред. В.С. Попова. Запорожье: Издательство ОАО „Мотор Сич”, 2000. 394 с.
97. Asayama Y., Hiyama M., Nakayama T. Ionization and diffusion of metal atoms under electric field at metal / insulator interfaces. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2017. Vol. 70. P. 78–82.
98. Трефилова Н. В. Анализ современных методов нанесения защитных покрытий. *Современные наукоёмкие технологии*. 2014. № 10. С. 67– 67.
99. Панин А.В., Шугуров А.Р., Колмаков А.Г. Методы нанесения защитных покрытий: учебное пособие. Томский политехнический университет. Томск : Изд-во ООО «СПБ Графикс», 2020. 109 с.
100. Каданер Л.И. Защитные пленки на металлах. Харьков, изд-во Харьковского университета, 1956. 283 с.
101. Фесенко А. Г. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин. Дніпропетровськ : РВВ ДНУ, 2015. 104 с.
102. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов Учебное пособие-справочник / Под редакцией д. т. н., проф. В. Д. Евдокимова. Одесса-Николаев: Изд-во НГГУ им. Петра Могилы, 2005. – 352 с.

103. Белкин П. Н. Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов. М. : Мир, 2005. 336 с.
104. Hang Zhao, Jianjun Li, Zhizhen Zheng, Aihua Wang, Yafeng Miao [The microstructures and tribological properties of composite coatings formed via PTA surface alloying of copper on nodular cast iron. \*Surface and Coatings Technology\*, 2016. Vol. 286. P. 303-312.](#)
105. Упрочнение стали 40Х комбинированной обработкой с применением лазера / А. Идан, О. В. Акимов, Е. А. Костик, А. А. Гончарук. *Металл и литье Украины*. 2016. № 7 (278). С. 33–35.
106. Коган Я.Д. Ресурсосберегающие технологии химико-термической обработки. *Сборник научных трудов МАДИ "Ресурсосберегающие технологии поверхностного упрочнения деталей"*, М., 1987. С.23-29.
107. Лахтин Ю.М.. Поверхностное упрочнение сталей и сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, №11, 1988. С. 14-25.
108. Дубинин Г.Н. О перспективах развития химико-термической обработки металлов. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2004.№ 7. С. 5-6.
109. Кравцова Е. А. Диффузионные методы упрочнения материалов : Учеб. пособие . Тольятти : ТГУ, 2006. 77с.
110. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов : учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп.* М. : ООО «ТИД «Аз-book», 2009. 448 с.
111. Герасимова Н. С. *Химико-термическая обработка сталей и сплавов : учебное пособие по курсу «Материаловедение».* Калуга : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. 48 с.
112. Ворошнин Л. Г., Менделеева О. Л., Смёткин В. А. *Теория и технология химико-термической обработки.* Новое знание, 2010. 297 с.



113. Жуковский А.В., Морозов Е.М., Шандров Б.В. Оборудование и технологии микродугового оксидирования. *Автомобильная промышленность*, 2007, № 5. С.37-39.
114. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Лялякин В.П., Михайлин Б.И. Методы химико-термической обработки при упрочнении восстановленных деталей. *Вестник машиностроения*.1988. № 2. С.54-57.
115. Ивашко В.С., Куприянов И.А., Шевцов А.И. Электротермическая технология нанесения защитных покрытий. Мн.: Навука і техніка, 1996. 345 с.
116. Бурделюк Л. І., Крюкова О. А. Характеристика сучасних методів нанесення захисних цинкових покриттів. *Технології та дизайн*. 2020. № 4 (37). [http://nbuv.gov.ua/UJRN/td\\_2020\\_4\\_14](http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2020_4_14).
117. Лахтин Ю.М. Поверхностное упрочнение сталей и сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1988, № 11. С. 14-25.
118. Medvedovski E., Dudziak T. Protective coatings for high-temperature steam oxidation in coal-fired power plants. *Surface and Coatings Technology*, 2019. Vol. 369. P. 127-141.
119. Похмурский В. И., Далисов В. Б., Голубец В. М. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий. К. : Наук. думка. 1980. 188с.
120. Бураковски Т., Сенаторки Я., Тацитовски Я. Трибологические свойства диффузионных слоёв на сталях. Трение, износ и смазочные материалы. Труды межд. научн. конф. 1985. Том 1. С. 288–294.
121. Лыгденов Б. Д., Гурьев А. М., Мосоров В. И., Бутуханов В. А. Перспективные диффузионные покрытия. *Международный журнал экспериментального образования*. 2015. № 12–4. С. 573–573.

