

Державне некомерційне підприємство  
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Леусенко Дар`я Володимирівна

УДК.621.831.004.55

## ДИСЕРТАЦІЯ

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПІДВИЩЕННЯ ЗМАЩУВАЛЬНОЇ ДІЇ  
МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИМИ  
ПРИСАДКАМИ В УМОВАХ РОБОТИ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ.

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

---

Дар`я ЛЕУСЕНКО

Науковий керівник: Кіндрачук Мирослав Васильович  
член-кореспондент НАН України,  
доктор технічних наук, професор

Київ -2025

## АНОТАЦІЯ

Леусенко Д.В. Фізико-хімічні процеси підвищення змащувальної дії мастильних матеріалів з багатофункціональними присадками в умовах роботи зубчастих передач. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» за спеціальністю G9 – Прикладна механіка. – Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут» Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі дослідженню фізико-хімічних процесів підвищення змащувальної дії мастильних матеріалів з багатофункціональними присадками в умовах роботи зубчастих передач.

Зміст роботи складається з чотирьох розділів, у яких викладено та обґрунтовано основні результати дисертації.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, описано методи дослідження, надана інформація про наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** за результатами проведеного аналізу літературних джерел із дослідження проблем змащувальної дії мастильних матеріалів з багатофункціональними присадками в умовах роботи зубчастих передач, визначені шляхи їх вирішення. Для оцінки змащувальної дії мастильних матеріалів з багатофункціональними присадками в умовах роботи зубчастих передач обґрунтовано доцільність вимірювання товщини мастильного шару методом вимірювання падіння напруги в режимі нормального жеврюючого розряду (метод ВПН у режимі НЖР).

Виконаний огляд літературних джерел в області теорії й практики формування змащувальних шарів в локальному контакті зубчастих передач дозволив виділити основні напрями, що спрямовані на :

- розробку критеріїв оцінки ефективності змащувальної дії мастильних матеріалів з фторвуглецевими присадками в локальному контакті при стаціонарних та нестаціонарних режимах роботи зубчастих передач;
- оцінку впливу присадок та домішок до мастильних матеріалів на припрацювання пар терття та формування змащувальних шарів;
- розробку рекомендацій правильного підбору редукторних олив за рахунок підвищення ефективності їх змащувальної дії;
- дослідження механізму змащувальної дії фторвуглецевих присадок до мастильних матеріалів та їх впливу на антифрикційні та протизносні властивості пар терття з локальним контактом;
- дослідження фізико-хімічних процесів підвищення змащувальної дії мастильних матеріалів з багатофункціональними присадками в умовах роботи зубчастих передач.

Виходячи з результатів аналізу літератури була сформульована мета і задачі досліджень.

**У другому розділі** викладено загальну методологію проведення науково-експериментальних досліджень, що пропонує використання комплексу методів і методик. В якості основного методу оцінки ефективності змащувальної дії мастильних матеріалів з присадками використовували метод вимірювання товщини мастильного шару методом вимірювання падіння напруги в режимі нормального жеврюючого розряду (метод ВПН у режимі НЖР), розроблений Райко М.В.. Для досягнення мети та вирішення задач дослідження в роботі використовувались розроблені при участі автора методики: оцінки ефективності масляної дії олив з присадками при стаціонарних та нестаціонарних режимах терття, оцінки складових змащувального шару в локальному контакті зубчастих передач, впливу карбонофторидних присадок на показники якості змащувальної дії мастильних матеріалів в процесі припрацювання зубчастих передач.

Розроблені методики оцінки триботехнічних показників мастильних матеріалів на етапі лабораторних досліджень дозволяють аналізувати спектр необхідних експлуатаційних параметрів трибоконтакту. Проведення оцінки якості

мастильних матеріалів за антифрикційними, змащувальними, протизношувальними показниками з урахуванням типу базової основи, наявності функціональних присадок дозволяє встановити взаємозв'язок між трибологічними показниками контакту, складом мастильного матеріалу та активованими поверхневими шарами контактних поверхонь та визначити механізми структурної пристосованості трибосистеми та оптимізувати вибір редукторних олів за трибологічними та фізико-хімічними характеристиками.

Мікроструктуру поверхонь тертя після трибологічних випробувань вивчали методами металографії, оптичної та електронної растрової мікроскопії. Тонкоплівкову будову поверхневих шарів досліджували методами мікрозондової оже-електронної спектроскопії та ступінчастого травлювання характерних мікроділянок поверхонь тертя йонами аргону (прилад JEOL JAMP-10S).

Основні результати дослідження ефективності змащувальної дії отримані на модернізованій машині СМЦ-2 (обладнаної системою вимірювання товщини мастильного шару, моменту тертя, плавною зміною частоти обертів, системою пуск-зупинка), деякі результати отримані на стандартних машинах тертя типу 2070 СМТ-1, МІ-1М, 4КМТ-1. Для експериментального підтвердження технології поверхневого зміцнення зубчастих коліс та підшипників в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту використовувався спеціальний стенд (на базі токарного верстата), обладнаний віброкамерою.

Конкретне обладнання (розділ 2) та умови експерименту наведені в розділі 3 та 4, в залежності від цілей та задач дослідження.

**У третьому розділі** наведено результати дослідження змащувальної дії мастильних матеріалів з поверхнево та хімічно активними присадками в умовах роботи зубчастих передач. У відповідності з задачами дослідження зроблений акцент на дослідження процесів управління якістю та експлуатаційними властивостями граничних змащувальних шарів. В розділі наведено результати дослідження впливу багатофункціональних поверхнево та хімічно активних присадок до мастильних матеріалів на:

- змащувальний шар в локальному контакті зубчастих передач;

- якість припрацювання зубчастих передач;
- втомне зношування і якість поверхонь тертя зубчастих передач;
- несучу спроможність змащувального шару редукторних масел з присадками;
- процеси формування мастильного шару при терті сталі по несталевим металевим поверхням.

Також в розділі 3 розглянуті механізми дії поверхнево та хімічно активних присадок, розроблені рекомендації для вибору редукторних олів з присадками.

**Четвертий розділ** присвячений дослідженню фізико-хімічних процесів еволюції граничних змащувальних шарів, сформованих мастильними матеріалами з карбонофторидними присадками та їх вплив на антифрикційні та протизносні властивості пар тертя з локальним контактом.

Запропонована адсорбційно-хімічна модель механізму змащувальної дії карбонофторидних присадок до мастильних матеріалів, яка одночасно враховує особливості формування граничних змащувальних шарів та їх хімічну активність по відношенню до поверхні пар тертя при стаціонарних та нестаціонарних режимах роботи зубчастих передач.

В розділі 4 наведені результати дослідження поверхневих шарів трибосполучень з використанням сучасних технологій поверхневого зміцнення та модифікування, а саме:

- особливості структури та властивості поверхневих шарів після граничного режиму мащення;
- аналіз хімічного складу трибоплівок утворених масляним середовищем з карбонофторидними присадками;
- технології молекулярного армування поверхонь тертя зубчастих коліс та підшипників з використанням технологічних рідин з карбонофторидними присадками.

Результати випробувань реальних вузлів тертя аерокосмічної техніки утворенням на поверхнях тертя фторвмісних нано - мікро - розмірних антифрикційних протизносних структур показали, що інтенсивність зносу при

реалізації технології утворення фторвмісних захисних плівок на поверхнях тертя зменшується не менше ніж на 25-30%; число циклів навантаження до настання викришування в підшипниках зростає в 1,2-1,5 рази; навантажувальна здатність мастильного шару підвищується на 35...40%; навантаження заїдання збільшується до 2 разів.

Розроблені методики оцінки ефективності застосування мастильних матеріалів з присадками для зубчастих передач, працюючих в різних режимах роботи (від припрацювання до екстремальних), використовуються при проведенні наукових досліджень, виборі складу, структури та технологій нанесення зносостійких покриттів і удосконаленні мастильних матеріалів різного експлуатаційного призначення.

**Ключові слова:** товщина мастильного шару, поверхнево та хімічно активні присадки, карбонофторидні присадки, інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, адсорбційно-хімічна модель механізму змащувальної дії, стаціонарні та нестаціонарні процеси, технології поверхневого зміцнення та модифікування, формування граничних змащувальних шарів, тертя ковзання гідродинамічні втрати потужності, зачеплення, авіаційні масла, антифрикційні властивості, режим змащування, мікротвердість, методика, змащувальний шар, знос, ефективна в'язкість, визначення експериментальних індикаторів зносостійкості, характеристики зносостійкості, втомна довговічність, підшипникові вузли, еластогідродинамічне (ЕГД) змащування, мастильний матеріал (мастило), реологічні та триботехнічні властивості, масло, температура, в'язкість, олива, підшипники кочення, пара тертя.

## SUMMARY

Leusenko D.V. Physico-chemical processes of increasing the lubricating effect of lubricants with multifunctional additives under the conditions of operation of gears. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge G "Engineering, Production and Construction" in the specialty G9 - Applied Mechanics. - State Non-Profit Enterprise "State University "Kyiv Aviation Institute" Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem of researching the physico-chemical processes of increasing the lubricating effect of lubricants with multifunctional additives under the conditions of operation of gears.

The content of the work consists of four chapters, in which the main results of the dissertation are presented and substantiated.

**The introduction** substantiates the relevance of the dissertation topic, formulates the purpose and tasks of the research, describes the research methods, provides information about scientific novelty and the practical significance of the obtained results.

**In the first chapter**, based on the results of the analysis of literary sources on the study of the problems of the lubricating effect of lubricants with multifunctional additives in the conditions of operation of gears, the ways of their solution are determined. In order to evaluate the lubricating action of lubricants with multifunctional additives under the operating conditions of gears, the expediency of measuring the thickness of the lubricating layer by measuring the voltage drop in the normal glow discharge mode (VPN method in the NTR mode) is substantiated.

The review of literary sources in the field of theory and practice of the formation of lubricating layers in the local contact of gears made it possible to identify the main directions aimed at:

the development of criteria for evaluating the effectiveness of the lubricating action of lubricants in local contact during stationary and non-stationary modes of operation of gears;

- assessment of the influence of additives and additives to lubricants on the running-in of friction pairs and the formation of lubricating layers;
- development of recommendations for the correct selection of gear oils by increasing the efficiency of their lubricating action;
- study of the mechanism of the lubricating effect of fluorocarbon additives to lubricants and their effect on the antifriction and antiwear properties of friction pairs with local contact;
- research of physico-chemical processes of increasing the lubricating effect of lubricants with multifunctional additives under the conditions of operation of gears.

Based on the results of the literature analysis, the goal and objectives of the research were formulated.

**The second chapter** describes the general methodology of conducting scientific and experimental research, which suggests the use of a complex of methods and techniques. As the main method of evaluating the effectiveness of the lubricating action of lubricants with additives, the method of measuring the thickness of the lubricating layer by measuring the voltage drop in the normal glow discharge mode (VPN method in the NTR mode), developed by M. V. Raiko, was used to achieve the goal and solve the research problems in The work used methods developed with the participation of the author: evaluation of the effectiveness of the oil action of oils with additives in stationary and non-stationary modes of friction, the influence of carbon fluoride additives on the quality indicators of the lubricating action of lubricants during the running-in process of gears, evaluation of the components of the lubricant layer in the local contact of gears .

The developed methods for evaluating the tribotechnical indicators of lubricants at the stage of laboratory research allow analyzing the spectrum of the necessary operating parameters of the tribocontact. Assessing the quality of lubricants based on anti-friction, lubrication, anti-wear indicators, taking into account the type of base, the presence of functional additives, allows to establish the relationship between the tribological indicators of contact, the composition of the lubricant and the activated surface layers of the contact surfaces, and to determine the mechanisms of the structural adaptability of the

tribosystem and to optimize the choice of gearboxes oil according to tribological and physicochemical characteristics.

The microstructure of friction surfaces after tribological tests was studied by methods of metallography, optical and electron raster microscopy. The thin-film structure of the surface layers was studied by the methods of microprobe Auger-electron spectroscopy and stepwise sputtering of characteristic microareas of friction surfaces with argon ions (JEOL JAMP-10S device).

The main results of the study of the effectiveness of the lubricating action were obtained on a modernized SMT-2 machine (equipped with a system for measuring the thickness of the lubricating layer, the friction moment, a smooth change in the frequency of rotation, a start-stop system), some results were obtained on standard friction machines of the type 2070 SMT-1, MI- 1M, 4KMT-1.

Specific equipment and conditions of the experiment are given in Chapters 3 and 4, depending on the goals and objectives of the study.

**In the third chapter**, the results of the study of the lubricating effect of lubricants with surface and chemically active additives in the working conditions of gears are presented. In accordance with the objectives of the research, emphasis is placed on the research of quality control processes and operational properties of boundary lubricating layers. In the section the results of the study of the influence of multifunctional surface and chemically active additives to lubricants on:

- lubricating layer in the local contact of gears;
- quality of running-in gears;
- fatigue wear and the quality of the friction surfaces of gears;
- bearing capacity of the lubricating layer of gear oils with additives;
- processes of formation of a lubricating layer during friction of steel on non-steel metal surfaces.

Also, in chapter 3, the changes in the properties of the boundary lubricating layers in the local contact of gears during operation were investigated, namely: the change in the lubricating effect of mineral oils under the influence of external electric fields; change

in surface hardness in the contact zone of machine parts; change in the rheological characteristics of the lubricating layer.

The mechanisms of action of surface and chemically active additives are considered, recommendations for the selection of gear oils with additives are developed.

**The fourth chapter** is devoted to the study of the physico-chemical processes of the evolution of boundary lubricating layers formed by lubricants with carbon fluoride additives and their influence on the anti-friction and anti-wear properties of friction pairs with local contact.

In order to control the process of lubricating action and the operational properties of boundary lubricating layers, the interrelationship of the factors determining the course of the process was revealed and presented in quantitative form - in the form of a mathematical model

An adsorption-chemical model of the mechanism of the lubricating action of carbonofluoride additives to lubricants is proposed, which simultaneously takes into account the peculiarities of the formation of boundary lubricating layers and their chemical activity in relation to the surface of the friction pairs in stationary and non-stationary modes of operation of gears.

Chapter 4 presents the results of the research of the surface layers of tribocompounds using modern technologies of surface strengthening and modification, namely:

- features of the structure and properties of the surface layers of the coating after the limit mode of lubrication;
- influence of metal matrix doping on antifriction properties of eutectic coatings;
- technologies of molecular reinforcement of the friction surfaces of gear wheels and bearings using process fluids with carbon fluoride additives.

The results of tests of real friction nodes of aerospace equipment by the formation on the friction surfaces of fluorine-containing nano - micro - size anti-friction anti-wear structures showed that the intensity of wear during the implementation of the technology of formation of fluorine-containing protective films on the friction surfaces is reduced by at least 25-30%; the number of load cycles before the occurrence of cracking in the

bearings increases by 1.2-1.5 times; the load capacity of the lubricating layer increases by 35...40%; the jamming load increases up to 2 times.

The developed methods of evaluating the effectiveness of the use of lubricants with additives for gears operating in various modes of operation (from run-in to extreme) are used in conducting scientific research, choosing the composition, structure and technologies of applying wear-resistant coatings and improving lubricants for various operational purposes at enterprises and institutions of Ukraine.

**Keywords:** thickness of the lubricating layer, surface and chemically active additives, carbon fluoride additives, wear intensity, coefficient of friction, adsorption-chemical model of the mechanism of lubricating action, stationary and non-stationary processes, technologies of surface strengthening and modification, formation of boundary lubricating layers.

## Список опублікованих праць за темою дисертації

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

1. **Леусенко Д. В.** Вплив фторвуглецевих сполук на антифрикційні та протизносні властивості трибосполучень *Проблеми тертя та зношування*, 2024. №1(102),84-90. ISSN: 0370-2197. DOI: [10.18372/0370-2197.1\(102\).18432](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(102).18432)

2. Мельник В.Б., **Леусенко Д.В.**, Мамай Б.М. Оцінка ефективності масляної дії олів з карбон фторидними присадками при нестационарних режимах тертя *Проблеми тертя та зношування*, 2023. No. 4(101). С. 29-41. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(101\).18077](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18077)

*Особистий внесок Мельник В.Б.: постановка завдання дослідження*  
*Особистий внесок Мамай Б.М.: розрахунок за інтегрованим показником ефективності масляної дії.*

*Особистий внесок Леусенко Д.В.: розроблено програму, визначено області найбільш ефективного використання олів з КФ-присадками.*

3. Кіндрачук М.В., Мельник В.Б., **Леусенко Д.В.**, Герасимов В.О. Вибір редукторних олів за фізико-хімічними характеристиками *Проблеми тертя та зношування*, 2023. No 3(100). С. 30-39. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17892](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17892).

*Особистий внесок Кіндрачук М.В. постановка завдання дослідження*

*Особистий внесок Мельник В.Б. аналіз мастильних матеріалів за стандартними фізико-хімічними характеристиками.*

*Особистий внесок Герасимов В.О. проведення порівняльного аналізу ефективності роботи синтетичних редукторних олів.*

*Особистий внесок Леусенко Д.В. проведення порівняльного аналізу ефективності роботи мінеральних олів.*

4. Кіндрачук М.В., Харченко В.В., Гуменюк І. А , **Леусенко Д.В.** Вплив легування металевої матриці на антифрикційні властивості евтектичних покриттів *Проблеми тертя та зношування*, 2023. No 1(98). С. 63-69 DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(98\).17360](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17360).

*Особистий внесок Кіндрачук М.В. постановка завдання дослідження*

*Особистий внесок Харченко В.В. проведення експериментальних досліджень.*

*Особистий внесок Гуменюк І. А аналіз існуючих антифрикційних матеріалів, що використовуються у вузлах тертя газоперекачувального агрегату в якості вкладишів підшипників.*

*Особистий внесок Леусенко Д.В., запропоновано новий матеріал, який буде дешевшим та матиме кращі експлуатаційні властивості*

5. Кіндрачук М.В., Мельник В.Б., **Леусенко Д.В.**, Романьок Ю.В. Оцінка якості послуг калібрувальної лабораторії кваліметричним методом. *Проблеми тертя та зношування*, 2022. № 4(97). С. 67-74. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(97\).16961](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(97).16961)

*Особистий внесок Кіндрачук М.В. постановка завдання дослідження*

*Особистий внесок Мельник В.Б. запропоновано експертний метод оцінки калібрувальної лабораторії.*

*Особистий внесок Леусенко Д.В. побудова причинно-наслідкової діаграми*

*Особистий внесок Романьок Ю.В. визначення основних факторів, що впливають на якість калібрування засобів вимірювальної техніки лабораторії.*

6. Кіндрачук М.В., Мельник В.Б., **Леусенко Д.В.** Вплив присадок карбонових кислот на змащувальний шар в локальному контакті зубчастих передач. *Проблеми тертя та зношування*, 2022. № 1(94). С. 83-89. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(94\).16474](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(94).16474)

*Особистий внесок Кіндрачук М.В. постановка завдання дослідження*

*Особистий внесок Мельник В.Б. в якості поверхнево-активних речовин запропоновано використовувати карбонові кислоти.*

*Особистий внесок Леусенко Д.В. проведено дослідження мастильних шарів.*

7. Кіндрачук М.В., **Леусенко Д.В.**, Мельник В.Б., Василик М.В., Харченко В.В. Технології поверхневого зміцнення зубчастих зачеплень та підшипників в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту. *Проблеми тертя та зношування*, 2024. № 3(104), С. 23-34.

DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18975](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18975)

*Особистий внесок Кіндрачук М.В. запропоновано конструкцію стендів на*

*базі токарного верстату.*

*Особистий внесок Мельник В.Б. аналіз результатів*

*Особистий внесок Леусенко Д.В. запропоновано методуку поверхневого зміцнення зубчастих коліс.*

*Особистий внесок Василик М.В. запропоновано методуку поверхневого зміцнення підшипників кочення.*

*Особистий внесок Харченко В.В. запропоновано рецептуру змащувального середовища з карбон фторидними присадками.*

*Статті в іноземних виданнях:*

8. Kindrachuk M.V., Charchenko V.V., Dukhota O.I., Khumeniuk I.A., **Leusenko D.V.** Features of the structure and properties of surface layers of babbitt coatings after boundary mode of friction. **ISSN 1027-5495**. Functional Materials, 30, No 3(2023), P. 1-8. (SCOPUS, Q4) DOI: <https://doi.org/10.15407/fm30.03/1>

*Особистий внесок Leusenko D.V. досліджено мікроструктуру та властивості поверхневих шарів поверхонь тертя бабітового покриття*

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації*

9. Мельник В.Б., Мікосянчик О.О., Кіндрачук М.В., **Леусенко Д.В.** Влияние присадок карбоновых кислот на гидродинамический смазочный слой в локальном контакте зубчатых передач. Current issues and prospects for the development of scientific research: Scientific Collection IV International Scientific and Practical Conference (December 07-08, 2021) Orléans (France) 2021. Orléans of the December 2021. № 90. p.465-474

10. **Леусенко Д.В.**, Гловин М.А., Мельник В.Б. Змащувальна дія авіаційних мастильних матеріалів з присадками та дослідження їх впливу на антифрикційні, протизносні та протизадирні властивості пар тертя з локальним контактом. AVIA-2022 : The International Scientific Conference. (Kyiv, 28-30, September 2022), Kyiv, 2022, p.17-20.

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8736/6970>

11. Мельник В.Б., **Леусенко Д.В.**, Титаренко В.В. Підвищення зносостійкості вузлів тертя аерокосмічної техніки утворенням на поверхнях тертя фторвмісних нано - мікро - розмірних антифрикційних протизносних структур. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024) : матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.]– Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. Т. 1. 108-110 с. [www.conference-chernihiv-politechnik.com](http://www.conference-chernihiv-politechnik.com).

12. Мирослав Кіндрачук, **Дар'я Леусенко** Визначення зносостійкості та втомної міцності деталей машин деякими стандартними методами оцінювання показників якості мастильних матеріалів. 16-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 18 – 19 травня 2023 р.) : Матеріали симпозіуму. Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2023. 60-61с. <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/12506/1/%D0%A1%D0%B8%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D1%96%D1%83%D0%BC%20%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%96%D1%82%D0%B5%D1%85.pdf>.

13. Трибологія та інженерія поверхні. Практикум для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 “Прикладна механіка”/Укладачі:М.В.Кіндрачук, О.І.Духота, В.В.Харченко, **Д.В. Леусенко** // К.: НАУ,2023, 48 с.

14. Триботехнічні матеріали та методи підвищення зносостійкості. Лабораторний практикум для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 “Прикладна механіка” /Укладачі: М.В.Кіндрачук, В.В.Харченко, **Д.В. Леусенко**// - К.:НАУ,2024, 36с.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>21</b>
<b>РОЗДІЛ 1. ЗМАЩУВАЛЬНА ДІЯ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З ПРИСАДКАМИ ПРИ ТЕРТІ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ.....</b>	<b>31</b>
<b>1.1 МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ЗМАЩЕННЯ.....</b>	<b>31</b>
1.1.1 В'язкість.....	31
1.1.2 Базові масла та присадки.....	34
1.1.3 Режими змащення.....	35
<b>1.2 Багатофункціональна присадка ZDDP.....</b>	<b>39</b>
1.2.1 Формування трибоплівки.....	40
1.2.2 Властивості та хімічний склад трибоплівки.....	41
1.2.2.1 Трибологічні властивості.....	42
1.2.2.2 Механічні властивості трибоплівки ZDDP.....	43
1.2.2.3 Хімічний склад трибоплівки ZDDP.....	44
<b>1.3 Модифікатори тертя.....</b>	<b>45</b>
1.3.1 Добавка MoDTC.....	45
1.3.1.1 Утворення та розкладання трибоплівки.....	46
1.3.1.2 Трибологічні властивості.....	47
1.3.1.3 Синергізм MoDTC із ZDDP.....	49
1.3.2 Поверхнево-активні речовини.....	50
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....</b>	<b>53</b>
<b>РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ, МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ПРИСАДКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>54</b>
<b>2.1. Вибір та обґрунтування методу досліджень.....</b>	<b>54</b>
2.1.1. Метод вимірювання падіння напруги в режимі нормального тліючого розряду.....	55
2.1.1.1 Обґрунтування вибору методу вимірювання падіння електричної напруги на змащувальному шарі при двох токах.....	56
2.1.1.2 Метод визначення складових змащувального шару в локальному контакті зубчастих передач.....	57

<b>2.2. Методики оцінки ефективності присадок в локальному контакті зубчастих передач за показниками змащувальної дії.....</b>	<b>59</b>
2.2.1 Методика оцінки ефективності присадок за показниками змащувальної дії на усталеному режимі в процесі припрацювання зубчастих передач.....	59
2.2.2. Методика оцінки ефективності присадок за показниками змащувальної дії при неусталеному режимі роботи зубчастих передач.....	61
2.2.3. Методика оцінки ефективності оливи з присадками за інтегрованим показником масляної дії.....	64
<b>2.3 Аналіз масла.....</b>	<b>66</b>
2.3.1 Атомно-емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-AES).....	66
2.3.2 Інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є (FTIR).....	67
<b>2.4 Трибохімічний аналіз поверхні.....</b>	<b>69</b>
2.4.1 Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія (XPS).....	69
2.4.2 Раманівська спектроскопія.....	70
<b>2.5 Методологія поверхневого зміцнення зубчастих коліс та підшипників в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту.</b>	<b>71</b>
2.5.2 Методика поверхневого зміцнення зубчастих коліс та підшипників в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту.	75
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.</b>	<b>81</b>
<b>РОЗДІЛ 3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗМАЩУВАЛЬНОЇ ДІЇ МАСЛЯНИХ СЕРЕДОВИЩ З ПОВЕРХНЕВО ТА ХІМІЧНО АКТИВНИМИ ПРИСАДКАМИ ПРИ КОЧЕННІ ЗІ СКОВЗАННЯМ.....</b>	<b>84</b>
<b>3.1 Присадки до мастильних матеріалів.....</b>	<b>84</b>
3.1.1 Полярні добавки.....	84
3.1.2 Вибір концентрації присадок.....	85
3.1.3 Види мастильних присадок.....	87
3.1.4 Вичерпування та виснажування масляних присадок при споживанні.....	94

<b>3.2 Вплив присадок карбонових кислот на змащувальний шар в локальному контактi зубчастих передач.....</b>	<b>96</b>
<b>3.3 Змащувальна дiя авiацiйних мастильних матерiалiв з присадками та дослідження їх впливу на антифрикцiйнi, протизноснi та протизадирнi властивостi пар тертя з локальним контактом в умовах кочення зi сковзанням.....</b>	<b>103</b>
<b>3.4 Вплив поверхнево-активних речовин мастильних матерiалiв на якiсть припрацювання зубчастих передач.....</b>	<b>106</b>
<b>3.5 Несуча спроможнiсть змащувального шару редукторних масел з присадками.....</b>	<b>110</b>
<b>3.5.1 Вплив присадок на ефективнiсть змащувальної дiї iндустрiальних масел серiї ITД рiзної в'язкостi без присадок та з хiмiчно-активними присадками.....</b>	<b>110</b>
<b>3.5.2 Оцiнка вiмiсту хiмiчних елементiв у поверхневому шарi зубчастих колiс пiсля роботи в iндустрiальних маслах серiї ITД рiзної в'язкостi без присадок та з хiмiчно-активними присадками методом бомбардувальної спектроскопiї.....</b>	<b>116</b>
<b>3.6 Процеси формування мастильного шару при тертi сталi по несталевим металевим поверхням.....</b>	<b>119</b>
<b>3.7 Вплив мастильних матерiалiв на втомне зношування i якiсть поверхонь тертя зубчастих передач.....</b>	<b>124</b>
<b>3.8 Вплив температури на ефективнiсть змащувальної дiї присадок домастильних матерiалiв.....</b>	<b>129</b>
<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....</b>	<b>131</b>
<b>РОЗДІЛ 4 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПІДВИЩЕННЯ ЗМАЩУВАЛЬНОЇ ДІЇ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З КАРБОНОФТОРИДНИМИ ПРИСАДКАМИ В УМОВАХ РОБОТИ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ.....</b>	<b>135</b>
<b>4.1 Фтористий графіт (карбонфторид (<math>CF_x</math>)<sub>n</sub>).....</b>	<b>135</b>
<b>4.2 Вплив карбонфторидних присадок до мастильних матерiалiв на припрацювання зубчастих передач.....</b>	<b>140</b>

<b>4.3</b>	<b>Ефективність змащувальної дії мастильних матеріалів з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя.....</b>	<b>142</b>
4.3.1	Динамічний режим нестационарності (пуски-зупинки).....	142
4.3.2	Температурний режим нестационарності.....	145
4.3.2.1.	Мастильна дія ТАП-І5 з КФ-присадками за швидкості нагріву $4^{\circ}/\text{хв}$ на усталеному режим.....	145
4.3.2.2	Спільний вплив динамічного та температурного режимів нестационарності. Змащувальна дія оливи ТАП-І5 з КФ-присадками за швидкості нагріву $4^{\circ}/\text{хв}$ у режимі пусків-зупинок.....	147
4.3.2.3	Мастильна дія оливи ТА-І5 у разі повільного нагрівання ( $1^{\circ}/\text{хв}$ ) у режимі пусків-зупинок.....	148
4.3.3.	Вплив складу карбонофторидних присадок на змащувальну дію мастильних матеріалів.....	149
<b>4.4</b>	<b>Механізм змащувальної дії карбонофторидних присадок.....</b>	<b>152</b>
<b>4.5</b>	<b>Аналіз складу трибоплівки, утворених мастильними матеріалами з карбонофторидними присадками на поверхнях тертя.....</b>	<b>154</b>
4.5.1	Мікрорентгенівський фазовий аналіз поверхневого шару.....	154
4.5.2	Аналіз хімічного складу поверхневих плівок, утворених після припрацювання в масляному середовищі з карбонофторидними присадками методами оже-спектроскопії.....	155
	<b>ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....</b>	<b>157</b>
	<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>159</b>
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>167</b>
	<b>ДОДАТОК А</b>	
	<b>ДОДАТОК Б</b>	
	<b>ДОДАТОК В</b>	

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

КГТЗ	Контактно-гідродинамічна теорія змазки
ПАР	поверхнево-активні речовини
ХАР	хімічно активні
СОП -	самогенеруючі органічні плівки .
(CF <sub>x</sub> ) <sub>n</sub>	фторвуглецеві присадки типу (CF <sub>x</sub> ) <sub>n</sub>
метод ВПН	метод вимірювання падіння напруги
в режимі НЖР	в режимі нормального жевріючого розряду
ЕГД	пружногідродинамічний
ГД	гідродинамічний
АРІ	Американський інститут нафти
ПАО	поліальфаолефін
ZDDP	Діалкілдитіофосфати цинку
MoDTC	Дитіокарбамат молібдену
КФ	карбонофторидні присадки
ПМА	Поліметакрилатні полімери (в'язкісна присадка)
ДВС	Двигун внутрішнього згорання
ВГВ	Вуглеводні
ЕОП	Елементоорганічні плівки

## ВСТУП

Підвищення експлуатаційної, надійності та довговічності машин є найважливішою проблемою сучасного машинобудування. Вирішення цієї проблеми, значною мірою пов'язане, з підвищенням техніко-економічних показників пар тертя з локальним контактом, таких як зубчасті передачі та підшипники кочення, які, в основному, лімітують довговічність та надійність машин. Ефективність застосування цих вузлів багато в чому залежить від правильного вирішення питань змащення.

Підвищення змащувальної дії мастильних матеріалів залежить від поєднання численних, тісно переплетених факторів, що визначають, у сукупності, характер впливу масла на тертя і зношування поверхонь. Положення ускладнюється відсутністю загальної теорії мащення. Результатом цього є недостатнє використання мастильної дії масел у підвищенні надійності та довговічності пар тертя.

Контактно-гідродинамічна теорія змазки (КГТЗ) в даний час розроблена з достатньою повнотою і перевірена експериментально. Однак на практиці для вибору та розробки мастильних середовищ не використовується через те, що змащувальна дія здійснюється в ширших межах, ніж це впливає з теорії. Істотним недоліком КГТЗ є те, що в ній не враховується фізична та хімічна сорбція, що існує між мастильним матеріалом та металом.

Гранична змащувальна дія, зважаючи на складність протікаючих фізико-хімічних процесів на межі метал - мастильне середовище, є найменш вивченою. В основному вивчений механізм утворення мастильних шарів поверхнево-активними речовинами (ПАР), перш за все, завдяки монографії А.С. Ахматова [43], а механізм змащувальної дії більшої частини компонентів мастильних матеріалів та багатофункціональних присадок в умовах роботи зубчастих передач досі не з'ясований.

Як показали експериментальні дослідження, граничні мастильні шари, при певних режимах тертя, особливо нестационарних, відіграють вирішальну роль у забезпеченні мінімального зношування поверхонь тертя.

У зв'язку з цим питання вдосконалення техніко-економічних показників роботи зубчастих передач за рахунок поліпшення змащувальної дії необхідно вирішувати на основі більш глибокого вивчення механізму утворення граничних мастильних шарів, а також їх протизносної дії.

**Актуальність роботи.** Гранична змащувальна дія мастильних матеріалів може бути значно покращена за рахунок легування їх різними присадками. Присадки та їх композиції, які вводяться в базове масло у певних, строго дозованих концентраціях, дозволяють отримувати, по суті, нові продукти із заздальгідь заданими властивостями, які часто мають мало спільного з вихідним маслом. За рівнем взаємодії з поверхнею присадки прийнято поділяти на поверхнево-активні (ПАР) та хімічно активні (ХАР). В основі механізму дії ПАР лежить висока адсорбційна активність, а ХАР - хімічна реакційність.

На змащувальну дію присадок дуже впливає температура. Численними експериментальними дослідженнями встановлено, що ПАР при температурах 60...100 °С десорбують з поверхні, і сформовані ними фізично адсорбовані шари руйнуються, а утворення хімічних сполук ХАР починається при температурах порядку 180...200°С. [101]. Таким чином існує широкий, найбільш поширений в експлуатації діапазон температур (60...180°С) для пар тертя з локальним контактом, в якому застосування існуючих присадок малоефективно, а в деяких випадках, навіть шкідливо.

Дослідженнями М.В. Райко та його учнів [63-70] встановлено, що в зазначеному діапазоні температур (60...200 °С) ефективна змащувальна дія забезпечується утворенням на поверхнях тертя, вуглеводнями мастильних матеріалів хемосорбційних плівок, названими авторами плівками СОП - самогенеруючими органічними плівками.

Плівки СОП мають високі антифрикційні, протизносні та антизадирні властивості завдяки зменшенню безпосереднього контакту металевих поверхонь, а також локалізації напруги і деформацій при зсуві в граничному шарі. Проте не всі масла досить ефективно здатні утворювати СОП, а деякі взагалі не утворюють таких. У зв'язку з цим актуальним завданням є створення присадок, здатних

працювати в широкому діапазоні температур, що володіють поряд з високою адсорбційною активністю і хімічною реакційністю, здатністю формувати на поверхнях тертя, хемосорбційні плівки.

Останнім часом особливий інтерес дослідників викликають багатофункціональні присадки, до складу яких входять фторвуглецеві сполуки типу (CF<sub>x</sub>)<sub>n</sub>, здатні працювати як при помірних температурах при припрацюванні та обкатці, так і на екстремальних режимах, близьких до заїдання. Механізм дії подібних присадок прийнято пояснювати на основі механо-фізико-хімічних уявлень, найчастіше порівнюючи з механізмом дії графіту та дисульфиду молібдену; антифрикційні властивості присадок типу

( CF<sub>x</sub> )<sub>n</sub> карбонофторидів) пояснюються збільшеною більш ніж у 3 рази, в порівнянні з графітом, відстанню між площинами шарів вуглецю, а протизносні властивості підвищуються за рахунок хімічного модифікування поверхонь з утворенням металофторидних сполук.

Незважаючи на те, що антифрикційні та протизносні властивості фторвуглецевих присадок типу (CF<sub>x</sub>) досить вивчені, досліджень граничних мастильних шарів, утворених цими присадками, майже немає.

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

Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Національного авіаційного університету. Автор була співвиконавицею держбюджетних тем.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках держбюджетної (кафедральної) науково-дослідної роботи № 123/07.01.02 „ Підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем сучасними методами інженерії поверхні”. Автором проведено дослідження змашувальної дії мастильних матеріалів та дослідження її впливу на антифрикційні, протизносні та протизадирні властивості пар тертя з локальним контактом в умовах кочення зі сковзанням.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках держбюджетної науково дослідної роботи кафедральної науково-дослідної роботи № 16-2022 «Підвищення довговічності та забезпечення міцності елементів конструкцій авіаційної техніки».

Автором проведений порівняльний аналіз ефективності роботи мінеральних та синтетичних редуторних олив за основними (стандартними) фізико-хімічними та трибологічними характеристиками.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідних робіт держбюджетної НДР 368-ДБ21 « Розроблення апаратно-методологічного нанотрибологічного комплексу для підвищення триботехнічних характеристик та ресурсу високонавантажених вузлів тертя авіакосмічної техніки». Автором розроблено методику оцінки будови та властивостей поверхневих шарів покриттів після граничного режиму тертя.»

**Мета та основні завдання роботи.** Метою роботи є дослідження фізико-хімічних процесів підвищення змащувальної дії мастильних матеріалів з багатофункціональними фтормісними присадками типу (CFx)<sub>n</sub> та вивчення їх впливу на антифрикційні, протизносні та протизадирні властивості пар тертя з локальним контактом .

Відповідно до мети в роботі поставлені та вирішуються наступні завдання:

1. Розробити методологію оцінки ефективності змащувальної дії мастильних матеріалів з фтормісними присадками типу (CFx)<sub>n</sub> при сталих та несталих умовах тертя;

2. Встановити закономірності зміни змащувальних, реологічних, антифрикційних та протизношувальних властивостей олив з фтормісними (карбонфторидними) присадками типу (CFx)<sub>n</sub> при формуванні мастильними матеріалами граничних шарів на активованих тертях поверхневих шарах металу;

3. Визначити закономірності зношування та розробити методику прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів металу при попередній технологічній та експлуатаційній модифікації поверхонь тертя в масляному середовищі з фтормісними присадками типу (CFx)<sub>n</sub>;

4. Запропонувати методики та технології підвищення зносостійкості вузлів тертя аерокосмічної техніки утворенням на поверхнях тертя фторвмісних нано - мікро - розмірних антифрикційних протизносних структур.

5. Методами металографічного, мікрорентгеноспектрального аналізу, скануючої електронної мікроскопії визначити склад та глибину поверхневих шарів металу при попередній технологічній та експлуатаційній модифікації поверхонь терття в масляному середовищі з фтормісними присадками типу (CF<sub>x</sub>)п;

6. Розробити адсорбційно-хімічну модель механізму змащувальної дії карбонофторидних присадок;

*Об'єкт дослідження:* змащувальна дія мастильних матеріалів з багатофункціональними присадками в умовах роботи зубчастих передач.

*Предмет дослідження:* закономірності зміни змащувальних, реологічних, антифрикційних та протизношувальних властивостей олив з фтормісними (карбонофторидними) присадками типу (CF<sub>x</sub>)п при формуванні мастильними матеріалами граничних шарів на активованих тертях поверхневих шарах металу;

**Методи досліджень.** В якості основного методу оцінки ефективності змащувальної дії мастильних матеріалів з присадками використовували вимірювання товщини мастильного шару методом вимірювання падіння напруги в режимі нормального жеврюючого розряду (метод ВПН у режимі НЖР). Для досягнення мети та вирішення задач дослідження в роботі використовувались розроблені при участі автора методики: оцінки ефективності масляної дії олив з присадками при стаціонарних та нестаціонарних режимах терття, оцінки складових змащувального шару в локальному контакті зубчастих передач [124], впливу карбонофторидних присадок на показники якості змащувальної дії мастильних матеріалів в процесі припрацювання зубчастих передач.[123], технології поверхневого зміцнення зубчастих зачеплень та підшипників в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту.[98].

Розроблені методики оцінки триботехнічних показників мастильних матеріалів на етапі лабораторних досліджень дозволяють аналізувати спектр необхідних експлуатаційних параметрів трибоконтакту. Проведення оцінки якості мастильних матеріалів за антифрикційними, змащувальними, протизношувальними показниками з урахуванням типу базової основи, наявності

функціональних присадок дозволяє встановити взаємозв'язок між трибологічними показниками контакту, складом мастильного матеріалу та активованими поверхневими шарами контактних поверхонь та визначити механізми структурної пристосованості трибосистеми та оптимізувати вибір редукторних олів за трибологічними та фізико-хімічними характеристиками [100].

Мікроструктуру поверхонь тертя після трибологічних випробувань вивчали методами металографії, оптичної та електронної растрової мікроскопії. Тонкоплівкову будову поверхневих шарів досліджували методами мікрозондової Оже-електронної спектроскопії та ступінчастого стравлювання характерних мікроділянок поверхонь тертя йонами аргону (прилад JEOL JAMP-10S).

Основні результати дослідження ефективності змащувальної дії отримані на модернізованій машині СМЦ-2 (обладнаної системою вимірювання товщини мастильного шару, моменту тертя, плавною зміною частоти обертів, системою пуск-зупинка), деякі результати отримані на стандартних машинах тертя типу 2070 СМТ- 1, МІ-1М, 4КМТ-1. Для експериментального підтвердження технології поверхневого зміцнення зубчастих коліс та підшипників в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту використовувався спеціальний стенд (на базі токарного верстата), обладнаний віброкамерою.[98].

**Наукова новизна отриманих результатів.** На підставі адсорбційно-хімічної теорії запропоновано модель механізму мастильної дії КФ-вмісних середовищ, що складається з наступних процесів: фізичної адсорбції полярно-активних молекул КФ-присадок і базової олії; хемосорбції на поверхні тертя фторвуглецевих з'єднань КФ-присадки з утворенням елементоорганічних плівок - ЕОП та хемосорбції вуглеводнів базової олії з утворенням самогенеруючих органічних плівок СОП; хімічного розкладання КФ-присадки та взаємодії продуктів розкладання з металом поверхні тертя з утворенням металофторидних з'єднань.

Запропоновано оціночні критерії ефективності мастильної дії КФ-присадок при різних режимах експлуатації зубчастих передач та підшипників (сталих та несталих).

Досліджено закономірності еволюції граничних мастильних шарів, сформованих мастильними матеріалами з КФ-присадками та їх вплив на антифрикційні, протизносні, протизадирні властивості пар тертя з локальним контактом.

Методами металофізичного аналізу досліджено глибину та елементний склад модифікованого поверхневого шару після роботи у фторміському масляному середовищі.