122. Файншмидт Е. М. Теория и практика термической обработки в кипящем слое изделий из металлов и сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. №3. С. 4–19.
123. Алиев А. А., Ампилогов А. Ю., Алиев Ак. А. Цементация и нитроцементация автотракторных деталей в кипящем слое. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009. № 4. С. 31–33.
124. Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка сплавов в активных газовых средах. *Вестник машиностроения*, 1986, № 9. С. 49–53.
125. Домбровский Ю. М., Степанов М. С. Новые аспекты химико-термической обработки металлов в порошковых средах. *Вестник ДГТУ*. 2011. Т. 11. № 8(59). Вып. 1. С. 1217–1221.
126. Pye D. Practical nitriding and ferritic nitrocarburizing. *Materials Park*, ОН : ASM International, 2003. 260 p.
127. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Кольцов В.Е., Бойназаров У.Р. Влияние предварительного оксидирования на процесс кратковременного азотирования. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1993, № 3. С.31-33.
128. Лахтин Ю.М. Оксизазотирование (нитрооксидирование). *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1994, № 9. С. 2-5.
129. Almeida E. A. S., Costa C. E., Milan J. C. G. Study of the nitrided layer obtained by different nitriding methods. *Materia*.Rio De Janeiro. 2015. Vol. 20, № 2. P. 460–465.
130. Куликов А.И. Фосфатоцементация металлов и сплавов. *Вестник машиностроения*, 2001, № 2. С 40-42.
131. Куликов А.И. Самосмазывающиеся и самоупрочняющиеся кольца. *Автомобильная промышленность*, 1990, №9. С.11-12.
132. Куликов А., Ильин А. Пассивирование поршневых колец. *Автомобильный транспорт*, 1991, №9. С.48-49.

133. Куликов А.И. Пассивирование деталей ДВС. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*, 2000, №2. С.28-30.
134. Гладкова Е.Н. Теоретические основы и технология паротермического оксидирования. Изд. Саратовского политехнического института, 1973. 98 с.
135. Файншмидт Е.М., Баскаков А.П., Пумпянская Т.А., Зыряков В.Г. Скоростное парооксидирование спеченных сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2001, № 4. С.40.
136. Фролов Е.А., Комарова А.Л., Мартыненко Л.Г. Усовершенствование технологического процесса паротермического оксидирования. *Авиационно-космическая техника и технология*, № 3 Харків : Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського Харківський авіаційний інститут, 2007. С. 52–55.
137. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Комплексні дослідження при розробці технологічного процесу підвищення експлуатаційних властивостей деталей масляного шестеренного насосу. „*Інтелектуальні транспортні технології*” Матеріали I-ї міжнародної науково-технічної конференції (24-30 січня 2020р. Трускавець-Харків) Харків : УкрДУЗТ. 2020. С.116 – 117.
138. Thelning K. E. *Steel and its heat treatment* // Butterworth-Heinemann, 2013. 678 p.
139. ГОСТ 3443-87 Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. М. : Издательство стандартов, Стандартинформ, Дата введения 01.07.88. 2005. 43 с. Режим доступа : <https://docs.cntd.ru/document/1200011563>
140. ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ». Чинний від 2016-04-01. 2016. 53с.

141. ДСТУ 8833:2019 Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом Загальні технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ». Чинний від 2020–01–01. 2019. 7с.
142. Волошина Л.В. Удосконалення технологічного процесу нанесення зносостійких шарів на поверхні пар тертя. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ: Довговічність, надійність, працездатність деталей рухомого складу залізниць та спеціальної залізничної техніки*. Харків : УкрДАЗТ. 2004. Випуск 61. С.100 – 105.
143. Тимофеева Л. А. Научные и практические основы экологически чистой химико-термической обработки железоуглеродистых сплавов с использованием водных растворов солей : автореф. дис. д-ра.техн.наук:05.16.01. Киев : ИПМ. 1992. 29с.
144. Timofeeva L.A., Solntsev L.A. Improvement of the ferro-carbon alloys oxyalloying process. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, 1997, (2), Pp. 116–117.
145. Тимофеева Л.А., Проскурина Л.В., Остапчук В.Н., Тимофеев С.С. Управление условиями антифрикционности узлов трения. *Журнал: Тяжелое машиностроение*, 2002. №3. С.27 – 28.
146. Тимофеева Л.А., Проскурина Л.В., Тимофеев С.С. Повышение эксплуатационных характеристик деталей масляного насоса двигателя СМД60. *Збірник наукових праць НТУ «ХП»*. Високі технології в машинобудуванні. Харків: НТУ «ХП». 2001. №1(4). С. 263 – 265.
147. Жученко В.В., Овчаров В.П. Яковлев Ф.И., Тимофеева Л.А. А.с.№1340217А1 „Печь для паротермического оксидирования деталей”, С23С8/16, F27В5/04, Опубл. 22.02.85.
148. Кіндрачук М. В., Лабунець В. Ф., Пащенко М. І., Корбут Є. В. Трибологія. К. : Вид-во НАУ, 2009. 392 с.