### **Практична значемість роботи.**

Відповідно до завдань експериментального дослідження:

- модернізовано машини тертя СМЦ-1, МІ-1М;
- спроектовано установки для стендових трибологічних випробувань зубчастих пар та підшипників (вібростенд з камерою заповненої технологічною рідиною з присадкою фторованого графіту; стенд на базі токарного верстата)

Розроблено методики:

- оцінки ефективності змащувальної дії на сталому та несталому режимі;
- роздільного вимірювання гідродинамічної та граничної складових мастильного шару.
- поверхневого зміцнення в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту для підвищення зносостійкості поверхонь зубчастих зачеплень, підшипників та інших пар тертя різних машин
- оцінки впливу присадок на несучу здатність мастильного шару за екстремальних умов тертя;
- оцінки впливу припрацювання в КФ-міських середовищах на втомну довговічність пар тертя.

На підставі проведених досліджень:

- розроблені науково-обґрунтовані рекомендації по підбору та застосуванні редукторних олив з присадками;

- розроблена рецептура технологічної рідини з присадкою фторованого графіту.
- запропонована методика оцінки ефективності використання мастильних матеріалів з присадками для усталених та неусталених режимів роботи зубчастих передач (з розробкою програми розрахунку інтегрованого показника змащувальної дії).

Основні науково-технологічні результати і висновки дисертаційної роботи використовуються при підготовці здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктор філософії за освітньо-науковою програмою 131 «Прикладна механіка» при викладанні дисциплін «Трибологія і інженерія поверхні» та «Триботехнічні матеріали та методи підвищення зносостійкості» на кафедрі «Прикладної механіки та інженерії матеріалів» аерокосмічного факультету «Державного університету «Київський авіаційний інститут».

**Особистий внесок здобувача.** Роботу виконано під науковим керівництвом члена-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Кіндрачука Мирослава Васильовича. Основні результати, що становлять суть дисертаційної роботи, автор отримала самостійно. Постановка задач, аналіз наукових результатів і основних висновків досліджень виконано спільно з науковим керівником д.т.н. , професором Кіндрачуком М.В. У публікаціях, підготовлених у співавторстві (стор. 12-15), особистий внесок здобувача полягає в тому що за допомогою розробленої програми визначено області найбільш ефективного використання оливи з КФ-присадками при несталих режимах роботи за інтегрованим показником ефективності масляної дії [2]. В роботі [3,12] автором проведений порівняльний аналіз ефективності роботи мінеральних та синтетичних редукторних оливи за основними (стандартними) фізико-хімічними та трибологічними характеристиками. Дани науково-обґрунтовані рекомендації по підбору та використанню редукторних оливи з поверхнево та хімічно активними присадками. В роботі [4] автору належить аналіз існуючих антифрикційних матеріалів, що використовуються у вузлах тертя газоперекачувального агрегату в якості вкладишів підшипників. За результатами цього аналізу, запропоновано

новий матеріал, який буде дешевшим та матиме кращі експлуатаційні властивості). В [5] автором побудована причинно-наслідкова діаграма й визначені основні фактори, що впливають на якість калібрування засобів вимірювальної техніки лабораторії.

В [6,9] автором проведено дослідження мастильних шарів, утворених оливами з поверхнево-активними присадками карбонових кислот у локальному контакті зубчастих передач. В [7] запропоновано підвищення достовірності вимірювання товщини мастильного шару в локальному контакті зубчастих передач за рахунок роздільного вимірювання граничної та гідродинамічної складових. Особисто автором в роботі [8] досліджено мікроструктуру та властивості поверхневих шарів поверхонь тертя покриття після граничного режиму змащування. Автором, на прикладі змащувальної дії авіаційних масел МС-20 та МК-8, а також індустріального І-50 досліджено закономірності утворення мастильних шарів між зубами в результаті гідродинамічного ефекту, граничних явищ і хімічних реакцій. На основі роздільного вимірювання товщини мастильних шарів були визначені області в яких проявляються різні механізми мастильної дії олив [10]. В [11] автором надано результати дослідження підшипників та зубчастих передач у фтормісних мастильних матеріалах. В [15] Автором запропонована методика поверхневого зміцнення зубчастих коліс та рецептура робочої рідини (суміш двох олій із введенням присадки (CF<sub>x</sub>)<sub>п</sub>)

**Апробація результатів роботи.** Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на IV International Scientific and Practical Conference (December 07-08, 2021) Orléans (France) 2021. Orléans of the Desember 2021; The International Scientific Conference. AVIA-2022 : (Kyiv, 28-30, September 2022), XIV Міжнародної науково-практичної конференції. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024) (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.); на 16-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 18 – 19 травня 2023 р.) XI Всесвітній конгрес «Авіація в ХХІ столітті» - Безпека в авіації та космічні технології», Київ, 25-27 вересня 2024, Національний авіаційний університет – К.: НАУ, 2024.

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження викладено в **12** наукових публікаціях серед них **7** публікації у наукових фахових виданнях України, **1** із них у виданні, проіндексованому в базі даних Scopus, **4** публікації у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, **4** розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить **186** сторінок, у тому числі основного тексту дисертації **136** сторінок, **86** рисунків, **16** таблиць, **4** додатки і список використаних джерел із **138** бібліографічних найменувань.

# РОЗДІЛ 1. ЗМАЩУВАЛЬНА ДІЯ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З ПРИСАДКАМИ ПРИ ТЕРТІ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ

## 1.1 Мастильні матеріали та змащення

Змащення — це ефективне розміщення речовини між двома тілами яка здатна зменшити тертя та/або знос під час роботи. Будь-яка рідина, газ або тверда речовина яка ефективно розміщена між двома поверхнями і називається мастилом.

Функціями мастила є змащування, охолодження, передача енергії, очищення, ущільнення та захист. Розуміння взаємодії між поверхнями та мастильним матеріалом життєво важливо для забезпечення ефективної роботи машин та механізмів.

Усі рухомі частини зі змазаними контактами проходять різні режими змащування під час експлуатації. Всього відомо чотири режими: граничний, змішаний, пружногідродинамічний (ЕГД) і гідродинамічний (ГД) [1].

Основні фактори, які впливають на змащування показано на рис. 1.1

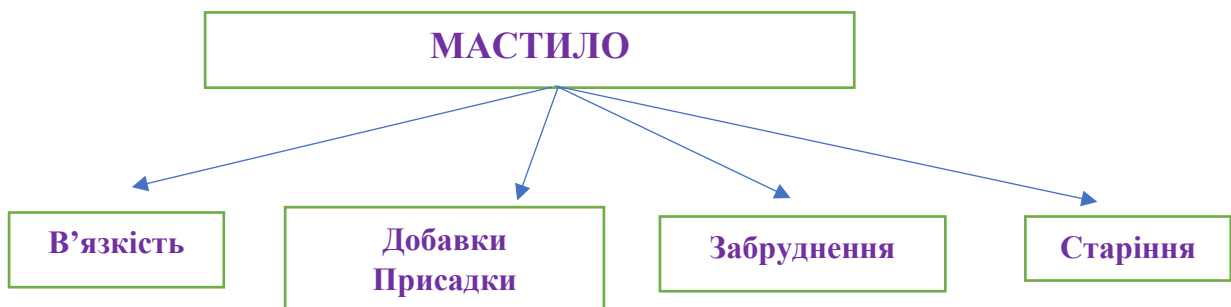


Рисунок 1.1 Фактори, що впливають на мастило.

### 1.1.1 В'язкість

Основною фізичною властивістю масла є в'язкість, опір рідини зсуву. Якщо температура рідини низька, вона природно стає дуже густою (вищою в'язкість), а при високих температурах рідина природним чином стає дуже рідкою (низька в'язкість). У кожному застосуванні, де використовуються масла як мастило, це критично важливі властивості, оскільки вони впливають на такі фактори, як товщина масляної плівки, яка є критичною для запобігання тертя і зношування при високих і низьких температурах [2].

Для вимірювання в'язкості рідини використовуються два методи: динамічний і кінематичний.

*Динамічна в'язкість*, також відома як *абсолютна в'язкість*, яка є опором рідини зсуву під дією сили.

*Кінематична в'язкість* - це опір рідини текти під дією сил тяжіння і часто визначається як відношення абсолютної в'язкості до щільності. Одиниці вимірювання цих різних значень в'язкості можна знайти в таблиці 1.1.

Для вимірювання динамічної в'язкості, використовуються магнітні властивості шариків підшипників за допомогою віскозиметра для вимірювання швидкості, з якою вони рухаються через рідину. В якості альтернативи можна використовувати датчики часу для вимірювання кінематичної в'язкості, гравітаційна сила використовується для вимірювання швидкості, з якою рідина рухається з однієї точки в іншу.

Техніка визначення динамічної в'язкості зазвичай використовується як тест/скринінг на місці, оскільки має проблеми з в межах його результатів. Тоді як зазвичай використовується метод кінематичної в'язкості аналіз використовуваних мастильних матеріалів, він став більш домінуючим завдяки простоті використання, більшість лабораторій містять автовіскозиметр, який використовується для вимірювання кінематична в'язкість.

Поряд з вимірюванням в'язкості температура, зазвичай 40°C і 100°C, при яких вимірюється в'язкість є життєво важливою для запису, оскільки температура значно впливає на в'язкість рідини.

Крім температури, зсув є ще одним фактором, який впливає на в'язкість рідини і його необхідно враховувати під час вимірювання або тестування рідини. Якщо в'язкість рідини не залежить від прикладеної сили зсуву, її називають ньютонівською рідиною. Однак, якщо профіль в'язкості рідини змінюється відносно сили зсуву її називають неньютонівською рідиною.

## Одиниці вимірювання в'язкості

В'язкість	Одиниці	Загальні одиниці	висновок
Динамічна (абсолютна)	Рівновага, баланс (poise)	Centipoise (1P = 100cP)	$1 P = 1 g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}$
Кінематична	Рівновага, Сток (stok)	Centistokes (1St = 100cSt)	$1 St = 1 cm^{-1} \cdot s^{-1}$

Для більшості мастил, несуттєво яка техніка, кінематична чи динамічна, використовується, для вимірювання в'язкості ньютонівської рідини, оскільки мала різниця між ними.

Однак у випадку з неньютонівською рідиною, рідина показує високу в'язкість, коли сила зсуву низька за допомогою кінематичної техніки.

В якості альтернативи, коли сила зсуву рідини велика, а в'язкість рідини зменшується. використовують динамічний метод.

Зміни в'язкості зі зсувною силою показано на рис. 1.2.

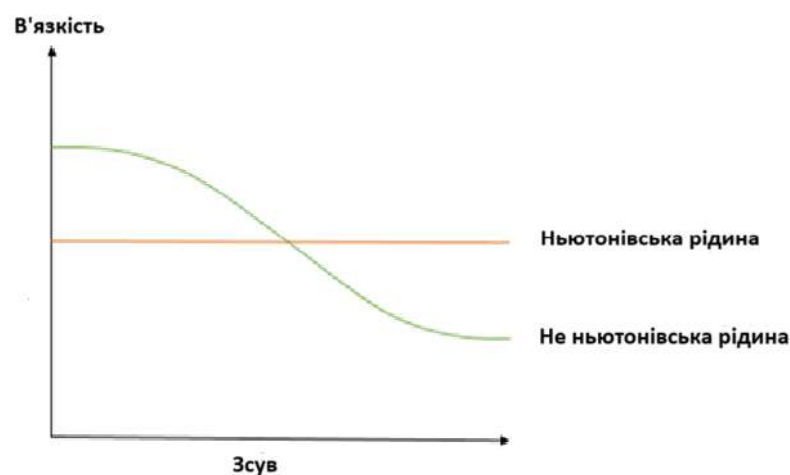


Рис. 1.2 Графік залежності між в'язкістю та зсувом

Слід бути особливо обережним при вимірюванні в'язкості неньютонівської рідини. Типовими мастилами, які мають неньютонівські властивості, є деградовані масла, масляні емульсії та масла з модифікаторами в'язкості.

### 1.1.2 Базові масла та присадки

За даними Американського інституту нафти (API), базові масла класифікуються на п'ять груп. Групи 1-3 - це мінеральні масла з різним вмістом сірки, насичених кислот і індексом в'язкості. Тоді як група 4 це мастильні матеріали, з синтетичним поліальфаолефіном (ПАО), а група 5 — будь-яка базова олива, яка не класифікується через групи з 1 до 4. Таблиця 1.2 показує різні групи базових масел відповідно до API.

Таблиця 1.2

Категорії базової оливи за API

Категорії	Класифікація	Зміст			Індекс в'язкості
		Насичені жирні кислоти, мас.%	Ароматичні речовини, мас.%	Сірка, ppm	
Група 1	Очищене мінеральне масло	65-85	15-35	300-3000	80-119
Група 2	Гідрооброблене мінеральне масло	$\geq 93$	$< 7$	3-500	80-119
Група 3	Мінеральне масло гідрокрекінгу	$\geq 95$	$< 5$	0-30	$> 120$
Група 4	Олігомери 1-алкену	-	-	-	-
Група 5	Усі рідини, не включені до груп 1-4	-	-	-	-

Присадки — це хімічні речовини, які додають до базової оливи для підвищення її продуктивності, чого не можна було б досягти лише за допомогою базової оливи. Фактори, які добавки можуть збільшити, підтримувати та значно зменшити тертя, знос, в'язкість, властивості рідини, забруднення та чистота. Робочий механізм дії добавок можна розділити на дві категорії: хімічні та фізичний, таблиця 1.3.

Найпоширеніші присадки, що містяться в маслах, з основним описом і приклад кожного, наведено в таблиці 1.3. Можливість повністю зрозуміти, як ці добавки працюють поодиноці і взаємодіють один з одним надзвичайно важливо [5].

Хімічно активні речовини (ХАВ) можна описати як добавки, які вимагають хімічної реакції для виконання своїх функцій і зазвичай є такими необоротні реакції.

**Таблиця 1.3**

Класифікація найпоширеніших оливних присадок [5].

Робочий механізм	Робочий сайт		
	Інтерфейс		
Хімічний	Модифікатори тертя	Інгібітор корозії	Антиоксидант
	Протизносні присадки	Антифрикційні присадки	Миючий засіб
Фізичний	Деемульгатор	В'язкісні присадки	Депресант температури застигання
	Протипінна присадка		
	Диспергатор		
Робоча функція	Триболопівшувачі	Супроводжувачі	Реополівшувачі

Поверхнево активні речовини (ПАР) можна описати як добавки які не вимагають хімічної реакції для виконання своїх функцій, фізичні зміни потребують менше енергії активації та можуть бути оборотними. Типовими хімічними присадками до моторних олив є протизносні речовини та засоби тертя модифікатори, причому модифікатори в'язкості є найпоширенішою фізичною добавкою.

### 1.1.3 Режими змащення

Режими змащування поділяються на чотири основні режими: граничний, змішаний, пружнодинамічний та гідродинамічний. Граничний та гідродинамічний

режими відомі як дві крайні форми змащування. Крива Штрібека, фундаментальний інструмент у трибології, дозволяє інженеру оцінювати зміни умови тертя в різних режимах змащення.

Лямбда-коефіцієнт ( $\lambda$ ), рівняння 1, є широко використовуваним показником у трибології для визначення співвідношення між мінімальною товщиною плівки мастила та контактною шорсткістю поверхні матеріалу. Кожен режим змащування пов'язаний з різним діапазоном значень лямбда-коефіцієнта, що дозволяє інженеру визначити яким буде режим змащення пари тертя під час роботи.

$$\lambda = h_{min} / \Sigma Ra \quad (1)$$

*Граничний режим змащування* - це коли мастильний матеріал під час експлуатації не розділяє дві поверхні, намагаючись наблизитись до сухого контакту. На рис.1.3 показана схема граничного контакту між двома поверхнями.



Рис.1.3 Схема граничного режиму змащення [7].

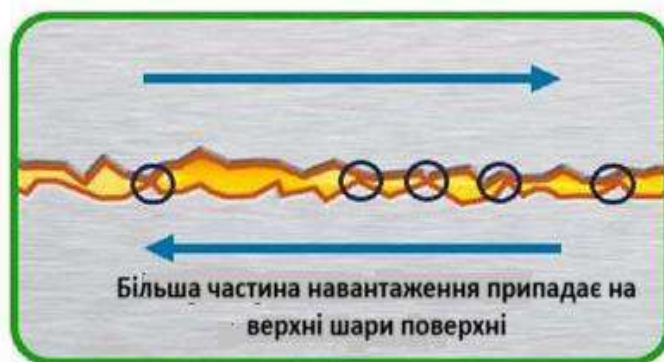


Рис. 1.4 Схема змішаного режиму змащування [7].

*Змішаний режим змащування* є сумішшю граничного та гідродинамічного режимів показано на рис.1.4. Можна побачити області, де є розділення через мастило та області, де нерівності контактують між собою. Фізичні та хімічні властивості мастила та граничної плівки також важливі ( $1 < \lambda < 4$ ).

*Пружнодинамічний режим змащування* дуже схожий на режим гідродинамічний у тому, що мастило повністю розділяє обидві поверхні. Однак різниця в тому, що локальна пружна деформація відбувається на поверхнях із збільшенням в'язкості за рахунок високого контактного тиску. Пружнодинамічний режим змащування зазвичай виникає в умовах високонавантажених пар тертя, таких як шестерні. ( $4 < \lambda < 10$ )



Рис. 1.5 Схема гідродинамічного режиму [7]

*Гідродинамічний режим змащування* має місце, коли мастило повністю розділяє дві поверхні. Схема цього режиму показана на рис. 1.5. Цей режим є ідеальною формою змащення, де виникає низька сила тертя і мінімальний знос. Об'ємна властивість мастила регулює характеристики контакту, а не хімічний склад мастильного матеріалу.

Таблиця 1.4

Найбільш поширені присадки, що містяться в оливах [4]

Тип хімічної добавки	Основні функції	приклади
Антиоксиданти	Зменшує швидкість окислення, що відбувається в мастилі, порушуючи тристадійний процес окислення шляхом розкладання перекисних радикалів або реакції з вільними радикалами.	Діалкілдитіофосфати цинку ( <b>ZDDP</b> ).
Модифікатори тертя	Зменшує тертя, яке виникає при контакті поверхонь за рахунок утворення поверхневої плівки	Дитіокарбамат молібдену ( <b>MoDTC</b> ), органічні модифікатори тертя, карбонофторидні присадки( <b>KF</b> )
Протизносні присадки	Зменшує знос між поверхнями, що труться під навантаженням.	Діалкілдитіофосфати цинку ( <b>ZDDP</b> ), карбонофторидні присадки ( <b>KF</b> ), модифікатори тертя,
Миючі засоби	Зменшує нерозчинні відкладення, що утворюються на поверхнях при високих температурах.	Сполуки кальцію або магнію
Диспергатори	Тримає нерозчинний матеріал у суспендованому стані в олії.	Беззольні (неметалеві) сполуки.
В'язкісні присадки	Зменшує зниження в'язкості внаслідок підвищення температури	Поліметакрилатні полімери (ПМА)
Депресанти температури застигання	Знижує температуру застигання олив, зберігаючи текучість мастила при низьких температурах	Парафінові сполуки

Будь-яке тертя, яке виникає, спричинене виключно зсувом мастильного матеріалу. Зазвичай гідродинамічний режим змащування виникає на високих швидкостях, малих навантаженнях і при високій в'язкості середовищ [6–9]

$$10 < \lambda$$

## 1.2 Багатофункціональна присадка ZDDP

ZDDP є багатофункціональною присадкою. Вона може діяти як антиоксидант, інгібітор корозії та протизносна присадка. Молекулярна структурна формула трибоплівки, яка утворюється на двох поверхнях під час тертя, показана на рисунку 1.6 [10]. Вона виконує свою первинну роль у режимі граничного змащування, де відбувається контакт поверхня-поверхня.

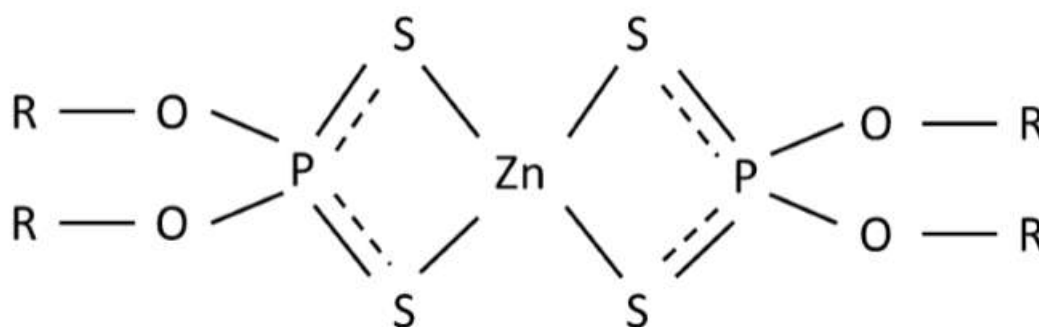


Рис. 1.6 Хімічна структура ZDDP [10].

З літератури відомо як ZDDP функціонує як протизносна присадка. Існує три основних шляхи змащувальної дії: утворення механічної захисної плівки, видалення корозійних пероксидів і розщеплення твердих абразивних частинок оксиду заліза [11].

Перший механізм – утворення плівки, на поверхнях тертя. Це запобігає безпосередньому контакту поверхонь, зменшуючи адгезію та напругу на вершинах нерівностей. Наступний механізм - трибоплівка ZDDP реагує з будь-якими пероксидами в мастилі, щоб запобігти їх появі від корозійного зношування поверхонь. Кінцевий механізм припускає, що частинки оксиду заліза перетравлюються в трибоплівку, таким чином зменшуючи ймовірність будь-якого третього тіла. Однак відомо, що це найбільше суперечлива методика, оскільки було мало доказів, які б її підтверджували.

Широке дослідження механізмів, функцій і взаємодії ZDDPs з іншими присадками ведеться більше 60 років, але не все відомо про ZDDP як присадку. Завдяки новому екологічному законодавству, необхідність зменшення вмісту

неметалевих сполук у присадках до моторної оливи та інших забруднювачів, в першу чергу фосфору та сірки, стає все більш очевидним. ZDDP продукти розпаду ZDDP також скорочують термін служби каталізаторів [12]. Таким чином, проводяться нові дослідження, щоб знайти альтернативні рішення протизносних присадок. Проте нові протизносні присадки мають працювати так само добре. Тому є все ще існує значна потреба в розумінні визначальних механізмів того, як ZDDP виконує свою функцію протизносної присадки та взаємодіє з іншими добавка.

### 1.2.1 Формування трибоплівки

Процес утворення трибоплівки з ЗДП на поверхні під час тертя показано на рис. 1.7 [11]. Він складається з трьох шарів: плівки, що пройшла хімічну реакцію, хімічно адсорбований шар і фізично адсорбований шар.

Дослідження з використанням різних методів, таких як апарат SLIM, показали що товщина трибоплівки ZDDP повинна бути в діапазоні 100-150 нм [13,14].

Було проведено широке дослідження механізму формування зносостійкої ZDDP-трибоплівки на поверхні тертя.

З літератури відомі фактори, які впливають на утворення таких трибоплівок це, перш за все: тиск, температура спалаху, трибоемісія і напруга зсуву.

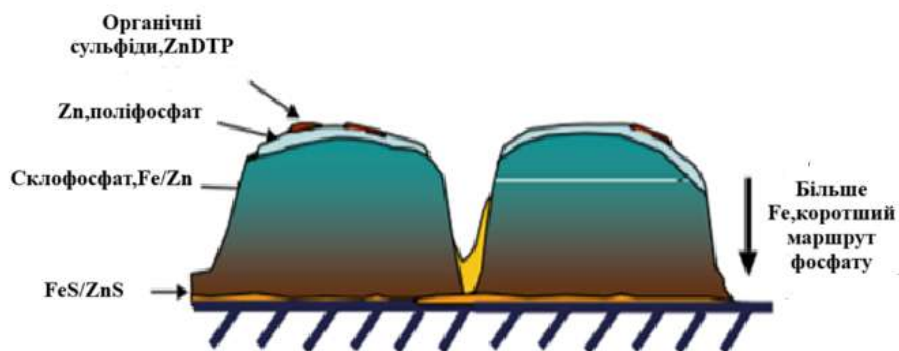


Рис.1.7 Шари трибоплівки ZDDP:.. плівка, що пройшла хімічну реакцію (склоподібний фосфат Fe/Zn; FeS/ZnS;), хімічно адсорбований шар ( органічний сульфід ZnDTP; поліфосфат цинку;) і фізично адсорбований шар (більш коротколанцюгові фосфати)

Теорія про те, що дуже високий тиск може вплинути на формування ZDDP трибоплівки була запропонована для таких деталей машин, як підшипники кочення та шестерні [15]. Нанометрова роздільна здатність на трибоплівці ZDDP показує, що плівки зверху нерівності з високим тиском твердіші за плівки, що утворюються між нерівностями.

Температура спалаху — це тепло, яке виділяється під час тертя двох поверхонь один проти одного, що, як припускають, впливає на формування трибоплівки.

Як правило, високі температури спалаху виникають при високих швидкостях прокатки, а не при невеликих швидкостях. Однак дослідження показали, що трибоплівки ZDDP можуть утворюватися при дуже низьких швидкостях приблизно близько 100 мм/с, де температура спалаху мала [16]. Це показує, що температура спалаху не є головним фактором формування трибоплівки ZDDP. Також при утворенні трибоплівки ZDDP досліджувався ефект трибоексії, в роботі [17] показано, що ZDDP плівки можуть утворюватися, коли поверхні, що труться, не контактують через мастило.

Цей висновок не узгоджується з теорією про те, що трибоексія є рушійною силою для утворення ZDDP, оскільки тертя необхідне для ефекту трибоексії.

Дослідження показали, що трибоплівки ZDDP утворюються в рідинах із високим тертям ЕГД припускаючи, що напруга зсуву є механізмом його формування [17].

Цей механізм також пояснює, чому трибоплівки ZDDP можуть формуватися на різних поверхнях. Стимулювання формування відбувається через тиск, між двома поверхнями тертя, а не хімічна реакція між поверхнею та трибоплівкою ЗДП.

### **1.2.2 Властивості та хімічний склад трибоплівки**

Дуже важливо розуміти механізми формування трибоплівки ZDDP, знати її властивості та хімічний склад. Знання трибологічних і механічних властивостей трибоплівки ZDDP є важливими для кращого розуміння її функціонування [12].

### 1.2.2.1 Трибологічні властивості

Основною функцією ZDDP як добавки є зменшення зносу, як показано на рис.1.8. На графіку показано зміну ширини сліду зносу залежно від часу тертя.

Умови випробувань були встановлені на рівні 40 °С з SRR 50 % і максимальним значенням контактний тиску по Герцу рівному 0,95 ГПа. Базове масло з ZDDP порівняно з просто базовою оливою значно зменшує ширину сліду зношування, коли час тертя збільшується [18].

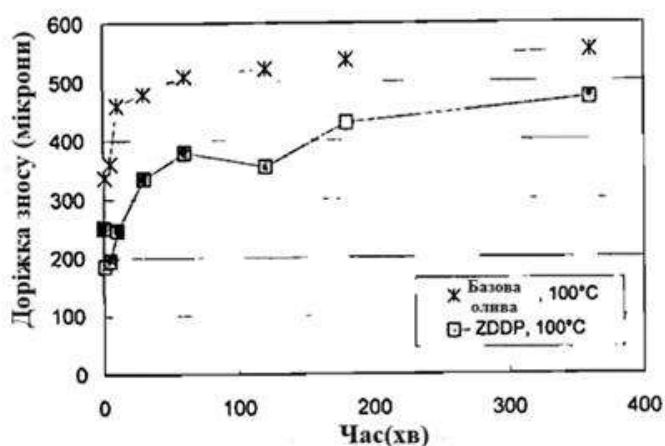


Рис. 1.8 Порівняння ширини сліду зносу для базової оливи та оливи, що містить ZDDP [18].

Трибоплівки ZDDP не тільки впливають на знос трибоконтакту, а й мають антифрикційні властивості. Утворення трибоплівки і її остаточна стаціонарна товщина впливає на коефіцієнт тертя [19]. Рис.1.9, взятий з [20], показує графік кривих Штрібека для розчину базової олії та базової олії з ZDDP. Робочі умови, які використовувалися в досліді, були встановлені на рівні 100 °С, 50% SRR, з постійною швидкістю кочення 100 мм/с і швидкістю ковзання від 10 до 3000 мм/с. Крива Штрібека при дуже низьких швидкостях захоплення подібна за значенням для обох базових масел та присадки ZDDP. Це свідчить про те що шорсткість трибоплівки ZDDP не має великого впливу на коефіцієнт тертя при дуже низьких відношеннях лямбда порівняно з базовою оливою. Однак обидва збільшуються від початкової кривої Штрібека, припускаючи, що шорсткість ZDDP є вище, ніж на

поверхні на початку випробування, що буде інгібувати захоплення мастила. Для базової оливи відбувається знос поверхні підкладки, що з часом збільшує тертя. Формування ZDDP також розширює режим граничного змащування до вищої швидкості захоплення. Коефіцієнт тертя від масла ZDDP збільшується набагато більше, ніж просто базова олива з більш високою швидкістю захоплення.

Раніше була думка, що це через шорсткість трибоплівки ZDDP, однак, збільшення відбувається і з гладкими трибоплівками. В [21] було припущено, що плівка ZDDP пригнічує занесення мастила в контакт, що зменшує товщину плівки ЕГД порівняно з дослідженням базової олії [21].

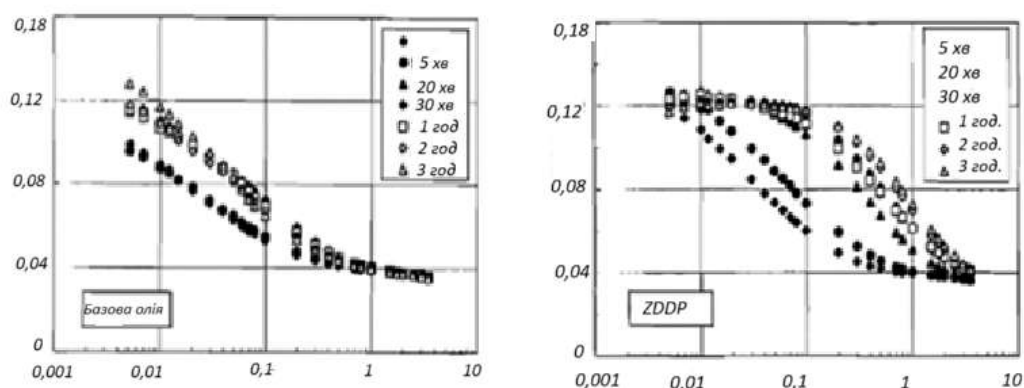


Рис. 1.9 Порівняння кривих Штрібека для базової олії та олії, що містить ZDDP [20].

### 1.2.2.2 Механічні властивості трибоплівки ZDDP

Були проведені дослідження щодо механічних властивостей трибоплівки ZDDPs [22,23]. На рис.1.10 зображено структуру і механічні властивості трибоплівки, сформованої з присадкою ZDDP [24].

Автор стверджує, що поліфосфатний шар неоднорідний за товщиною що впливає на еластичні властивості. Також важливо відзначити, що поліфосфатні шари зазвичай не завжди покривають сульфідні/оксидні шари

Поліфосфатні шари можуть утворюватись у впадинах нерівностей коли проводиться випробування на тертя на машинах Амслера. Однак тоді вони утворюють слабку форму адгезії, яку можна легко видалити за допомогою розчинників. Поліфосфатна плівка властивості, як і твердість, залежать від прикладеного тиску в трибоконтакті.

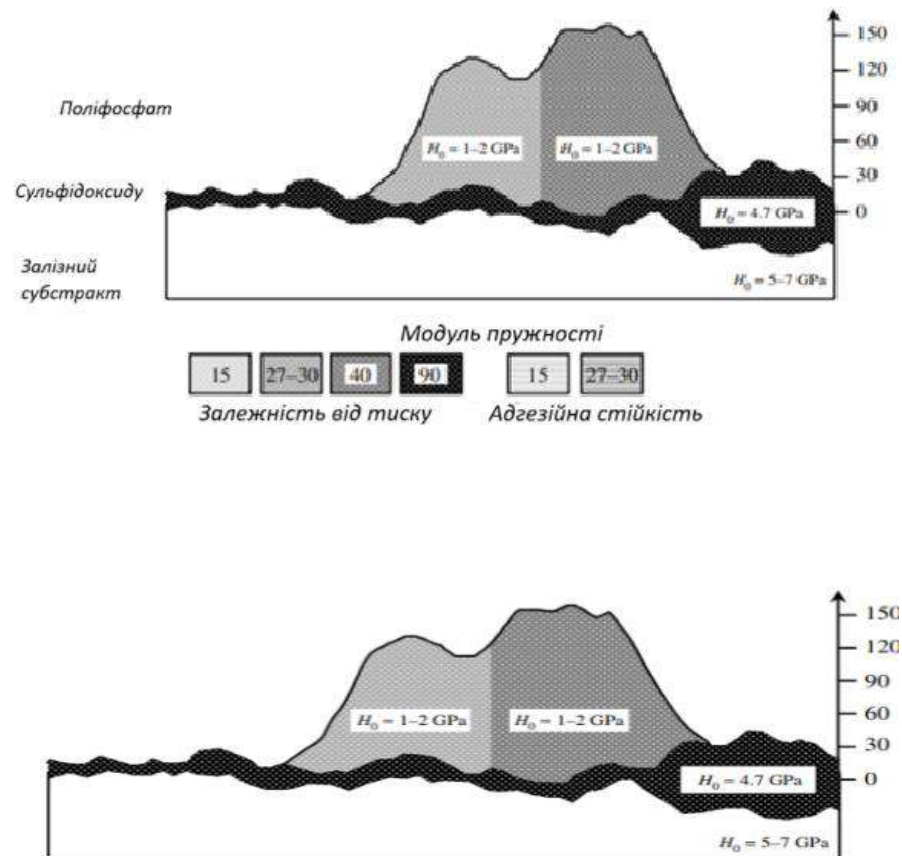


Рисунок 1.10 Механічні властивості трибоплівки ZDDP [24].

### 1.2.2.3 Хімічний склад трибоплівки ZDDP

Хімічний склад трибоплівки ZDDP було проаналізовано за допомогою різних методів таких як XPS, EDX і XANES. Дослідження показали, що трибоплівка ZDDP складається з фізично адсорбованого шару на зовнішньому краю, легко видаляється розчинниками, а потім, ближче до поверхні, хімічно утворений шар, що складається з поліфосфатів з різною довжиною ланцюга.

Більш коротколанцюгові фосфатні шари знаходяться ближче до субстрату, кількість фосфатів з більш довгим ланцюгом збільшується до верхньої поверхні трибоплівки з відсутністю вуглецю в об'ємі.

Профілювання AES дало вагомні докази цього [25]. ToF-SIMS також було застосовано для аналізу трибоплівки ZDDP, що узгоджується з профілем XPS, підтверджуючи, що оксиду заліза дуже мало всередині трибоплівки і що фосфатне скло присутнє по всій товщині плівки [26].

### 1.3 Модифікатори тертя

Як було сказано в попередніх розділах, розуміння граничних добавок у низці в'язкість масел є критичною. Коли в'язкість масла зменшується, тертя в граничному режимі змащення збільшується. Як протидія зростанню тертя використовуються модифікатори тертя.

Модифікатори тертя, які зараз використовуються можна розділити на дві основні групи: неорганічні та органічні. Дослідження у цьому розділі буде зосереджено виключно на неорганічних модифікаторах тертя

#### 1.3.1 Добавка MoDTC

MoDTC, неорганічна сполука, є найпоширенішим модифікатором тертя, для зниження тертя в режимі граничного змащення. Хімічна структура MoDTC показана на рис. 1.11

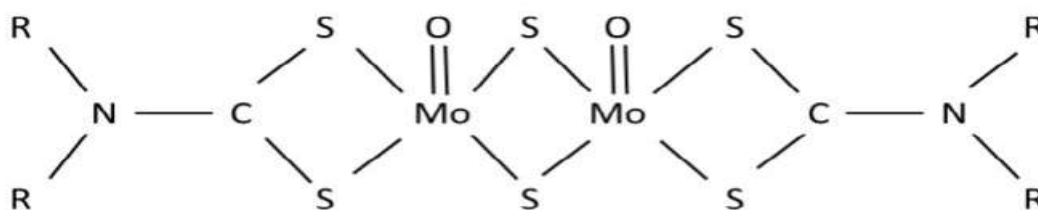


Рис. 1.11 Хімічна структура MoDTC.



Крок 1 MoDTC адсорбується на поверхнях трибоконтакту.

Крок 2 Розкладання відбувається через напругу зсуву, прикладену до MoDTC від трибоконтакту. Відбувається розрив зв'язку C-S, що призводить до утворення аморфного MoSx.

Крок 3 MoSx перетворюється на MoS<sub>2</sub> через збільшення енергії в трибоконтакті від підвищення температури або напруги зсуву.

Крок 4 Реакції оксидів заліза на сталевих поверхнях з MoSx призводять до утворення FeMoO<sub>4</sub>.

### 1.3.1.2 Трибологічні властивості

Трибоплівка MoS<sub>2</sub>, утворена з неорганічного модифікатора тертя MoDTC відома своїми значними властивостями зниження тертя. MoS<sub>2</sub> окремі листи (<10 нм у довжину) вбудовані в трибоплівку MoDTC кількома десятками нанометрів товщини плівки. Листи мають кристалоподібну структуру схожий на графіт. Сили Ван-дер-Ваальса між листами MoS<sub>2</sub> дозволяють це зробити легко піддаватися зрізу для створення режиму низького тертя. Попередніми дослідженнями показано, що MoS<sub>2</sub> створює значення коефіцієнта тертя в діапазоні 0,04-0,06 у граничному та змішаному режимах змащування [30,31]. Рис.1.13 показує результати трибометричного випробування з використанням 0,5 мас.% мастила MoDTC при 100 °C.

Базова олива та сухе тертя показані на графіку для порівняння. Високий коефіцієнт тертя для мастила MoDTC на початку випробування, проте через кілька хвилин тертя він швидко падає і повільно зростає до стабільного стану приблизно 0,04-0,06, що є суттєвою характеристикою трибоплівки MoS<sub>2</sub>

Основними факторами, які впливають на властивості MoDTC щодо зниження тертя, є [30–34];

1) Концентрація – MoDTC більш ефективний з вищою концентрацією добавки в поєднанні з високою температурою.

2) Шорсткість поверхні – виявлено, що MoDTC виробляє MoS<sub>2</sub> на більш шорсткій поверхні порівняно з більш гладкими поверхнями.

### 3) Умови експлуатації:

а. Температура – підвищення температури призводить до збільшення продуктивності MoDTC.

б. Навантаження – збільшення навантаження призводить до збільшення продуктивності MoDTC.

в. Співвідношення ковзання до кочення – отримання зниження тертя в контактах кочення з ковзанням стає більш складним, ніж чисте ковзання. Збільшення коефіцієнту ковзання призводить до підвищення продуктивності MoDTC.

г. Орієнтація контакту – MoDTC більш ефективний при великій довжині ходу зворотно-поступальних умовах, оскільки це вимагає лише утворення MoS<sub>2</sub> всередині трибоконтакту для зменшення тертя.

Основною функцією MoDTC є зменшення тертя. Проте дослідження показують що вона може зменшити знос порівняно з базовою оливою [35]. Однак механізм, який зменшує знос від MoDTC, не на тому рівні як у протизносної присадки ZDDP.

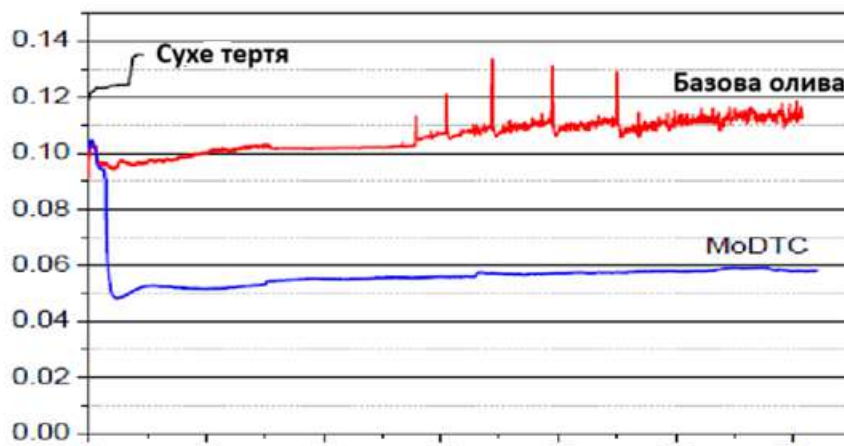


Рис.1.13. Порівняння тертя як функції часу для сухого тертя, базової оливи та оливи, що містить MoDTC [30]

### 1.3.1.3 Синергізм MoDTC із ZDDP

Загальновідомо, що MoDTC входить до складу повністю розроблених моторних олив. Вона повинна виконувати свою функцію разом із багатьма добавками, включеними до складу масла. Найбільш поширеною взаємодією між граничними добавками є MoDTC і ZDDP.

Оскільки одна зменшує тертя, а інша зношування, важливо зрозуміти, як вони працюють разом у трибо-контакті. Ефект, який ZDDP має на властивості MoDTC зменшувати тертя було досліджено в роботах [36–39]. В усіх роботах автори погоджуються, що тертя та знос трибоконтатів покращується при використанні як MoDTC, так і ZDDP.

На рис. 1.14 показує коефіцієнт тертя, якого можна досягти при застосуванні обох добавок разом [40]. З точки зору тертя ZDDP не має негативного впливу на здатність MoDTC функціонувати як модифікатор тертя. Було зазначено, що найменшого коефіцієнта тертя можна досягти при малих дозах ZDDP які додають до високих концентрацій MoDTC. Основна причина додавання ZDDP до MoDTC має зменшити знос, як показано на рис.1.14. Масло 004A з ZDDP і MoDTC спричиняє менший знос, ніж 001A, лише базова олива, і 003A лише з MoDTC. Це показує, що ZDDP може зменшити знос при додаванні до масла з MoDTC. Однак 004A не знижує рівень зносу до рівня 003A лише з ZDDP. Слід також зазначити, що коли MoDTC додається до повністю розробленого масла, знос збільшується порівняно з повністю розробленим маслом без MoDTC, що навпаки, якщо це лише ZDDP і MoDTC в олії [41]. Коли обидві присадки знаходяться в одній олії, з використанням різних хімічних методів аналізу, такі як XPS, EDX, XANES, було встановлено що фосфатні шари утворені з ZDDP з  $FeS_2$  і N органічних шарів с  $MoS_2$  утворюється в результаті розкладання MoDTC. Довші фосфатні ланцюги при порівнянні виявляються в межах трибоплівки, утвореної з ZDDP і MoDTC тільки до ZDDP, що пояснює більший знос. Це свідчить про те, що обидві добавки, пов'язані з трибоплівками, змогли утворити мультидобавки трибоплівки з основними функціями протизносу та зменшення тертя.