149. Справочник по триботехнике/ Под общ. Ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. Т 1. Теоретические основы. М. : Машиностроение, 1989. 400с.
150. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Учебник для студентов вузов., М. : Машиностроение, 1989. 328с.
151. Комбалов В.С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. М. : Наука. 1983. 136с.
152. Ясь Д.С., Подмоков В.Б., Дяденко Н.С. Испытания на трение и износ. Методы и оборудование. К. : «Техніка», 1971, 140с.
153. Жуковец И.И. Механические испытания металлов: Учеб. Для сред. ПТУ. – 2-е изд., перераб и доп. М. : Высш. Шк., 1986. 199с.
154. Гриб В.В., Лазарев Г.Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. М. : Наука, 1968. 141с.
155. Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость : ГОСТ 30480-97. М. : Издательство стандартов. 1998. 15с.
156. Обеспечение износостойкости изделий. Методы подтверждения износостойкости. Общие требования : ГОСТ 23.225-99. Действующий от 01.07.2000. М. : Стандартиформ, 1999. 22с.
157. Когаев, В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин, М. : Высшая школа, 1991. 320с.
158. Тарасов В.В. Нові способи визначення зносостійкості покриттів. Тертя і знос. 1993. Т.14. №6. С.1087-1091.
159. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: Учебник для вузов/ Под ред. Д.Г. Громаковского. Самар. гос. техн. ун-т. Самара, 2000. 268 с.
160. Материалы конструкционные и смазочные. Методы экспериментальной оценки коэффициента трения: ГОСТ 27640-88. [Действующий от 1989-01-01]. М.: Изд. ст-ов. 1988. 22 с.

161. Приходько В. М., Петрова Л. Г., Чудина О. В. Металлофизические основы упрочняющих технологий: монография. М. : Машиностроение, 2003. 384 с.
162. Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев О.А., Синдеев В.И. Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий М. : Мир, 2004. 384 с.
163. Избранные методы исследования в металловедении/ Под ред. Хунгера Г.-Й: Пер. с нем. М. : Металлургия, 1985, 416 с.
164. Жигунов К. В. Влияние состояния поверхностного слоя материалов на процессы насыщения при химико-термической обработке. *Машиностроитель*. 2004. № 2. С. 41-43.
165. Жигунов К.В. Общие закономерности процессов диффузионного насыщения при химико-термической обработке. *Машиностроитель*. 2004. №1. С.26-27.
166. Вашуль Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов., пер. с нем. М. : Металлургия. 1988. 320с.
167. Ревенко А.Г. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ природных материалов. Новосибирск : В.О. «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. 264 с.
168. Лосев Н.Ф., Смагунова А.Н. Основы рентгеноспектрального флуоресцентного анализа. М. : Химия, 1982. 282 с.
169. Миркин Л.И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. Справочник. Москва: Машиностроение, 1979. 134 с
170. Баранова Л.В., Демина Э.Л. Металлографическое травление метал-лов и : справ. изд. М. : Металлургия, 1986. 256 с
171. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления : справочник ; пер. с нем. Н.И. Туркиной, Е.Я. Капуткина ; под ред. И.Н. Фридляндера и др. М. : Металлургия, 1988. 399 с