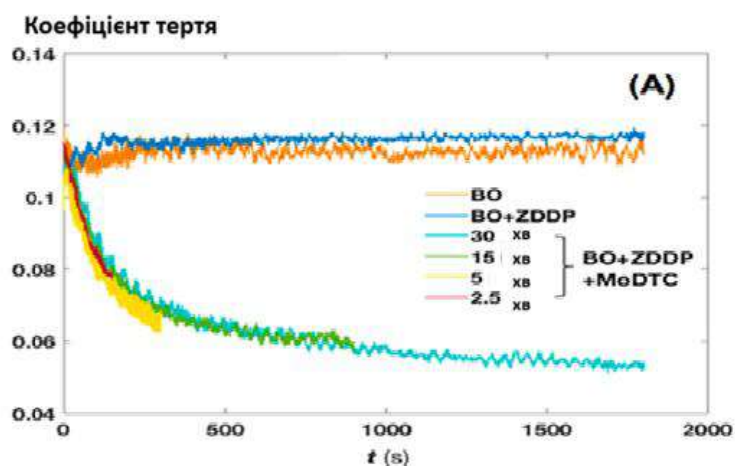


Рис. 1.14 Порівняння тертя як функції часу для базової оливи, базової оливи + ZDDP і базове масло + ZDDP + MoDTC [40]

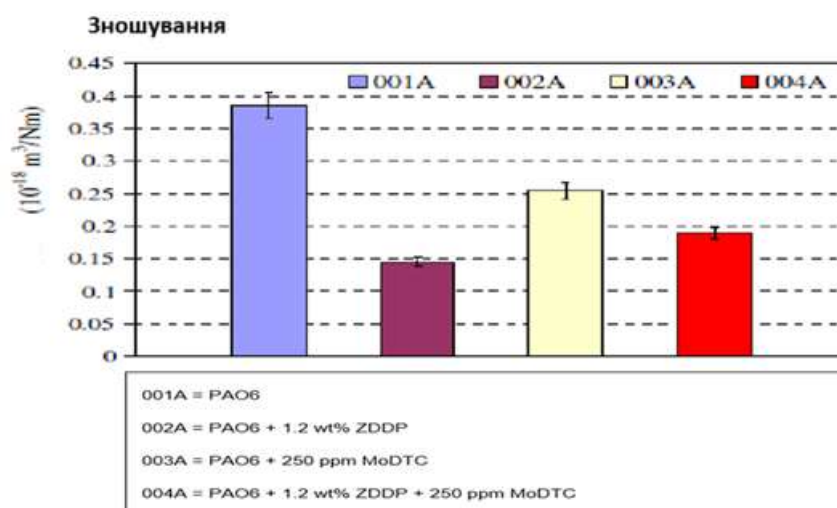


Рис. 1.15 Коефіцієнти зносу для різних складів олив ZDDP і MoDTC [36].

### 1.3.2 Поверхнево-активні речовини

Приблизно від 10 до 15% пакету присадок до оливи становлять поверхнево-активні речовини.

Вперше на утворення адсорбційних мастильних шарів за рахунок фіксації та орієнтації полярних молекул мастила на поверхні тертя під впливом сил Ван-дер-Ваальса з радіусом дії поверхні твердої фази, що досягає тисяч Ангстрем, вказував В. Гарді [12].

Найбільш фундаментальним дослідженням у теорії змащувальної дії при граничному терті є монографія А.С. Ахматова [43], де на основі узагальнення

наукових публікацій та своїх досліджень автор розширив та поглибив теорію граничного тертя з погляду фізичної природи взаємодії молекул мастила один з одним і з поверхнею металу, а також фізичних властивостей молекул. Їм було доведено, що у результаті взаємодії молекул мастила з поверхнею металу створюється мультимолекулярні граничні шари, що набувають квазікристалічної структури і мають пружну форму.

Структурні особливості молекул показані на рис.1.17 Вони містять полярну головку, вуглеводневий хвіст і один або декілька іонів металу.

Полярна головка зазвичай є кислотною групою, яка реагує з гідроксидами або оксидами металу. Вуглеводневий хвіст забезпечує розчинність ПАР в олії зазвичай використовуються іони металів кальцію, натрію та магнію. Кальцій є найпоширенішим. Їх основна функція - захист металу деталей ДВС. Вони виконують цю функцію, нейтралізуючи неорганічні кислоти з продуктів згоряння та органічні кислоти з розкладання нафти.

Ліворуч на рис. 1.17 показано неорганічне ядро, карбонат кальцію, поєднане з молекулами поверхнево-активної речовини. ПАР суспендує з кіптявою, шламом, нерозчинними речовинами, продуктами зносу та окислення. Це дозволяє нейтралізувати кислоти та розчинити будь-які полярні речовини в олії. Зліва від фігури, ПАР також може утворювати захисний шар на поверхнях, запобігаючи високим температурним відкладенням [44].

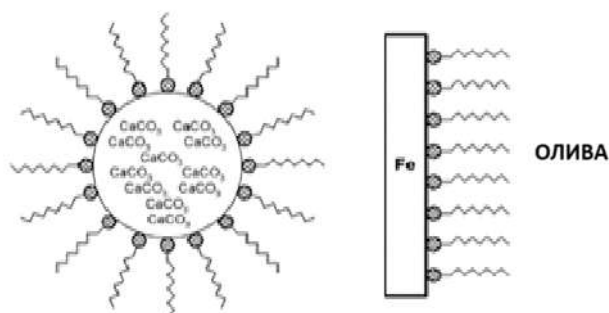


Рисунок 1.17. Синергія поверхнево-активної речовини та базової оливи [44].

### 1.3.2.1 Трибологічні властивості та синергізм з іншими добавками

Як вказувалось в попередньому параграфі, ПАР становлять відносно велику частку добавок у повному обсязі розроблених олив, та взаємодіють з іншими присадками, тому важливо зрозуміти, чи заважає це іншим, чи сприяє їм. Найбільш поширена взаємодія ПАР з ЗДДП [45,46]. Фактично, самі по собі, ПАР можуть утворювати трибоплівку з властивостями зниження зносу.

Вплив трибоплівок на знос показано на рис. 1.18. Питомі показники зносу матеріал штифта для 3,5-годинного тесту TE77 використовується на графіку з маслом рецептури, показані під рисунком. Автор констатував, що висока швидкість зносу від 0,5 мас.% олії ZDDP через низьку концентрацію використовуваного ZDDP.

Зазвичай 1,0 мас.% масла ZDDP зменшує швидкість зносу 0,5 мас.% ZDDP

олії ще на 50%. Зразок С дає нижчий рівень зносу на графіку ніж зразок Z, демонструючи властивості трибоплівки щодо зменшення зносу.

Коли ПАР змішується з ХАР (ZDDP), зразок ZС додатково знижує швидкість зносу зразка С. Це показує, що існує синергізм між двома добавками [47,48,49].

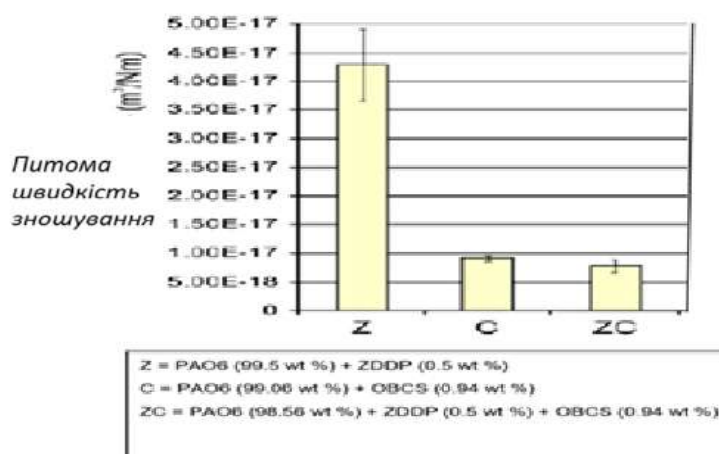


Рисунок 1.18 Порівняння показників питомого зносу для різних складів оливи, що містять ZDDP і OBСS [47]

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. На основі літературних даних був проведений аналіз дослідження модифікаторів тертя, зокрема MoDTC з різними умовами, такими як концентрація, робочі умови, і синергізм із хімічно-активною присадкою ZDDP. Змащувальна дія при граничному режимі обумовлена утворенням на металевих поверхнях структурованих граничних шарів, в основі формування яких є явища фізичної та хімічної адсорбції, однак факт існування якісно різних форм адсорбційних структур недостатньо досліджувався при розгляді змащувальних процесів.

2. У зв'язку з тим, що суттєвим недоліком традиційних присадок ПАР (на основі, в основному, карбонових кислот) є десорбція при температурі 50...60°C, а хімічне модифікування присадками ХАР (на основі галогенміських компонентів (в основному S та P) частіш за все відбувається при температурах > 180°C, використання присадок ПАР та ХАР малоефективно, необхідний пошук принципово нових сполучень здатних забезпечити працездатність вузлів тертя 60°C...180°C.

3. Серед присадок до мастильних матеріалів добрі перспективи використання мають фторвуглеводневі сполуки (CF<sub>x</sub>)<sub>n</sub>, як наслідок їх високої адсорбційної активності та хімічної реакційності. Однак, не дивлячись на те, що антифрикційні та протизносні властивості цих сполук активно вивчаються в останні роки за теорією хімічної модифікації поверхні, досліджень змащувальної дії за адсорбційно-хімічною теорією проведено мало.

4. У зв'язку з тим, що однією з основних причин підвищених зносів на неусталених режимах тертя є тимчасове погіршення змащувальної дії (ТПЗД), пов'язане зі зміною фізично-адсорбованих шарів на більш стійкі до зовнішніх впливів хемосорбційні плівки, особливо важлива розробка методики, яка дозволяє оцінити ступінь погіршення рівня змащувальної дії, а також правильним підбором режимів тертя та змащувальних середовищ зменшити, а в деяких випадках і усунути його негативну дію при неусталених режимах тертя.

## РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ, МАСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ТА ПРИСАДКИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Вибір та обґрунтування методу досліджень

До теперішнього часу, при дослідженні змащувальної дії мастильних матеріалів переважно обмежувались давно відомими методами вимірювання моменту тертя, температури, зносу. Але дані, отримані такими вимірюваннями обмежені. Вочевидь, що в умовах підвищених вимог до зносостійкості та мінімізації енергетичних втрат, висуваємих сучасним машинобудуванням, необхідно використання нових методів і при дослідженні процесів змащування.

Найбільш ефективним методом, який характеризує змащувальну дію оливи та змазок є вимірювання товщини змащувальних шарів. В роботі [50] відмічається, що однією з основних задач в області підвищення зносостійкості поверхонь тертя, є створення методів вимірювання товщини змащувальних шарів.

Однак вимірювання товщини змащувальних шарів, непроста задача, тому що об'єкт вимірювання, змащувальна плівка, знаходиться між двома поверхнями, які рухаються з великою швидкістю, підвержені деформаціям та биттям, що в більшості випадків перевищує вимірювальну величину. Тому, метод вимірювання товщини змащувального шару, який використовується, повинен мати високу чутливість, точність, стабільність, та безінерційність.

В наш час для вимірювання товщини змащувальних шарів використовують ряд методів: механічний [51], люмінесцентний [52], рентгеновський [53,54], інтерференційний [55,56], індукційний [57], ємкісний [58,59], пробною [60,61], опору [62], падіння напруги [63].

Не зупиняючись детально на кожному з перерахованих методів відзначимо що всі вони, за винятком електричних методів, складні, або їх здійснення неможливе для вимірювання мастильної плівки між рухомими контактуючими поверхнями.

З перерахованих електричних методів найбільш повно задовольняє вимогам точності, стабільності та безінерційності метод вимірювання падіння напруги в режимі нормального жевріючого розряду (метод ВПН в режимі НЖР).

### 2.1.1. Метод вимірювання падіння напруги в режимі нормального тліючого розряду

В основі методу ВПН в режимі НЖР лежить пряма пропорційність між товщиною змащувального шару та падіння на ньому напруги. Для дослідження процесів терття, змащення та зносу контактних поверхонь метод ВПН вперше обгрунтовано застосував М.В. Райко [63], в лабораторії змазки контактних поверхонь Київського інституту інженерів цивільної авіації. В подальшому метод був удосконалений в роботах його учнів М.С.Тривайло [67], , В.Н.Павлова [53], В.П.Кадомського [64], В.С. Белоуса [68], М.Ф. Дмитриченко [69], Бавіна І.І. [65], Головача П.А. [70], Мнацаканова Р.Г. [66], та інших.

З метою обгрунтування використання методу ВПН в режимі НТР та визначення оптимального електричного режиму його здійснення при вимірюванні товщин тонких змащувальних шарів (до 5мкм) Райко М.В. та Павлов В.М. [53, 54] провели дослідження механізму електропровідності змазаного контакту терття, в результаті яких встановлено:

1. Існування в тонкому змащувальному шарі стійкого нормального тліючого розряду (НТР), який працює за законами Пашена та Гея: падіння напруги на змащувальному шарі пропорційне товщині змащувального шару; падіння напруги не залежить від площі контакту.
2. При жевріючому розряді олива не є основним носієм електричних зарядів, що обумовлює малу залежність результатів вимірювання від її властивостей та стану (вологості, окисленості тощо). Самі вимірювання не впливають на змащувальну дію та зносостійкість.
3. Електронний характер провідності забезпечує безінерційність та стабільність вимірювань.
4. Падіння напруги не залежить від температури в широкому діапазоні її вимірювання.

Дослідженнями Райко М.В. [54] та Павлова В.М. [53] було встановлено, що параметри розряду та характер вольтамперних характеристик (ВАХ) залишаються

однаковими при зміні товщини змащувальних шарів гідродинамічного та адсорбційного походження, а також при вимірюванні хемосорбційної органічної плівки (СОП). Дослідженнями з побудови ВАХ для різних олив при різних товщинах змащувального шару встановлено, що стійкий нормальний тліючий розряд (НТР) з'являється при силі току від 0,4 до 30А. В наших дослідженнях використовувалась сила току 2 та 4 А.

### 2.1.1.1 Обґрунтування вибору методу вимірювання падіння електричної напруги на змащувальному шарі при двох токах

В ході тривалих досліджень можлива поява значних похибок при визначенні дійсного падіння напруги на змащувальному шарі. Джерелом цих похибок є супроводжуючий терття в кисеньміському середовищі процес неперервного утворення та руйнації на поверхнях терття окисних плівок, що приводить до зміни зовнішнього електричного опору на різних стадіях експерименту. [71] Джерелом похибок можуть бути також температурні коливання.

На підставі ефекту Р. Хольма [72] про постійний опір тонких окисних плівок в діапазоні електричних напруг до 0,25 В., що дозволяє вважати їх провідниками з металевою провідністю, до яких можна застосовувати закон Ома, - Бавін І.І. та Стаднік В.А. [73] вивели формулу (2.1.), використання якої дозволяє повністю виключити похибки, які виникають в зовнішньому ланцюгу схеми падіння напруги

$$\Delta U = 2U_1 - U_2 \quad (1)$$

де  $\Delta U$ - падіння напруги на змащувальному шарі;

$U_1$  – падіння напруги в контакті при силі току  $I_1=2A$ ;

$U_2$  – падіння напруги в контакті при силі току  $I_2=4A$ ;

умова  $I_2=2I_1$  – обов'язкова.

Практично вимірювання здійснюються наступним чином:

На працюючій установці СМЦ-2 вимірюють  $U_1$  при силі току  $I_1=2A$ ;

Потім вимірюють  $U_2$  при силі току  $I_2=4A$ ;

По формулі 2.1 визначають дійсне значення падіння електричної напруги на змащувальному шарі  $\Delta U$ .

Перераховують значення  $\Delta U$  в мВ на значення товщини мастильного шару  $h$  в мкм по тарировочним графікам.

Електрична схема вимірювання товщини змащувального шару показана на рис.2.1.

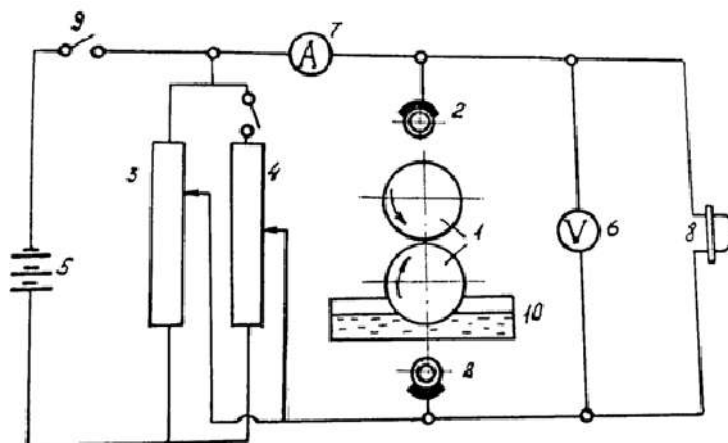


Рис.2.1. Електрична схема вимірювання товщини змащувального шару

1- ролики, 2- токозйомники, 3-4 - реостати, 5 - акумуляторна батарея, 6-вольтметр, 7- амперметр, 8- осцилограф, 9 - вимикачі, 10 - масляна ванна

Достовірність отриманих цим методом результатів підтверджується відповідністю результатів вимірювань іншим показникам тертя змазаних поверхонь. Встановлена кореляція даних про товщину змащувального шару та коефіцієнту тертя, виникнення захоплення, зміну виду змащувальної дії, реологічними характеристиками смазки, взаємодією присадок. Виявлена та підтверджена експлуатаційними випробуваннями чітка кореляція товщини змащувального шару з інтенсивністю зношування, що дозволяє використовувати результати вимірювань для прогнозування зносостійкості.

### 2.1.1.2 Метод визначення складових змащувального шару в локальному контакті зубчастих передач

В багатьох умовах ефективність змащувальної дії визначається декількома одночасно протікаючими процесами. Тоді виключне значення має вимірювання товщини різних складових змащувального шару – гідродинамічної та граничної. Тому, додатково до методу ВПН в режимі НЖР застосовувався метод окремого вимірювання товщини цих частин змащувального шару [74 ]

Мета впровадження цього методу – підвищення достовірності вимірювання товщини змащувального шару за рахунок роздільного вимірювання граничної та гідродинамічних складових. Поставлена мета досягається за рахунок того, що випробування проводять в режимі часто повторювальних циклів: пуск-усталений режим-зупинка, причому сумарну товщину змащувального шару вимірюють на усталеному режимі; його граничну складову на стоянці; а гідродинамічну визначають як різницю цих вимірювань. [74]. Суть метода ґрунтується на тому, що на стоянці, при швидкості рівній 0, існування гідродинамічної складової змащувального шару неможливо. Метод реалізується наступним чином:

Пару тертя навантажують і розміщують в масляній ванні, задають досліджуваний режим нестационарності: пуск- усталений режим – зупинка, вимірюють методом падіння електричної напруги сумарну товщину змащувального шару на усталеному режимі, тим же методом вимірюють граничну складову товщини змащувального шару на стоянці, а гідродинамічну складову визначають як різницю цих вимірювань. Одночасно вимірюють момент тертя ( пусковий та усталений) та об'ємну температуру в масляній ванні, вимірювання проводять з однаковим часовтерттяим інтервалом.

Дослідження проводились на машині тертя СМЦ-2 (обладнаної системою вимірювання товщини мастильного шару, моменту тертя, плавною зміною частоти обертів, системою пуск-зупинка) Умови випробувань: контактна напруга – 700 МПа, проковзування – 20 %, сумарна швидкість кочення – 4,23 м/с, матеріал роликів – ст. 40Х, твердість HRC 30 - 32, шорсткість Ra - 0,3 мкм. Режим нестационарності: розгін до заданої швидкості (4,23 м/с) протягом 3 с, робота з постійною швидкістю – 10 с, гальмування – 3 с, стоянка – 5 с. Цикли розгін - встановлений режим - гальмування - стоянка слідує один за одним без перерви протягом 2 год.

## **2.2. Методики оцінки ефективності присадок в локальному контакті зубчастих передач за показниками змащувальної дії.**

### **2.2.1 Методика оцінки ефективності присадок за показниками змащувальної дії на усталеному режимі в процесі припрацювання зубчастих передач.**

В процесі припрацювання зубчатих передач забезпечується оптимальна мікрогеометрія, склад, структура та фізико-механічні властивості поверхневих шарів. В основі припрацювання лежать складні механо-фізико-хімічні процеси. Ці процеси корінним чином змінюють властивості поверхневих шарів трибосполучень та приводять до формування змащувальних шарів з високими протизносними властивостями. У сучасній літературі, присвяченій дослідженню процесів припрацювання, вивчались рельєф, структура, хімічний склад, механічні властивості металів, виникаючі в процесі тертя вторинні структури [76,77]. Визначені певні погляди на процеси, які відбуваються в період припрацювання і які приводять до формування специфічного поверхневого шару металу. Однак стан і роль змащувального шару при припрацюванні вивчені недостатньо. Вплив змащувального шару на процеси припрацювання досліджувались в роботах М.В. Райко та його учнів [63 - 70]. В цих роботах використовувався на той час принципово новий метод дослідження процесу припрацювання шляхом вимірювання товщини змащувального шару. В наших дослідженнях цей метод також був використаний в якості основного для оцінки показників якості змащувальної дії мастильних матеріалів в локальному контакті зубчатих передач. Мета дослідження – вивчення впливу карбонофторидних присадок на процеси припрацювання зубчатих передач.

Дослідження формування змащувальних шарів в період припрацювання виконувались на машині тертя СМЦ-2 при постійних контактних напруженнях 700МПа, сумарній швидкості кочення 4,23 м/с та коефіцієнта проковзування 20%. В якості зразків використовувалися циліндричні ролики, що імітують роботу зубчастих коліс, виготовлені зі сталі 40Х з твердістю 28...32HRC і вихідною шорсткістю  $Ra = 0,3$  мкм. Випробовувалися наступні мастильні матеріали:

- авіаційні масла ВНДІ НІ-50-1-4У (ТУ 38401286–80), МС–8П (ОСТ 38101163–78);
- індустриальні масла ПІМ–10 (ОСТ 3801294–83), ІГП–18 (ТУ 38101413–78);
- автомобільне масло М–10Г2К (ГОСТ 20799–88);
- дизельне паливо ДЗ (ГОСТ 305 - 82).

Перераховані мастильні середовища випробовувалися в однакових умовах без присадок і з присадками карбонофторидов (ТУ 6.02.2.859–85) в концентрації 0,125; 0,25; 0,5 і 1% мас. Об'єм випробовуваних середовищ 100 мл. Основними параметрами, що свідчили про ефективність змащувальної дії, були: Товщина змащувального шару, момент тертя і об'ємна температура мастильного середовища (рис. 2.2).

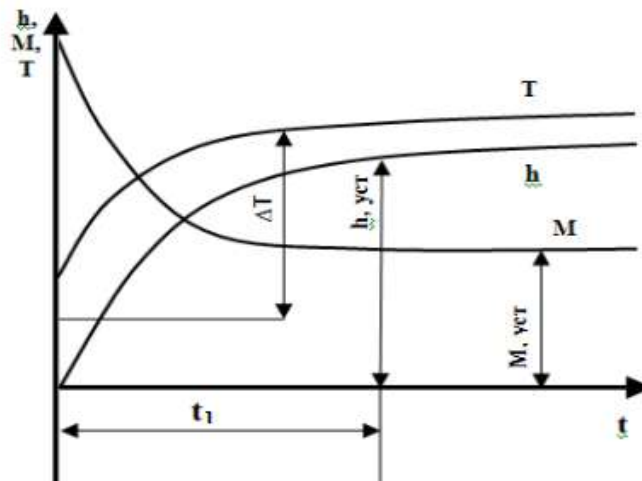


Рис. 2.2. Основні показники якості змащувальної дії на усталеному режимі:

$\Delta T$  – зміна температури змащувального середовища;

$h_{уст}$  – значення товщини змащувального шару після припрацювання;

$t_1$  – час припрацювання;

$M_{уст}$  – значення моменту тертя після припрацювання

За показники якості ефективності змащувальної дії були прийняті:

$t_1$  – час припрацювання, визначений по стабілізації товщини мастильного шару, моменту тертя і температури мастильного середовища;

$h_{уст}$  – усталене значення товщини мастильного шару;

$M_{уст}$  – усталене значення моменту тертя після припрацювання;

$\Delta T$  – зміна температури з початку експерименту до її стабілізації після припрацювання.

### **2.2.2. Методика оцінки ефективності присадок за показниками змащувальної дії при неусталеному режимі роботи зубчастих передач**

Нестаціонарні режими роботи значно впливають на працездатність і економічність пар тертя. Загальновідомо, що нестаціонарні режими викликають найбільше зношування [78,79], проте здатність мастильних середовищ протистояти цьому поки що не оцінюється, невідомо навіть чи пов'язано збільшення зносу з властивостями мастильного середовища, чи можна вибором мастильних середовищ його зменшити. Як встановлено проведеними дослідженнями, однією з основних причин підвищеного зносу при нестаціонарному режимі є тимчасове погіршення мастильної дії (ТПМД), викликане зміною граничних процесів, що протікають - руйнуванням спочатку сформованих фізично адсорбованих і формуванням більш стійких хемосорбційних шарів [80,81]. Подібний ефект зменшення кількості адсорбованого на поверхні матеріалу за нестаціонарних умов встановлений дослідженнями з фізико-хімії твердого тіла [82,83]. Експерименти показали, що зростання за нестаціонарних умов тертя інтенсивності зношування корелює з інтенсивністю ТПМД. Небезпека ТПМД (у деяких випадках може призвести до пошкодження вузла тертя) визначається видом нестаціонарності, показниками режиму роботи та найбільшою мірою властивостями мастильних середовищ. Розроблено метод оцінювання ТПМД за результатами вимірювання товщини мастильного шару. Метод заснований на тому, що змащувальні властивості рідких середовищ при нестаціонарних умовах визначаються ступенем тимчасового зменшення товщини мастильного шару і тривалістю цього зменшення [84].

Великий вплив на ТПМД, крім вуглеводневого складу олів, надають присадки. Присадки можуть як згладжувати ТПМД, так і посилювати його. Тому

правильний підбір присадок для оливо, що працюють у нестационарних умовах, має винятково важливе значення.

Дослідження впливу КФ-присадок на мастильну дію масляних середовищ при нестационарних режимах тертя виконувалося в умовах лінійного локального контакту при коченні з просковзанням циліндричних зразків на модернізованій машині тертя СМЦ-1, що дозволяє багаторазово проводити запуск, роботу з постійною частотою та гальмування за заданими параметрами - навантаження, швидкості та часу кожного циклу [85]. Умови випробувань моделювали умови зачеплення зубів зубчастих передач. Під час випробувань реєструвалися: – частота обертання; пусковий і встановлений момент тертя; товщина мастильного шару після виходу на частоту обертання, що встановилася (сумарна товщина гідродинамічної та граничної складових мастильного шару); товщина мастильного шару на стоянці (товщина твердоподібних самогенеруючих органічних плівок СОП) [74]; температура середовища.

Випробовувалися такі мастильні середовища:

- авіаційні оливи ВНПП-50-1-4у;
- ПМ-10; МС-8п;
- індустриальні оливи І-20А;
- ІДП-18;
- автомобільне масло М-10Г2К.

Мастильні середовища випробовувалися в однаковому нестационарному режимі (пуски-зупинки), без присадок та з присадками карбонофторидів (ТУ 6:02-2-859-85) у концентрації: 0,125; 0,25; 0,5; 1% (масових часток). Обсяг випробуваного середовища – 100 мл. Умови випробувань: контактна напруга – 700 МПа, прослизання – 20 %, сумарна швидкість кочення – 4,23 м/с, матеріал роликів – ст. 40Х, твердість НРС 30 - 32, шорсткість Ra - 0,3 мкм. Режим нестационарності: розгін до заданої швидкості (4,23 м/с) протягом 3 с, робота з постійною швидкістю – 10 с, гальмування – 3 с, стоянка – 5 с. Цикли розгін - встановлений режим - гальмування - стоянка слідує один за одним без перерви протягом 2 год. На рис. 1 показані типові криві зміни сумарної товщини мастильного шару (крива 1),

товщини самогенеруючої органічної плівки (крива 2) та моменту тертя (крива 3) за нестационарних умов за весь час експерименту. На рис. 2 представлені осцилограми зміни цих параметрів за один цикл на початку експерименту і після припрацювання.

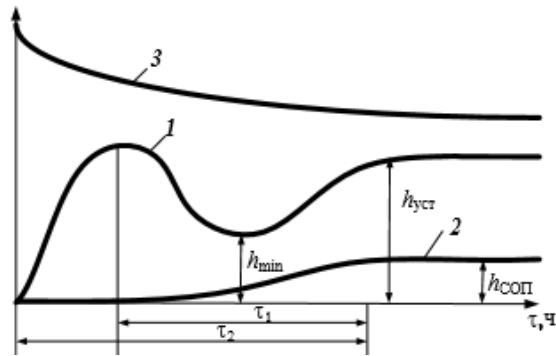


Рис.2.3. Типові криві зміни в часі сумарної товщини мастильного шару (1), товщини самогенеруючої органічної плівки (2) та моменту тертя (3) за нестационарних умов [86 ]

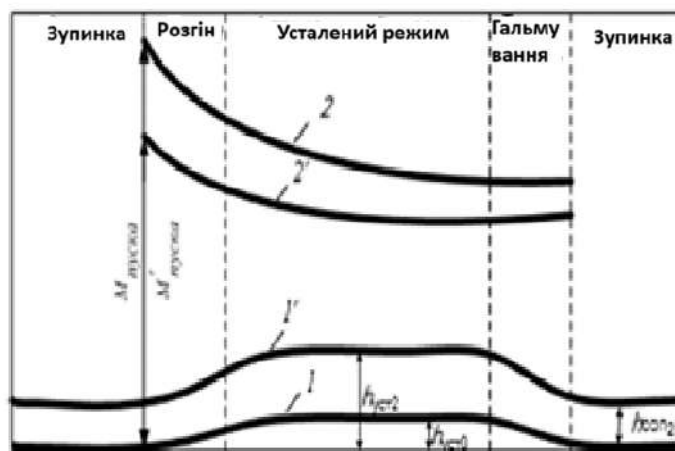


Рис. 2.4 Осцилограми зміни моменту тертя (2), та сумарної товщини мастильного шару (1) 1,2 - олива без КФ-присадок; 1<sup>2</sup>2<sup>1</sup> -олива з КФ-присадками [124]

Як основні критерії оцінки ефективності мастильної дії при нестационарних умовах тертя запропоновані:

$\tau_1$  - тривалість зменшення товщини мастильного шару при ТПМД;

$h_{\min}$  - мінімальна товщина мастильного шару при ТПМД;

$h_{\text{уст}}$  - товщина мастильного шару, що встановилася після приробітку;

$h_{\text{соп}}$  – товщина твердоподібних СОП;

$\tau_2$  – час до стабілізації параметрів тертя (час припрацювання);

$f_n$  – коефіцієнт тертя при запуску;

$f_1$  – коефіцієнт тертя, що встановився;

$\Delta T$  – збільшення температури мастильного середовища;  $I$  - знос.

### 2.2.3. Методика оцінки ефективності олів з присадками за інтегрованим показником масляної дії.

Розрахунок кількісного показника ефективності мастильної дії олів з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя проводився за Формулою (1):

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m v_{ik} * P_{ik} \quad (2)$$

де  $v_{ik}$  - ваговий коефіцієнт показника, що відображає його важливість;

$P_{ik}$  – одиничні показники, які забезпечують якість (кожний з вказаних показників оцінюється за 5- бальною шкалою);

$n$  – кількість груп показників,

$m$  – кількість одиничних показників у кожній групі.

Комплекс показників ефективності мастильної дії 6 олів з карбонофторидними присадками 5 різних концентрацій при нестационарних режимах тертя за 9 групами показників якості і 45 одиничними показниками зформовано у вигляді матриці.

$$P := \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} & P_{17} & P_{18} & P_{19} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} & P_{27} & P_{28} & P_{29} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} & P_{37} & P_{38} & P_{39} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} & P_{47} & P_{48} & P_{49} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} & P_{57} & P_{58} & P_{59} \end{pmatrix}$$

Рис 2.5 Матриця показників якості

$V$  – ваговий коефіцієнт взято від 1 до 5. (Таблиця 2.1)

Таблиця 2.1

Ваговий коефіцієнт	
Ваговий коефіцієнт	Вагомість
1	Надзвичайно важливо
2	Дуже важливо
3	Важливо
4	З помірною важливістю
5	Мало важливо

Аналіз результатів випробувань шести марок масел, наведених у таблиці, показує, що ефективність впливу КФ-присадок на мастильну дію при нестаціонарних умовах тертя залежить від базового мастильного середовища і концентрації присадки, що вводиться. Так, наприклад, високоякісні авіаційні масла МС-8п і ППМ-10, що володіють гарною мастильною дією на встановленому режимі, добре працювали і при нестаціонарних умовах: при ТПМД товщина мастильного шару не зменшувалася нижче 1мкм і протягом усього експерименту інтенсивно утворювалися СОП ( товщина СОП 0,71 і 0,41 мкм відповідно). Застосування КФ-присадок у цих оліях неефективне, а при деяких концентраціях може призвести до погіршення основних показників дії мастила. Введення в мастильний матеріал присадки КФ призводить, під впливом тих же умов контакту, до утворення фази FeF в поверхневому шарі металу і хемосорбованих шарів  $CF_2$  і  $CF_3$  на поверхнях тертя. Експерименти показали, що ці хемосорбовані плівки, як і СОП, мають високі протизносні характеристики [74; 86]. З шести випробуваних мастил найбільш інтенсивно утворювали СОП авіаційні масла МС-8П, ППМ-10, ВНДІ НП-50-1-4У (товщина СОП - 0,71; 0,41; 0,3 мкм відповідно). Ці масла при нестаціонарному режимі тертя показали найменшу величину ТПМД (мінімальна товщина шару – 1,05; 1,0; 0,7 мкм). Індустріальні олії І-20А, ІГП-18 та автомобільна олія М-10Г2К значно гірше утворювали СОП (товщина відповідно – 0,25; 0,1 та 0,05 мкм). Введення присадок КФ у випробуванні за даних режимах авіаційні оливи не призвело до відчутного поліпшення мастильної дії. При введенні цих присадок навіть у малій концентрації в оливі І-20А, ІГП-18, М-10Г2К змащувальна дія

покращувалася. Наприклад, якщо масова частка присадки КФ становить 0,125% маслі М-10Г2К товщина трибоплівки зростає в 3 рази, а мінімальна товщина шару при ТПМД збільшується з 0,45 до 0,65 мкм.

За розробленими критеріями оцінено ефективність мастильної дії шести марок масел з КФ-присадками при нестационарних режимах тертя. Ефективність застосування КФ-присадок залежить від властивостей базової олії та їх концентрації. Для випробуваних масел різного складу та призначення оптимальна масова частка присадки становила 0,25 – 0,5 %. У зв'язку з тим, що компоненти масел можуть конкурувати з КФ-присадками та перешкоджати утворенню ними трибоплівки, доцільно застосовувати КФ-присадки в умовах слабого утворення СОП. Введення присадки КФ у мастильні середовища значно зменшує, а в окремих випадках повністю усуває ТПМД при нестационарних режимах за рахунок високих адсорбційних властивостей та хімічної активності карбонофторидів. Розроблена програма оцінки ефективності масляної дії олів з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя за інтегрованим показником ефективності масляної дії  $Q$  є дієвим інструментом для визначення областей для поліпшень та для відстеження ефективності масляної дії олів з присадками при нестационарних режимах тертя [Додаток 1]

## **2.3 Аналіз масла**

### **2.3.1 Атомно-емісійна спектроскопія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-AES)**

ICP-AES дозволяє кількісно визначити масовий відсоток елементів у рідині. Однак ця методика не підходить для таких елементів, як С, Н, N і О. Найбільш істотними недоліками є фізичні та спектральні перешкоди і відсутність деякої елементарної чутливості. Схематичне зображення атипова установка ICP-AES показана на рис.2.3 взятому зі [87].

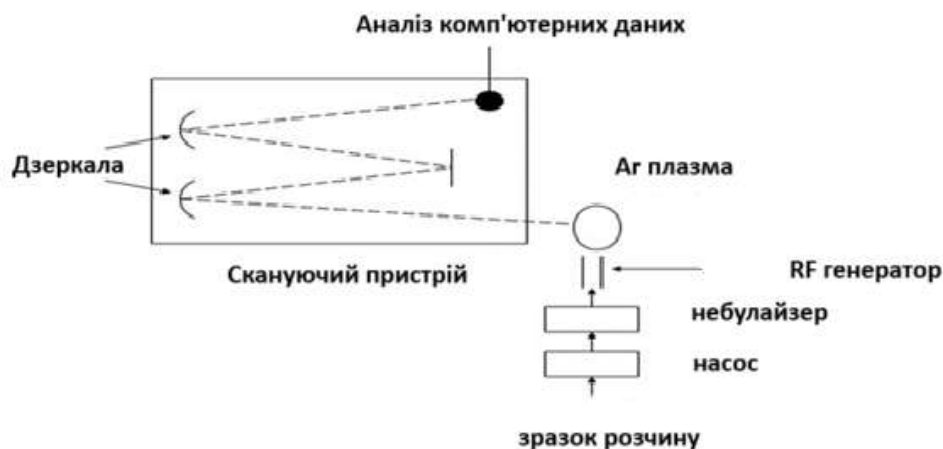


Рисунок 2.6 Типове налаштування ICP-AES [87]

Принцип техніки заснований на випромінюванні фотонів з атомів шляхом впливу високоенергетичної плазми. Акт збудження електронів виробляє світлові хвилі, довжина яких залежать від різниці між рівнями енергії електронів. Цей принцип дозволяє використовувати різні елементи та їх масу відсоток, яких визначається.

Основним використанням ICP у цьому дослідженні було вимірювання концентрації хімічних елементів у складі повністю розроблених олив. Ці оливи створені з використанням багатьох добавок з різними елементами, деякі з яких виключно належать до однієї присадки, а інші містяться в кількох присадках в оливі. Це може бути концентрація елементів, а не концентрація сполук, яка визначається за допомогою методики ICP. Аналіз ICP також може визначити адитивність виснаження (спрацювання) внаслідок окислення шляхом порівняння спектру оливи до та після експериментів [88].

### 2.3.2 Інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є (FTIR)

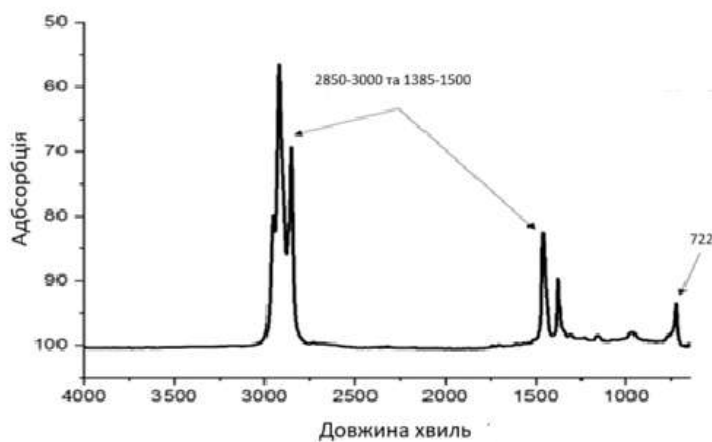
FTIR — добре відомий метод аналізу, який порівнює свіжу і олию, яка має певний ресурс напрацювання [88]. Принцип методики використовує взаємодію молекул під впливом інфрачервоного випромінювання. Кожна молекула адсорбує випромінювання від інфрачервоного випромінювання на певних довжинах хвиль. Питома адсорбована довжина хвилі дозволяє розрізнити різні речовини тому що дві

молекули ніколи не видають однаковий сигнал. Таким чином, кожен спектр виробляється з FTIR сканування містить напівкількісні дані, якщо порівнюються дві речовини.

FTIR дозволяє ідентифікувати деградацію масла, деяких присадок, забруднювачів та залишків зносу. У більшості випадків він використовується як засіб скринінгу.

ІЧ-спектри FTIR, використані у цій дисертації, були отримані спектрометром Perkin Elmer FTIR з роздільною здатністю спектрів  $4 \text{ см}^{-1}$  в діапазоні  $650\text{-}4500 \text{ см}^{-1}$ . Як показано на рис. 2.4.,приклад повністю сформованого спектру FTIR олива містить три основні піки, пов'язані з вуглеводнями базової оливи.

Рисунок 2.7 Приклад спектру FTIR.



Конкретні області, які використовуються при аналізі деградації оливи в оливах для легкових автомобілів, показані в таблиці 2.2. Ці значення зазвичай зустрічаються в [88,89] та інших

Таблиця 2.2

Діапазони довжин хвиль, використаних в цьому дослідженні

Приблизна довжина хвилі кількість (см-1)	компонент	молекула
3400	вода	
1700-1800	Оксиданти	Карбонільвмісні продукти розпаду – напр. карбонова кислота (ПАВ)
1100-1200	Сульфати	Оксиди і кислоти сірки
900-1000	ZDDP (протизносна присадка)	P-O-C і P=S зв'язок (ХАВ)
750	Газолін	

## 2.4 Трибохімічний аналіз поверхні

Після випробувань на тертя зразки очищали гептаном перед проведенням будь-якого аналізу поверхні для видалення залишків масла на зразках.

### 2.4.1 Рентгенівська фотоелектронна спектроскопія (XPS)

XPS — потужний метод хімічного аналізу поверхні, який використовується для аналізу хімії трибоплівки, утворених тертям двох поверхонь.

Метод називається процесом фотоemisії, коли рентгенівські промені потрапляють на поверхні, що спричиняє випромінювання та детектування електронів під час взаємодії між рентгенівськими променями і поверхневими атомами. Ці виявлені електрони, випущені з поверхня містить цінну інформацію, таку як кінетична енергія. Використовуючи кінетичну енергію випущених електронів і енергія фотонів рентгенівського випромінювання, енергію зв'язку,  $BE$ , можна розрахувати за допомогою рівняння 9, де  $KE$  є кінетична енергія випущеного електрона,  $h\nu$  – енергія фотона,  $\phi$  – функція роботи спектрометра. Фотони рентгенівського випромінювання мають глибину проникнення до  $\approx 10$  нм [89].

$$KE = h\nu - BE - \phi \quad (3)$$

У цьому дослідженні було проведено частину хімічного аналізу трибоплівки за допомогою XPS. Потужне монохроматичне джерело рентгенівського випромінювання Al K $\alpha$  (1486,6 eV), енергетична роздільна здатність 0,5 eV

використовувалася для отримання двох типів сканування в межах заздалегідь визначена сфера інтересів; огляд і висока роздільна здатність (HR). Сканування були використані для ідентифікації елементів та їх масових % в межах досліджуваної площі. HR-сканування проводили для отримання хімічного складу трибоплівок спеціально ідентифікуючи хімічний зв'язок, пов'язаний з обраним хімічні станом елементів, таких як Mo 3d і Zn 2p. Спінові орбіталі 2p і 3d поділяють сигнали на  $2p_{3/2}$ ,  $2p_{1/2}$  і  $3d_{5/2}$ ,  $3d_{3/2}$ .

Перед будь-яким аналізом сигналів використовується пік сигналу C1s для калібрування через потенційну зарядку під час збору даних і встановлено на 285 eV [90]. Тип лінії Ширлі використовувався як стандартна базова лінія та інша лінія форми використовувалися для піків, щоб розрізнити різні компоненти всередині сигнали. Необхідно застосовувати загальні та спеціальні умови та обмеження при деконволюції сигналів. Вони наступні:

- Площа  $2p_{1/2}$  завжди в 0,5 раза менша за площу  $2p_{3/2}$ .
- Площа  $3d_{3/2}$  завжди в 0,67 разів менша за площу  $3d_{5/2}$ .
- Спінові орбіталі з більшим знаменником завжди мають вищий зв'язок енергія, наприклад,  $2p_{3/2} < 2p_{1/2}$  енергія зв'язку.
- Різниця енергії зв'язку між  $3d_{5/2}$  і  $3d_{3/2}$  у деконволюція сигналів Mo3d обмежена 3,13 eV [91].

Щоб зрозуміти хімічний склад різних шарів у трибоплівки, травлення проводили за допомогою пучка іонів Ar<sup>+</sup> при 2 кеВ з а струм розпилення 1 мкА. Використання цих налаштувань забезпечує швидкість травлення сталі 4,5 нм на хвилину за Wуко [92].

#### 2.4.2 Раманівська спектроскопія

Вібраційні характеристики молекули можна досліджувати за допомогою Раманівської спектроскопії. Джерело енергії монохроматичного світла лазера виробляє молекулярні коливання, коли енергія падаючого світла передається молекулам. Ці коливання молекул характеризуються хвильовим числом, коливання різних молекул створюють різні числа довжини хвиль.

Склад розсіяного світла сильно залежить від молекули, яка вібрує, [93]. Програмне забезпечення Wire 3.4 використовується в поєднанні з Reinshaw Raman системи спектрометра. Це дозволяє користувачеві регулювати численні параметри, включаючи потужність лазера, час експозиції та кількість сканувань.

Спектральний роздільна здатність спектрометра Рейншоу Рамана становить  $\approx 1 \text{ см}^{-1}$ . Спектри для всіх трибоплівок, створених на кульках, були отримані з Рамана за допомогою 488 лазер з довжиною хвилі нм з фільтром потужності 10 %, експозицією 10 с. В якості лазера було обрано довжину хвилі 488 нм попередні дослідження показали, що це критично важливо для виявлення трибоплівки  $\text{MoS}_2$  [94].

Фільтр потужності 10 %, низький час експозиції 10 с і два накопичення вибрано так, щоб лазер не пошкодив трибоплівку. Вершини і відповідні режими вібрації з типового спектру  $\text{MoS}_2$  показані на рис. 2.5.

Число довжин хвиль коливань  $E_{2g}$  становить  $\approx 381 \text{ см}^{-1}$ , а  $A_{1g}$  становить  $\approx 408 \text{ см}^{-1}$ . Було створено карти Рамана та отримані дані використовуючи пікові інтенсивності  $A_{1g}$  [95].

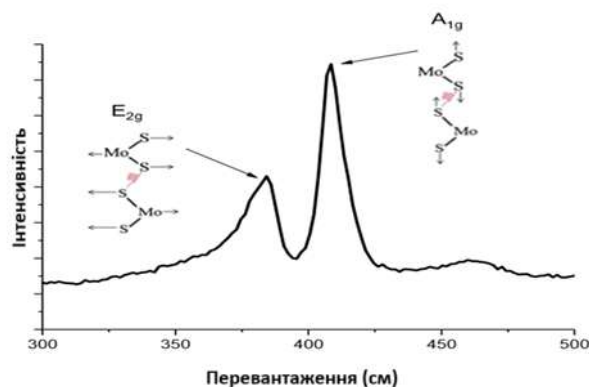


Рисунок 2.8 Приклад спектрів комбінаційного розсіювання піків  $\text{MoS}_2$

## 2.5 Методологія поверхневого зміцнення зубчастих коліс та підшипників в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту.

### 2.5.1 Методика підвищення зносостійкості вузлів тертя утворенням на поверхнях фторвмісних нано - мікро - розмірних антифрикційних протизносних структур

Забезпечення низького рівня тертя, зношування та контактної втоми поверхонь тертя деталей в аерокосмічній техніці ускладнюється наявністю високих

навантажень, швидкостей, розрідженістю або відсутністю атмосфери, ускладненнями або неможливістю застосування мастил. Однією з технологій, що враховує зазначені особливості зношування, є утворення на поверхнях тертя захисних фторміських плівок. Об'єктами первинного застосування та апробації розроблених технологій були: роликові та кулькові підшипники кочення компресора, турбіни та редуктора, а також зубчасті колеса планетарного редуктора турбостартера ТС-12М.

Фторвміські плівки утворюються при фізико-хімічній взаємодії матеріалу поверхонь з мікрочастинками фторованого графіту  $(CF_x)_n$ , введеними у вигляді присадки в мастильний матеріал. Під дією тертя частинки фторованого графіту руйнуються, оголюються зв'язки, що несуть вільні атоми фтору, які хімічно реагують з металевими, наприклад, сталевими поверхнями, і утворюють еластичний шар фторидів заліза  $FeF_3$ , що істотно відрізняється за властивостями базової поверхні. Поверхні тертя при цьому стають гладкішими і міцнішими, витримують більше циклів навантаження до настання викришування, адсорбують мастило і відштовхують вологу - джерело водню, що руйнує поверхню.

Ефективність нової технології обумовлена високою термічною стабільністю та довговічністю плівок  $(CF_x)_n$  порівняно з оксидами та іншими антифрикційними плівками.

Після взаємодії частинок  $(CF_x)_n$  з металами на поверхні утворюється шар фторидів, наприклад  $FeF_3$ , що мають дзеркальний вигляд, шорсткість на порядок нижче, ніж у оксидів, більш високу мікротвердість і в 1,2-1,5 рази більшу контактну витривалість. Поверхня набуває гідрофобності та високої хемосорбційної здатності.

Технологія утворення фторвмісних захисних плівок пройшла успішні лабораторні та експлуатаційні випробування на авіаційних газотурбінних двигунах, автотранспортних двигунах внутрішнього згорання, газомоторних компресорах, у приводах та шпинделях металорізальних верстатів. Технологічний процес реалізується при обкатуванні пар тертя, коли в обкатну рідину вводять 1...5% порошку карбонофториду. Обкатку вузлів тертя проводять

спочатку без навантаження, а потім при номінальній частоті обертання та навантаженні. Якість обкатки забезпечується контролем моменту тертя, мікротвердості, шорсткості, температури розігріву поверхонь, енергії активації (методом склерометрії), параметрів, зношування. Час обкатки уточнюється для кожного вузла тертя і становить від 5-10 хв до 0,5 год. Для номенклатури деталей вузлів тертя редуктора турбостартера ТС-12М рекомендована обробка у фторвмісних приробіткових рідинах підшипників і зубчастих коліс (табл.1).

Обкатку підшипників проводили поза виробом (у лабораторних умовах) на машині тертя МІ-1М за схемою, наведеною на рис.1. Режими обкатки: частота обертання шпинделя  $n_{\text{шп}} = 300 \dots 350 \text{ хв}^{-1}$ ; радіальне навантаження  $P = 0,1 \dots 25 \text{ Н}$ .

Склад присадки  $(\text{CFx})_n$  для обкатки деталей турбостартера: карбонофторид  $(\text{CFx})_n$  - 30...33% мас; поверхнево-активні речовини ПАР – 6,0-6,3% мас; гас – інше.

Обкатку зубчастих коліс проводили поза виробом на верстатах токарної групи за схемами, наведеними на рис. 2.9 і 2.10

При обкатуванні зубчастих коліс із зовнішнім зачепленням (рис. 2.9) планетарна шестерня закріплюється в патроні токарного верстата. Сателіт встановлюється на оправці, що закріплена в різцетримачі супорта верстата.

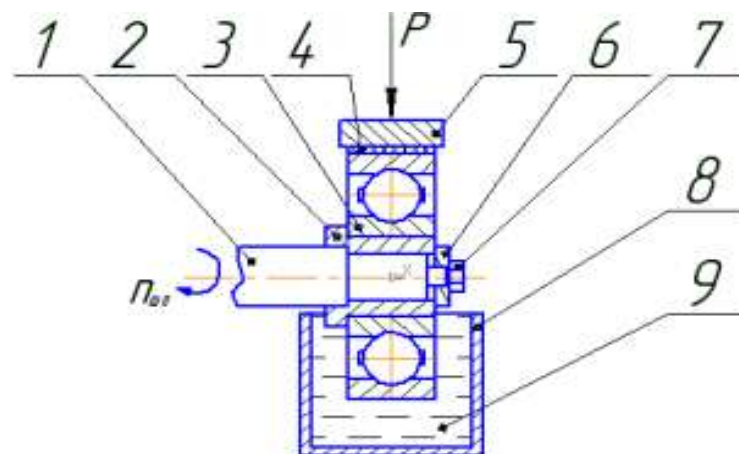


Рис.2.9 Схема дослідження підшипників на машині тертя МІ-1М:

1-патрон;2-кулачок;3-полукільця;4-шестерня;5-підшипники; 6- сателіт; 7- оправка; 8 – супорт; 9 – припрацювальна рідина;

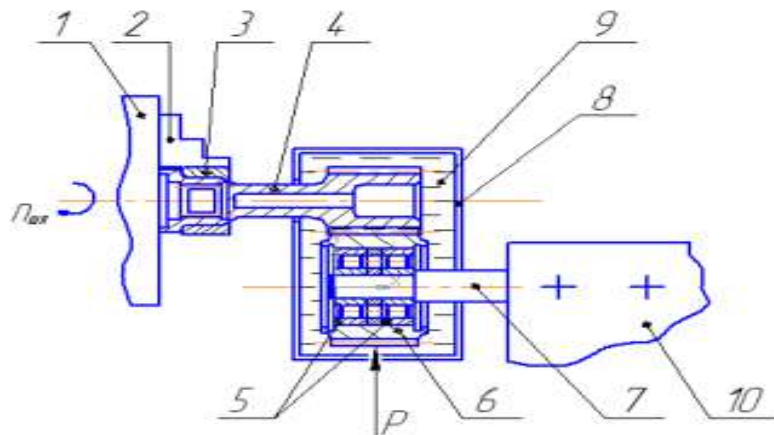


Рис.2.10 Схема дослідження зубчастих коліс. Зовнішнє зачеплення:

1 - шпиндель; 2 - втулка; 3 - підшипник; 4 - прокладка фрикційна;  
5 – гальмівна колодка; 6 - шайба; 7- гвинт; 8 - ванна; 9 – припрацювальна рідина;  
10-супорт

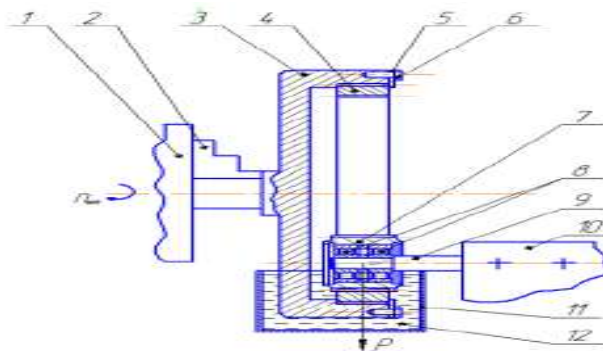


Рис.2.11 Схема дослідження зубчастих коліс. Внутрішнє зачеплення:

1 - патрон; 2 - кулачок; 3 - пристосування; 4 - зубчастий вінець кільцевої шестерні;  
5-планка;6-гвинт;7-сателіт;8-підшипники;9-оправка;10-суппорт;11-ванна;12-припрацювальна рідина.

При обкатуванні зубчастих коліс із внутрішнім зачепленням (рис.2.9) зубчастий вінець кільцевої шестерні редуктора закріплюється у спеціальному пристрої, встановленому в патроні токарного верстата. Сателіт встановлюється на оправці в різцетримачі верстата. Режими обкатки: частота обертання шпинделя  $n_{\text{шп}} = 100 \dots 1000 \text{ хв}^{-1}$ ; радіальне навантаження -  $P = 0,1 \dots 250 \text{ Н}$ . Склад припрацювальної рідини і час обробки ті ж, що і для підшипників. Навантаження у зубчастому з'єднанні створюється поперечним переміщенням супорта токарного верстата. Контроль рівня навантаження здійснюється за тарованим лімбом верстата. Підшипники і зубчасті колеса, що пройшли обкатку і контроль параметрів, підлягали складанню і випробуванням у складі турбостартера.

Таблиця 2.3

## Номенклатура деталей

Вузол турбостартера	Позначення підшипника	кількість	Позначення зубчастого колеса	кількість
Редуктор	85-276207P1	1	Шестерня планетарна	1
	5-32206P8	1	(центральна)	3
	5-42204Б4	6	Сателит	1
	26-42209Л2Т1	2	Шестерня кільцева (зубчастий вінець)	1

Узагальнення результатів лабораторних і стендових випробувань деталей турбостартера ТС-12М показало, що інтенсивність зносу при реалізації технології утворення фторвмісних захисних плівок на поверхнях тертя зменшується не менше ніж на 25-30%; число циклів навантаження до настання викришування в підшипниках зростає в 1,2-1,5 рази; навантажувальна здатність мастильного шару підвищується на 35...40%; навантаження заїдання збільшується до 2 разів.

### **2.5.2 Методика поверхневого зміцнення зубчастих коліс та підшипників в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту.**

Методологія поверхневого зміцнення в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту призначена для підвищення зносостійкості поверхонь зубчастих зачеплень, підшипників та інших пар тертя різних машин [96,97,98,99] та ін.

Ресурсопідвищуюча технологія поверхневого зміцнення в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту – реалізується шляхом дифузійного впровадження мікро-нано-часток, або активних органічних молекул у поверхневий шар металу по виходах дефектів кристалічної решітки.

Технологія містить два етапи:

- на першому етапі проводять підготовку поверхонь до молекулярного армування – їх миття та слабе травлення;
- на другому етапі відбувається процес молекулярного армування. Деталі,

контактні поверхні яких зміцнюються, занурюють у термоактивовану (порядку 30-50 °С) органічну – рідину, наприклад, масло індустріальне 20, що містить частинки фторованого графіту  $(CF_x)_n$  у концентрації порядку 1,5...2,0%, а потім у рідині задавали вібрацію ( $f \approx 10...50$  Гц,  $A \approx 1...5$  мм). Вібрація викликає руйнування органічних молекул мастила.

У місцях розриву молекул мастила утворюються активні реакційні зв'язки. Ці зв'язки та активні частинки  $(CF_x)_n$  взаємодіють з активними центрами на поверхнях деталей та армують їх поверхні, що показано на рис. 2.12 В результаті армування на зміцнювальній поверхні утворюється модифікований шар, «прошитий» міцними ланцюжками хімічно зв'язаних частинок, що виконують у металевих гратах роль арматури.

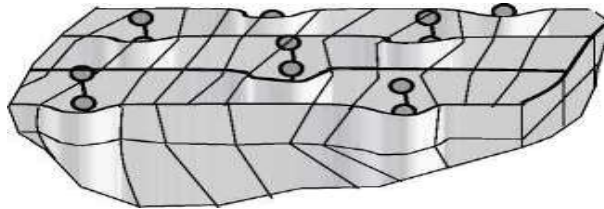


Рис.2.12. Схема пасивації поверхневих дефектів

Технологія зміцнення відпрацьована на зубчастих колесах, підшипниках газотурбінних двигунів, деталей шасі літаків та інших вузлів тертя.

Для реалізації молекулярного армування підшипників кочення розроблено два технологічні варіанти армування.

У першому варіанті (рис. 2.13), зміцнення проводять на вібростенді в камері - 2, заповненої – технологічною рідиною (наприклад, сумішшю масел МС-20 і МС-8п в рівних співвідношеннях) з присадкою 2 ... 3% фторованого графіту  $(CF_x)_n$  при задаванні резонансних коливань робочої рідини, в яку занурюють зміцнювані деталі, де 1 - вібропривід; 2 - робоча ємність (камера); 3 - підшипники, що розміщуються в камері. Наприклад, при армуванні підшипників ( $\Phi = 50...150$  мм) у робочій камері задавали резонансні коливання рідини при амплітуді в межах 5...7 мм. Час обробки – близько 5 хвилин. Контроль зміцнення проводили методами мікротвердості та склерометрування.

У другому варіанті відпрацьовано схему поверхневого зміцнення деталей підшипників при молекулярному армуванні поверхонь контакту при використанні

токарного верстата, рис.2.14 а, б.

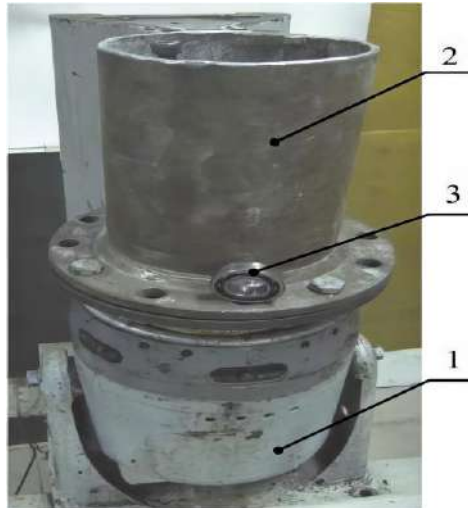


Рис. 2.13. Ілюстрація установки для зміцнення підшипників на вібростенді

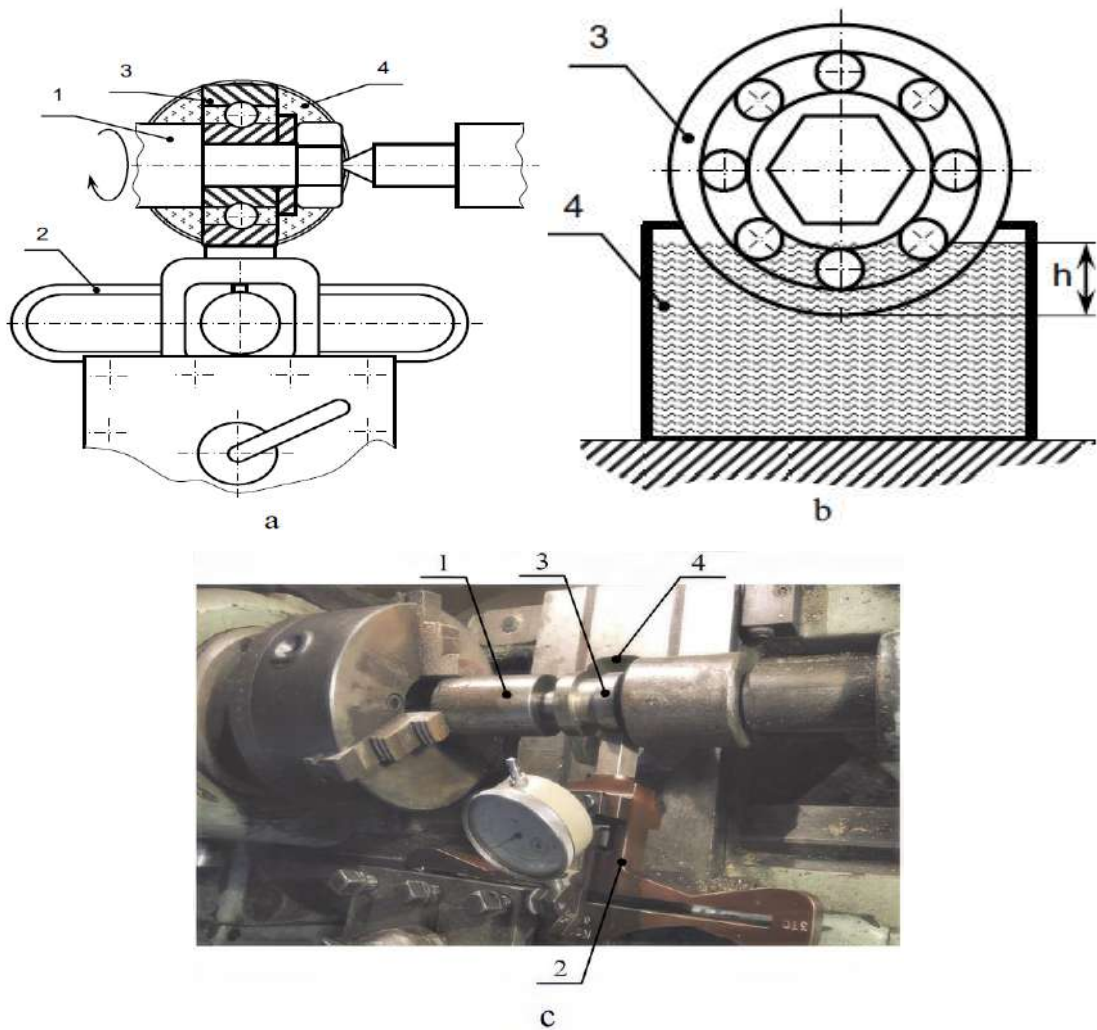


Рис.2. 14. Ілюстрація способу зміцнення підшипників на токарному верстаті:  
а - схема зміцнення; б - схема занурення в приробіткову рідину; с - фотографія робочого блоку.

Підшипник, що зміцнюється, занурювали на  $1/3$  діаметра у ванну - 4 (рис. 3б) з технологічною рідиною. Час зміцнення становив близько 5 хвилин; температура робочої рідини мінус  $30 \dots 50^{\circ}\text{C}$ ; склад рідини - суміш масел МС-20 + МС8П (у рівних співвідношеннях) з присадкою 2...3% фторованого графіту ( $\text{CF}_x$ )<sub>n</sub>.

Швидкість обертання камери -  $330 \text{ хв}^{-1}$ , радіальне навантаження 50 кГс.

На схемі: 1 - оправка для встановлення підшипника; 2 - привід навантаження з динамометром вимірювання сили; 3 - зміцнюваний підшипник; 4 - ванна з технологічною рідиною; h - рекомендована глибина занурення - на  $1/3$  зовнішнього діаметра підшипника.

Оцінка міцності поверхні після зміцнення показала її збільшення до 25%. Для поверхневого зміцнення конічних шестерень також були розроблені два технологічні варіанти:

➤ **зміцнення на вібростенді** (рис.2.15 і 2.17) у робочій ємності, шляхом динамічного наклепу поверхонь зубів шестерень сталевими кульками з одночасним введенням у робочу зону порошку фторованого графіту ( $\text{CF}_x$ )<sub>n</sub>. Амплітуда коливань робочої ємності на резонансному режимі -  $5 \dots 7 \text{ мм}$ , час обробки близько 5 хв;

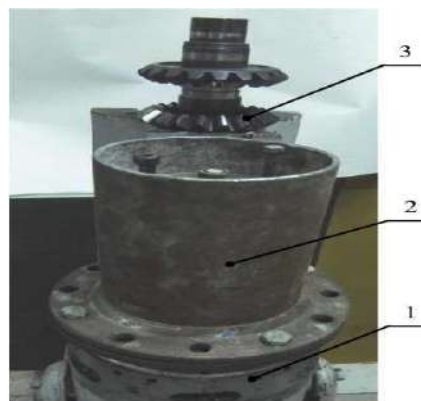


Рис. 2.15 Зміцнення конічних шестерень на вібростенді шляхом динамічного наклепу поверхонь зубів сталевими кульками з порошком фторованого графіту: 1 - вібропривід; 2 - робоча ємність (камера); 3 - схема встановлення конічних шестерень

➤ **зміцнення на токарному верстаті** - 1 (рис. 2.16), при якому робочу ємність

- 2 для динамічного наклепу поверхонь зубів шестерень сталевими кульками

встановлювали на токарному верстаті.

В обох випадках (рис. 2.17) зубчасті колеса 3 зміцнювали зустрічно на торцевих поверхнях робочої ємності - 2 (обсяг простору між зубцями шестерень 1... 2 л). Ємність між шестернями на  $1/3...1/2$  заповнювали сталевими кульками ( $d=2...3,5$  мм) при одночасному введенні порошку фторованого графіту ( $CF_x$ )<sub>п</sub>.

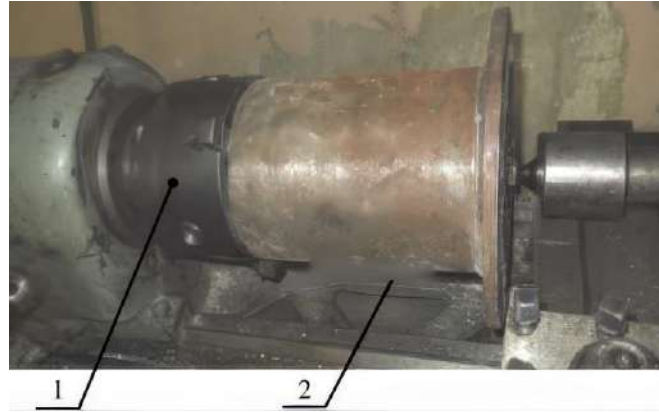


Рис. 2.16 Оснащення для зміцнення конічних шестерень на токарному верстаті шляхом динамічного наклепу поверхонь зубів сталевими кульками та порошком фторованого графіту: 1 - патрон токарного верстата; 2 – робоча ємність

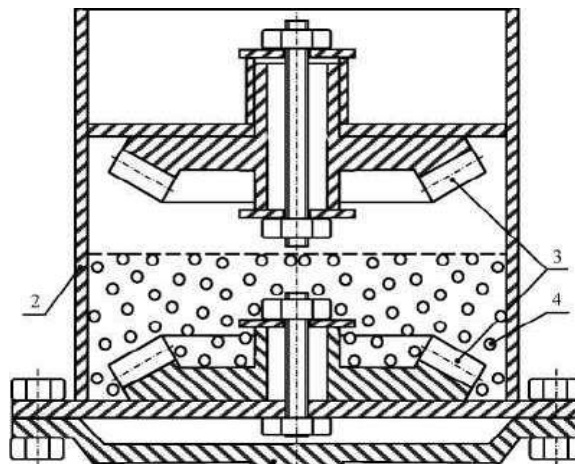


Рис. 2.17 Встановлення конічних шестерень у робочій камері для динамічного наклепу поверхонь зубів сталевими кульками із введенням порошку фторованого графіту:

1 - фланець віброприводу ; 2 - робоча камера ; 3 - шестерні, що зміцнюються; 4 - сталеві кульки

Методика зміцнення зубчастих коліс на вібростенді містить такі основні технологічні операції:

1. Установку зубчастих коліс, контактні поверхні яких зміцнюються, - 3 в

робочу камеру установки - 2, (рис. 2.17).

2. Введення в робочу камеру зміцнювальних кульок ( $\sim 0,3 \dots 0,5$  об'єму між шестернями, контактні поверхні яких зміцнюються) і фторованого графіту (у кількості 2% від об'єму кульок).

3. Закріплення робочої камери на вихідному фланці вібростенду (рис.2.15) або в патроні токарного верстата (рис. 2.16).

4. При використанні вібростенду відбувається налаштування на резонансну частоту коливань робочої камери.

5. Час зміцнення поверхонь зубчастих коліс близько 5 хвилин встановлюється за результатами контролю зміцнювального ефекту.

Для зміцнення поверхонь тертя зубчастих зачеплень найбільш ефективною є схема (рис.2.15) для виконання динамічного наклепу сталевими кульками ( $d = 2 \dots 3,5$  мм), що займають  $1/3 \dots 1/2$  об'єму проміжку між шестернями, при одночасному введенні в ємність порошку фторованого графіту  $(CF_x)_n$  у кількості рядка 2% від об'єму кульок.

Однак, при схемі кріплення робочої камери з шестернями, що зміцнюються, на токарному верстаті є більш широка можливість варіювання параметрами відпрацювання (швидкість обертання, кількість і розміри кульок та ін.) зміцнюваних деталей.

Приклад характеристик шорсткості, отриманої на зубцях конічних шестерень наведено на рис. 2.15 та 2.16, а фотографії на рис.2.17 та 2.18.

Застосований для зміцнення деталей фторований вуглець є порошкоподібним - порошок з хімічною формулою  $(CF_x)_n$  від білого до сірого кольору без механічних домішок. Фторований вуглець має водо- і масло-відштовхувальні властивості, не запалюється і не займається. Термічно стійкий до температури  $400^\circ C$ .

Результати оцінки зміцнення наведено у таблиці. Отримання подібних результатів зміцнення на токарному верстаті потребує більших витрат часу.

Таблиця 2.4

Оцінка підвищення мікротвердості та енергії активації зміцнення методами мікротвердості та склерометрування

№ п/п	Найменування операції	Мікротвердість Нц, кГс/мм <sup>2</sup>		Енергія активації та де4, (Дж/мм <sup>3</sup> )	
		До зміцнення	Після зміцнення	До зміцнення	Після зміцнення
2	Зміцнення поверхонь зубів конічної шестерні	624, 651, 693	662, 702, 715	8,5...24,5	10,1...27

Примітка: \* - при глибині подряпин 1,5...5,8 мкм.



Рис. 2.18  
Профілограма  
поверхні зуба  
конічної шестерні  
до зміцнення (Ra =  
0,76 мкм)



Рис. 2.19 .  
Профілограма  
поверхні зуба конічної  
шестерні після  
зміцнення (Ra = 0,45  
мкм).

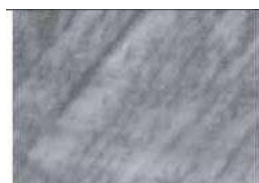


Рис. 2.20  
Поверхня зуба  
конічної шестерні  
до зміцнення  
(Ra = 0,76 мкм)  
x400



Рис. 2.21  
Поверхня зуба  
після зміцнення  
(Ra = 0,45 мкм)  
x400

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.

1. Найбільш ефективним методом, який характеризує змащувальну дію мастильних матеріалів з присадками є вимірювання товщини змащувальних шарів.

Однак вимірювання товщини змащувальних шарів, непроста задача, тому що об'єкт вимірювання, змащувальна плівка, знаходиться між двома поверхнями, які рухаються з великою швидкістю, підвержені деформаціям та биттям, що в більшості випадків перевищує вимірювальну величину. Тому, метод вимірювання товщини змащувального шару, який використовується в цій дисертації, повинен мати високу чутливість, точність, стабільність, та безінерційність. Найбільш повно цим вимогам задовольняє метод вимірювання на змащувальному шарі падіння напруги в режимі нормального жевріючого розряду (метод ВПН в режимі НТР), пропорційний його товщині.

2. Використання даного методу разом з оцінкою змащувальної дії дозволяє вирішувати більш широке коло питань: прогнозувати зносостійкість, визначати режими змащування, вимірювати гідродинамічну та граничну складову

мастильного шару, давати оцінку ефективності роботи мастильних матеріалів та присадок в різних умовах терття.

3. Дослідження ефективності змащувальної дії отримані на модернізованій машині терття СМЦ-2 (обладнаної системою вимірювання товщини мастильного шару, моменту терття, плавною зміною частоти обертів, системою пуск-зупинка), дозволили розробити методики оцінки ефективності мастильних матеріалів та присадок за показниками змащувальної дії:

- на усталеному режимі в процесі припрацювання зубчастих передач;
- на неусталеному режимі роботи зубчастих передач з урахуванням динамічного (пуски-зупинки) та температурного (швидкість нагріву) режимів нестационарності;
- оцінки ефективності мастильних матеріалів з присадками за інтегрованим показником масляної дії;
- методу визначення складових змащувального шару в локальному контакті зубчастих передач.

4. В пп.2.3 та 2.4 наведені відомі сучасні методи металографії, оптичної та електронної растрової мікроскопії, які використовувались для вивчення мікроструктури поверхонь тертя після трибологічних випробувань Тонкоплівкову будову поверхневих шарів досліджували методами мікросондової оже-електронної спектроскопії та ступінчастого травлювання характерних мікроділянок поверхонь тертя йонами аргону

5. Забезпечення низького рівня тертя, зношування та контактної втоми поверхонь тертя деталей в аерокосмічній техніці ускладнюється наявністю високих навантажень, швидкостей, розрідженістю або відсутністю атмосфери, ускладненнями або неможливістю застосування мастил. Однією з технологій, що враховує зазначені особливості зношування, є утворення на поверхнях тертя захисних фторміських плівок. Об'єктами первинного застосування та апробації розроблених при участі автора, технологій були: роликові та кулькові підшипники кочення компресора, турбіни та редуктора, а також зубчасті колеса планетарного редуктора турбостартера ТС-12М.

Фторміські плівки утворюються при фізико-хімічній взаємодії матеріалу

поверхонь з мікрочастинками фторованого графіту (CF<sub>x</sub>)<sub>n</sub> , введеними у вигляді присадки в мастильний матеріал.

Узагальнення результатів лабораторних і стендових випробувань деталей турбостартера ТС-12М показало, що інтенсивність зносу при реалізації технології утворення фторвмісних захисних плівок на поверхнях тертя зменшується не менше ніж на 25-30%; число циклів навантаження до настання викришування в підшипниках зростає в 1,2-1,5 рази; навантажувальна здатність мастильного шару підвищується на 35...40%; навантаження заїдання збільшується до 2 разів.

## **РОЗДІЛ 3. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗМАЩУВАЛЬНОЇ ДІЇ МАСЛЯНИХ СЕРЕДОВИЩ З ПОВЕРХНЕВО ТА ХІМІЧНО АКТИВНИМИ ПРИСАДКАМИ ПРИ КОЧЕННІ ЗІ СКОВЗАННЯМ.**

### **3.1 Присадки до мастильних матеріалів**

Вважається що в'язкість є найважливішою властивістю базової оливи мастильних матеріалів. а стан мастила контролюється лише на основі в'язкості. Однак мастильні матеріали — це не тільки в'язкість. Дуже важливо розуміти роль присадок та їх функції в мастилі.

Присадки до мастил — це органічні або неорганічні сполуки, розчинені або зважені у вигляді твердих речовин в маслі. Зазвичай їх кількість коливається від 0,1 % до 30% об'єму масла, залежно від машини, механізму обладнання.

Добавки (присадки) виконують три основні ролі:

- Покращують наявні властивості базової олії за допомогою антиоксидантів, інгібіторів корозії, антипінних агентів і деемульгаторів.
- Пригнічують небажані властивості базової оливи за допомогою депресантів температури застигання та покращувачів індексу в'язкості (VI) .
- Надають базовим оливам нових властивостей за допомогою присадок для екстремального тиску (EP), мийних засобів, дезактиваторів металів і реагентів для підвищення клейкості.

#### **3.1.1 Полярні добавки**

Полярність присадки визначається як природне спрямоване притягання молекул присадки до інших полярних матеріалів у контакті з маслом. Простіше кажучи, це все, що вода розчиняє або перетворюється на воду.

Губка, металева поверхня, бруд, вода та деревна маса – все це полярно. До неполярних речей належать віск, тефлон, мінеральна основа, та водовідштовхувальні засоби.

Важливо відзначити, що добавки також зпрацьовуються. Якщо у системи з'являються забруднювачі, які приваблюють добавки, такі як бруд, кремнезем і вода, добавки будуть чіплятися за забруднення та осідати на дно або будуть відфільтровані та виснажать пакет присадок.

Існує кілька полярних механізмів, таких як обволікування частинок, емульгування води та змочування металу, які заслуговують на обговорення. Обволікання частинок означає, що добавка прилипає до поверхні частинок і огортає їх. Ці добавки є дезактиваторами металів, детергентами та диспергаторами. Вони використовуються для пептизації (диспергування) частинок сажі з метою запобігання агломерації, осідання та відкладень, особливо при низьких і помірних температурах.

### **3.1.2 Вибір концентрації присадок**

При використанні масляних присадок більше не завжди означає краще. Інколи, додавання в масло більшої кількості присадок переваги не приносить, а іноді продуктивність фактично погіршується. В інших випадках продуктивність добавки не покращується, але ресурс може покращуватись.

Крім того, збільшення процентного вмісту певної присадки може покращити одну властивість олії та водночас погіршити іншу. Коли зазначені концентрації присадок стають незбалансованими, це також може вплинути на загальну якість масла.

Деякі добавки конкурують між собою за однакове місце на металевій поверхні. Якщо до оливи додати високу концентрацію протизносної присадки, інгібітор корозії може стати менш ефективним. Результатом може бути збільшення проблем, пов'язаних з корозією.

Емульгування води відбувається, коли полярна головка добавки прилипає до мікрокраплі вологи. Ці види добавок є емульгаторами.

Якщо вода потрапила в двигун, важливо видалити воду, визначити, де вода потрапила в систему, і відремонтувати її, використовуючи підхід до технічного обслуговування з першопричини, необхідно мати на увазі, що пакет присадок був уражений. З точки зору змащування це відомо як виснаження (зпрацьовування) присадок. Працездатність присадок, що залишилися в мастилi може визначити тільки аналіз масла.



Рис. 3.1 Основні функції добавок (присадок) до мастильних матеріалів

Таблиця 3.1.

Концентрація добавок (присадок) відносно загального обсягу  
мастильних матеріалів в механізмах

Механізми	Використовувані звичайні добавки	Відсоток об'єму масла
Двигуни	Антиоксиданти, ігібітори корозії, мпюча присадка, диспергатор, протизносна, антипінна, покращувач лужності	10-30%
Пари тертя турбіни, компресора	Антиоксиданти, ігібітори корозії, Деемульгатор, антипінна	0,5-5%
Передачі (спіральні, конічні або гіпоідні)	Протизносна, антиоксидант, антипінна, ігібітори корозії, антинавантажувальна	1-10%
Черв'ячні передачі	Антиоксиданти, ігібітори корозії, антинавантажувальна	3-10%
Гідросистема	Антиоксиданти, протизносна, протипінна, ігібітори корозії, низькотемпературний депресант	2-10%

Змочування металу – це коли добавки закріплюються на металевих поверхнях, що вони й повинні робити. Вони кріпляться до внутрішньої частини корпусу редуктора, зубців шестерні, підшипників, валів тощо.

Присадки, які виконують цю функцію, - це ігібітори корозії, протизносні (AW) і протизадирні присадки, маслянисти та ігібітори корозії.

Добавки AW працюють спеціально для захисту металевих поверхонь під час граничних умов. Вони утворюють пластичну золоподібну плівку при помірних і високих температурах контакту (від 150 до 230 градусів F). За граничних умов в плівці AW локалізуються зсувні деформації замість матеріалу поверхні.

Однією з поширених протизносних присадок є діалкілдітіофосфат цинку (ZDDP). Вона зменшує ризик контакту метал-метал, що може призвести до підвищення температури, призвести до окислення та негативно вплинути на міцність плівки .

Незалежно від того, чи покращують вони, чи пригнічують або надають нові властивості базовій олії, присадки відіграють важливу роль у змащуванні машин.

### **3.1.3 Види мастильних присадок**

Існує багато типів хімічних добавок, доданих до базової олії для покращення властивостей базової олії, для пригнічення деяких небажаних властивостей базової олії та, можливо, для надання деяких нових властивостей.

Присадки зазвичай складають приблизно від 0,1 до 30 відсотків готової мастильної оливи, залежно від цільового застосування мастила.

Добавки до мастильних матеріалів є дорогими хімічними речовинами, і створення правильної суміші або рецептури присадок є дуже складною наукою. Саме вибір присадок відрізняє турбінне (R&O) масло від гідравлічного масла , трансмісійного масла та моторного масла .

Серед багатьох існуючих мастильних присадок, присадки вибираються для використання їх здатності виконувати свою призначену функцію. Вони також вибираються через здатність легко змішуватися з вибраними базовими маслами, бути сумісними з іншими присадками в рецептурі та бути економічно ефективними.

Деякі присадки виконують свою функцію всередині мастила (наприклад, антиоксиданти), тоді як інші виконують свою роботу на поверхні металу (наприклад, протизносні присадки та інгібітори іржі).

Звичайні мастильні присадки (добавки), до них відносяться такі загальні види добавок:

## Антиоксиданти.

Окислення - це загальна атака найслабших компонентів базової олії киснем повітря. Це відбувається постійно при будь-якій температурі, але прискорюється при вищих температурах і через присутність води, зносу металів та інших забруднень. Зрештою це спричиняє утворення кислот (які викликають корозію) та шламу (що призводить до утворення поверхневих відкладень і збільшення в'язкості).

Інгібітори окислення, як їх ще називають, використовуються для продовження терміну служби масла. Вони є присадками, які витрачаються під час експлуатації затримуючи початок окислення, таким чином захищаючи базову оливу. Вони присутні майже в кожному мастилі.

### Інгібітори іржі та корозії

Ці добавки зменшують або усувають внутрішню іржу та корозію, нейтралізуючи кислоти та створюючи хімічний захисний бар'єр для відштовхування вологи з металевих поверхонь. Деякі з цих інгібіторів є специфічними для захисту певних металів. Тому масло може містити кілька інгібіторів корозії. Знову ж таки, вони поширені майже в кожному маслі та мастилі. Іншою формою інгібітора корозії є дезактиватори металу.