172. Богомолова Н. А. Практическая металлография: Учеб. для сред. ПТУ - 3-е изд., перераб. и доп. М. : Высш. шк., 1987. 240 с
173. Коваленко В. С. Металлографические реактивы. Справ. Изд. – 3-е изд., перераб. и доп. М. : Metallurgia, 1981. 120 с.
174. Antczak G., Ehrlich G. Surface diffusion: metals, metal atoms, and clusters. Cambridge University Press, 2010. 757 p.
175. Горбунов Н.С. Диффузионные покрытия на железе и стали. М. : Изд.-во академии наук СССР, 1958, 208с.
176. Shewmon P. Diffusion in solids. Springer, 2016. 245 p.
177. Кузнєцов В.Д., Пащенко В.М. Фізико – хімічні основи створення покриттів: Навчальний посібник. К. : НМЦВО, 1999. 176 с.
178. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнєцов В.Д., Корж В.М. Інженерія поверхні. К. : НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2007. 558с.
179. Кузнєцов В.Д., Пащенко В.Д., Ющенко К.А., Борисов Ю.С. Фізико – хімічні основи інженерії поверхні: Навчальний посібник. К. : ВІПОЛ, 2005. 372с.
180. Сидоренко С.И., Пащенко В.Н., Кузнєцов В.Д. Матеріалознавчі основи інженерії поверхні. К. : Видавництво «Наукова думка», 2001. 230с.
181. Дроздов Ю. Н., Усов С. В. Использование комбинированных технологических методов для повышения износостойкости деталей машин. Вестн. машиностр. 1985. №10. С. 9–11
182. Мерер Х. Диффузия в твердых телах. Пер. с англ. – Москва : Интеллект, 2011. 536 с.
183. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах: учеб. Пособие. Москва : Metallurgia, 1978. 248 с
184. Лариков Л. Н., Исайчев В. И. Диффузия в металлах и сплавах: справочник. Киев : Наукова думка, 1987. 510 с.

185. Фирстов С. А., Саржан Г. Ф. О температурной зависимости коэффициента диффузии. *Электронная микроскопия и прочность материалов*: Сб. науч. тр. К. : ІПМ НАН України, 2014. Вип.20. С. 71–75.
186. Огнеупорные изделия, материалы и сырье : справочник / Под ред. д.т.н. проф. Каркалита А.К., М. : Металлургия, 1991. 415с.
187. Стецько А. Зміцнення деталей машин комплексним методом. *Комп'ютерні технології друкарства*. 2015. № 33. С. 125–130.
188. Лавров А.В., Гундарина З.И. Поведение твердых растворов алюмохромофосфатного связующего при термообработке. *Изв. АН СССР. Сер. Неорганич. материалы*. 1978, т.13, №11, с.2085 – 2089.
189. Проскурина Л.В., Тимофеева Л.А. Повышение работоспособности масляных шестеренных насосов тракторных дизелів. *Инженерия поверхности и ренновация изделий. Материалы 1-й Международной научно-технической конференции* (г.Феодосия, 29-31 мая 2001г). Киев. 2001. с.152 – 153.
190. Проскурина Л.В. Влияние технологических параметров химико-термической обработки на износостойкость пары трения шестерня - корпус масляного насоса. *Современные проблемы подготовки производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении. Материалы 3-го Международного научно-технического семинара* (27-29 февраля 2003г., г.Свалява, Карпаты). Киев. 2003. С.126 – 128.
191. Проскурина Л.В., Тимофеева Л.А. Повышение надежности работы масляных шестеренных насосов. *Инженерия поверхности и ренновация изделий. Материалы 3-й Международной научно-технической конференции* (27-29 мая 2003г., г.Ялта). Киев. 2003. С.201 – 202.
192. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Підвищення зносостійкості пар тертя нанесенням покриттів із водних розчинів солей. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, Харків : УкрДАЗТ. 2011. Випуск 127. С.131 – 136.



193. Штерензон В. А. Моделирование технологических процессов. Екатеринбург : Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. 66 с.
194. Мамонова М. В., Прудников В. В., Прудникова И. А. Физика поверхности. Теоретические методы и модели и экспериментальные методы. М. : Физматлит. 2011. 400 с.
195. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ : 3-е изд. перераб. и доп. Москва: Вильямс, 2007. 912с.
196. S. Ananth, J. Udaya Prakash, T. V. Moorthy, P. Hariharan. Optimization of Wear Parameters for Grey Cast Iron under Different Conditions using Grey Relational Analysis. *Materials Today: Proceedings*, 2018. Vol. 5, Iss. 2, Part 2. P. 7346-7354.
197. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Визначення технологічних параметрів процесу обробки в залежності від експлуатаційних властивостей покриття. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ «ХП». 2012. №66. С. 20 – 23.
198. Волошина Л.В. Визначення та оптимізація параметрів нової технології залежно від заданих властивостей покриття. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, Харків : УкрДАЗТ. 2012. Випуск 134. С. 224 – 229.
199. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В., Гордієнко П.М. Аналіз технологічних параметрів процесу нанесення зносостійкого покриття. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, Харків : УкрДУЗТ. 2017. Випуск 170. С.13 – 19. (НБД *Index Copernicus*).
200. Глинка Н. Л. Общая химия. 30-е изд. М. : Интеграл-Пресс, 2003. 728 с.
201. Волошина Л. В. Результати металографічного дослідження покриття із водного розчину алюмохромфосфатної солі. «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» Тези доповідей 79-тої міжнародної науково-технічної конференції.(Харків, 25-27 квіт.