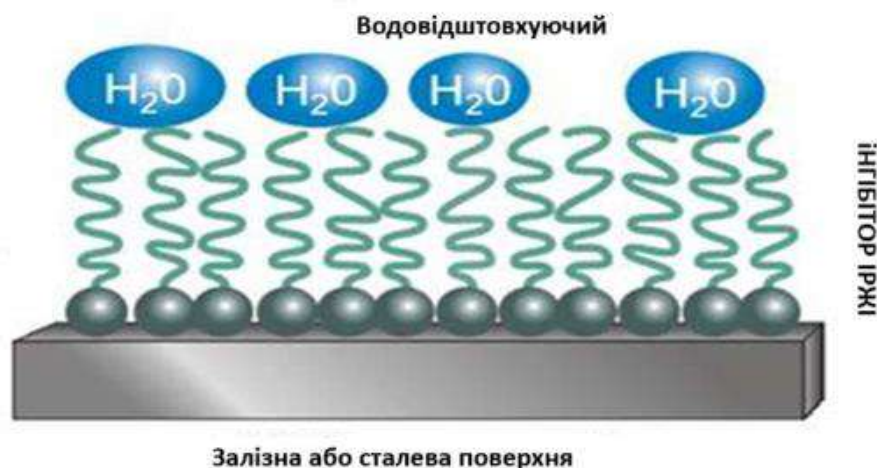


Рис. 3.2 Модель механізму дії інгібіторів корозії

### Покращувачі індексу в'язкості

Покращувачі індексу в'язкості - це полімерні присадки, які частково запобігають розрідженню масла (втраті в'язкості) при підвищенні температури. Ці

присадки широко використовуються при змішуванні різносортних моторних олів, таких як SAE 5W-30 або SAE 15W-40. Вони також відповідають за кращий потік масла при низьких температурах, що призводить до зменшення зносу та покращення економії палива. Крім того, покращувачі VI використовуються для отримання гідравлічних і трансмісійних олів з високим VI для покращення запуску та змащування при низьких температурах.

Присадка, що покращує VI, залишається згорнутою в кульку при низьких температурах і дуже мало впливає на в'язкість масла. Потім, коли температура підвищується, присадка розширює або розширює свої плечі (що робить її більшою) і запобігає надто розрідженню олії при високих температурах.

Покращувачі VI дійсно мають кілька негативних рис. Добавки є великими (з високою молекулярною вагою) полімерами, що робить їх чутливими до подрібнення або розривання на дрібні шматочки компонентами машини (сила зсуву). Шестерні, як відомо, жорстко впливають на добавки, що покращують VI.

Постійний зсув присадки, що покращує VI, може спричинити значні втрати в'язкості, які можна виявити за допомогою аналізу масла. Друга форма втрати в'язкості виникає через високі сили зсуву в зоні навантаження поверхонь тертя (наприклад, у підшипниках ковзання).

Вважається, що добавка, що покращує VI, втрачає свою форму або рівномірну орієнтацію і, отже, втрачає частину своєї загущуючої здатності.

В'язкість масла тимчасово падає в зоні навантаження, а потім повертається до нормальної в'язкості після того, як воно залишає зону навантаження. Ця характеристика фактично допомагає зменшити споживання палива.

Існує кілька різних типів покращувачів VI (загальними є олефінові сополімери). Високоякісні добавки, що покращують VI, менш чутливі до постійних втрат при зсуві, ніж недорогі, низькоякісні добавки, що покращують VI.

Протизношувальні присадки (AW).

Ці добавки зазвичай використовуються для захисту деталей машин від зношування та втрати металу під час граничних умов змащування. Це полярні добавки, які прикріплюються до третьових металевих поверхонь. Вони вступають

у хімічну реакцію з металевими поверхнями, коли відбувається контакт металу з металом в умовах змішаного та граничного змащування.

Вони активуються теплом контакту, щоб утворити плівку, яка мінімізує знос. Вони також допомагають захистити базове масло від окислення, а метал від пошкодження корозійними кислотами.

Ці добавки «використовуються», виконуючи свою функцію, після чого посилюється пошкодження адгезивного зносу. Зазвичай це сполуки фосфору, найпоширенішим з яких є діалкілдітіофосфат цинку (ZDDP).

Існують різні версії ZDDP — одні призначені для гідравлічних застосувань, інші — для високих температур, які зустрічаються в моторних оливах. ZDDP також має деякі антиоксидантні властивості та властивості інгібування корозії. Крім того, інші типи хімікатів на основі фосфору використовуються для захисту від зносу (наприклад, TSP).

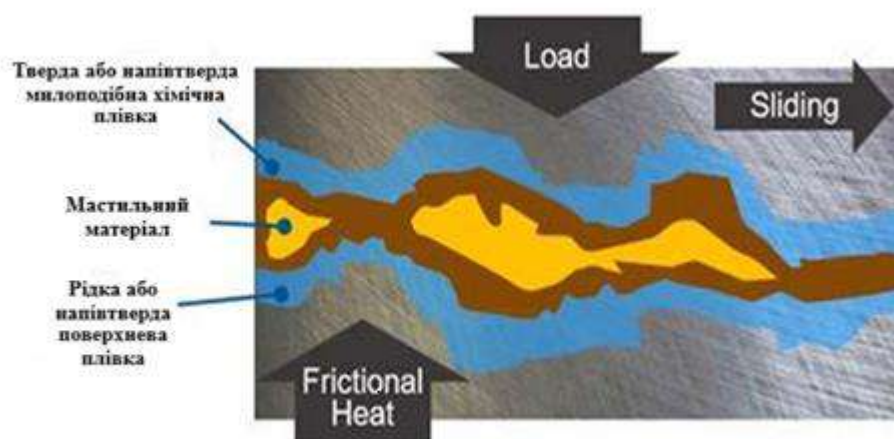


Рис.3.3 Модель механізму дії протизношувальних присадок (AW)

Добавки для екстремального тиску (EP).(присадки проти задиру)

Ці добавки є більш хімічно агресивними, ніж добавки AW. Вони вступають у хімічну реакцію з металевими (залізними) поверхнями, утворюючи тимчасову поверхневу плівку, яка запобігає зварюванню та схопленню протилежних нерівностей, спричинених контактом металу з металом (адгезивний знос).

Вони активуються при високих навантаженнях і високих контактних температурах, які створюються. Вони, як правило, використовуються в

трансмисійних оливах і надають цим оливам унікальний, сильний запах сірки. Ці добавки зазвичай містять сполуки сірки та фосфору (і іноді сполуки бору).

Вони можуть бути корозійними для жовтих металів, особливо при вищих температурах, і тому не повинні використовуватися в черв'ячних передачах і подібних механізмах, де використовуються метали на основі міді. Існують деякі протизадирні присадки на основі хлору, але вони використовуються рідко через проблеми з корозією.

Протизношувальні присадки та засоби протизадирного тиску утворюють велику групу хімічних присадок, які виконують свою функцію захисту металевих поверхонь під час граничного змащування шляхом утворення захисної плівки або бар'єру на зношуваних поверхнях.

Поки між металевими поверхнями зберігається гідродинамічна або еластогідродинамічна масляна плівка, граничне змащування не відбудеться, і ці присадки для граничного змащування не будуть потрібні для виконання своїх функцій.

Коли масляна плівка руйнується і виникає нерівність контакту під високими навантаженнями або високими температурами, ці граничні змащувальні добавки захищають поверхні, що зношуються.

#### Миючі засоби

Миючі засоби виконують дві функції. Вони допомагають утримувати гарячі металеві компоненти вільними від відкладень (чистими) і нейтралізують кислоти, які утворюються в маслі. Детергенти в основному використовуються в моторних маслах і є лужними або основними за своєю природою.

Вони складають основу резерву лужності моторних олив, який називають основним числом (BN). Зазвичай вони є матеріалами хімії кальцію та магнію. Миючі засоби на основі барію використовувалися в минулому, але зараз використовуються рідко.

Оскільки ці металеві сполуки залишають зольний відкладення під час згоряння олії, вони можуть спричинити утворення небажаного залишку при високій температурі. У зв'язку з проблемою золи багато OEM-виробників

вибирають оливи з низьким вмістом золи для обладнання, що працює при високих температурах. Миюча добавка зазвичай використовується в поєднанні з диспергуючою добавкою.

### Диспергатори

Диспергатори в основному містяться в моторному маслі з миючими засобами, щоб допомогти зберегти двигун чистим і без відкладень. Основною функцією диспергаторів є утримання частинок нагару дизельного двигуна в дрібнодисперсному або зваженому вигляді в маслі (розміром менше 1 мікрона).

Мета полягає в тому, щоб утримувати забруднювач у зваженому стані та не дозволяти йому агломерувати в маслі, щоб мінімізувати пошкодження та вивести його з двигуна під час заміни масла. Диспергатори, як правило, органічні та беззольні. Таким чином, їх нелегко виявити за допомогою звичайного аналізу масла.

Комбінація миючих/диспергуючих добавок дозволяє нейтралізувати більше кислотних сполук і більше частинок забруднювачів залишатися у зваженому стані. Оскільки ці присадки виконують свої функції нейтралізації кислот і суспендування забруднюючих речовин, вони зрештою перевищують свою потужність, що викличе необхідність заміни масла.

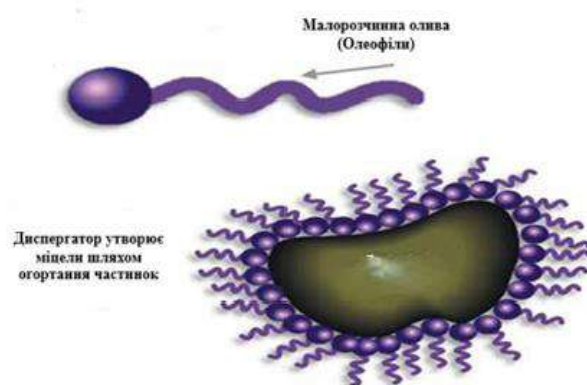


Рис. 3.4 Модель механізму дії диспергаторів

### Антипінні агенти

Хімічні речовини в цій групі присадок мають низький міжфазний натяг, який послаблює стінку масляних бульбашок і дозволяє бульбашкам піни легше лопатися. Вони мають непрямий вплив на окислення, зменшуючи кількість повітряно-масляного контакту. Деякі з цих присадок є нерозчинними в маслі силіконовими матеріалами, які не розчиняються, а скоріше тонко диспергуються в мастилі. Зазвичай потрібні дуже низькі концентрації. Якщо додати занадто багато антипіноутворювача, це може мати зворотний ефект і сприяти подальшому піноутворенню та залученню повітря.

### Модифікатори тертя

Модифікатори тертя зазвичай використовуються в моторних оливах і рідинах для автоматичних трансмісій для зміни тертя між компонентами двигуна та трансмісії. У двигунах наголос робиться на зниженні тертя для покращення економії палива.

У коробках передач основна увага приділяється покращенню зачеплення матеріалів зчеплення. Модифікатори тертя можна розглядати як протизносні добавки для менших навантажень, які не активуються контактними температурами.

### Депресанти температури застигання

Температура застигання олії - це приблизно найнижча температура, при якій олія залишається рідкою. Кристали воску, які утворюються в парафінових мінеральних маслах, кристалізуються (стають твердими) при низьких температурах. Тверді кристали утворюють ґратчасту мережу, яка перешкоджає витіканню залишків рідкої нафти.

Присадки цієї групи зменшують розмір кристалів воску в маслі та їх взаємодію один з одним, дозволяючи маслу продовжувати текти при низьких температурах.

### Деемульгатори

Добавки-деемульгатори перешкоджають утворенню стабільної масляно-водної суміші або емульсії, змінюючи межфазний натяг масла таким чином, що

вода зливається і легше відділяється від масла. Це важлива характеристика для мастильних матеріалів, які піддаються впливу пари або води, щоб вільна вода могла осідати та легко стікати в резервуар.

#### Емульгатори

Емульгатори використовуються в металообробних рідинах на основі олії та води та вогнестійких рідинах, щоб допомогти створити стабільну емульсію олія-вода. Добавку емульгатора можна розглядати як клей, що зв'язує олію та воду, тому що зазвичай вони хотіли б відокремитися одна від одної через міжфазний натяг і різницю в питомій вазі.

#### Засоби підвищення клейкості

Підвищувачі клейкості — це в'язкі матеріали, які використовуються в деяких маслах і мастилах, щоб запобігти відриву мастила від металевої поверхні під час обертального руху.

Щоб бути прийнятними як для блендерів, так і для кінцевих користувачів, добавки повинні бути придатними для обробки в звичайному обладнанні для змішування, стабільними при зберіганні, не мати неприємного запаху та бути нетоксичними за нормальними промисловими стандартами.

Оскільки багато з них мають високу в'язкість, їх зазвичай продають розробнику олії у вигляді концентрованих розчинів у базовій олії-носії.

### **3.1.4 Вичерпування та виснажування масляних присадок при споживанні**

Дуже важливо розуміти, що більшість присадок споживаються та виснажуються за рахунок: « розкладання » або руйнування; « адсорбції » на поверхні металу, часток і води, а також « розділення » внаслідок відстоювання або фільтрації.

Механізми адсорбції та розділення включають масообмін або фізичний рух присадки. Для багатьох присадок чим довше олива залишається в експлуатації, тим менш ефективним залишається пакет присадок для захисту обладнання. Коли пакет присадок слабшає, в'язкість збільшується, починає утворюватися шлам, корозійні кислоти починають впливати на підшипники та металеві поверхні та/або

починає збільшуватися знос. Якщо використовуються олії низької якості, ці проблеми починаються набагато раніше.

Наступну таблицю можна використовувати як орієнтир для більш глибокого розуміння типів присадок та їх функцій у складі моторної оливи.

Таблиця 3.2

### ПРИСАДКИ ЗАХИСНІ ПОВЕРХНІ МАСТИЛА МОТОРНІ

ТИП ДОБАВКИ	МЕТА	ТИПОВІ СПОЛУКИ	ФУНКЦІЇ
<b>Засіб проти зношування</b>	Зменшити тертя та знос, а також запобігти подряпинам та заїданню	дитіофосфати цинку, органічні фосфати та кислі фосфати; органічні сполуки сірки та хлору; сульфировані жири, сульфіді і дисульфіді	Хімічна реакція з поверхнею металу з утворенням плівки з нижчою міцністю на зсув, ніж метал, що запобігає контакту металу з металом
<b>Інгібітор корозії та іржі</b>	Запобігає корозії та іржавінню металевих частин, що контактують з мастильним матеріалом	Дитіофосфати цинку, феноляти металів, сульфонати основних металів, жирні кислоти та аміни	Переважає адсорбція полярних компонентів на поверхні металу для створення захисної плівки та/або нейтралізації корозійних кислот
<b>Миючий засіб</b>	Очищає поверхні від відкладень і нейтралізує корозійні кислоти	Металоорганічні сполуки фенолятів, фосфатів і сульфонатів барію, кальцію і магнію	Хімічна реакція з шламом і прекурсорами лаку для їх нейтралізації та збереження розчинності
<b>Диспергатор</b>	Тримає нерозчинну сажу диспергованою в мастилі	Полімерні алкілтіофосфонати та алкілсукциніміди, органічні комплекси, що містять сполуки азоту	Забруднювачі запобігають агломерації та зберігаються в суспензії завдяки розчинності диспергатора
<b>Модифікатор тертя</b>	Зміна коефіцієнта тертя	Органічні жирні кислоти та аміни, жирна олія, органічний фосфор і ефіри фосфорної кислоти	Переважає адсорбція поверхнево-активних матеріалів

Таблиця 3.3

**ЕФЕКТИВНІ ПРИСАДКИ. МАСТИЛА ДВИГУНА**

<b>Депресант температури застигання</b>	Забезпечити течію мастила при низьких температурах	Алкіловані нафталінові та фенольні полімери, поліметакрилати	Змінить формування кристалів воску, щоб зменшити блокування
<b>Засіб для набухання ущільнень</b>	Набухаючі еластомерні ущільнювачі	Органічні фосфати, ароматичні сполуки, вуглеводні галогеновані	Хімічна реакція з еластомером викликає легке розбухання
<b>Полішувач в'язкості</b>	Зменшити швидкість зміни в'язкості з температурою	Полімери та співполімери метакрилатів, бутадієн-олефінів та алкілованих стиролів	Полімери розширюються з підвищенням температури, щоб протидіяти розрідженню масла

Таблиця 3.4

**МАСТИЛЬНІ ЗАХИСНІ ПРИСАДКИ. МОТОРНІ МАСТИЛА**

<b>Антипінний</b>	Не допускайте утворення стійкої піни	Силіконові Полімери та органічні сополімери	Зменшить поверхневий натяг, щоб прискорити руйнування піни
<b>Антиоксидант</b>	Сповільнює окислювальний розпад	Дитіофосфати цинку, утруднені феноли, ароматичні аміни, сульфовані феноли	Розщеплюють пероксиди та припиняють вільнорадикальні реакції
<b>Дезактиватор металу</b>	Зменшити каталітичний вплив металів на швидкість окислення	Органічні комплекси, що містять азот або сірку, аміни, сульфідні та фосфіти	Утворює неактивну плівку на металевих поверхнях шляхом утворення комплексів з іонами металів

З наведеної вище інформації очевидно, що в більшості масел, які використовуються для змащування обладнання, міститься багато хімії. Це складні суміші хімічних речовин, які знаходяться в рівновазі один з одним і це необхідно враховувати. Саме з цих причин слід уникати змішування різних масел і додавання додаткових мастильних присадок.

### 3.2 Вплив присадок карбонових кислот на змащувальний шар в локальному контакті зубчастих передач

Гідродинамічний шар в контактi займає проміжне положення між граничними шарами, прилеглими до сполучених поверхонь тертя. Товщина і роль такого шару істотно змінюється в залежності від умов навантаження і матеріалів, але цей шар завжди практично має місце в умовах тертя з мастилом. У зв'язку з цим, у рамках проведених досліджень, постає завдання вивчення впливу карбонових кислот на цей шар.

Метою дослідження є оцінка впливу мастильних матеріалів з поверхнево-активними присадками карбонових кислот на гідродинамічний шар у локальному контактi зубчастих передач.

Випробування проводилися на контактнo-роликовій машині тертя за схемою ролик-ролик. Як зразки служили пари роликів діаметром 80 і 85 мм. Матеріал зразків – сталь 45, твердість НВ-200. Тиск у контактi становив 400 і 1000 МПа. Як мастильні матеріали застосовувалося авіаційне масло МС-20, без присадок і з присадками 0,5% однієї з основних карбонових кислот. Перед випробуваннями зразки попередньо припрацьовували, ретельно промивали в бензині Б-70 і висушували.

На рис.3.5; 3,6; 3.7 наведено результати досліджень мастильної дії олії МС-20 з присадками у початковий період – період стабілізації параметрів мастильної дії. Введення присадок у всіх випробуваннях призводило до зниження товщини мастильного шару (рис. 3.5) на величину, яка залежить від виду присадки та умов навантаження. Найбільший вплив мають присадки мурашинової кислоти, які здатні зменшити товщину мастильного шару на 90% і більше – аж до появи та розвитку схоплювання контактних поверхонь. Зі збільшенням тиску посилюється дія присадок пропорційно їх молекулярній вазі, тобто зі збільшенням тиску з 400 до 1000 МПа товщина шару зменшувалася приблизно на 0, 0,7 і 20% відповідно у присутності мурашинової, оцтової та олеїнової кислот.

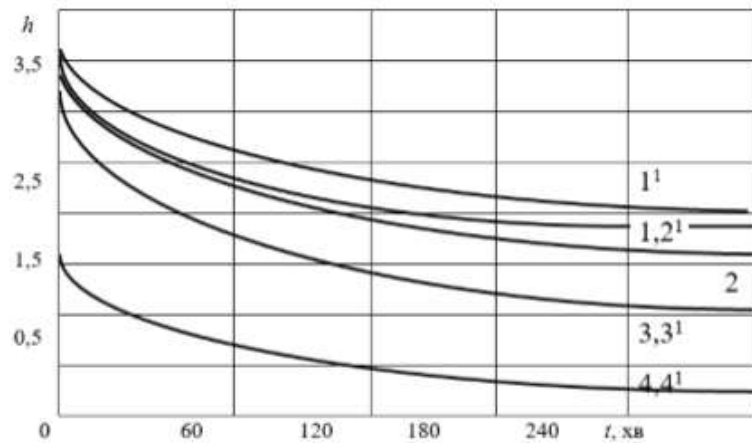


Рис. 3.5 Зміна товщини гідродинамічного шару у післяпусковий період: 1 - 4 – при тиску в контактї 1000 МПа; 1<sup>1</sup>-4<sup>1</sup> – при тиску в контактї 400 МПа; 1,1<sup>1</sup> - МС-20; 2,2<sup>1</sup> – МС-20 з олеїною кислотою; 3,3<sup>1</sup> – МС-20 з оцтовою кислотою; 4,4<sup>1</sup> – МС-20 з мурашиною кислотою

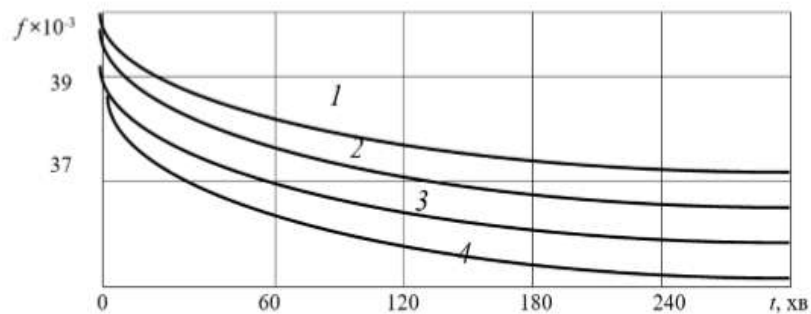


Рис. 3.6 Зміна коефіцієнта тертя. 1 – МС-20; 2 – МС-20 з олеїною кислотою; 3 - МС-20 з оцтовою кислотою; 4 - МС-20 з мурашиною кислотою

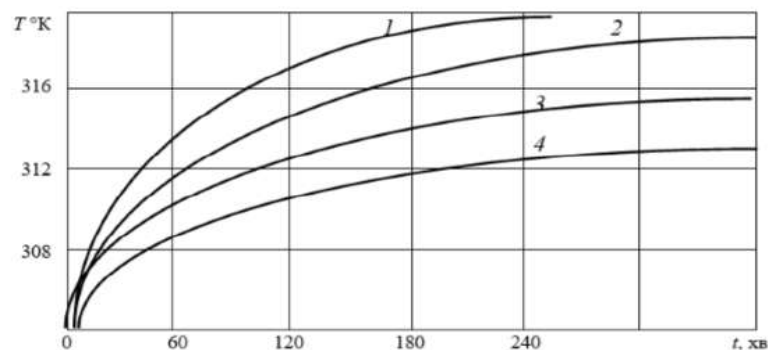


Рис. 3.7 Зміна температури мастила на вході в контакт: 1 - МС-20; 2 - МС-20 з олеїною кислотою; 3 – МС-20 з оцтовою кислотою; 4 – МС-20 з мурашиною кислотою

Зміна коефіцієнта тертя (рис. 3.6) відбувається відповідно до кривої Герсі - Штрибека – зменшуються втрати на тертя із зменшенням товщини шару, а у разі надмірного його зниження втрати на тертя збільшуються. Останнє підтверджується появою слідів схоплювання на поверхнях, що труться. Швидкість зміни та кінцеві значення температури олії якісно узгоджуються з експериментальними даними втрат на тертя рис. 3.6 та рис. 3.7 На рис.3.8 наведено графік зміни відношення розрахункових значень кінематичної в'язкості олії МС-20 та МС-20 з присадкою мурашинної кислоти на вході в контакт з урахуванням зміни температури на вході в контакт (крива 1).

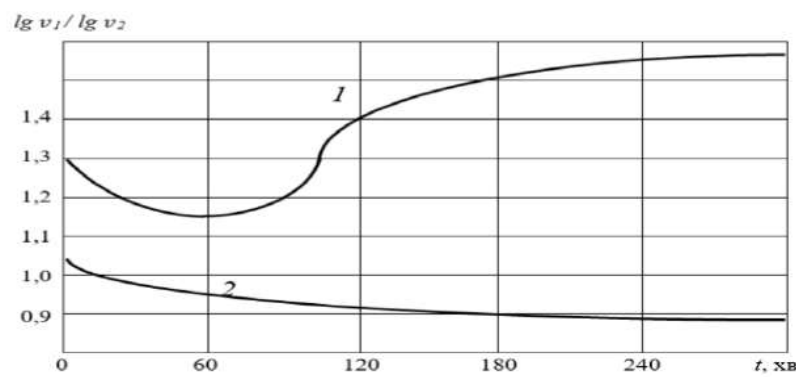


Рис. 3.8 Зміна величини відношення середньої кінематичної в'язкості мастила МС-20 до аналогічної величини мастила МС-20 з присадкою мурашиної кислоти та контакті 1 та величини відношення в'язкості цих мастильних матеріалів на вході в контакт 2 в період стабілізації параметрів мастильного шару.

На рис.3.8 наведено криві для середньої кінематичної в'язкості в контакті, яка визначалася відповідно до формули Ньютона [1]

$$v = \mu h / V_{\text{ков}} \quad (1)$$

де  $\mu$  – напруга зсуву у шарі олії в контакті;  $v$  – кінематична в'язкість;  $h$  – товщина мастильного шару у контакті;  $V_{\text{ков}}$  – швидкість ковзання.

З аналізу отриманих відносин випливає, що в'язкість базової олії на вході в контакт нижче в'язкості олії з присадками, що пояснюється тепловими явищами.

$$\lg v_1 / \lg v_2 \leq 1 \quad (2)$$

Однак одні теплові явища не в змозі пояснити той факт, що за меншої температури масла з присадкою мурашиної кислоти, в'язкість в контакті нижче, ніж у масла без присадок. Для аналізу співвідношень теоретичних та експериментальних параметрів мастильної дії відповідно до даних температури проведено розрахунок товщини контактної-гідродинамічного мастильного шару за формулою Петрусевича А.І.,

$$h=C v_0^\beta V_{\text{сум}} P^{-6} a^\varepsilon \rho^\tau E^m \quad (3)$$

де  $C$  – коефіцієнт,  $v$  – кінематична в'язкість;  $V_{\text{сум}}$  – сумарна швидкість кочення;  $P$  – погонне навантаження;  $a$  – п'єзоефект в'язкості;  $\rho$  – наведений радіус кривизни;  $E$  – модуль пружності, а також коефіцієнт тертя відповідно до формули запропонованої Дроздовим Ю.М. [155, 156, 157].

$$f = \frac{A_{\text{п}}^{0,1} \left[ 10 + \lg \left( \frac{HB \cdot R_{\text{а}}}{E_{\text{пп}} E_{\text{пр}}} \right) \right]}{V_{\text{к}}^{0,07} \cdot \vartheta_{\text{ск}}^{0,35} \cdot \vartheta_{\text{е}}^{0,1} \cdot R_{\text{пр}}^{0,25}} \quad (4)$$

де  $A = 0,09$ . Формула використовується при виконанні наступних умов: в'язкість –  $v > 1$  ст, навантаження  $P_{\text{п}} \geq 300$  Кгс/см, тиск у контакті  $p \geq 4000$  Кгс/см<sup>2</sup>, швидкість кочення  $V_{\text{коч}} \geq 100$  см/с; швидкість ковзання  $V_{\text{ков}} > 20$  см/с, наведений радіус кривизни  $R_{\text{нав}} > 0,5$  см, шорсткість  $R_{\text{а}} > 10^{-5}$  см. Твердість  $HB > 5000$  кг/см<sup>2</sup>.

Функціональна схема (рис. 3.9) відображає причини та хід зміни товщини мастильного шару та коефіцієнту тертя відповідно до КГТЗ. При заданих умовах мастила  $N$ ,  $V$ ,  $T$  і матеріалах  $C$  збільшення температури  $T$  супроводжується зменшенням в'язкості; (динамічної та кінематичної) та п'єзокоефіцієнта в'язкості  $a$ , що відповідно до виразів (4) та (5), викликає збільшення коефіцієнта тертя та зменшення товщини гідродинамічного шару. Такі зміни призводять до збільшення деформації контактних поверхонь та прискорюють їх зношування. Стабілізація параметрів у цих умовах можлива через збільшення тепловідведення поперек мастильного шару.

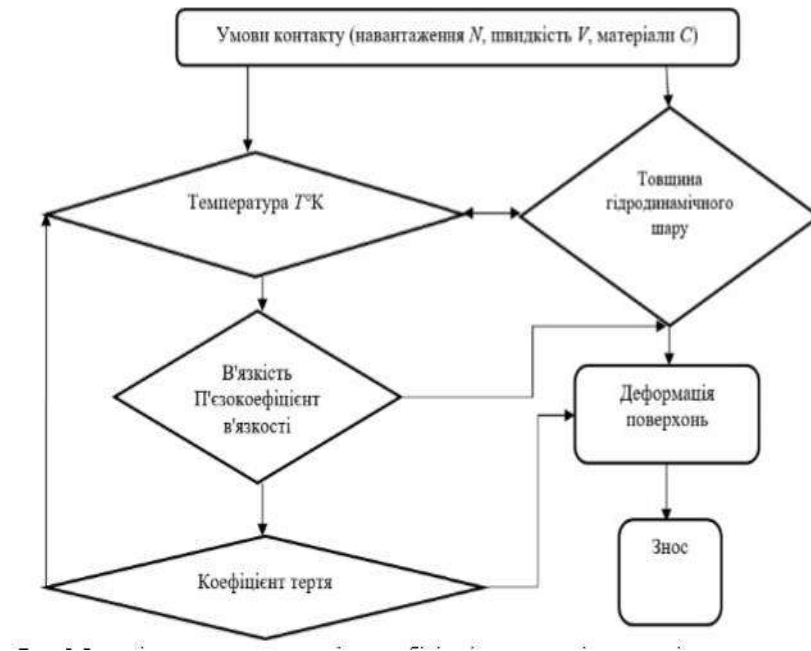


Рис.3.9 Функціональна схема механізму стабілізації товщини гідродинамічного шару та коефіцієнта тертя відповідно до контактної-гідродинамічної теорії змащування за заданих умов навантаження.

Зміни експериментальних і розрахункових кривих мастильних шарів якісно збігаються, тобто. мають спадаючий характер (рис.3.5 та рис.3.10 ). З величини відношення експериментальних товщин до розрахункових впливає, що найкраща збіжність відповідає випробуванням з маслом без присадок при встановлених параметрах (відношення у відсотках становить 77%) . Найгірша збіжність спостерігалася при додаванні мурашиної кислоти (близько 11%).

Зростаючий характер втрат тертя протилежний аналогічним експериментальним характеристикам, де спостерігалася зниження втрат тертя з початку випробувань. У міру зростання температури збільшення розрахункових значень коефіцієнта тертя обумовлено зниженням в'язкості олії, значення якої перебувають у знаменнику виразу (5). Якісно подібні результати отримані і при випробуваннях вазелінової олії, масел І-40А, І-50А, МК-8, а також присадок шавелевої, бурштинової, циклобутанкарбонової, циклопентанкарбонової та циклогексанкарбонової кислот.

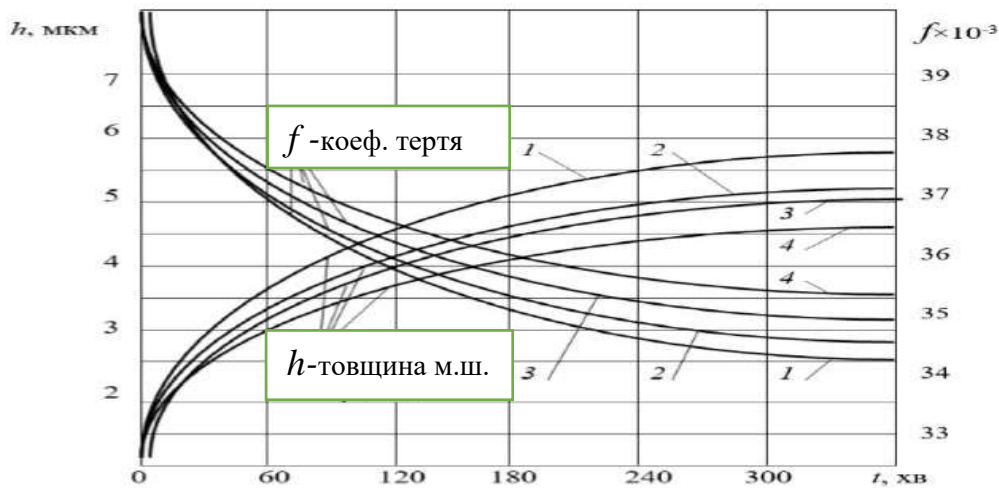


Рис.3.10 Зміна коефіцієнта тертя  $f$  і товщини мастильного шару  $h$  у відповідності з формулами контактної гідродинаміки в післяпусковий період при тиску в контакті 1000 МПа; 1 – МС-20; 2 – МС-20 з олеїною кислотою; 3 – МС-20 з оцтовою кислотою; 4 – МС-20 з мурашиною кислотою

Виявлене явище зниження товщини мастильного шару з одночасним зниженням втрат на тертя у присутності присадок поверхнево-активних речовин виявлялося так само і при великих швидкостях кочення – до 25м/с. Такі явища суперечать поглядам, що встановилися, і не можуть бути пояснені з позицій класичної контактної-гідродинамічної теорії мастила, що враховує лише стисливість контактних поверхонь і зміну в'язкості відповідно до температури в контакті.

Однією з причин значного зниження товщини мастильного шару в присутності поверхнево-активних речовин може бути зміна в'язкості масел в об'ємі відповідно до номограми Семенідо або формули Штаудінгера [1] для мастил. Однак розрахунки показують, що в'язкість сумішей масла і присадок, що застосовувалися, незначно відрізняється від в'язкості базового масла. В'язкість застосовуваних кислот на два-три порядки нижче в'язкості базової олії МС-20, тому можливість зниження товщини мастильного шару відповідно до цього механізму цілком реальна.

Для перевірки такого припущення з поверхні зразків у процесі випробувань в режимі тертя за зоною контакту, що встановився, відбиралися проби масла. Методом інфрачервоного спектрального аналізу визначалося вміст присадок у цих

пробах і порівнювалося з вмістом в обсязі. Істотної різниці у в'язкості, здатної вплинути помітно на товщину мастильного шару, не спостерігалось. На відсутність значного впливу в'язкості присадок на в'язкість мастильних сумішей вказує також той факт, що в'язкість оцтової кислоти на 25% при 200°C менше в'язкості мурашиної, а товщина мастильного шару в останньому випадку була значно нижчою на всьому протязі випробувань (рис.3.5).

У роботі [1] вказується на можливість ламінізації потоку мастильного шару присадками, що мають ниткоподібну або пластинчасту структуру, внаслідок їх орієнтації вздовж потоку. Однак довжина молекули олеїнової кислоти значно перевищує довжину молекули оцтової або мурашиної кислот, але останні мають великий вплив на мастильний шар і на коефіцієнт тертя. У дослідженнях швидше спостерігалася зворотна залежність між величиною зміни мастильних властивостей і довжиною молекул.

### **3.3 Змащувальна дія авіаційних мастильних матеріалів з присадками та дослідження їх впливу на антифрикційні, протизносні та протизадирні властивості пар тертя з локальним контактом в умовах кочення зі сковзанням**

Зубчасті передачі є найбільш розповсюдженим видом механічних передач. У зв'язку з цим збільшення несучої спроможності і підвищення якості зубчастих передач має велике значення. Велика роль в цьому належить мастильним матеріалам, так як мастильні матеріали в значній мірі попереджують зношування зубів, яке є основною причиною виходу зубчастих коліс із ладу. Із збільшенням навантажень, швидкостей, температури умови тертя на робочих поверхнях зубів є більш важкими. Правильний вибір мастильних матеріалів є порівняно складною проблемою, особливо в зв'язку з розширенням асортименту мастильних матеріалів і присадок. Труднощі при виборі мастил пояснюються тим, що мастильні шари між зубами утворюються в результаті гідродинамічного ефекту, граничних поверхневих явищ, хімічних реакцій. Теорія сумісної дії цих чинників на сьогоднішній день відсутня, незважаючи на те, що окремі питання її розвиваються успішно. В першу чергу необхідно відмітити розвиток так званої

контактно-гідродинамічної теорії мащення. Значні успіхи досягнуті і в області вивчення хімічних процесів, що протікають між мастилом і металом.

Необхідно дослідити закономірності утворення мастильних шарів між зубами в результаті гідродинамічного ефекту, граничних явищ і хімічних реакцій.

При вивченні мастильної дії олив в якості основної характеристики мастильних шарів приймалась їх товщина. Для виміру товщини шарів безпосередньо між зубами використовувався метод, який заснований на вимірюванні падіння електричної напруги в локальному контакті зубців зубчастих передач та описаний в розділі 2.1. Для підтвердження високої точності цього методу були проведені порівняння даних, отриманих цим методом та методом описаним в. Була експериментально підтверджена висока точність електричного методу в режимі тліючого розряду. Цей метод дозволяє роздільно виміряти товщину мастильних шарів різної природи їх утворення за рахунок механічного руйнування сформованих поверхневих шарів і необхідністю необхідного часу для їх наступного відновлення. Це дозволяє в початковий момент після зняття поверхневих шарів виміряти товщину шару тільки гідродинамічного походження, а потім виміряти утворення з часом товщини поверхневих шарів.

Результати роздільного вимірювання товщини мастильних шарів в залежності від сумарної швидкості кочення зубів наведені на рис. 3.11. Експериментальні дослідження проводились для авіаційних олив МС-20, МК-8 та для індустріального І-50. Графіки 1, 2, 3 характеризують товщину мастильного шару, що утворюється за рахунок гідродинамічного ефекту і поверхневих явищ для олив відповідно МС-20, І-50, МК-8. Графіки 1а, 2а, 3а характеризують товщину мастильних шарів для тих же олив, що утворюються тільки за рахунок гідродинамічного ефекту. Порівняння цих графіків показує, що між зубами можливо утворення відносно товстих шарів поверхневого походження. Підтвердженням того, що графіки 1а, 2а, 3а показують закономірність зміни товщини мастильних шарів гідродинамічного походження є пропорційність цих товщин густині досліджуваних мастил в ступені 0,7. Так, співвідношення густин для олив 1,0 : 0,4 : 0,2. Експериментально отримано співвідношення товщини

шарів 1,0 : 0,42 : 0,2. Крім того, порівняння експериментальних та теоретичних значень товщини мастильних шарів (графіки 1а та 4) показують їх задовільну кореляцію. Теоретична крива 4 побудована за формулою А.І. Петрусевича.

Необхідно відмітити, що утворення поверхневих шарів великої товщини можливо тільки при низьких температурах. Результати роздільного вимірювання товщини мастильних шарів в залежності від температури показано на рис. 3.12. Графік 1, характеризує зміну сумарної товщини мастильного шару для оливи МС-20, а графік 2 - зміну товщини мастильного шару гідродинамічного походження. Із графіків видно, що із збільшенням температури різко зменшується товщина поверхневих шарів, так як кінетична енергія адсорбованих молекул оливи починає перевищувати енергію їх зв'язку з поверхнею зубів і в результаті чого протікає їх десорбція в рідку фазу.

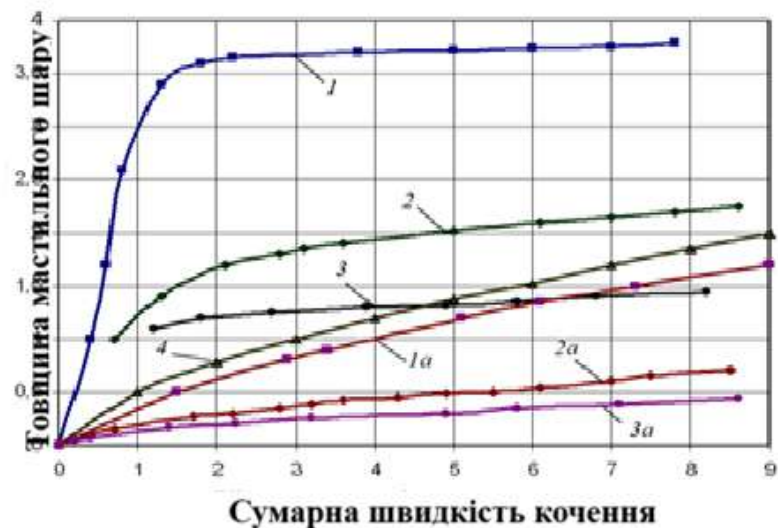


Рис.3.11 – Розподільне вимірювання товщини мастильних шарів різної природи походження

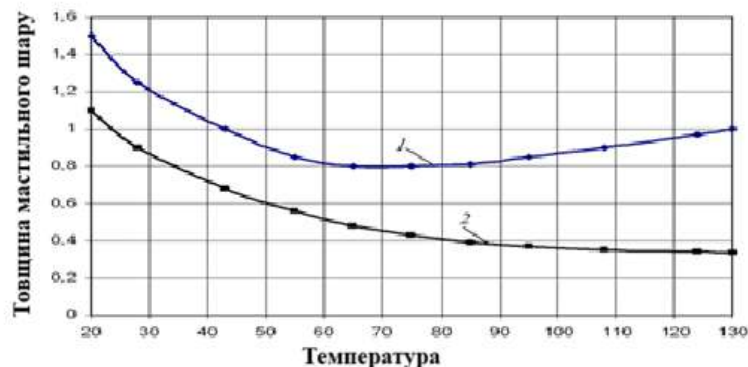


Рис.3.12 – Залежність товщини мастильного шару від температури.

Також було виявлено, що при температурі вище  $70^{\circ}\text{C}$  має місце збільшення товщини поверхневого шару, що зумовлено утворенням на поверхні зубів твердо подібних плівок. Подальші дослідження, виконані нами показали, що ці плівки мають мастильну та захищають поверхню зубів від руйнування.

На основі роздільного вимірювання товщини мастильних шарів були визначені області в яких проявляються різні механізми мастильної дії оливо.

1. В зоні низьких температур і малих швидкостей кочення превалюють поверхневі шари адсорбційного походження. Ця область характерна для роботи тихохідних зубчастих передач.

2. В зоні середніх температур, навантажень і великих швидкостей кочення превалююче значення мають шари гідродинамічного походження. В цій зоні працює більшість зубчастих передач.

3. В зоні підвищених температур мастильна дія оливо відбувається за рахунок твердоподібних плівок. В цій зоні працюють важко навантажені зубчасті передачі.

### **3.4 Вплив поверхнево-активних речовин мастильних матеріалів на якість припрацювання зубчастих передач**

Одним з шляхів підвищення надійності та довговічності машин є забезпечення оптимального припрацювання деталей. Якісне припрацювання поверхонь тертя підвищує несучу спроможність масляної плівки змащувального шару, забезпечує оптимальну мікрогеометрію, склад, структуру та фізико-механічні властивості поверхневих шарів. Вплив змащувального шару на процеси припрацювання досліджувалися у роботах професора М.В. Райко та його учнів, виконаних в 70-90 роках минулого сторіччя в лабораторії «Змащування контактних поверхонь» (сучасна кафедра «Прикладної механіки та інженерії поверхні» Національного авіаційного університету) [63-70].