- 2017р.) Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Харків : УкрДУЗТ, 2017, Вип. 169 (додаток), С. 138 – 140.
202. Тимофеев С.С., Волошина Л.В., Воскобойников Д.Г. Формування покриттів багатофункціонального призначення. *Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 19-го Международного научно-технического семинара, (18–22 февраля 2019г., г. Кошице, Slovak Republic)*. Киев : АТМ України, 2019. С. 208 – 210.
203. Сторожук Н. В., Гусак А. М. Конкуренция эффектов Френкеля и Киркендалла при взаимной диффузии. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2014. Т. 36, № 3. С. 367—374.
204. Волошина Л. В. Ресурсозберігаюча технологія нанесення покриттів. *«Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. Тези доповідей 75-ї міжнародної науково-технічної конференції. Збірник наукових праць УкрДАЗТ. Харків : УкрДАЗТ, 2013, Вип. 136, С. 349.
205. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Підвищення якості пар тертя нанесенням зносостійких покриттів. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика*. Материалы 11-й Международной научно-практической конференции (27-29 сентября 2011г., г.Ялта, Крым). Киев. 2011. С.151 – 153.
206. Волошина Л. В. До питання дослідження впливу складу покриття на триботехнічні властивості залізвуглецевих сплавів. *«Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. Тези доповідей 80-ї міжнародної науково-технічної конференції. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Харків : УкрДУЗТ, 2018, Вип. 177, С. 93.
207. Кононюк А. Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента) в 4-х кн. К.2. К. : 2011. 452с.

208. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Підвищення якості, працездатності масляних шестеренних насосів ДВС. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика*: Материалы 18-й Международной научно-практической конференции (03–07 сентября 2018 г., г. Одесса), Киев : АТМ України, 2018. С.108 – 110.
209. Волошина Л.В. Ресурсозберігаюча технологія формування зносостійких покриттів на деталях рухомого складу. „*Вагони нового покоління: із ХХ в ХХІ сторіччя*” Тези доповідей II-ї Всеукраїнської конференції. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Харків : УкрДУЗТ, 2019, Вип. 184(додаток), С. 42 – 43.
210. Венцель Є.С., Жалкін С.Г., Кравець А.М., Садієв С.А. Підвищення протизношувальних властивостей дизельного палива гідродинамічним диспергуванням. *Підвищення ефективності технології і техніки для виконання вантажно – розвантажувальних, будівельних та колійних робіт на залізничному транспорті*: Зб. наук. праць. Харків : УкрДАЗТ, 2002. Вип. 50. С. 88–94.
211. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: Справочник. М. : Машиностроение, 1986. 224с.
212. Чумаков П.В., Мартынов А.В., Коломейченко А.В. Оценка технического состояния круглых шестеренных гидронасосов навесных гидросистем тракторов – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.426-447. *Инженерные технологии и системы*. 2020. Т. 30, № 3. С. 426–447.
213. Кулешков Ю.В., Матвієнко О.О., Руденко Т.В. Методика стендових випробувань шестеренного насоса. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»*. Кіровоград, КНТУ 2011. № 24 (ч.ІІ). С. 97–110.

214. Спосіб хіміко-термічної обробки деталей із металів та сплавів /Тимофєєва Л.А., Проскуріна Л.В., Тимофєєв С.С., Федченко І.І. Патент України на винахід №45841А: В22F3/24.. Заявник та патентовласник УкрДАЗТ. №2001075170; заявл.19.07.2001; опубл. 15.04.2002, Бюл.№4.
215. Комарова Г.Л., Волошина Л.В. Вплив параметрів обробки на якість формування захисних покриттів. *"Інженерія поверхні і реновація виробів"* Матеріали 19-ї міжнародної науково-технічної конференції (20-24 травня 2019р., м. Свалява, Закарпатська обл.) Київ : АТМ України, 2019, С. 75 – 77.
216. Тимофєєва Л.А., Устенко О.В., Цап О.І., Волошина Л.В. Підвищення експлуатаційних показників фрикційних клинів шляхом формування покриттів зі спеціальними властивостями. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, Харків : УкрДУЗТ. 2019. Випуск 185. с.88-95. (НБД Index Copernicus)
217. Балака Е.И., Бойко И.Г., Дикань В.Л., Ковалев Д.И. Оценка экономической эффективности инвестиций в мероприятия научно – технического прогресса: Учебно-методическое пособие / Под ред. В.Л. Диканя. Харьков : Основа, 1995. 76 с.