У цих роботах використовувався принципово новий на той час метод дослідження процесу припрацювання шляхом вимірювання товщини змащувального шару. В наших дослідженнях цей метод також був використаний в якості основного для оцінки показників якості змащувальної дії мастильних матеріалів в локальному контакті зубчатих передач (Методика оцінки ефективності

присадок за показниками змащувальної дії на усталеному режимі в процесі припрацювання зубчастих передач описана в розділі 2.2.1).

Результати проведених досліджень відкрили новий шлях до скорочення часу припрацювання і підвищення його якості за рахунок оптимізації режиму при одночасному контролі якості. Оптимальним з точки зору якнайшвидшого вигладжування і узгодження контактних поверхонь є режим припрацювання, при якому підтримують товщину мастильного шару, здатного попередити заїдання. Мінімальну товщину мастильного шару підтримують безперервно з початку припрацювання до досягнення номінального навантаження шляхом безперервного його регулювання. Відповідно до цієї товщини мастильного шару, значення падіння електричної напруги на ньому для кожної конструкції визначається експериментально на дослідних парах.

Відомо, [63,64] що ефективність дії мастильних матеріалів, призначених для роботи в умовах граничного і гідродинамічного тертя, визначається не тільки їх реологічними властивостями, але і їх схильністю до утворення в контакті пар тертя самогенеруючих органічних плівок (СОП) з одного боку, і їх здатністю забезпечувати оптимальну мікрогеометрію поверхонь тертя з іншого. Однак, як і утворення СОП, так і формування оптимальної мікрогеометрії поверхонь тертя, відбувається на початковій стадії їх експлуатації – тобто на стадії припрацювання. Тому утворення СОП небажано в період зношування при припрацюванні, так як це збільшує тривалість припрацювання і погіршує якість поверхонь. Для запобігання утворенню СОП в період зношування при припрацюванні і прискорення процесу припрацювання застосовують присадки поверхнево-активних речовин (ПАР). Введення ПАР в масла пригнічує процес утворення СОП, що призводить до прискореного припрацювання контактуючих поверхонь. Наступне, після отримання плями контакту, нагрівання масла до температури десорбції або розкладання ПАР [65] інтенсифікує утворення СОП. Прискорення припрацювання контактуючих поверхонь передбачає швидкий перехід в діапазон навантажень, які відповідають мінімальним значенням темпу зносу контактуючих поверхонь.

Мета дослідження – вивчення впливу поверхнево-активних присадок на процес припрацювання зубчастих передач.

У відповідності до поставленої мети досліджувався вплив мурашиної кислоти (ПАР) на процес припрацювання в середовищі мінеральної оливи МК-8, яка інтенсивно утворює СОП вже при кімнатній температурі. Досліди проводились на машині тертя СМЦ-1 на ролікових зразках, виготовлених з нормалізованої сталі 45 твердістю НВ 220, з шорсткістю  $R_a$  робочих поверхонь 0,4-0,32мкм., при постійних контактних напруженнях 700МПа, сумарній швидкості кочення  $V_{\Sigma}$  4,23м/с та коефіцієнта проковзування 20%. Присадку мурашиної кислоти вводили в оливу МК-8 безпосередньо перед дослідами. За основні параметри, які характеризують процес припрацювання, були прийняті товщина мастильного шару  $h$ , коефіцієнт тертя  $f_{\text{терт.}}$  та кінцева величина шорсткості  $R_a$ . Товщину мастильного шару та момент тертя визначали за методикою, наведеною в [102], а шорсткість оцінювали згідно з методикою, наведеною в [103].

На рис.3.13 та рис.3.14 наведені графіки зміни товщини змащувального шару, коефіцієнту тертя та шорсткості поверхонь від часу припрацювання

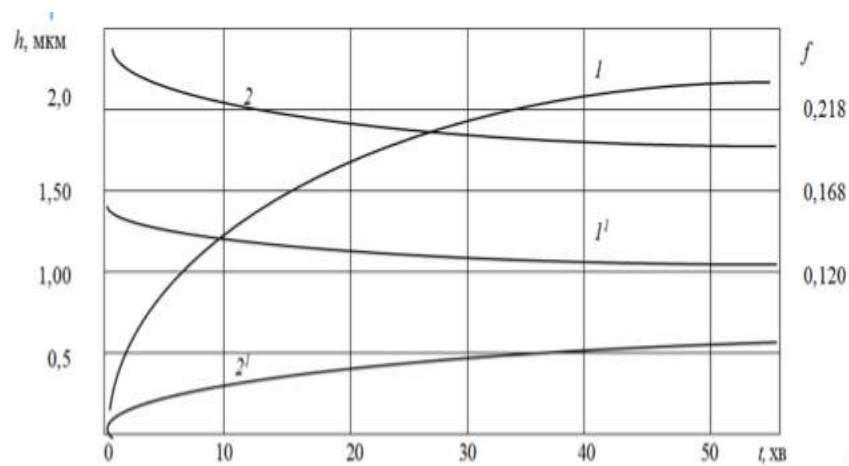


Рис.3.13. Зміна товщини змащувального шару та коефіцієнту тертя при припрацюванні на оливі МК-8 (криві 1 та 1') без присадок та з 1% поверхнево-активної присадки мурашиної кислоти (криві 2 та 2')

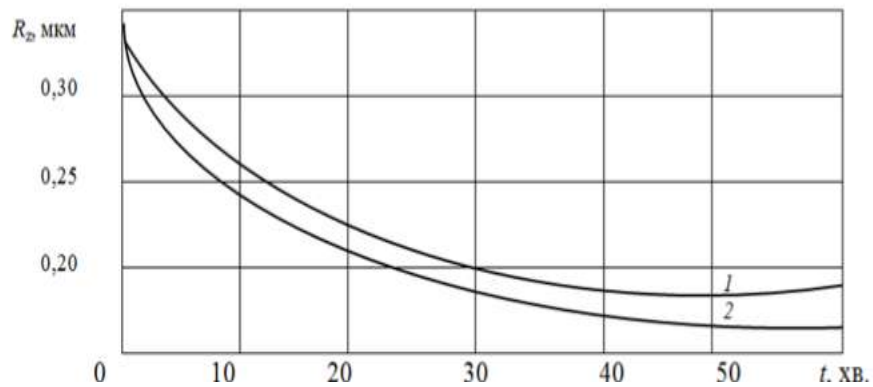


Рис.3.14. Зміна шорсткості поверхонь під час припрацювання на МК-8 без присадок (крива 1) та з присадкою мурашиної кислоти (крива 2).

При припрацюванні зразків на оливі МК-8 без поверхнево-активної присадки мурашиної кислоти (криві 1 та 1<sup>1</sup>) СОП утворювались з перших хвилин дослідів та щільно укривали контактуючі поверхні. Товщина масляного шару стабілізувалася через 40 хвилин. Шорсткість поверхонь становила 0,18 мкм при наявності на них СОП. Після видалення СОП слабким розчином сірчаної кислоти, шорсткість поверхонь складала 0,25 мкм. Збільшення шорсткості поверхонь при видаленні СОП пояснюється тим, що матеріал плівки до видалення заповнював западини поверхонь контакту та нівелював поверхні.

Після введення до мастила поверхнево-активної присадки утворення СОП припинялося. Припинення утворення СОП контролювалося шляхом вимірювання падіння напруги на масляному шарі в режимі нормального тліючого розряду (НТР) та візуального спостереження. В наших дослідів припинення утворення СОП починалось при введенні в оливу МК-8 не менше 1% присадки. При меншій кількості мурашиної кислоти утворення СОП повністю не припинялося, а лише сповільнювалося. При цьому СОП з'являлися в зоні тертя у вигляді окремих смужок на поверхнях тертя, які орієнтовані в напрямку тертя. Припрацювання на оливі МК-8 з присадкою закінчувалося формуванням змащувального шару (крива 2) суттєво меншої товщини, ніж на оливі МК-8 без присадки. При цьому товщина цього шару стабілізувалась через 25 хвилин. Шорсткість поверхонь складала 0,087 мкм. При збільшенні кількості присадки ПАР з 1% до 2% різко зростала шорсткість. Таким чином, введення до оливи присадки ПАР значно скорочує час формування оптимальної мікрогеометрії поверхні тертя,

а утворення СОП забезпечується нагріванням мастильного середовища до температури десорбції поверхнево-активних молекул мурашиної кислоти (до 373°K), після чого на поверхнях, що труться, утворюються щільні шари СОП темно-коричневого кольору.

Виконані дослідження припрацювання та формування змащувальних шарів шляхом вимірювання їх товщини дозволили встановити наступне:

1. Запропонований метод припрацювання кінематичних пар тертя в мастильному середовищі, в основі якого є принцип регулювання товщини та стану третього тіла, ефективний для припрацювання поверхонь, коли основною метою є зниження до мінімуму зносу в період припрацювання.

2. Введення до мінеральної оливи МК-8 мурашиної кислоти як поверхнево - активної присадки призводить до зменшення інтенсивності утворення СОП, а при збільшенні концентрації навіть припинення, що прискорює процес припрацювання та покращує якість поверхонь.

3. Подальше нагрівання олив з поверхнево-активними речовинами до температури десорбції молекул ПАР призводить до інтенсифікації утворення СОП, що в свою чергу підвищує зносостійкість та контактну витривалість пар тертя.

### **3.5 Несуча спроможність змащувального шару редукторних масел з присадками**

#### **3.5.1 Вплив присадок на ефективність змащувальної дії індустріальних масел серії ІТД різної в'язкості без присадок та з хімічно-активними присадками**

Основна функція змащувальних матеріалів — розділення поверхонь тертя утворюваним ними мастильним шаром, що забезпечує мінімізацію зношування та затрат на тертя. До складу сучасних мастильних матеріалів входить по декілька присадок, кожна з яких має певне функціональне призначення перешкоджати схоплюванню, перешкоджати окисленню тощо та відповідно, різні механізми дії. У той же час, хімічні та фізико-хімічні процеси, які забезпечують дію присадок, впливають на здатність масел розділяти поверхні тертя, досліджені недостатньо.

Разом із тим відомо, що введення в масла, наприклад, протизадиркових присадок в деяких випадках збільшувало зношування.

Результати досліджень на чотирикульковій машині тертя показують, що підвищення навантаження схоплювання введенням протизадиркових присадок призводить в багатьох випадках до збільшення діаметра плями зношування.

Для дослідження впливу присадок на ефективність змащувальної дії індустріальних масел при контактному терті в умовах кочення зі сковзанням було поставлено завдання експериментально дослідити вплив присадок на здатність масел розділяти поверхні тертя при різних режимах змащування.

Для виконання поставленого завдання як основний показник, який характеризує вплив присадок на змащувальну дію, була прийнята товщина змащувального шару (визначена методом вимірювання падіння електричної напруги в режимі нормального жервіючого розряду), оскільки ймовірно, що якщо вона менше величини сумарної нерівності поверхонь тертя - зношування буде інтенсивнішим та мінімізується при товщині більше сумарної висоти нерівностей. За допомогою метода роздільного вимірювання вимірювалась гідродинамічна, адсорбційна та хемосорбційна складова мастильного шару [75].

На окремих етапах дослідження визначалась об'ємна температура масла, коефіцієнт тертя та величина лінійного зношування. Наші дослідження ефективності змащувальної дії виконувались на модернізованій машині тертя СМЦ-1. Як зразки, які досліджувалися, використовувались циліндричні ролики діаметром 50 мм зі сталі 40Х з твердістю поверхні HRC 58-62. Вихідна шорсткість  $R_a - 0,3$  мкм.

Досліди виконувались в умовах, що моделюють роботу зубчастого зчеплення при різних навантаженнях (до максимальних для матеріалу роликів) та швидкостях (до сумарної швидкості кочення  $V=4,7$  м/с).

У процесі експериментів завдяки відносно великій швидкості ковзання (20 % від швидкості кочення) та малій кількості змащувального матеріалу температура масла при найбільшому навантаженні доходила до  $55\text{ }^{\circ}\text{C} - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Досліджувались чотири марки індустріальних оливо: ІТД-68; ІТД-100; ІТД-220; ІТД-680 та ці ж оливи, леговані однаковим комплексом присадок – протизадирною ІХП - 14А; антиокислювальною та протизносною ДФБ; в'язкісною ПМА «Д».

На рис. 3.15 показано зміну товщини мастильного шару в контактi роликів при зміні навантаження від  $0,5P_{\max}$  до  $P_{\max}$ . В досліджуваному діапазоні навантажень (від  $0,5P_{\max}$  до  $P_{\max}$ . ) зміна товщини змащувального шару для всіх масел має однаковий характер: від  $0,5P_{\max}$  до  $0,75P_{\max}$ . - знижується, від  $0,75P_{\max}$  до  $P_{\max}$  - збільшується.

В першому випадку зміна товщини погоджується з гідродинамічними уявленнями, нехай якісно товщина змащувального шару зменшується в результаті підвищення температури та навантаження. Невідповідність товщини в'язкості може бути пояснена різницею п'єзокоефіцієнтів та різною здатністю оливо до формування фізично адсорбованих граничних шарів.

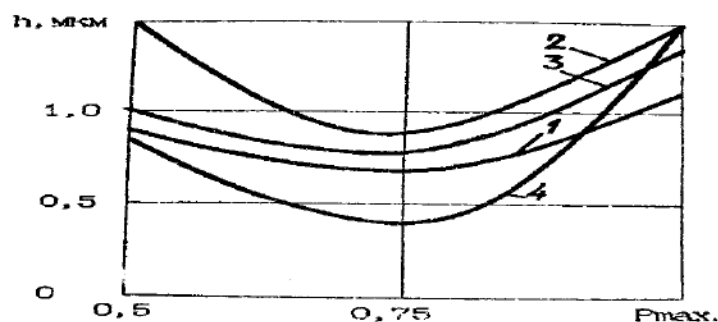


Рис.3.15 Залежність товщини змащувального шару від навантаження при випробуванні оливо серії ІТД різної в'язкості: 1-ІТД-68; 2-ІТД-100; 3-ІТД-220; 4-ІТД-680.

Збільшення товщини змащувального шару з підвищенням навантаження від  $0,75P_{\max}$  до  $P_{\max}$  суперечить гідродинамічним уявленням.

Таке збільшення було зафіксовано раніше на усіх досліджених оливах та мастилах — індустріальних, трансмісійних, моторних, авіаційних, безприсаджувальних й легованих. Цей ефект підтверджується зменшенням зношеності. Інтенсивність збільшення товщини змащувального шару не пов'язана з в'язкістю масла, що пояснюється, передусім, збільшенням температури масла до  $55-70$  °С, через що гідродинамічний ефект зменшується, фізично адсорбовані

прошарки руйнуються, а на їх місці формуються хемосорбційні плівки СОП.

Подана на рис. 3.16 залежність товщини змащувального шару від в'язкості олив знову, таки не узгоджується з гідродинамічними уявленнями про змащувальну дію, що свідчить про необхідність спеціальної оцінки здатності олив формувати хемосорбційні шари при граничному змащуванні.

На рис.3.17 та рис.3.18 показана зміна товщини змащувального шару залежно від навантаження та вязкості для тих самих індустріальних олив серії ІТД, легованих однаковим комплексом присадок. Умови досліджень ті самі, що і для нелегованих масел. На легованих маслах має місце той же ефект що на нелегованих: зниження товщини змащувального шару при помірних навантаженнях, та збільшення при температурах від 40 до 70-80 °С.

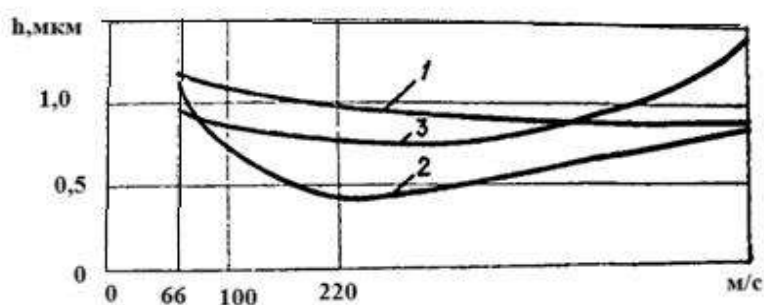


Рис.3.16 Залежність товщини змащувального шару від в'язкості при випробуванні масел за ІТД різного навантаження: 1- $P_{\max}$ ; 2- $0,75 P_{\max}$ ; 3  $0,5 P_{\max}$

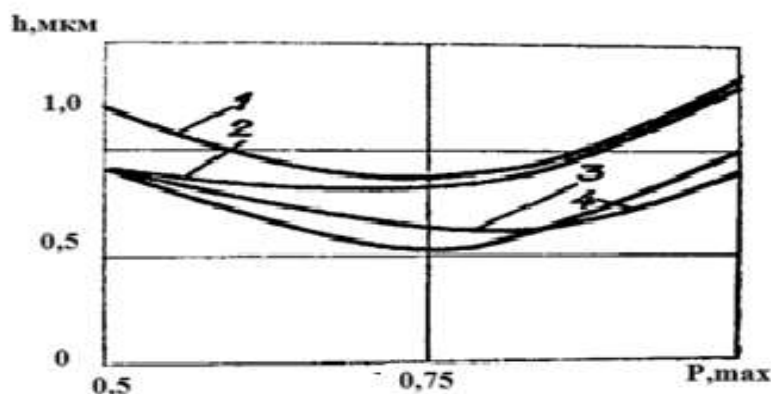


Рис.3.17 Залежність товщини змащувального шару від навантаження при випробуванні олив серії ІТД різної в'язкості з присадками: 1-ІТД-68п; 2-ІТД-100п; 3-ІТД-220п; 4-ІТД-680п

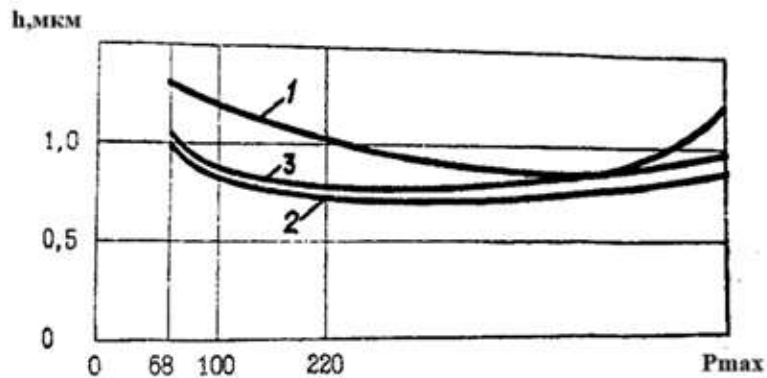


Рис.3.18 Залежність товщини змащувального шару від в'язкості при випробуванні олив серії ІТД з присадками за різного навантаження: 1- $P_{\max}$ ; 2- $0,75 P_{\max}$ ; 3 –  $0,5 P_{\max}$

Таким чином присадки не змінили суттєво рівень змащувальної дії, в цих, близьких до робочих для зубчастих передач умовах. Такий результат не є неочікуваним. Згідно з даними, наведеними в [68], протизадирні присадки позитивно діють тільки в умовах близьких до заїдання.

У той же час окремі присадки можуть стимулювати описане вище збільшення товщини змащувального шару в діапазоні робочих температур і блокувати його. Так, при дослідженнях, виконаних на роликкових машинах тертя, досліджувалось масло И-20А та це ж масло з присадками, які мали в своєму складі активну сірку ОТП та ДФ-11, а в контакті моделювались умови роботи зубчастого зчеплення трансмісії трактора Т-150К.

Сумарна швидкість кочення — 2,04 м/с, що приводило до переважно граничного характеру змащувальної дії.

Досліди виконувались за поступового нагрівання до робочої температури (95-100 °С) та подальшої роботи при цій температурі.

На рис.3.19 показано зміну товщини змащувального шару в процесі нагрівання. Після стабілізації температури стабілізувалась і товщина змащувального шару

У процесі підвищення температури товщина змащувального шару зменшується, а з 50-70 °С (для різних масел) - збільшується. Такий характер зміни товщини змащувального шару в контакті підтверджено експериментально на декількох десятках змащувальних матеріалів: у всіх випадках після досягнення

певної температури змінювалось її підвищенням.

Причина таких змін встановлена фізико-хіміками, які досліджували процес адсорбції на твердих поверхнях [83].

При підвищенні температур майже від абсолютного нуля кількість адсорбованого матеріалу зменшується, а після досягнення певної температури (залежно від матеріалу, який адсорбується) ця кількість починає збільшуватись.

Причина цього: при низьких температурах відбувається процес фізичної адсорбції через малу енергію зв'язку молекул адсорбата з поверхнею тепловий рух молекул, який збільшується з підвищенням температури, призводить до їх відриву від поверхні. З підвищенням температури рівень енергії досягає величини, достатньої для активації процесу хемосорбції, і на поверхні місце фізично адсорбованих займають хемосорбовані граничні шари.

Хемосорбовані шари, до яких належать органічні плівки (полімери тертя), що самогенеруються, за рахунок набагато більшої енергії зв'язку з поверхнею тертя забезпечують високі протизносні властивості у важких умовах тертя.

Як видно з рис.3.19, введення присадки ОТП значно зменшує товщину змащувального шару в зоні робочих температур для більшості зубчастих передач, а збільшення кількості присадки від 2,5 % до 5 % блокує утворення хемосорбційних граничних шарів. Введення присадки ДФ-11, навпаки, стимулює утворення хемосорбційних шарів порівняно з базовим маслом.

Викликана введенням присадок зміна товщини змащувального шару була підтверджена експлуатаційними випробуваннями тракторів Т-150К протягом першого доремонтного періоду. Зношування шестірень ведучих мостів при застосуванні олив без присадки ОТП 0.07- ,11 Mr/r а для масел з цією присадкою воно становило 0,93 мг/г, тобто було в десять разів більше.

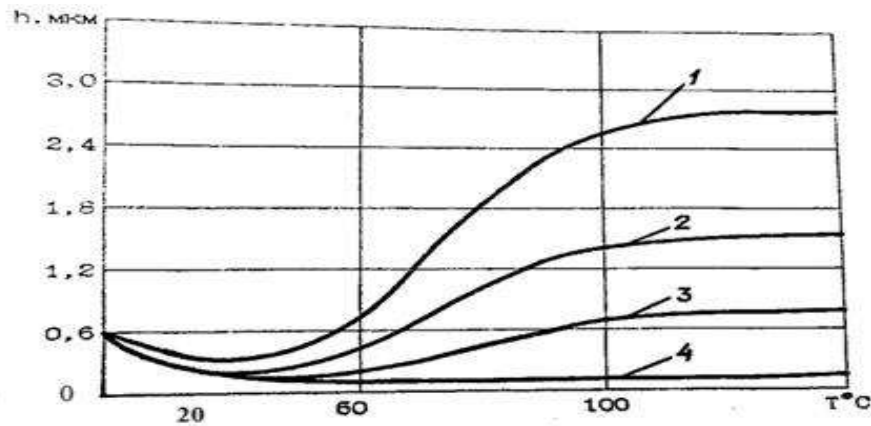


Рис. 3.19 Залежність товщини змащувального шару від температури:

1- I-20A+ДФ-11; 2- I-20A; 3 – I-20A+2%ОТП; 4- I-20A+5%ОТП

З наведених результатів експериментів можна дійти висновку, що традиційне використання хімічно-активних присадок не завжди покращує змащувальну дію, а в деяких випадках і погіршує, блокуючи формування хемосорбційних граничних плівок (СОП).

Тому для повної оцінки присадок, окрім їх випробувань на специфічну дію, необхідно враховувати ще інші показники змащувальної дії, насамперед здатність масел розділяти поверхні тертя та їх вплив на несучу спроможність змащувального шару.

### **3.5.2 Оцінка вмісту хімічних елементів у поверхневому шарі зубчастих коліс після роботи в індустріальних маслах серії ІТД різної в'язкості без присадок та з хімічно-активними присадками методом бомбардувальної спектроскопії.**

Одним з небагатьох методів, що дозволяють оцінювати вміст хімічних елементів у поверхневому шарі фізично адсорбованих та хімічно сорбованих елементів з мастильного та повітряного середовища, є метод бомбардувальної спектроскопії.

Метод також дозволив оцінити розподіл хімічних елементів за товщиною шару, використовуючи поступове стравлювання іонами аргону та одночасною зйомкою електронного спектру складу шару.

Умови роботи аргонного джерела іонів:

енергія іонного пучка  $E = 8 \text{ КэВ}$  при струмі пучка  $I = 50 \text{ мкА}$ ;

$I = 4$  мкА, струм фокусування

На перших етапах травлення проводили східчасто через 1-2 хв. Навіть через 10 хв травлення проводили разом із записом спектра.

Умови зйомки спектрів та позначення параметрів приладу такі:

$E_p = 1,5$  КэВ – енергія первинних електронів;

$I_0 = 100$  мА - струм електронів, що реєструється в ланцюзі зразка, при даній  $E_p$ ;

$S = 100 \times 3$  – чутливість синхронного детектора;

$t.c. = 10$ с. - Постійна часу;

$M = 14$  еВ - напруга модуляції;

$t = 10$  хв. - Час сканування;

$U = 3,7$  кВ. – напруга на каналному електронному помножувачі;

$N(E)$  – амплітуда сигналу з розподілу електронів за енергіями при заданому значенні  $E$ ;

$N(E)/dE$  – час, похідна амплітуди сигналу (швидкості рахунку).

Досліджувалися поверхневі плівки, отримані в результаті тертя при коченні зі ковзанням в індустріальних оліях серії ІТД з присадками і без присадок, що відрізняються в'язкістю в 10 разів.

Загальною для електронних спектрів є наявність двох зон.

Зона плівки СОП та зона безпосередньо пов'язана з основою сплаву – залізом. Плівка СОП містить, як правило, елементи С, О, Н. Залежно від складу присадок та навколишнього середовища в поверхневій плівці виявляється азот (рис.3.20; 3.21).

З графіків вмісту хімічних елементів видно, що максимальний вміст у СОП вуглецю забезпечує більш в'язке масло ІТД-680 (рис. 3.21). Для малов'язкого масла ІТД-68 спостерігається значний вміст кисню в основі сплаву (рис.3.20). Більш крутий характер розподілу кисню відповідає маслам із присадками.

Товщина СОП на графіках визначена вертикальною стрілкою. Максимальний час травлення СОП відповідає маслам більшої в'язкості. Збільшення часу травлення СОП іонами аргону пояснюється більшою енергією зв'язку, створенням вторинних

структур тертя більшої міцності, що містить менше дефектів будови, що обмежують дифузії кисню та азоту поверхні розділу.

З графіків вмісту хімічних елементів видно, що максимальний вміст у СОП вуглецю забезпечує більш в'язке масло ІТД-680 (рис. 3.21)

Для малов'язкого масла ІТД-68 спостерігається значний вміст кисню в основі сплаву (рис.3.21). Більш крутий характер розподілу кисню відповідає маслам із присадками.

Товщина СОП на графіках визначена вертикальною стрілкою. Максимальний час травлення СОП відповідає маслам більшої в'язкості. Збільшення часу травлення СОП іонами аргону пояснюється більшою енергією зв'язку, створенням вторинних структур тертя більшої міцності, що містить менше дефектів будови, що обмежують дифузії кисню та азоту поверхні розділу.

Узагальнюючи проведені дослідження, можна зробити висновок, що плівки СОП інтенсивніше формуються, в даних умовах тертя, в середовищі з більш в'язким маслом, містить більшу кількість вуглецю та кисню, мають спадаючий характер концентрації до поверхні сплаву (сталі)

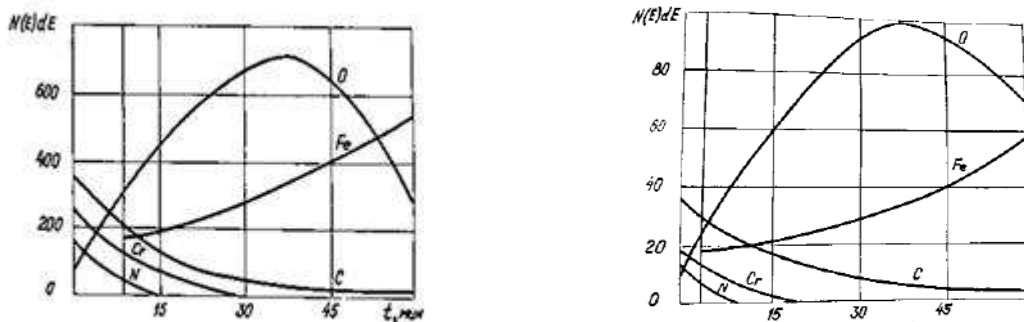


Рис. 3.20 Розподіл хімічних елементів по глибині поверхневого шару зразків зі сталі 40X після роботи в оливі ІТД-68 (а) та ІТД-68 з присадками (б)

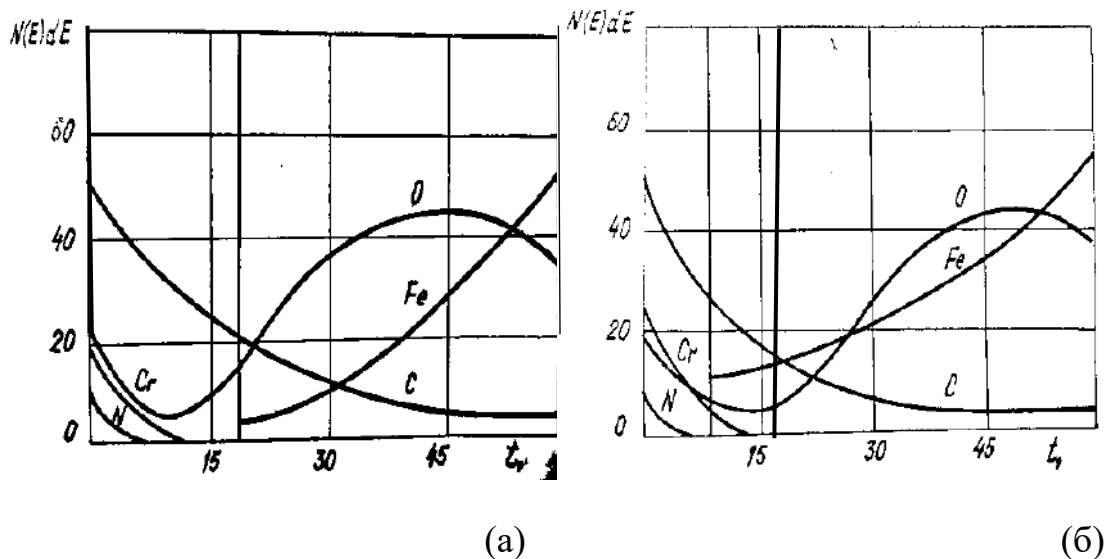


Рис.3.21 Розподіл хімічних елементів по глибині поверхневого шару зразків зі сталі 40X після роботи в оливі ІТД-680 (а) та ІТД-680 з присадками (б)

Плівки СОП, сформовані в більш в'язких мастилах, по інтенсивності зв'язку в кілька разів перевищують плівки, утворені в малов'язких оливах і оливах без присадок. Для малов'язких масел спостерігається значна дифузія кисню через СОП вглиб металу, що свідчить про більш (дефектну) пухку будову СОП, що формуються в малов'язких маслах.

### 3.6 Процеси формування мастильного шару при терті сталі по несталевим металевим поверхням

У нерівнозважених умовах змащеного трибологічного контакту формуються трибологічні структури, властивості яких визначають рівень трибологічних процесів. Такі структури функціонують тільки безпосередньо в процесі тертя. Про їх існування свідчать вторинні структури, найтонші шари на поверхнях тертя, це: аморфізовані шари чистих металів, структури Бельбі, Гаркунова, матові шари на поверхнях циліндрів поршневих двигунів, хемосорбційні самогенеруючі органічні плівки (СОП).

Формування трибоструктур – досить тонкий індивідуальний процес, який залежить від безлічі внутрішніх і зовнішніх факторів. У роботі [160] встановлено методом оже-спектроскопії, що при терті бронзи Бр.АЖМц 10-3-1,5 в маслі АМГ-10 по сталі ШХ-15 на поверхні бронзи утворюється вторинна структура товщиною

70-100нм, яка містить до 90% вуглецю. Вуглець приєднується до поверхневих атомів металу при механодеструкції молекул мастил, які містять вуглець. Якщо в цій системі замінити сталь на детонаційні системи TiC – Co, то відбудеться вибіркоче розчинення легуючих елементів з бронзи. В результаті взаємного перенесення на поверхні бронзи утворюється шар аморфізованої міді товщиною 400-700нм.

Наведені результати свідчать про те, що процес формування трибологічних структур складним чином залежить від складу твердих тіл, застосування ж нового матеріалу призводить до зміни якісної картини процесу. У роботі [105] наводяться результати досліджень змащувальних процесів при терті пар сталь-бронза та сталь-спечений матеріал. З цих даних випливає, що спечені матеріали утворюють СОП в більшій мірі, ніж сталеві. Останнє пояснюється, перш за все, пористою структурою в поверхневих шарах спеченого матеріалу, що сприяє інтенсифікації окисно-полімеризаційних процесів, спрямованих на утворення СОП.

З наведених результатів досліджень випливає, що процеси формування трибологічних структур при терті сталі по несталевих металевих поверхнях, зокрема бронзових, відрізняються від процесів, що протікають при терті по сталі, що пояснює менший знос черв'ячних коліс, виготовлених зі спечених матеріалів, порівняно з колесами з оловяністих бронз. Такий знос мав місце у промислових випробуваннях редукторів типу РЧП-80 і РЧУ-80. Причиною цього, очевидно, є шари СОП, що утворюються на поверхнях тертя на відміну від випробувань бронзових коліс, де таких шарів не спостерігалось. Необхідно відзначити той факт, що мастильні шари типу СОП повністю не руйнуються в період запуску і зупинки. Такий режим характерний для роботи багатьох редукторів в різних умовах їх експлуатації. Відомо, що саме на цей період припадає основна частка зносу пар тертя. Дослідження СОП представляють нові дані про природу змащувальної дії, в першу чергу – про вплив граничних процесів на знос і тертя.

Досліджувались змащувальні процеси при терті пар сталь-бронза та сталь-спечений матеріал, а також визначення зв'язку між товщиною мастильного шару, моментом тертя та зносом поверхонь. Дослідження змащувальної дії,

антифрикційних та протизносних властивостей в умовах контакту сталь-спечений матеріал проводилося на парах роликів – ролик що обертається зі сталі 40Х; діаметр 50 мм; HRC-50; і нерухомий циліндричний ролик: діаметр 40 мм з бронзи ОФІО-1; НВ-103; або із спеченого матеріалу ЖД5Ф1М0S22; НВ103. Спечений матеріал виготовлений методами порошкової металургії. Подібне поєднання матеріалів знаходить все більш широке застосування в вузлах тертя і, зокрема, в черв'ячних передачах. В якості мастила використовувалось індустріальне масло І-40А.

Умови випробувань наступні: швидкість ковзання – 0,26; 0,52 та 0,78 м/с; навантаження – 500 Н. Величину зносу визначали за допомогою вимірювань ширини зони контакту за допомогою мікроскопу, на нерухомому ролику, момент тертя – методом тензометрування, а товщини мастильних шарів – за методикою, викладеною в [106].

В однакових умовах навантаження при терті сталі по бронзі величина зносу бронзового зразка весь час є більшою, а момент тертя  $Z_1, M_1$  меншим, ніж при терті сталі по спеченому матеріалу  $Z_2, M_2$ . Значення температур погоджується з втратами на тертя.

Такі результати – зменшення зносу і одночасне збільшення втрат на тертя – не узгоджуються з низкою експериментів [77] і можуть бути пояснені даними про товщину та структуру мастильного шару. При терті сталі по бронзі мастильний шар був дещо тоншим, утворювався повільніше та мав гідродинамічне походження. Тільки протягом першої години роботи пари тертя спостерігалася поява незначного адсорбційного (хемосорбційного) шару  $U_{a1}$ , надалі ж цей шар не перевищував сотих часток мікрона та не міг бути виміряний методом падіння напруги. Гідродинамічний шар знижував до мінімуму втрати на тертя, але при цьому не забезпечував достатніх протизносних властивостей.

Отримані результати наведені рис.3.22 та рис.3.23.

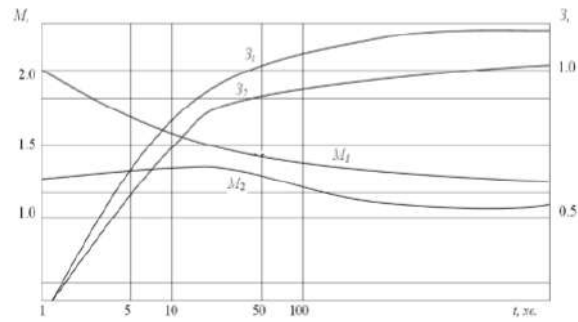


Рис.3.22 Зміна моменту тертя  $M$  та зносу  $Z$ . Індекси 1 відповідають випробуванням пари сталь-бронза, індекси 2 – пари сталь-спечений матеріал. Швидкість ковзання 0,52 м/с.

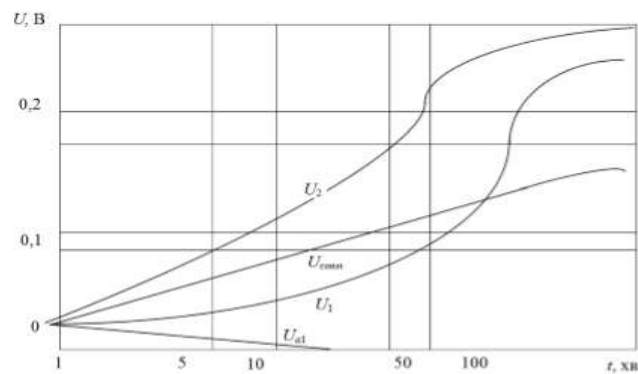


Рис.3.23. Зміна падіння електричної напруги по всій товщині змащувального шару  $U$ , на адсорбційних  $U_{ад}$  та СОП  $U_{соп}$  прошарках. Індекси 1 відповідають випробуванням пари сталь-бронза, індекси 2 – пари сталь-спечений матеріал. Швидкість ковзання 0,52 м/с.

При терті сталі по спеченому матеріалу з самого початку мастильний шар включав СОП (її товщина пропорційна  $U_{соп2}$ ). Присутність шарів СОП визначалася також за характерним забарвленням. Можна припускати, що встановлений у роботі [9] зв'язок сили тертя та зносу існує тільки при незмінній структурі мастильного шару. З того, що більшому зносу відповідали менші втрати на тертя, можна зробити висновок про те, що втрати на деформування та руйнування поверхні металу є малими порівняно з силами тертя в змащувальному шарі. Ці дані узгоджуються з думкою Боудена про те, що основна частка опору при терті обумовлюється зсувом у самому мастилі, а два мастила можуть дати однаковий опір зсуву, хоча знос при цьому може відрізнятись у 20 разів [77].

Отже, протизносні характеристики значною мірою визначаються здатністю матеріалів до утворення в результаті взаємодії з мастилом граничних структур з різними реологічними, фізико-хімічними та хімічними властивостями. Зростання моменту тертя при випробуванні сталі по бронзі ( $M_1$ ) в початковий період припрацювання можна пояснити руйнуванням раніше утворених поверхневих плівок немасляного походження (наприклад, оксидів), які мають кращу змащувальну здатність. Відмінності у властивостях граничних шарів дозволяють встановити природу їх виникнення. У зв'язку з цим, окрім сумарного падіння напруги  $U$ , яке характеризує повну товщину мастильного шару, вимірювалося падіння напруги на адсорбційній частині шару  $U_a$  і на шарах СОП  $U_{\text{соп}}$ . Зміна параметрів змащувальної дії відображає процес припрацювання, а саме зміна розміру плями контакту, шорсткості та товщини мастильного шару. Остання величина змінювалася як в результаті вигладжування, так і в результаті утворення граничних шарів [110]. Точний теоретичний розрахунок товщини мастильного шару за формулами гідродинамічної теорії змащування в умовах роботи пари, яка досліджувалася, є неможливим через відсутність даних про епюри розподілу тиску в контакті.

Якісний аналіз показав наступне: оскільки ширина плями контакту і теплопровідність у випробуваннях з бронзовим зразком є вищими, а температура – нижчою у зразка зі спеченого матеріалу, то товщина рідинного мастильного шару в контакті сталь-бронза є значно більшою, ніж в контакті сталь-спечений матеріал. Таке співвідношення повинно відповідати більшому зносу спеченого матеріалу та призводити до великих втрат на тертя згідно з гідродинамічною теорією змащування. Однак, з даних рис.3.22 та рис.3.23 випливає, що відбувається збільшення лише втрат на тертя. З цього можна зробити висновок, що рідинний мастильний шар визначає втрати на тертя, а загальна товщина мастильного шару – знос поверхонь тертя.

У роботі проведено дослідження змащувальних процесів при терті пар сталь-бронза та сталь-спечений матеріал, а також визначено зв'язки між товщиною мастильного шару, моментом тертя та зносом поверхонь. У результаті проведених

випробувань встановлено, що більшому зносу відповідають менші втрати на тертя, тобто втрати на деформування та руйнування поверхні металу є малими порівняно з силами тертя в змащувальному шарі, а протизносні характеристики значною мірою визначаються здатністю матеріалів до утворення в результаті взаємодії з мастилом граничних структур з різними реологічними, фізико-хімічними та хімічними властивостями. Перспективами подальших досліджень окрім аналізування тонких поверхневих прошарків металу є визначення властивостей і експлуатаційних характеристик протизносних та антифрикційних хемосорбційних плівок СОП, які утворюються вуглеводневими компонентами мастильних матеріалів.

### **3.7 Вплив мастильних матеріалів на втомне зношування і якість поверхонь тертя зубчастих передач**

Найбільш розповсюдженим видом зношування пар тертя з локальним контактом є втомне зношування (викришування, пітінг). Згідно з даними, наведеними в [107], при ремонті авіатехніки до 70% з загальної кількості зубчатих коліс бракувалися через наявність на поверхнях тертя втомного викришування.

На думку більшості дослідників початкові тріщини контактного руйнування розвиваються з поверхні деталі, а не під нею (що підкреслює роль мастила в розвитку втомного викришування). Ще досліді, які започаткували сучасні дослідження втомного викришування, показали, що воно виникає тільки на змащених поверхнях тертя. Досліді на роликах без мастильних матеріалів приводили тільки до їх стирання, але аж ніяк не до викришування.

Визначення критеріїв оцінки властивостей олив, які пояснюють вплив сорта оливи на контактну міцність, робились неодноразово. Як властивість оливи, яка визначає її вплив на втомне викришування, одні автори пропонували враховувати маслянистість [2], інші – здатність масла проникати у втомні тріщини, які оцінюються капілярними властивостями олив [108].

Не дивлячись на те, що вплив наведених властивостей олив на зношування та розвиток втомних тріщин підтверджений експериментально, ці дослідження не можуть дати пояснення розмаїттю впливу олив на контактну витривалість, а саме

за підвищених температур, коли вплив маслянистості зникає, а вплив капілярних можливостей олів зводиться до мінімуму.

У сучасній літературі, присвяченій дослідженню процесів контактної міцності, вивчалися рельєф, структура, хімічний склад, механічні властивості металів, вторинні структури, які виникають в процесі тертя [109,110,111].

Визначені певні погляди на процеси, які відбуваються в період роботи пар тертя з локальним контактом і які призводять до формування специфічного поверхневого шару металу. Однак стан і роль мастильного шару при випробуваннях на контактну міцність вивчені недостатньо. Вплив мастильного шару на процеси втомлювального викришування досліджувались в роботах М.В. Райко та його учнів [63, 113]. В цих роботах використовувався метод вимірювання товщини мастильного шару. В наших дослідженнях цей метод також був використаний в якості основного для оцінки показників якості змащувальної дії мастильних матеріалів в локальному контакті зубчатих передач.

Метою дослідження є оцінка впливу мастильних матеріалів на втомне зношування пар тертя з локальним контактом в умовах роботи зубчатих передач.

Випробовувалися п'ять марок олів: синтетичні ВНИИ НП 50-1-4у й ИПМ-10 та мінеральні МС-8п, МС-20, М10Г<sub>2</sub>К. Випробування кожної оливи проводили на новій парі зразків.

Як критерій довговічності було вибрано час роботи пари тертя до появи на відстаючому (верхньому) ролику перших ознак викришування. Контрольним часом роботи пари тертя було вибрано 20 годин (або  $4,8 \cdot 10^5$  циклів), адже саме після відпрацювання такої кількості циклів в оливі ВНИИ НП 50-1-4у на верхньому зразку з'явилася одинична виразка викришування. Пара тертя, яка відпрацювала  $4,8 \cdot 10^5$  циклів у випробовуваних середовищах без ознак пошкоджуваності, вважалася такою, що витримала випробування і експеримент припинявся.

Випробування проводилися на машині тертя СМЦ-1. Зразки: нижній – діаметр 50мм, ширина – 10мм; верхній – діаметр – 50мм, ширина – 4мм. Матеріал зразків – сталь 40Х. Твердість – HRC 30 ... 32. Розрахункові допустимі напруження – 770 МПа. Шорсткість – 0,3мкм. Контактні напруження – 850 МПа. Обороти:

нижній – 420 об / хв; верхній – 350 об / хв. Проковзування – 20%.

На рис. 3.24 та рис.3.25 показано зміну основних триботехнічних показників (товщини мастильного шару та коефіцієнта тертя,) в локальному контакті пари тертя для п'яти олив.

З п'яти випробованих олив тільки олива ВНИИ НП 50-І-4У витримала випробування на втомне зношування -  $4,8 \cdot 10^5$  циклів (20 годин). Але навіть на цій оливі через 20 годин випробувань на поверхні тертя була виявлена одинична виразка викришування. Решта досліджених олив мали меншу п'іттингостійкість. Однак, слід зазначити, що зразки, які працювали на оливах МС-8п і ИПН-10 показали втомну довговічність, близьку до довговічності зразків на оливі ВНИИ НП 50-1-4у ( $4,06 \cdot 10^5$  і  $3,55 \cdot 10^5$  до настання викришування відповідно). Кількість циклів до викришування на оливах МС-20 і М-10Г2к є майже в три рази меншою, ніж оливі ВНИИ НП 50-1-4у ( $1,32 \cdot 10^5$  і  $1,66 \cdot 10^5$  відповідно). Аналіз результатів показує, що синтетичні масла ВНИИ НП 50-І-4у і ИПН-10 по п'іттингостійкості в 3,5 ... 4 рази перевищують мінеральні.

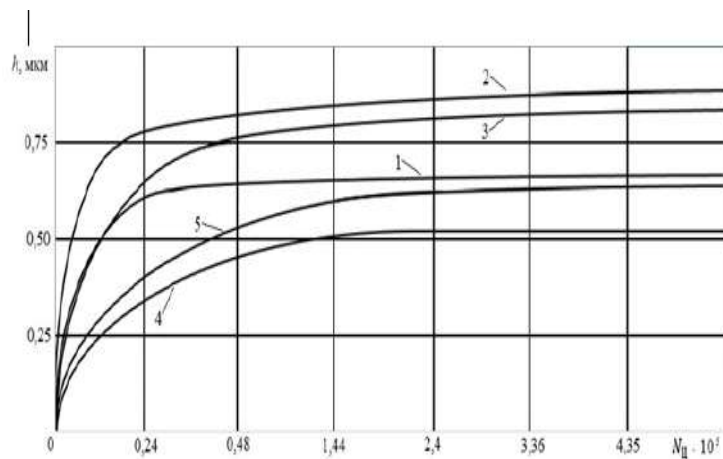


Рис 3.24 Зміна товщини мастильного шару при випробуваннях на викришування:

- 1) ВНИИ НП 50-1-4У; 2) МС-8п; 3) ИПН-10; 4) МС-20; 5) М-10 Г2к.

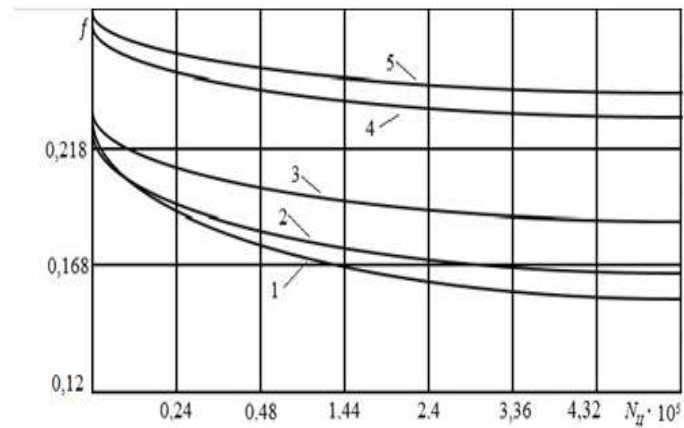


Рис 3.25 Зміна коефіцієнта тертя при випробуваннях на викришування:  
1) ВНИИ НП 50-1-4У; 2). МС-8п; 3) ИПМ-10; 4) МС-20; 5) М-10 Г2к.

Винятком була олива МС-8п, яка показала п'ятингостойкість, близьку до синтетичних. Таку стійкість проти викришування можна пояснити тим, що олива МС-8п є єдиною з випробовуваних, яка добре сформувала темно-коричневу самогенеруючу органічну плівку (СОП), що має високі протизносні властивості. За даними [132], у присутності на поверхні тертя СОП ознак викришування не спостерігається при числі циклів у 15 ... 18 разів більшому, ніж при терті в оливі за відсутності СОП. Слід зазначити, що в умовах наших дослідів олива, яка формує СОП, підвищила стійкість проти викрашування в 3,5 ... 4 рази порівняно з оливами, що не утворюють або погано утворюють СОП.

Оливи, на яких зразки пропрацювали найбільшу кількість циклів до викришування, показали найбільші значення товщини мастильного шару на сталому режимі. Причому найбільше значення товщини  $h$  показала олива МС-8п - 0,95 мкм, єдина з випробовуваних оливах, на якій візуально добре видно темно-коричневу плівку СОП. Оливи ВНИИ НП 50-1-4у й ИПМ-10 показали меншу товщину - 0,65 і 0,75 мкм відповідно.

Найгірші по стійкості проти викришування оливи МС-20 і М-10Г<sub>2</sub>К показали найменшу товщину – 0,50 і 0,55 мкм. Оливи, що підвищують стійкість проти викришування, формують у контакті досить товсті мастильні шари (ВНИИ НП 50-1-4у, МС-8п, ИПМ-10), показали добрі антифрикційні властивості, коефіцієнт тертя  $f$  у них на 25...35% нижчий, ніж у оливах МС-20 і М-10Г<sub>2</sub>К (рис. 3.25).

Об'ємна температура олив  $T$  у ході випробування змінилася несуттєво від вихідної до  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  (у ВНИИ НП 50-1-4у) до  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  (у МС-20).

Результати дослідження впливу мастильних матеріалів на змащувальну дію та втомне зношування поверхонь тертя наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Вплив мастильних матеріалів на змащувальну дію та втомлювальне зношування поверхонь тертя зубчастих передач

№ п/п	Мастильні матеріали	$h$ , мкм	$f$	$T, ^{\circ}\text{C}$	$N_{ц} \cdot 10^5$	Якість поверхонь тертя зубчастих коліс
1	ВНИИ НП 50-1-4у	0,65	0,130	45	4,8	Одинична виразка викришування
2	МС-8п	0,95	0,144	48	4,08	СОП. Викришування
3	ИПН-10	0,75	0,157	50	3,5	Викришування
4	МС-20	0,50	0,202	55	1,32	Викришування
5	М-10Г <sub>2</sub> К	0,55	0,211	42	1,68	Викришування

Порівняння результатів дослідження показує, що існує зв'язок між товщиною мастильного шару та часом до появи викришування на поверхнях тертя зубчастих коліс (більшій товщині відповідає більша кількість циклів до викришування на всіх оливах, за винятком ВНИИ НП 50-1-4у).

У зв'язку з тим, що утворення хемосорбційних плівок, які проявляють підвищену стійкість проти викришування, не пов'язано з гідродинамічним ефектом, обґрунтовано вивчення негідродинамічної змащувальної дії та її впливу на втомне зношування контактних поверхонь.

Проведені дослідження дозволяють пояснити суперечливість (неоднозначність) результатів багатьох досліджень, які вивчали вплив в'язкості оливи на втомне викришування. У багатьох випадках ця неоднозначність є наслідком того, що дослідниками не приймалася до уваги наявність чи відсутність СОП у контакті.

Використання протизносивих та противопітінгових властивостей СОП є найбільш перспективним і найбільш економічним шляхом для подальшого підвищення зносостійкості та довговічності зубчастих передач, підшипників

кочення та інших деталей, що не вимагає ускладнення технології виробництва та підвищення якості конструкційних матеріалів.

### **3.8 Вплив температури на ефективність змащувальної дії присадок до мастильних матеріалів**

Кінетика процесу зношування пов'язана із станом змащувального шару і його найважливішою характеристикою – товщиною мастильного шару. Відомо, що відмова трибомеханічної системи визначається двома чинниками: необхідним – руйнуванням змащувального шару і додатковим – руйнуванням контактної поверхні. Але якщо питання, пов'язані з руйнуванням поверхні тертя, достатньо вивчені і описані в літературі, то поведінка тонких змащувальних шарів напередодні і в момент руйнування залишається не дослідженою, що обумовлено складністю моделювання цих процесів

Одним з найбільш ефективних та економічних засобів підвищення рівня змащувальної дії є легування мастильних матеріалів присадками. Присадки, що зменшують знос і протидіють захопленню, прийнято розділяти на адсорбційні і хімічно активні. Відповідно до наведених узагальнених залежностей коефіцієнта тертя від температури (рис.3.26 ) [101,124] останній при граничному терті має помірні значення до деякої критичної температури  $T_k$ , що обумовлено дією присадки першого типу. При подальшому підвищенні температури коефіцієнт тертя значно зростає і може призвести до захоплення. При досягненні температури  $T_{km}$  коефіцієнт тертя знову знижується до помірних значень, що пояснюється дією присадки другого типу, які утворюють на поверхнях тертя модифіковані прошарки. В [101,124] наведені значення  $T_k$  і  $T_{km}$  отримані на чотирьохкульковій машині тертя (ЧКМ) при однохвилинному випробуванні. Різниця  $T_{km} - T_k$  складає 90-100°C і припадає на температури при яких працюють, наприклад, багато зубчатих передач. Таким чином, в діапазоні від  $T_k$  до  $T_{km}$  відбувається різке погіршення змащувальної дії, збільшується зношування і може відбутися захоплення.

Погіршення мастильної дії при цих температурах підтверджується вимірюванням товщини змащувального шару – його товщина зменшується, а в

деяких випадках аж до повного руйнування [124]. Слід зазначити, що при роботі з температурою дещо нижчою  $T_k$  більш тривалий час, змащувальний шар руйнується внаслідок десорбції і, як наслідок, діапазон небезпечних температур розширюється. Вочевидь, ліквідація описаного небезпечного погіршення повинна сприяти підвищенню надійності і довговічності трибосполучень.

$T_k$  розглядають як температуру руйнування і фізично адсорбованих і хемосорбованих граничних шарів. Але, як дослідження адсорбції на твердих поверхнях пар тертя [101] так і дослідження змащувальної дії в локальному контакті шляхом вимірювання товщини змащувального шару [63,124] свідчать про те, що хемосорбовані плівки стійкі до значних температур – більше  $200^\circ\text{C}$ , тобто можуть протидіяти описаному погіршенню (рис.3.26).

Поясненням такого протиріччя результатів можуть слугувати нетривалі випробування на ЧКМ, тоді як хемосорбційні самогенеруючі органічні плівки (СОП) в залежності від умов в контакт і складу змащувального матеріалу формуються від півгодини до декількох годин.

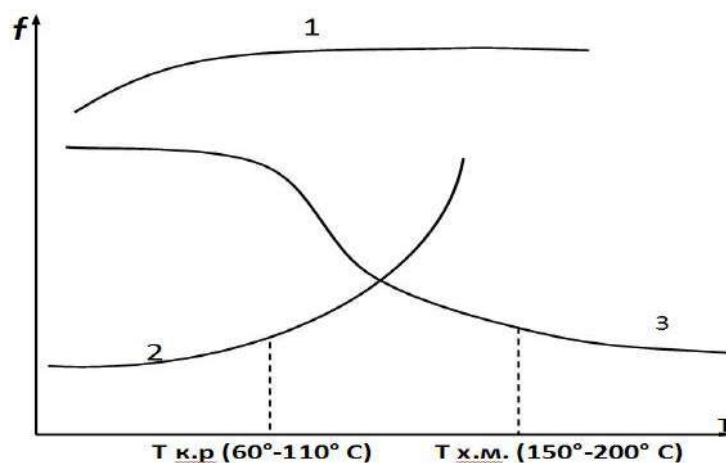


Рис.3.26 Залежність коефіцієнту тертя від температури: 1-неполярне масло; 2-масло з поверхнево-активною речовиною (ПАР);3- масло з хімічно-активною речовиною (ХАР)

Таким чином, в діапазоні температур від  $T_k$  до  $T_{km}$  ефективну змащувальну дію можна забезпечити хемосорбційними процесами, наслідком яких є утворення СОП. Ефективність СОП, що утворюються нелегованими маслами, визначаються

їх вуглеводневим складом – про це свідчать експерименти з індивідуальними вуглеводнями [73] і наявністю в маслі ПАР і деяких інших речовин. Різний склад масел в першу чергу приводить до різної ефективності хемосорбованих СОП. Так, наприклад, присадка ОТП блокує утворення СОП. Тому для багатьох масел необхідне покращення процесів хемосорбції в діапазоні температур  $T_k - T_{km}$ . Із наведених результатів випливає, що ефективність протизносної дії присадок не є однозначним поняттям і суттєво залежить від умов тертя і режиму змащування. Так, стосовно екстремальних умов тертя, що характеризуються високим тиском в контакті і швидкостями ковзання, перевага має бути на боці сполук в механізмі дії яких домінує хімічний фактор. При помірному режимі тертя доцільно використовувати присадки, що володіють високою здатністю адсорбуватися і помірною реакційною здатністю.

## **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3**

3.1 Збільшення процентного вмісту певної присадки може покращити одну властивість олії та водночас погіршити іншу. Коли зазначені концентрації присадок стають незбалансованими, це може вплинути на загальну якість масла. Деякі добавки конкурують між собою за однакове місце на металевій поверхні. Якщо до оливи додати високу концентрацію протизносної присадки, інгібітор корозії може стати менш ефективним. Результатом може бути збільшення проблем, пов'язаних з корозією.

3.2 Проведені дослідження узгоджуються з положеннями КГДТЗ, в якій вказується, що в умовах контактно-гідродинамічного тертя виявляються не тільки в'язкісні властивості мастила та пружні – твердих тіл, але й вплив процесів адсорбції, що реалізують умови прояву ефекту, гідродинамічного стану мастильного шару. Така дія підтверджується тим, що зі збільшенням навантаження на контакт збільшується вплив присадок. Відомо, що навантаження має першорядну роль в деструкційних процесах [133,134], у яких утворюються вільні радикали молекул з адсорбційної активністю. Надмірне зниження товщини мастильного шару у присутності ПАР може призвести до безпосереднього контакту виступів нерівностей. Захист від схоплювання в цьому випадку

забезпечують адсорбційні та окисні плівки. Зокрема, присадка мурашиної кислоти, вочевидь, утворює недостатньо ефективні адсорбційні плівки. Разом з тим, мурашина кислота є гарним відновником і знаходить у цій якості широке застосування у техніці. Зменшення товщини плівки оксидів при невеликій товщині в'язкого та адсорбційних шарів є причиною розвитку схоплювання.

3.3 На основі роздільного вимірювання товщини мастильних шарів були визначені області в яких проявляються різні механізми мастильної дії олив.

В зоні низьких температур і малих швидкостей кочення превалюють поверхневі шари адсорбційного походження. Ця область характерна для роботи тихохідних зубчастих передач.

В зоні середніх температур, навантажень і великих швидкостей кочення превалююче значення мають шари гідродинамічного походження. В цій зоні працює більшість зубчастих передач.

В зоні підвищених температур мастильна дія олив відбувається за рахунок твердо подібних плівок. В цій зоні працюють важко навантажені зубчасті передачі.

3.4 Введення до мінеральної оливи МК-8 мурашиної кислоти як поверхнево-активної присадки призводить до зменшення інтенсивності утворення СОП, а при збільшенні концентрації навіть припинення, що прискорює процес припрацювання та покращує якість поверхонь.

Подальше нагрівання олив з поверхнево-активними речовинами до температури десорбції молекул ПАР призводить до інтенсифікації утворення СОП, що в свою чергу підвищує зносостійкість та контактну витривалість пар тертя.

3.5 З наведених результатів експериментів можна дійти висновку, що традиційне використання хімічно-активних присадок не завжди покращує змащувальну дію, а в деяких випадках і погіршує, блокуючи формування хемосорбційних граничних плівок (СОП). Тому для повної оцінки присадок, окрім їх випробувань на специфічну дію, необхідно враховувати ще інші показники змащувальної дії, насамперед здатність масел розділяти поверхні тертя та їх вплив на несучу спроможність змащувального шару.

Узагальнюючи проведені дослідження, можна зробити висновок, що плівки СОП інтенсивніше формуються, в даних умовах тертя, в середовищі з більш в'язким маслом, містить більшу кількість вуглецю та кисню, мають спадаючий характер концентрації до поверхні сплаву (сталі).

Плівки СОП, сформовані в більш в'язких мастилах, по інтенсивності зв'язку в кілька разів перевищують плівки, утворені в малов'язких оливах і оливах без присадок. Для малов'язких масел спостерігається значна дифузія кисню через СОП вглиб металу, що свідчить про більш (дефектну) пухку будову СОП, що формуються в малов'язких маслах.

3.6 Проведено дослідження змащувальних процесів при терті пар сталь-бронза та сталь-спечений матеріал, а також визначено зв'язки між товщиною мастильного шару, моментом тертя та зносом поверхонь. У результаті проведених випробувань встановлено, що більшому зносу відповідають менші втрати на тертя, тобто втрати на деформування та руйнування поверхні металу є малими порівняно з силами тертя в змащувальному шарі, а протизносні характеристики значною мірою визначаються здатністю матеріалів до утворення в результаті взаємодії з мастилом граничних структур з різними реологічними, фізико-хімічними та хімічними властивостями. Перспективами подальших досліджень окрім аналізування тонких поверхневих прошарків металу є визначення властивостей і експлуатаційних характеристик протизносних та антифрикційних хемосорбційних плівок СОП, які утворюються вуглеводневими компонентами мастильних матеріалів.

3.7 Порівняння результатів дослідження показує, що існує зв'язок між товщиною мастильного шару та часом до появи викришування на поверхнях тертя зубчастих коліс (більшій товщині відповідає більша кількість циклів до викришування на всіх оливах).

У зв'язку з тим, що утворення хемосорбційних плівок, які проявляють підвищену стійкість проти викришування, не пов'язано з гідродинамічним ефектом, обґрунтовано вивчення негідродинамічної змащувальної дії СОП та її впливу на втомне зношування контактних поверхонь. Використання

протизносних та противопітінгових властивостей СОП є найбільш перспективним і найбільш економічним шляхом для подальшого підвищення зносостійкості та довговічності зубчастих передач, підшипників кочення та інших деталей, що не вимагає ускладнення технології виробництва та підвищення якості конструкційних матеріалів.

3.8 Таким чином, в широкому діапазоні температур (60...200°C) використання традиційних присадок ПАР та ХАР малоефективно, в зв'язку з чим є доцільним дослідити механізм змащувальної дії присадок принципово нового типу – карбонофторидів (CF<sub>x</sub>)<sub>n</sub>, які мають у своєму складі сполуки фтору та вуглецю, та здатні, поряд з високою адсорбційною активністю та хімічною реакційністю формувати на поверхні тертя хемосорбційні плівки, які мають високі протизносні та антифрикційні властивості.

## РОЗДІЛ 4 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПІДВИЩЕННЯ ЗМАЩУВАЛЬНОЇ ДІЇ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З КАРБОНОФТОРИДНИМИ ПРИСАДКАМИ В УМОВАХ РОБОТИ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ.

### 4.1 Фтористий графіт (карбонфторид ( $CF_x$ )<sub>n</sub>.)

Успішне застосування графіту в якості сухої змазки стимулювало вивчення його похідних. Фтористий графіт (карбонфторид) був отриманий в 1934 році шляхом прямого об'єднання графіту з фтором [114], але до 1969 року практично не з'являлось ніяких публікацій про його використання в якості змазки.

Фусаро та Слайні [115] виявили, що зносостійкість покриттів зі фтористого графіту вище, чем зносостійкість натурального графіту чи дисульфиду молібдена. Коефіцієнт терття фтористого графіту нижче, ніж у натурального графіту. Під час випробувань на кульковій машині терття Осікава [116] встановив, що питоме навантаження консистентної змазки суттєво збільшується з додаванням в неї, в якості присадки фтористого графіту. Крім того ним було встановлено що фтористий графіт може ефективно використовуватися як суха змазка для ущільнювальних матеріалів навіть при високих температурах та навантаженнях.

Не дивлячись на достатню кількість інформації про фтористий графіт, змащувальна дія його ще дуже мало вивчена. В основному вся інформація відноситься до матеріалу, отриманому шляхом прямої реакції графіта з фтором при високих температурах [116,117]. В результаті цієї реакції отримуємо суміш з емперичною формулою  $CF_x$ , де максимальна величина  $x$  приблизно дорівнює 1, а точна величина змінюється зі зміною температури реакції, збільшуясь з підвищенням температури. В літературі різні дослідники по різному називають отриману речовину: фтористий графіт [80], фторід графіта [114], фторований вуглець [118,119], карбонфторид [120-126].

Отриманий матеріал було класифіковано як полімер, на відміну від газоподібного  $CF_4$ , та відповідно, може розглядатися як  $(CF_x)_n$ . Колір матеріалу змінюється від сірого до білого в залежності від відношення С і F.

Структуру фтористого графіту  $(CF_x)_n$  точно визначити не вдалося, але була запропонована структура, яка має ковалентні зв'язки між атомами фтору та

вуглецю, а також гексагональну будову вуглецевих зв'язків [119,129]. Рентгенівська дифракція показала, що відстань між площинами шарів вуглецю збільшилась від  $3,4 \text{ \AA}$  в графіті до, приблизно,  $8\text{\AA}$  у фтористому графіті. Причому, змінилась не тільки відстань між площинами вуглецевих шарів, але і відстань між атомами вуглецю. Таким чином структура складається з «хвилястого шару» атомів вуглецю, розміщеного між двома шарами фтору.

На рис. 4.1 показана структура площин вуглецевих шарів графіту, а на рис.4.2 – ті ж площини після реакції графіту зі фтором та утворення фтористого графіту.

В таблиці 1.5. наведені данні про деякі фізичні властивості фтористого графіту, отримані різними дослідниками [128]/ Наводяться також відповідні дані по графіту [130].

По зносостійкості ці фторовані суміші можна порівняти з відомими промисловими присадками з ді-н-бутилдітіофосфата (ZDTP). Автори відзначають, що оливорозчинні фторовані суміші показали себе ефективними зносостійкими антифрикційними присадками при випробуваннях на кульковій машині терття та іншому випробувальному обладнанні. Механізм дії цих матеріалів заснований на утворенні плівки, яка містить металофторид.

Таблиця 4.1.

## Фізичні властивості фтористого графіту,

№ п/п	Склад	Щільність г/см <sup>2</sup>	Відстань між атомами вуглецю $\text{\AA}$	Відстань між площинами вуглецевих шарів, $\text{\AA}$	Питомий електроопір Ом/см	№ публікації згідно переліку літератури
1	(CF <sub>1,085</sub> )	2,39	1,42	8,2	$>3 \cdot 10^3$	114
2	(CF <sub>0,988</sub> )	2,67	1,54	6,6	$>3 \cdot 10^3$	118
3	(CF <sub>0,996</sub> )	2,78	1,49	6,0	$>3 \cdot 10^3$	119
4	<b>Графіт</b>	1,4-1,7	1,42	3,35	$5 \cdot 10^{-3}$	117

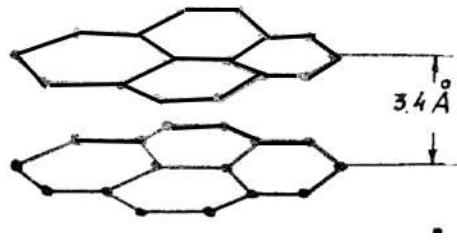


Рис.1.30 Структура графіту.

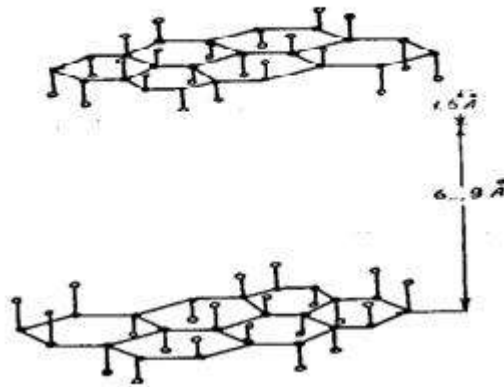


Рис. 1.31. Структура фтористогографіту з розтягнутими площинами вуглецевих шарів за рахунок впровадження атомів фтору. [115].

В Україні найбільш повні та систематичні дослідження по використанню фторвуглецевих сполук (карбонфторидів) в якості змазки проводились в Національному авіаційному університеті [121-124, 129]. В ході досліджень встановлені унікальні властивості карбонфторидів (КФ) при їх введенні в трибосистему: здатність до хімічної модифікації поверхні (в процесі терття або при термічній модифікації), підвищення зносостійкості та контактної витривалості, зниження терття.

Розроблені способи використання карбонфторидів включають припрацювання вузлів терття в середовищах, які містять карбонфториди, введення добавок карбонфториду в оливи, пластичні змазки, змащувально-охолоджувальні та гідравлічні рідини.

Апробація цих способів в вузлах тертя газотурбінних двигунів (ГТД) показала перспективу їх широкого використання в авіаційній техніці. Найбільш важливі результати апробації в тому, що в присутності карбонофторидів може бути суттєво підвищений ресурс та максимум допустимих контактних напружень підшипників кочення та зубчастих передач та після введення карбонофторидів вузли тертя стають менш чутливими до якості мастильних матеріалів. [131].

При введенні 0,05% КФ в гідравлічну рідину АМГ-10 запобігалось схоплювання та заїдання в цангових замках підкос-підйомника основної стійки шасі літака Ту-154 [99].

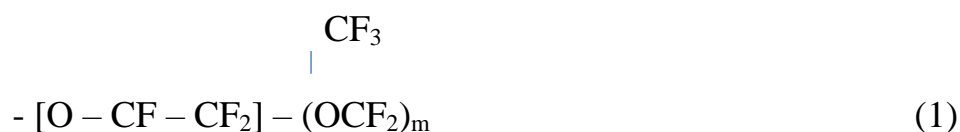
За кордоном карбонофториди достатньо широко використовують в трибосполученнях для підвищення протизносних та антифрикційних властивостей.

В монографії [128] та інших джерелах вказується що цей матеріал дуже зацікавив дослідницьки центри та випробувальні лабораторії НАСА. Згідно інформації НАСА найбільш відомі застосування карбонофторидів в суміші або замість дисульфіда молібдена в твердозмащувальних покриттях.

В Японії карбонофторид використовували в якості наповнювача нейлонових та самозв'язуючих покриттів шляхом одночасного осадження металу та карбонофториду з розчину. Є повідомлення про покращення антифрикційних властивостей змазок при додаванні карбонофториду до літєвої змазки при високих температурах.

Найбільш відомими використаннями карбонофторидів можна вважати наступні:

Міжнародна фірма «Монтедиссон» випускає рідину для припрацювання Fomblin Yfluorinated fluids, яка має наступну структуру:



Фірма рекламує припрацювання в цій рідині різних вузлів терття. Наводиться наступний приклад: підшипник, припрацьований в рідині Fomblin працює при сухому тертті в вакуумі 7 років.

Фірма «Дайкин» випускає хлортрифторетиленові мастила, які є теломерами хлортрифторетилену формули:



В залежності від ступеня полімеризації вони мають густину від рідких до воскоподібних.

Масла на основі простого перфторполіетилену мають формулу:



високу хімічну та термічну стійкість, та виробляються фірмами «Дюпон» та «Монтедиссон».

Найбільш повна інформація про склад оливи, яка містить карбонофторид міститься в патенті Франції 1026655А, опубл. 30.06.83, бюл. №24.

Запатентоване масло на мінеральній основі містить дитіофосфат цинку, малорозчинні солі, а також фтористий графіт (де  $x=0$ ,  $x=1$ ) в кількості 0,1-1%, який попередньо диспергується в ефірі полігліколя.

Порівняльні випробування оливи з фтористим графітом на випробувальних стендах показали здатність витримувати збільшення навантаження на 40-100%, порівняно з базовим маслом, а досліди на серійних автомашинах показали, що використання нового масла дало економію 5,4% на двигунах внутрішнього згорання, та 11% на дизельних двигунах.

Не дивлячись на то що введення карбонофторидів в змащувальні матеріали модефікує поверхні контакту, підвищуя їх триботехнічні властивості, вплив КФ-присадок на стан граничних змащувальних шарів вивчено недостатньо.

## 4.2 Вплив карбофторидних присадок до мастильних матеріалів на припрацювання зубчастих передач

Дослідження ефективності змащувальної дії мастильних матеріалів з карбофторидними присадками в процесі припрацювання зубчастих передач проводилось за методикою наведеною в 2.2.1.

Кінетика зміни товщини змащувального шару і коефіцієнту тертя для шести базових середовищ показаний на рис.4.3 та рис.4.4

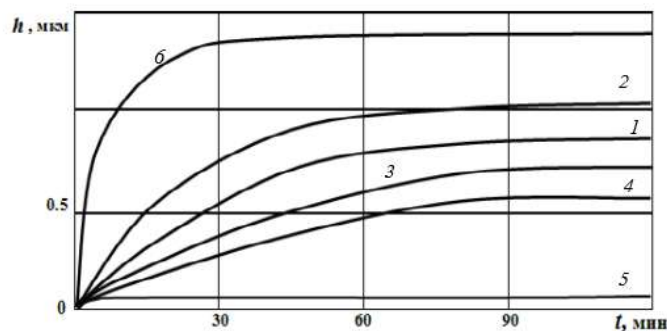


Рис.4.3 Зміна товщини змащувального шару для різних масел при припрацюванні на усталеному режимі: 1 – ВНП НП-50-1-4У; 2 – ІПМ-10; 3 – І-20А; 4 – М-10Г2К; 5 – ДЗ; 6 – МС– 8П

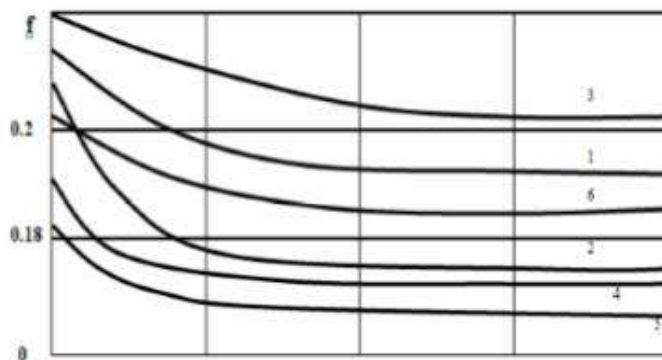


Рис.4.4 Зміна коефіцієнта тертя для різних масел при припрацюванні на усталеному режимі: 1 – ВНП НП-50-1-4У; 2 – ІПМ-10; 3 – І-20А; 4 – М-10Г2К; 5 – ДЗ; 6 МС– 8П

Як видно з таблиці 4.1 всі випробувані матеріали, за винятком дизельного палива, мають задовільні мастильні властивості. При цьому зразки добре припрацьовувались (від 20 до 100 хв), після припрацювання формувалися досить товсті мастильні шари (хуст – від 0,6 до 1,25 мкм

Таблиця 4.2

Вплив концентрації присадки КФ на показники мастильного дії при припрацюванні

Змащувальна середа	% конц. КФ	Показники змащувальної дії			
		$t$ , МИН	$h_{уст}$ , МКМ	$f$	$\Delta T$ , °С
ВНПНП-50-1-4У	0	70	0,9	0,2	21
	0,125	90	0,6	0,18	20
	0,25	80	0,8	0,16	22
	0,5	40	1,0	0,14	19
	1,0	30	0,85	0,22	18
ІІМ-10	0	65	0,95	0,21	16
	0,125	65	0,90	0,17	12
	0,25	60	0,75	0,17	11
	0,5	45	0,95	0,16	16
	1,0	60	0,8	0,155	13
М-10Г2К	0	100	0,60	0,18	23
	0,125	95	0,90	0,14	18
	0,25	60	1,0	0,13	21
	0,5	55	1,0	0,15	22
	1,0	80	0,6	0,185	22
І-20А	0	100	0,9	0,17	21
	0,125	85	1,2	0,17	16
	0,25	100	1,0	0,175	15
	0,5	50	0,55	0,175	17
	1,0	90	0,65	0,19	15
МС-8П	0	20	1,25	0,20	21
	0,125	35	1,0	0,19	22
	0,25	50	0,9	0,16	20
	0,5	15	1,0	0,19	25
	1,0	60	1,2	0,17	15
ДЗ	0	-	0,1	0,165	20
	0,125	75	0,95	0,18	14
	0,25	25	1,0	0,165	17
	0,5	10	0,95	0,21	19
	1,0	75	0,90	0,19	18

На дизельному паливі припрацювати зразки не вдалося. Через 2–3 хв після початку експерименту на зразках відзначалася поява темної плівки і зміна кольору дизельного палива від прозорого до майже чорного. Товщина змащувального шару не піднімалася вище 0,1 мкм на всьому протязі експерименту, спостерігалися розриви змащувального шару. Найменший час припрацювання ( $t$  – 20 хв) та найбільшу товщину мастильного шару має масло МС-8П ( $h_{уст}$  – 1,25мкм). Гарну змащувальну дію показали також авіаційні масла ВНДІ НП-50-1-4У та ІІМ-10. Два інших масла – І-20А і, особливо, М-10Г<sub>2</sub>К показали найгіршу з випробуваних масел змащувальну дію. Так, час припрацювання на М-10Г<sub>2</sub>К в 5 разів більше, а товщина шару, яка сформувалася після припрацювання в 2 рази менше, ніж на МС-8П. Найбільш ефективно використання КФ в дизельному паливі (ДЗ). Введення КФ (від 0,125 % до 1 %) збільшує товщину змащувального шару в 9...10 разів,

дозволяє швидко і якісно припрацювати поверхні тертя (залежно від концентрації КФ час припрацювання від 10 до 75 хв), зменшує знос деталей від 2 до 6 разів. Як видно з таблиці 4.1 оптимальної для ДЗ виявилася концентрація 0,5 % КФ: при цьому товщина шару після припрацювання збільшилася з 0,1 до 0,95 мкм, знос зменшився з 6 до 1 мкм, час припрацювання становило 10...15 хв і співрозмірно з кращим з випробуваних масел МС–8П. Аналіз результатів випробувань показує, що оптимальними концентраціями КФ-присадок є: □ для масла ВНІІ НП–50–1–4У = 0,5 % КФ; □ для масла ПІМ–10 = 0,5 % КФ; □ для масла І–20 = 0,125 % КФ; □ для масла М–10Г<sub>2</sub>К концентрації від, 0,15 до 0,5 % КФ. Застосування КФ в маслі МС–8П до помітного поліпшення його основних показників не привело, а при деяких концентраціях (0,125; 0,25; 1 %) було гірше, ніж у базового масла.

### **4.3 Ефективність змащувальної дії мастильних матеріалів з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя**

#### **4.3.1 Динамічний режим нестационарності (пуски-зупинки)**

Випробовувалися такі мастильні середовища:

- авіаційні оливи ВНІІНП-50-1-4у; ПІМ-10; МС-8п; - індустриальні оливи І-20А; ІДП-18; - автомобільне масло М-10Г<sub>2</sub>К.

Мастильні середовища випробовувалися в однаковому нестационарному режимі (пуски-зупинки), без присадок та з присадками карбонофторидів (ТУ 6:02-2-859-85) у концентрації: 0,125; 0,25; 0,5; 1% (масових часток), згідно методики наведеної в 2.2.2.

Аналіз результатів випробувань шести марок масел, наведених у таблиці 4.2, показує, що ефективність впливу КФ-присадок на мастильну дію при нестационарних умовах тертя залежить від базового мастильного середовища і концентрації присадки, що вводиться.

Так, наприклад, високоякісні авіаційні масла МС-8п і ПІМ-10, що мають гарну мастильною дією на усталеному режимі, добре працювали і при нестационарних умовах: при ТПМД товщина мастильного шару не зменшувалася нижче 1мкм і

протягом усього експерименту інтенсивно утворювалися СОП ( товщина СОП 0,71 і 041 мкм відповідно).

Таблиця 4.3

Таблиця 1.

## Вплив концентрації КФ-присадок на основні показники мастильної дії

Масило	Концентрація КФ, %	Основні показники мастильної дії									Інтегр-й показник ефективності масляної дії $Q$
		$\tau_1$ , мин.	$\tau_2$ , мин.	$h_{min}$ , мкм.	$h_{уст.}$ , мкм.	$h_{соп}$ , мкм.	$f_n$	$f_{уст.}$	$\Delta T$ , °C	$I$ , мкм.	
ВНИИП 50-1-4v	0	55	90	0,7	0,95	0,3	0,38	0,22	22	2,5	169
	0,1	45	90	0,65	0,85	0,12	0,38	0,22	20	2,8	157
	0,25	30	35	0,8	0,9	0,15	0,33	0,17	12	0,75	77
	0,5	30	50	0,85	0,95	0,475	0,31	0,18	14	0,47	94
	1	40	100	0,9	1	0,25	0,37	0,23	15	0,65	156
ПМ-10	0	20	70	1,2	1,25	0,41	0,41	0,26	16	0,69	108
	0,1	30	40	0,8	0,9	0,45	0,34	0,15	12	0,8	82
	0,25	50	60	0,7	0,9	0,56	0,38	0,21	11	0,75	121
	0,5	20	30	0,85	0,9	0,65	0,34	0,19	16	1,74	67
	1	30	85	0,8	0,85	0,45	0,34	0,19	13	1,1	129
МС-8п	0	5	20	1,05	1,4	0,71	0,36	0,23	21	1,28	49
	0,1	50	60	0,85	1,1	0,64	0,34	0,21	22	1,2	134
	0,25	20	30	0,9	1,15	0,64	0,33	0,2	20	0,75	71
	0,5	10	30	0,9	1,2	0,62	0,32	0,2	21	1	63
	1	10	30	0,75	1,2	0,51	0,32	0,2	18	0,9	59
И-20А	0	90	90	0,4	1	0,25	0,32	0,19	21	1,44	203
	0,1	20	85	0,9	1	0,07	0,32	0,19	16	0,34	122
	0,25	50	85	0,9	0,95	0,25	0,34	0,2	15	1	151
	0,5	45	55	0,25	0,55	0,08	0,36	0,2	17	0,4	117
	1	20	20	0,25	0,6	0,08	0,33	0,2	15	1,31	56
ИПТ-18	0	10	110	0,8	1	0,1	0,32	0,2	17	0,65	138
	0,1	15	80	0,55	0,65	0,05	0,32	0,2	23	0,7	118
	0,25	-	5	0,65	0,65	0,45	0,32	0,2	21	0,85	26
	0,5	15	30	0,65	0,75	0,05	0,33	0,17	21	0,6	66
	1	-	10	0,65	0,6	0,05	0,31	0,2	22	0,75	32
М-10Г К	0	25	50	0,45	0,55	0,05	0,33	0,17	23	0,4	98
	0,1	20	50	0,65	0,95	0,28	0,34	0,15	18	0,42	88
	0,25	20	40	1	1,05	0,15	0,31	0,17	21	0,43	83
	0,5	20	85	0,9	1,1	0,125	0,35	0,19	22	0,56	123
	1	20	40	0,85	1,05	0,08	0,341	0,18	22	0,44	83

Застосування КФ-присадок у цих оліях неефективне, а при деяких концентраціях може призвести до погіршення основних показників дії мастила.

Введення в мастильний матеріал присадки КФ призводить, під впливом тих же умов контакту, до утворення фази FeF в поверхневому шарі металу і хемосорбованих шарів  $CF_2$  і  $CF_3$  на поверхнях тертя. Експерименти показали, що ці хемосорбовані плівки, як і СОП, мають високі протизносні характеристики [74; 86].

З шести випробуваних мастил найбільш інтенсивно утворювали СОП авіаційні масла МС-8П, ПМ-10, ВНДІ НП-50-1-4У (товщина СОП - 0,71; 0,41; 0,3 мкм відповідно). Ці масла при нестационарному режимі тертя показали найменшу величину ТПМД (мінімальна товщина шару – 1,05; 1,0; 0,7 мкм). Індустріальні олії І-20А, ІПП-18 та автомобільна олія М-10Г<sub>2</sub>К значно гірше утворювали СОП (товщина відповідно – 0,25; 0,1 та 0,05 мкм).