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Тимофеева Л.А., Проскурина Л.В., Тимофеев С.С. Повышение эксплуатационных характеристик деталей масляного насоса двигателя СМД 60. *Збірник наукових праць НТУ «ХП».* Високі технології в машинобудуванні. Харків: НТУ «ХП». 2001. №1(4). С. 263 – 265.

2. Патент України на винахід №45841А: МПК В22F3/24. Спосіб хіміко-термічної обробки деталей із металів та сплавів / Тимофеева Л.А., Проскурина Л.В., Тимофеев С.С., Федченко І.І. Заявник та патентовласник УкрДАЗТ. №2001075170; заявл.19.07.2001; опубл. 15.04.2002, Бюл.№4.

3. Волошина Л.В. Удосконалення технологічного процесу нанесення зносостійких шарів на поверхні пар тертя. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ: Довговічність, надійність, працездатність деталей рухомого складу залізниць та спеціальної залізничної техніки.* Харків : УкрДАЗТ. 2004. Випуск 61. С.100 – 105.

4. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Підвищення зносостійкості пар тертя нанесенням покриттів із водних розчинів солей. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ,* Харків : УкрДАЗТ. 2011. Випуск 127. С.131 – 136.

5. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Визначення технологічних параметрів процесу обробки в залежності від експлуатаційних властивостей покриття. *Вісник НТУ «ХП».* Серія нові рішення в сучасних технологіях. Харків : НТУ «ХП». 2012. №66. С. 20 – 23.

6. Волошина Л.В. Визначення та оптимізація параметрів нової технології залежно від заданих властивостей покриття. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ,* Харків : УкрДАЗТ. 2012. Випуск 134. С. 224 – 229.

7. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В., Гордієнко П.М. Аналіз технологічних параметрів процесу нанесення зносостійкого покриття. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ,* Харків : УкрДУЗТ. 2017. Випуск 170. С.13 – 19. (НБД Index Copernicus).

Публікації у виданнях інших держав:

8. Тимофеева Л.А., Проскурина Л.В., Остапчук В.Н., Тимофеев С.С. Управление условиями антифрикционности узлов трения. *Журнал: Тяжелое машиностроение,* 2002. №3. С.27 – 28. (індексується в базі Scopus)

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Проскурина Л.В., Тимофеева Л.А. Повышение надежности работы масляных шестеренных насосов. *Инженерия поверхности и ренновация изделий. Материалы 3-й Международной научно-технической конференции.* Киев. 2003. С.201 – 202.

10. Проскурина Л.В. Влияние технологических параметров химико-термической обработки на износостойкость пары трения шестерня - корпус масляного насоса. *Современные проблемы подготовки производства, обработки и сборки в машиностроении и приборостроении. Материалы 3-го Международного научно-технического семинара.* Киев. 2003. С.126 – 128.

11. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Підвищення якості пар тертя нанесенням зносостійких покриттів. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика. Материалы 11-й Международной научно-практической конференции.* Киев. 2011. С.151 – 153.

12. Тимофеева Л.А., Федченко І.І., Волошина Л.В. Дослідження впливу поверхневого шару на триботехнічні властивості залізвуглецевих сплавів. *Матеріали 12-ї міжнародної науково-технічної конференції "Інженерія поверхні і реновація виробів" 04-08 червня 2012р.*, м. Ялта, Крим. Київ : АТМ України, 2012. С. 294 – 297.

13. Волошина Л. В. Ресурсозберігаюча технологія нанесення покриттів. *«Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. Тези доповідей 75-ї міжнародної науково-технічної конференції. Збірник наукових праць УкрДАЗТ. Харків : УкрДАЗТ, 2013, Вип. 136, С. 349.

14. Волошина Л. В. Результати металографічного дослідження покриття із водного розчину алюмохромфосфатної солі. *Тези доп. 79-та міжнародна науково-технічна конференція «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. Харків, 25-27 квіт. 2017р. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Харків : УкрДУЗТ, 2017, Вип. 169 (додаток), С. 138 – 140.

15. Волошина Л. В. До питання дослідження впливу складу покриття на триботехнічні властивості залізвуглецевих сплавів. *Тези доповідей 80-ї міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті»*. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Харків : УкрДУЗТ, 2018, Вип. 177, С. 93.

16. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Підвищення якості, працездатності масляних шестеренних насосів ДВС. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 18-й Международной научно-практической конференции, 03–07 сентября 2018 г., г. Одесса*. Киев : АТМ Украины, 2018. С.108 – 110.

17. Волошина Л.В. Ресурсозберігаюча технологія формування зносостійких покриттів на деталях рухомого складу. *Тези доповідей II-ї Всеукраїнської конференції „Вагони нового покоління: із ХХ в ХХІ сторіччя”* Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Харків : УкрДУЗТ, 2019, Вип. 184 (додаток), С. 42 – 43.

18. Комарова Г.Л., Волошина Л.В. Вплив параметрів обробки на якість формування захисних покриттів. *"Інженерія поверхні і реновація виробів"* Матеріали 19-ї міжнародної науково-технічної конференції (20-24 травня 2019р., м. Свалява, Закарпатська обл.) Київ : АТМ України, 2019, С. 75 – 77.

19. Тимофеева Л.А., Волошина Л.В. Комплексні дослідження при розробці технологічного процесу підвищення експлуатаційних властивостей деталей масляного шестеренного насосу. *„Інтелектуальні транспортні технології”* Матеріали I-ї міжнародної науково-технічної конференції, 24-30 січня 2020р. Трускавець-Харків : УкрДУЗТ. 2020. С.116 – 117.

Додаткові праці, які відображають результати дисертації:

20. Тимофеев С.С., Волошина Л.В., Воскобойников Д.Г. Формування покриттів багатофункціонального призначення. *Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте: Материалы 19-го Международного научно-технического семинара, 18–22 ф-ля 2019г. г. Кошице, Slovak Republic*. Киев : АТМ Украины, 2019. С. 208 – 210.

21. Тимофеева Л.А., Устенко О.В., Цап О.І., Волошина Л.В. Підвищення експлуатаційних показників фрикційних клинів шляхом формування покриттів зі спеціальними властивостями. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, Харків : УкрДУЗТ. 2019. Випуск 185. С.88 – 95. (НБД Index Copernicus)

22. Волошина Л.В., Цап О.І. Дослідження впливу захисних покриттів на експлуатаційні показники фрикційних клинів гасників коливань візків вантажних вагонів. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 20-й Международной научно-практической конференции, 07–11 вересня 2020 р., м. Одеса*. Київ : АТМ України, 2020. С.28 – 30.

# ДОДАТОК Б

## ПАТЕНТ НА ВИНАХІД



УКРАЇНА

(11) 45841

(19) (UA)

(51) 7 B22F3/24,  
C23C8/28МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ  
УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

### ПАТЕНТ на винахід

видано відповідно до Закону України  
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного департаменту  
інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) 2001075170  
(22) 19.07.2001  
(24) 15.04.2004  
(46) 15.04.2004. Бюл. № 4

(72) Тимофесва Лариса Андріївна, Проскуріна Людмила Володимирівна, Федченко  
Ірина Іванівна, Тимофеса Сергій Сергійович  
(73) Українська державна академія залізничного транспорту

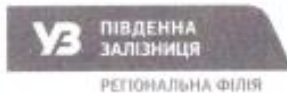
(54) СПОСІБ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ІЗ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ





## ДОДАТОК В

### АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ



АКЦІОНЕРНЕ ТОВ,  
«УКРАЇНСЬКА ЗАЛ.  
АТ «УКРЗАЛІЗН»

**Виробничий підрозділ «Вагонне депо Харків-Сортувальний»**

uz.gov.ua

вул. Беркоса, 2-Б, м. Харків, 61067, тел. (+380 57) 724 6130,  
факс (+380 57) 7242534

*08.09.2017*

*В. ВОСКОБОЙНИКОВ*

№ *01-07/1317*

#### Акт

провпровадження результатів дисертаційної роботи  
Волошиної Людмили Володимирівни  
на тему: «Підвищення зносостійкості масляних шестеренних насосів  
тракторних дизельних двигунів»  
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 05.02.01 Матеріалознавство

Акт складено в тому, що згідно комплексу наукових та експлуатаційних досліджень, які проводилися науковцями Українського державного університету залізничного транспорту та співробітниками служби вагонного господарства регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця» щодо розробленої інноваційної технології підвищення зносостійкості масляних шестеренних насосів тракторних дизельних двигунів, дисертаційна робота Волошиної Л.В. є частиною вище вказаних досліджень.

Загальна оцінка розробок позитивна. За результатами випробувань визначено необхідність та доцільність в подальшому використанні технології формування зносостійких покриттів нанесенням із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання на деталях транспортного призначення.

Результати наукового дослідження Волошиної Л.В. щодо підвищення зносостійкості та ресурсу деталей, які працюють в умовах тертя зношування, нанесенням покриття оксидуванням із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання будуть використані при розробці технологічних процесів роботи підприємства.

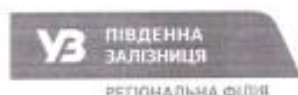
Начальник виробничого підрозділу  
«Вагонне депо Харків-Сортувальний»  
регіональної філії «Південна залізниця»  
АТ «Укрзалізниця»



Дмитро ВОСКОБОЙНИКОВ

Головний технолог виробничого підрозділу  
«Вагонне депо Харків-Сортувальний»  
регіональної філії «Південна залізниця»  
АТ «Укрзалізниця»

*Катерина ГРЕБЕНЮКОВА*



АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
«УКРАЇНСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»  
АТ «УКРЗАЛІЗНИЦЯ»

## СЛУЖБА ПРИМІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

uz.gov.ua

вул. Саєна Котляра, 7, м. Харків, 61052, тел.: (+380 57) 724 39 70

**Акт**  
про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Волошиної Людмили Володимирівни  
на тему: «Підвищення зносостійкості масляних шестеренних насосів  
тракторних дизельних двигунів»  
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 05.02.01 Матеріалознавство

На підприємстві була проведена перевірка розробленої технології підвищення зносостійкості за рахунок нанесення покриттів із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання. По розробленій технології були оброблені деталі масляних шестеренних насосів дизельних двигунів, що пройшли стендові випробування.

Результати випробувань показали що розроблена технологія нанесення покриттів підвищує зносостійкість деталей в 2,5-3 рази порівняно з деталями за базовою технологією.

Розроблена технологія може бути використана в подальшому для підвищення зносостійкості та збільшення ресурсу інших деталей транспортного призначення.

Рекомендувати розроблену Волошиною Л.В. технологію нанесення покриття окиселюванням із водного розчину алюмохромфосфатного з'єднання для зміцнення інших деталей транспортного призначення, які працюють в умовах тертя та зношування.



Головний інженер структурного підрозділу  
«Служба приміських пасажирських перевезень  
регіональної філії «Південна залізниця»  
АТ «Укрзалізниця»»

Сергій ГАХОВ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Проректор з науково-педагогічної роботи  
Українського державного університету  
залізничного транспорту, доцент  
Артур КАГРАМАНЯН

2021 р.

Акт

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Волошиної Людмили Володимирівни  
на тему: «Підвищення зносостійкості масляних шестеренних насосів  
тракторних дизельних двигунів»  
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за  
спеціальністю 05.02.01 Матеріалознавство

Основні результати науково-дослідної дисертаційної роботи Волошиної Людмили Володимирівни на тему «Підвищення зносостійкості масляних шестеренних насосів тракторних дизельних двигунів» впроваджені в навчальний процес кафедри «Інженерія вагонів та якість продукції» Українського державного університету залізничного транспорту і використовуються при читанні лекцій, проведенні лабораторних і практичних занять по дисциплінам «Матеріалознавство», «Технологія конструкційних матеріалів», «Матеріалознавство та технологія матеріалів», «Ресурсозберігаючі технології», «Інноваційні ресурсозберігаючі технології», «Організація технологічних процесів» для студентів механіко-енергетичного факультету спеціальності 273 «Залізничний транспорт» освітніх програм: Локомотиви та локомотивне господарство, Високошвидкісний рухомий склад, Автомотриси, автодрезини та спеціальні машини залізничного транспорту, Вагони та вагонне господарство, Мехатроніка у вагонобудуванні, Вагони та транспортна інженерія, спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» освітня програма бакалавр Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка та магістр Якість, стандартизація та сертифікація, 144 «Теплоенергетика» освітня програма Теплоенергетика, для студентів будівельного факультету спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітня програма Організація паливно-мастильного господарства підприємств та 133 «Галузеве машинобудування» освітні програми: Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, колійні машини та обладнання, Будівельні, колійні, гірничі та нафтогазопромислові машини.

Декан механіко-енергетичного факультету

УкрДУЗТ, д.т.н., професор

Олександр УСТЕНКО