Введення присадок КФ у випробувані за даних режимах авіаційні оливи не призвело до відчутного поліпшення мастильної дії. При введенні цих присадок навіть у малій концентрації в оливі І-20А, ІПП-18, М-10Г<sub>2</sub>К змащувальна дія покращувалася. Наприклад, якщо масова частка присадки КФ становить 0,125% маслі М-10Г<sub>2</sub>К товщина твердоподібної плівки зростає в 3 рази, а мінімальна товщина шару при ТПМД збільшується з 0,45 до 0,65 мкм.

За розробленими критеріями оцінено ефективність мастильної дії шести марок масел з КФ-присадками при нестационарних режимах тертя. Ефективність застосування КФ-присадок залежить від властивостей базової олії та їх концентрації. Для випробуваних масел різного складу та призначення оптимальна масова частка присадки становила 0,25 – 0,5 %. У зв'язку з тим, що компоненти масел можуть конкурувати з КФ-присадками та перешкоджати утворенню ними твердоподібних плівок, доцільно застосовувати КФ-присадки в умовах слабого утворення СОП.

Введення присадки КФ у мастильні середовища значно зменшує, а в окремих випадках повністю усуває ТПМД при нестационарних режимах за рахунок високих адсорбційних властивостей та хімічної активності карбонофторидів. Розроблена програма оцінки ефективності масляної дії оливи з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя за інтегрованим показником ефективності масляної дії  $Q$  є дієвим інструментом для визначення областей для поліпшень та для відстеження ефективності масляної дії оливи з присадками при нестационарних режимах тертя (див. Додаток А, розділ 2.2.3).

### 4.3.2 Температурний режим нестационарності.

#### 4.3.2.1. Мастильна дія ТАП-І5 з КФ-присадками за швидкості нагріву $4^{\circ}/\text{хв}$ на усталеному режимі

Випробування на усталеному режимі проводили на зразках зі сталі 40Х твердістю HRC 32...34, шорсткістю Ra 0,3мкм, за контактних напружень (за Герцем) 700 МПа, сумарної швидкості кочення  $V=1,71$  м/с, швидкості ковзання  $V=0,47$  м/с, проковзування 20 %.

Для проведення випробувань під час нагрівання було сконструйовано і виготовлено спеціальну ванночку для мастила. Змащення здійснювалося зануренням нижнього зразка в змашувальне середовище, що заливається у ванночку. Ванночка має подвійне дно. У простір між першим і другим дном встановлено електронагрівач. Кількість тепла, що виділяється електронагрівачем, регулювалася зміною напруги за допомогою автотрансформатора.

Нагрівання мастильного середовища відбувалося з двома швидкостями:

1. Режим 1 -  $4^{\circ}/\text{хв}$ ;
2. Режим 2 -  $1^{\circ}/\text{хв}$ .

У всіх дослідах температура оливи до початку роботи становила  $20^{\circ}\text{C}$ . В подальшому в процесі роботи температура оливи доводилася до  $180^{\circ}\text{C}$  і витримувалася до стабілізації товщини мастильного шару і коефіцієнту тертя.

Перед дослідями робочі поверхні роликів не припрацьовували (за винятком спеціально обумовлених випадків).

Ефективність оливок під час нагрівання оцінювали за тими самими критеріями, що і під час пусків-зупинок.

Для порівняльного аналізу дослідження несущої здатності оливи ТАП-І5 з КФ - присадками при підвищених температурах проводились на усталеному режимі та в режимі пусків-зупинок.

Результати випробувань представлені на рис. 4.5 и 4.6.

При збільшенні температури, в період припрацювання, протягом перших 60 хв, спостерігалось різке зменшення товщини мастильного шару як на оливі ТАП-І5, так і на оливі ТАП-І5 з 1% добавкою карбонофториду. Однак, якщо на маслі

ТАП-І5 через І годину товщина мастильного шару зменшилася до 0 і надалі не відновилася, що призвело до підвищеного зносу зразків, то при введенні в оливу ТАП-І5 1 % добавки Кф-присадки товщина мастильного шару впродовж перших 60 хв роботи зменшилася до 0,1 мкм за мінімально допустимої товщини мастильного шару продовжувалась робота впродовж 30 хв, а потім спостерігалось зростання товщини мастильного шару та її стабілізація на рівні 1,4 мкм.

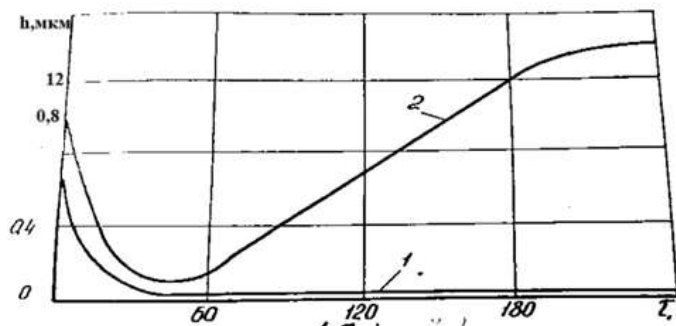


Рис.4.6(а) Зміна товщини мастильного шару в процесі нагрівання ( $4^{\circ}/\text{хв}$ ) на сталому режимі. 1 – ТАП-15; 2 – ТАП-15+1% КФ-присадки

На рис. 4.6 показано залежність товщини мастильного шару від температури. Олива ТАП-І5 без добавки КФ-присадки в діапазоні температур  $60...80^{\circ}\text{C}$  значно знижує рівень змащувальної дії, а при температурі понад  $80^{\circ}\text{C}$  практично непрацездатна. Введення ж 1 % добавки Кф-присадки значно (до  $180^{\circ}\text{C}$ , а можливо, і більше) розширює діапазон температурного застосування оливи ТАП-І5. Слід зазначити, що в цьому випадку діапазон температур  $60...80^{\circ}\text{C}$  є найбільш несприятливим з точки зору забезпечення змащувальної дії і є небезпечним з точки зору заїдання.

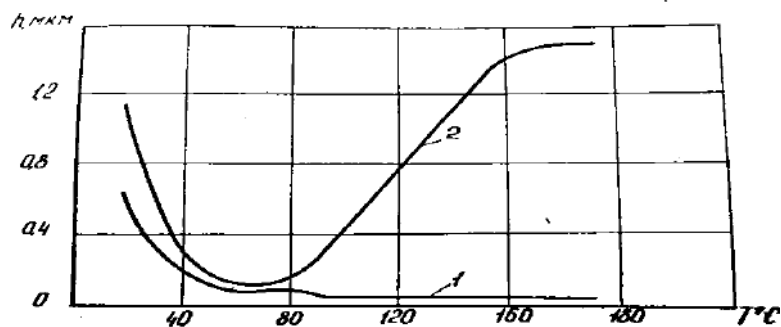


Рис.4.6 (б) Залежність товщини мастильного шару від температури ( $4^0/\text{хв}$ ) на сталому режимі. 1 – ТАП-15; 2 – ТАП-15+1% КФ-присадки

Описані експерименти ще раз підтверджують ТЗЗД за температурного фактору нестационарності. Механізм цього явища досить детально описаний у [66, 121,96].

В його основі лежать адсорбційні процеси, що відбуваються на поверхні тертя. В наших дослідах при нагріванні до  $50^0\text{C}$  в умовах граничного тертя відбувається руйнування фізично адсорбованих шарів, у діапазоні температур  $50\dots 80^0\text{C}$  відбуваються конкурентні процеси (руйнування фізично адсорбованих шарів і формування хемосорбційних плівок), при температурі понад  $80^0\text{C}$  на олії, що містить КФ-присадку, формуються хемосорбційні плівки, які містять у своєму складі групи  $\text{CF}_2/\text{CF}_3$  [133, 134], що відрізняються від органічних плівок (СОП), сформованих активними компонентами оливи, які здебільшого містять групи  $\text{CH}_2/\text{CH}_3$  [133, 134]. Крім того, при цій температурі і вище можливе насичення тонких поверхневих шарів активним фтором.

#### **4.3.2.2 Спільний вплив динамічного та температурного режимів нестационарності. Змащувальна дія оливи ТАП-15 з КФ-присадками за швидкості нагріву $4^0/\text{хв}$ у режимі пусків-зупинок.**

Підвищені температури характерні для механізмів, що працюють у безперервному режимі, а також у режимі з частими пусками і зупинками. В останньому випадку пари тертя, перебувають у більш важких умовах внаслідок поганої змащувальної дії в цей період.

Усі дослідження в умовах пусків-зупинок, наведені в цьому розділі, проводилися в такому режимі: розгін до заданої швидкості ( $V = 1,7 \text{ м/с}$ ) протягом 3 с, робота з постійною швидкістю - 10 с, гальмування - 3 с, стоянка - 5 с. Цикли "розгін-сталій режим-гальмування-стоянка" слідуєть один за одним без перерви протягом 4 год (якщо заїдання не настане раніше).

Наведені на рис.4.7 результати випробувань показують, що при сумісному введенні температурного і швидкісного факторів нестационарності після досить різкого зменшення рівнів мастильного шару до 0, його відновлення не відбувається

і через 20 хв настає заїдання (крива 1). Введення 1% КФ-добавки практично мало змінило і характер зміни товщини мастильного шару і час роботи до заїдання (крива 3).

Попереднє припрацювання на усталеному режимі протягом 2 год при подальшій роботі в умовах пусків- зупинок з нагріванням лише дещо збільшило товщину мастильного шару в перші 15 хв, потім послідувало її різке зменшення до 0, яке привело до заїдання через 30 хв.

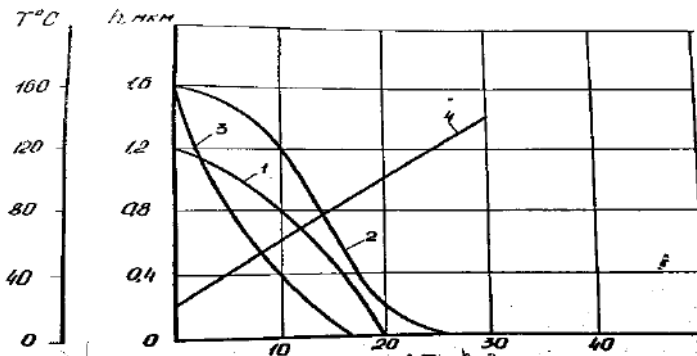


Рис. 4.7 Зміна товщини змащувального шару в процесі нагрівання ( $4^{\circ}/\text{хв}$ ) в режимі «пуск-зупинка». 1-ТАП-15; 2-ТАП-15 (поверхні попередньо припрацьовані на усталеному режимі при  $20^{\circ}\text{C}$ ); 3-ТАП-15+1% КФ; 4- зміна температури.

#### 4.3.2.3 Мастильна дія оливи ТА-І5 у разі повільного нагрівання ( $1^{\circ}/\text{хв}$ ) у режимі пусків-зупинок

Як показано на рис. 4.7, за "швидкого" нагрівання  $4^{\circ}/\text{хв}$ , у режимі пусків-зупинок як чисте мастило ТАП-15, так і з КФ-присадками практично непрацездатне (заїдання настало через 20...30 хв). Причина цього, очевидно, в тому, що за такого швидкого нагрівання швидкість температурної деструкції молекул оливи і присадки значно перевершує хемосорбційні та хімічні процеси взаємодії молекул мастильного середовища з поверхнею тертя. У зв'язку з цим швидкість нагріву була зменшена до  $1^{\circ}/\text{хв}$ .

Результати випробувань оливи ТАП-І5 і ТАП-І5 + 1 % КФ-присадки представлені на рис. 4.8.

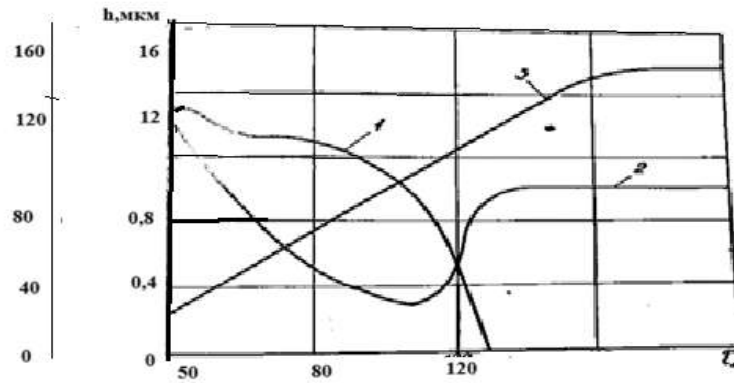


Рис.4.8 Зміна товщини мастильного шару в процесі нагріву ( $1^{\circ}/\text{хв}$ ) в режимі пуск-зупинка: 1-ТАП-15; 2-ТАП-15+ 1%КФ; 3-зміна температури.

Так само як під час нагрівання в режимі I ( $4^{\circ}/\text{хв}$ ), під час нагрівання в режимі 2 ( $1^{\circ}/\text{хв}$ ) на олії ТАП-15 без присадки настало заїдання. Температура заїдання при нагріванні в режимі I -  $90...100^{\circ}\text{C}$ , при нагріванні в режимі 2 -  $140^{\circ}\text{C}$ .

Введення 1% добавки КФ-присадки усунуло заїдання на наступному режимі. Характер зміни товщини мастильного шару в маслі ТАП-15+ 1% КФ-присадки наведено на кривій 2, рис. 4.8.

Товщина мастильного шару протягом перших 90 хв у міру збільшення температури монотонно зменшувалась з 1,4 мкм на початку експерименту до  $h_{\min} 0,3$  мкм при температурі  $80^{\circ}\text{C}$ . Потім на протязі майже півгодини трималась на мінімальній величині, а при температурі  $100...110^{\circ}\text{C}$  почала інтенсивно збільшуватися і за 30 хв збільшилася на 1,0 мкм, після цього стабілізувалася на цій величині і залишалася незмінною до кінця експерименту.

Наведений на рис. 4.9 графік зміни коефіцієнта тертя показує, що введенням КФ-присадки в оливу ТАП-15 можна досягти зниження втрат на тертя на 30%.

Найгірша масляна дія здійснювалася в діапазоні температур  $80...120^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.3.3. Вплив складу карбофторидних присадок на змащувальну дію мастильних матеріалів

Для необхідної седиментаційної стійкості до складу присадки поряд із подрібненими до  $0,1...1,0$  мік частинками карбофториду входить ПАВ - авіаційна олива КУА (суміш ефірів ди-карбонових кислот).

Тому з метою оцінки впливу ПАР на СД ТАП-15 були проведені експерименти, результати яких показано на рис. 4. 11; 4.12; 4.13.

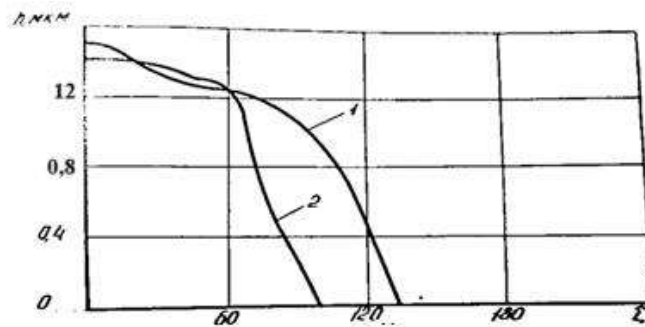


Рис. 4.9 Зміна товщини мастильного шару в процесі нагріву ( $1^0/\text{хв}$ ) при пусках-зупинках: 1-ТАП-15; 2-ТАП-15+1% КУА

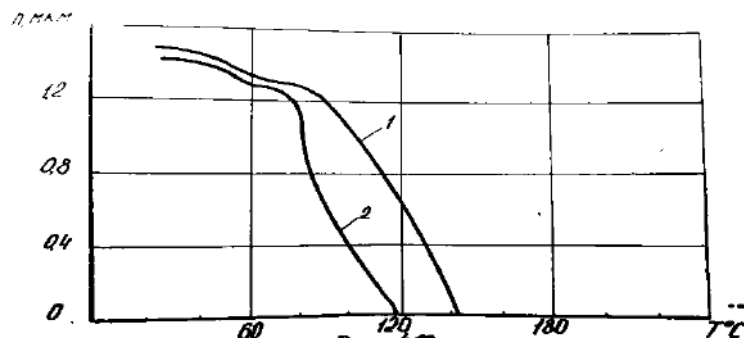


Рис. 4.10 Залежність товщини мастильного шару від температури ( $1^0/\text{хв}$ ) при пусках-зупинках: 1-ТАП-15; 2-ТАП-15+1% КУА

Введення ПАР суттєво не поліщило змащувальну дію порівняно з мастилом ТАП-15 без присадки. Заїдання настало на 20 хв раніше, ніж на оливі без присадки при температурі  $T = 120^{\circ}\text{C}$  (на ТАП-15 без ПАР при  $T = 140^{\circ}\text{C}$ ).

Коефіцієнт тертя змінюється більш інтенсивно при введенні ПАР, усталені значення відрізняються не на багато 0,21...0,23.

Найкращою змащувальну дію показало введення в оливу ТАП-15 1% присадки, що відповідає її складу 27,8 %КФ + 5,6 NB+ 66,6 КУА. Товщина мастильного шару в період тимчасового зниження змащувальної дії (ТЗМД) зменшилася незначною мірою з 1,5 до 0,9 мкм, потім зросла до 1,2 мкм і за температури  $170^{\circ}\text{C}$  стабілізувалася. Введення в невеликих концентраціях до КФ-місткої присадки нітриду бору в 3 рази (з 0,3 до 0,9 мкм) підвищило мінімальну

товщину мастильного шару, а стали товщину мастильного шару на 0,2 мкм. Нітрид бору дещо збільшив коефіцієнт тертя карбоновмісної присадки, але він був нижчим, ніж у оливи без присадок, а також у оливи ТАП-15 з присадкою нітриду бору, але без КФ.

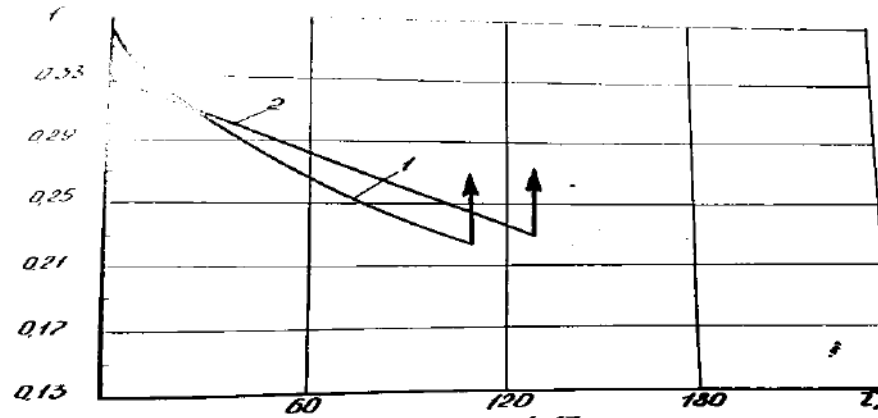


Рис. 4.11 Зміна коефіцієнту тертя в процесі нагріву ( $1^{\circ}/\text{хв}$ ) при пусках-зупинках: 1-ТАП-15; 2-ТАП-15+1% КУА

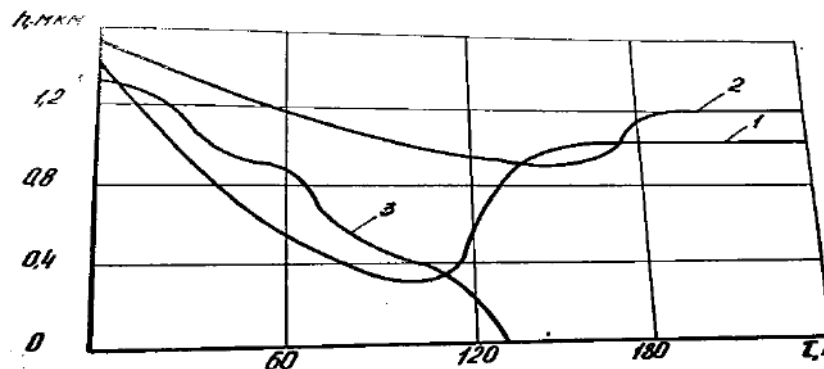


Рис.4.12 Зміна товщини змащувального шару в процесі нагріву ( $1^{\circ}/\text{хв}$ ) в режимі «пуск-зупинка»: 1-ТАП-15+1% (33,4% КФ+66,6% КУА);  
2 – ТАП-15+1% (27,8% КФ + 5,6%NB + 66,6% КУА);  
3-ТАП-15+1% (33,4%NB + 66,6% КУА)

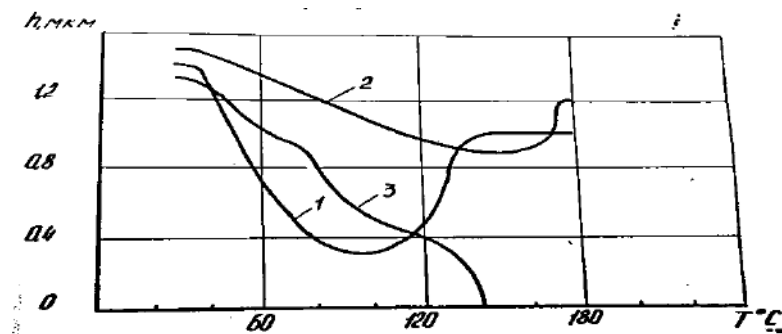


Рис.4.13 Зміна товщини змащувального шару від температури ( $1^{\circ}/\text{хв}$ ) в режимі «пуск-зупинка»: 1-ТАП-15+1% (33,4% КФ+66,6% КУА);  
2 – ТАП-15+1% (27,8% КФ + 5,6%NB + 66,6% КУА);  
3-ТАП-15+1% (33,4%NB + 66,6% КУА)

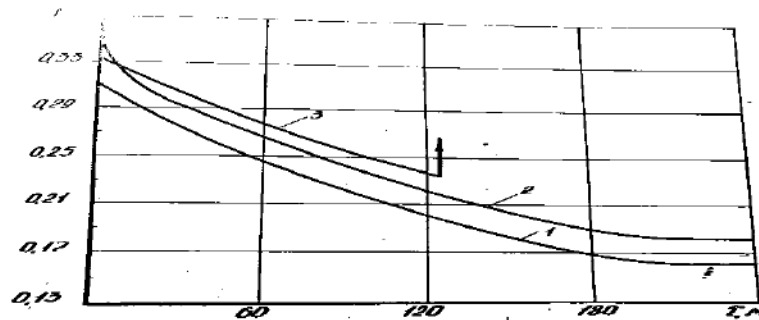


Рис.4.14 Зміна коефіцієнту тертя в процесі нагріву ( $10^{\circ}/\text{хв}$ ) в режимі «пуск-зупинка»:

- 1-ТАП-15+1% (33,4% КФ+66,6% КУА);
- 2 – ТАП-15+1% (27,8% КФ + 5,6%NB + 66,6% КУА);
- 3-ТАП-15+1% (33,4%NB + 66,6% КУА)

Введення нітриду бору в оливу ТАП-15 практично не змінило його масляну дію. Товщина мастильного шару зменшилась з 1,3 мкм до 0, робота пари тертя продовжувалась з підвищенням, порівняно з оливою без присадки коефіцієнтом тертя та через 2 години при температурі 140 °С, настало заїдання.

#### 4.4 Механізм змащувальної дії карбонофторидних присадок.

Механізм утворення хемосорбційних плівок карбонофторидними присадками багато в чому схожий на механізм утворення органічних плівок вуглеводнями олії. Утворення плівок компонентами олії відбувається в умовах конкуренції за місце на поверхні між вуглеводнями олії та фторвуглецевими сполуками КФ-присадки. Ця конкуренція діє, мабуть, в основному під час хемосорбції, і в ній можуть брати участь як активні елементи присадки (насамперед фтор), так і компоненти олії. Антизадирна ефективність плівки, що утворилася в результаті такої конкуренції, залежатиме від найбільш активної речовини фтору, переможця в конкурентній боротьбі.

Можна вважати встановленим існування двох механізмів виникнення плівок на металевих поверхнях:

- шляхом хемосорбції молекул КФ-присадки на поверхні тертя;
- шляхом хімічної реакції активного фтору із металевою поверхнею під дією тепла тертя.

Імовірно, у загальному вигляді механізм мастильної дії КФ-присадки складається з наступних процесів, рис. 4.17.

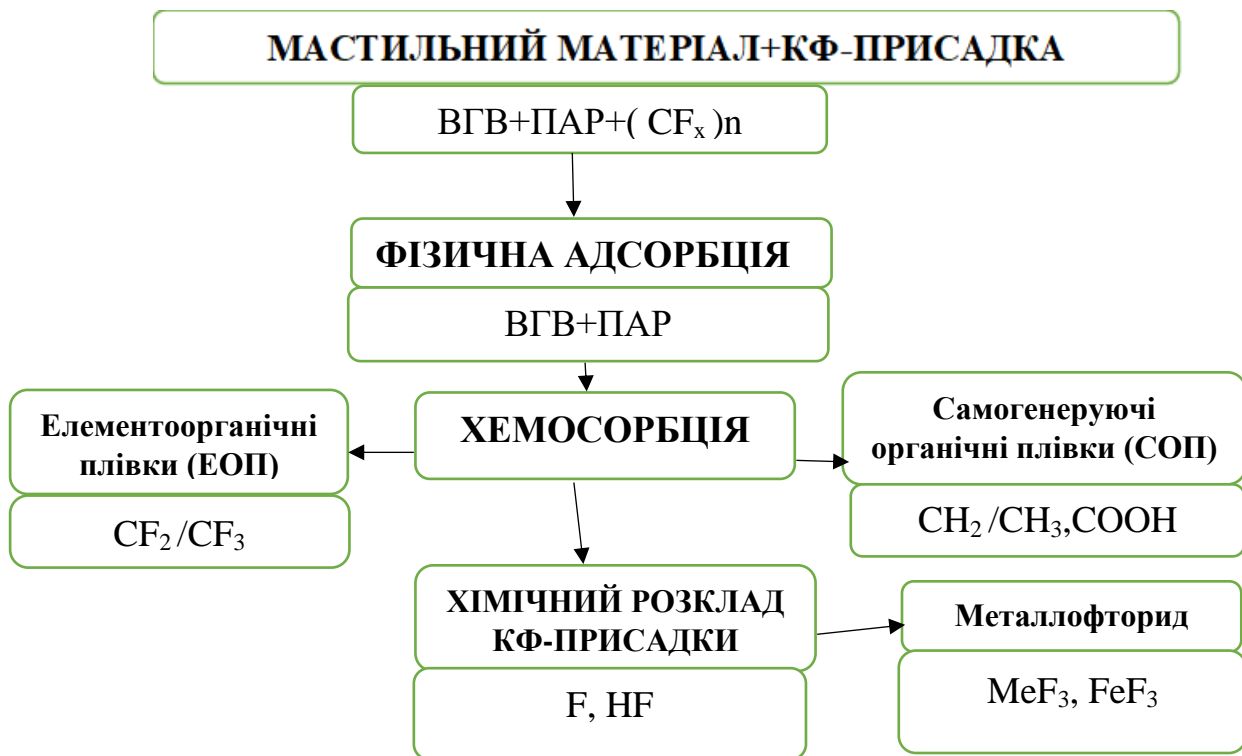


Рис.4.15 Схема механізму змащувальної дії масляних середовищ з карбонофторидними присадками

1. Фізичної адсорбції полярно-активних молекул оливи та ПАР
2. Хемосорбції.
3. Хімічного розкладання молекул КФ-присадок за підвищених температур.
4. Хімічної взаємодії найбільш активних продуктів розкладання КФ-присадок із металом поверхні тертя (хімічне модифікування поверхонь тертя)

Обидва механізми утворення плівок не виключають, а навпаки, у багатьох випадках доповнюють один одного: спочатку відбувається хемосорбція, потім, в умовах тертя, після досягнення досить високої температури хемосорбована сполука вступає в реакцію з металом.

## 4.5 Аналіз складу трибоплівок, утворених мастильними матеріалами з карбонофторидними присадками на поверхнях тертя.

### 4.5.1 Мікрорентгенівський фазовий аналіз поверхневого шару

Підтвердженням тому можуть бути результати дослідження поверхонь після тертя у фторвуглецевмісної суміші під рентгенівським фотоелектронним спектроскопом, наведені в [135], які показали два яскраво виражених піку величин F, - один у точці 664 еВ (зв'язувальна енергія), яка відповідає фториду заліза [136, 137, 138], а інший - у точці 665 еВ, завдяки групам CF<sub>2</sub>/CF<sub>3</sub>, органічної фторованої суміші (рис.4.18).

Зміна поверхневої концентрації металофториду MeF<sub>3</sub> та елементоорганічних сполук CF<sub>2</sub>/CF<sub>3</sub> після іонного травлення (швидкість травлення 1 анг/хв)

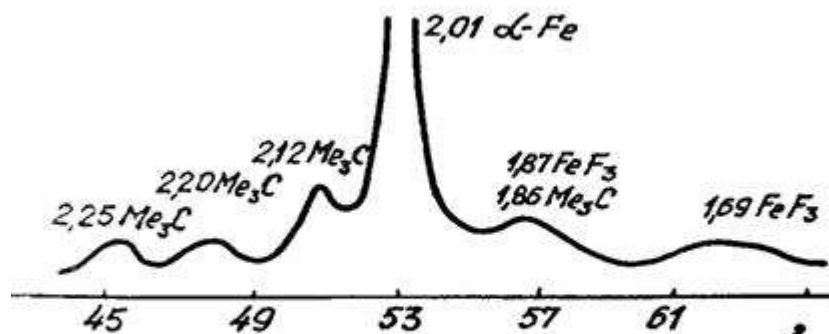


Рис.4.16 Ділянка дифрактограми зразка припрацьованого в 1% КФ - присадки

При хімічній реакції КФ - присадок з металевою поверхнею спочатку має відбутися їхнє розкладання під дією тепла в зоні контакту. У цьому утворюються порівняно прості речовини - F фтор і фтористий водень HF. Ці речовини, взаємодіючи з поверхнею тертя будуть утворювати на ній плівки нових хімічних сполук металофториди MeF<sub>3</sub>. Мікрорентгенівський фазовий аналіз поверхневого шару зразків після припрацювання в дизельному паливі ДЗ+1% КФ-присадки, проведений на установці ДРОН-3, показав наявність модифікованого поверхневого шару, для якого виявлено утворення фази FeF<sub>3</sub> (1,69; 1,87; 3, 74 Å) (рис.4.18.).

#### 4.5.2 Аналіз хімічного складу поверхневих плівок, утворених після припрацювання в масляному середовищі з карбонофторидними присадками методами оже-спектроскопії

На рис. наведені мікрофотографії поверхонь тертя, отримані на електронному мікроскопі Camscan-4", після припрацювання в трансмісійній олії ТАП-15 та в середовищі з 1% КФ-присадки, що підтверджують наявність поверхневих плівок. Аналіз спектрограм хімічного складу плівки на вихідній поверхні сталі 40Х (рис.4.19) та зразках, що працювали в маслі ТАП-15 (рис.4.19) та в середовищі з 1% КФ-присадки (рис.4.21), показали наступне:

- на вихідній поверхні не виявлено підвищеного вмісту будь-яких елементів, крім заліза та хрому, що природно для сталі 40Х;

- після роботи в середовищі з КФ-присадкою і формування плівок, вміст хрому і заліза в поверхневому шарі в порівнянні з вихідним зменшувалося, отже, КФ-присадка здатна формувати хемосорбційні плівки, що мають захисну дію, що екранує, що оберігає деталі тертя від безпосереднього контакту.

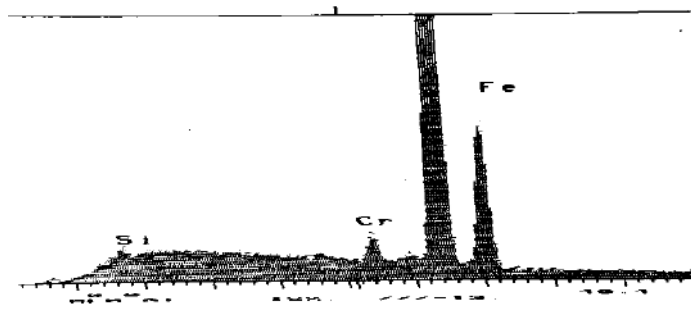


Рис. 4.17 Спектрограма вихідної поверхні зразків із сталі 40Х

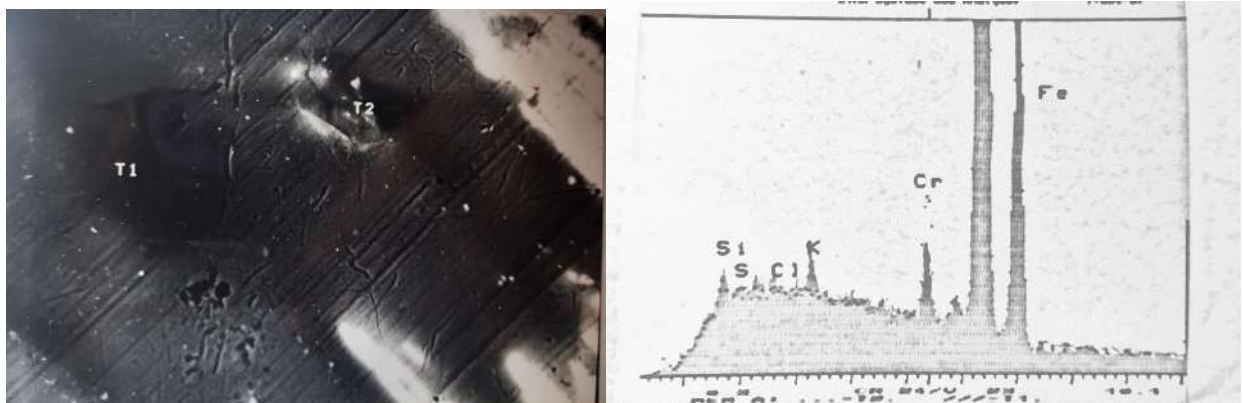


Рис. 4.18 Мікрофотографія і спектрограма хімічного складу поверхні зразка зі сталі 40Х після роботи в маслі ТАП-15

У поверхневому шарі після тертя в трансмісійній олії ТАП-15 зменшення заліза та хрому не виявлено, водночас з'явився незначний вміст сірки, хлору, калію. Наявність цих елементів пояснюється присутністю в маслі ТАП-15 хімічно активних галогенвмісних присадок. Відомо, що ці присадки (зокрема сірчана) починають інтенсивно утворювати на поверхні сульфідні плівки при температурі вище 200 °С. Описувані дослідження були проведені при помірних температурах, очевидно, цим і пояснюється настільки незначний вміст сірки та інших елементів.

Найбільш поширеними присадками в трансмісійних оліях є сульфол, ОТ-І, ОТП, ПЗ-6/9, ЛЗ-23К та ін. У зв'язку з тим, що деякі з них (наприклад, ЛЗ-23К) є продуктом взаємодії ізопропілксантогенату калію з дихлоретаном можливе утворення на поверхні складних хімічних сполук, що містять поряд з хлором і сіркою калій. Присадка ЛЗ-23К застосовується у маслі ТАП-15. Практично не змінений вміст заліза в поверхневому шарі в порівнянні з вихідним дозволяє припустити, що сірка, хлор та інші елементи знаходяться в поверхневому шарі не в чистому вигляді, а у вигляді хімічних сполук з залізом.

Крім зменшення вмісту в поверхневому шарі заліза та хрому виявлено підвищений вміст фтору. Присутність фтору по глибині від вільної поверхні визначалося з видалення матеріалу поверхневого шару при бомбардуванні іонами аргону (обдування аргоном). Сліди фтору пропадають на глибині від поверхні 0,005 мм. Отже, товщина хімічно модифікованого КФ-присадками шару становить близько 5 мкм.



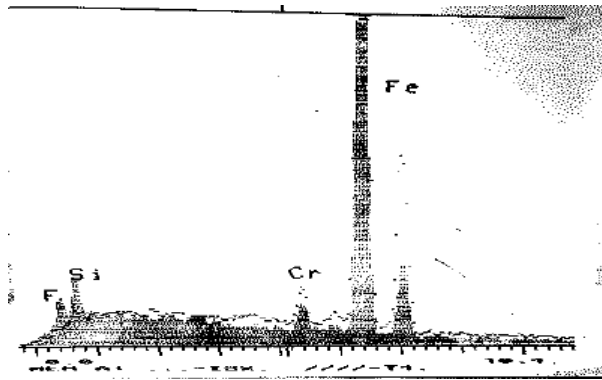


Рис. 4.19 Мікрофотографія та спектрограма хімічного складу поверхні зразка зі сталі 40Х після припрацювання в масляному середовищі з 1% КФ-присадки

Таким чином, аналізуючи наведені вище літературні дані та власні металофізичні дослідження, можна припустити, що дві фази реакції КФ - присадок у процесі тертя, мабуть, відіграють велику роль у механізмі мастила хемосорбційні плівки є модифікатором тертя, а металевий фторид знижує інтенсивність зношування.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. З описаних результатів випливає, що ефективність протизносної дії присадок не є однозначним поняттям і суттєво залежить від умов тертя та режиму змащування. Так, стосовно екстремальних умов тертя, що характеризується високими контактними тисками і швидкостями ковзання, перевага має бути віддана сполукам, в механізмі дії яких домінує хімічний фактор. При помірному ж режимі тертя доцільніше використовувати присадки, що мають високу адсорбованість і помірну реакційну здатність.

У зв'язку з тим, що відомі присадки ефективні або в першому випадку, або в другому, виникла необхідність пошуку спеціальних багатофункціональних добавок до олив, що забезпечують працездатність вузлів тертя в широкому діапазоні умов: від припрацювання або обкатки до режимів, близьких до заїдання.

2. На підставі адсорбційно-хімічної теорії запропоновано модель механізму мастильної дії КФ-містять середовищ, що складається з наступних процесів: фізичної адсорбції КФ-присадок та полярно-активних молекул олії; хемосорбції фторвуглецевих сполук на поверхні тертя УГВ олії з утворенням на поверхні

органічних плівок СОП та КФ-присадки з утворенням елементоорганічних плівок ЕОП; хімічного розкладання присадки та взаємодії продуктів розкладання з металом поверхні тертя з утворенням металофторидних сполук.

3. Методами бомбандувальної ОЖЕ-спектроскопії встановлено вміст хімічних елементів та їх розподіл за глибиною органічних плівок СОП для індустріальних масел серії ІТД різної в'язкості без присадок та з хімічно активними присадками. Показано, що до складу плівки СОП входять, в основному, сполуки елементів С, О, Н. Плівки СОП інтенсивніше формуються в умовах тертя, в середовищі з більш в'язким маслом, містять більшу кількість вуглецю і кисню. Плівки СОП, сформовані в більш в'язких оліях, за міцністю зв'язку в кілька разів перевищують плівки, утворені малов'язкими оліями, що мають більш пухку (дефектну) будову за рахунок дифузії кисню через СОП углиб металу.

4. Сучасними методами метало-фізичного аналізу поверхонь, після тертя в КФ-містять середовищах, виявлені в поверхневому шарі групи  $\text{CF}_2/\text{CF}_3$  а також металофторидні сполуки типу  $\text{MeF}_3$ . Причому перші, володіючи екрануючою дією, локалізують у собі зсувні деформації, внаслідок чого значно знижуються втрати на тертя контактуючих поверхонь, а другі підвищують протизносні та протизадирні властивості пар тертя, за рахунок утворення хімічно модифікованого фтором на глибину близько 5 мкм протизносного поверхневого шару.

5. З метою оцінки складу карбонофторидних присадок на змащувальну дію мастильних матеріалів були проведені дослідження їх складових при динамічних та температурних режимах нестационарності. Найкращою змащувальну дію показало введення в оливу ТАП-15 1% присадки, що відповідає її складу 27,8 %КФ + 5,6 NB+ 66,6 КУА. Товщина мастильного шару в період тимчасового зниження змащувальної дії (ТЗМД) зменшилася незначною мірою з 1,5 до 0,9 мкм, потім зросла до 1,2 мкм і за температури 170<sup>0</sup>С стабілізувалася. Введення в невеликих концентраціях до КФ-місткої присадки нітриду бору в 3 рази (з 0,3 до 0,9 мкм) підвищило мінімальну товщину мастильного шару, а стали товщину мастильного шару на 0,2 мкм. Нітрид бору дещо збільшив коефіцієнт тертя карбоновмісної

присадки, але він був нижчим, ніж у оливи без присадок, а також у оливи ТАП-І5 з присадкою нітриду бору, але без КФ.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Змащувальна дія при граничному режимі обумовлена утворенням на металевих поверхнях структурованих граничних шарів, в основі формування яких є явища фізичної та хімічної адсорбції, однак факт існування якісно різних форм адсорбційних структур недостатньо досліджувався при розгляді змащувальних процесів.

2. У зв'язку з тим, що суттєвим недоліком традиційних присадок ПАР (на основі, в основному, карбонових кислот) є десорбція при температурі 50...60<sup>0</sup>С, а хімічне модифікування присадками ХАР (на основі галогенміських компонентів (в основному S та Р) частіш за все відбувається при температурах > 180<sup>0</sup>С, використання присадок ПАР та ХАР малоефективно, необхідний пошук принципово нових сполучень здатних забезпечити працездатність вузлів терття в діапазоні температур 60<sup>0</sup>С...180<sup>0</sup>С.

3. Серед присадок до мастильних матеріалів добрі перспективи використання мають фторвуглеводневі сполуки (CF<sub>x</sub>)<sub>n</sub>, як наслідок їх високої адсорбційної активності та хімічної реакційності. Однак, не дивлячись на те, що антифрикційні та протизносні властивості цих сполук активно вивчаються в останні роки за теорією хімічної модифікації поверхні, досліджень змащувальної дії за адсорбційно-хімічною теорією проведено мало.

4. У зв'язку з тим, що однією з основних причин підвищених зносів на неусталених режимах терття є тимчасове погіршення змащувальної дії (ТПЗД), пов'язане зі зміною фізично-адсорбованих шарів на більш стійкі до зовнішніх впливів хемосорбційні плівки, особливо важлива розробка методики, яка дозволяє оцінити ступінь погіршення рівня змащувальної дії, а також правильним підбором режимів терття та змащувальних середовищ зменшити, а в деяких випадках і усунути його негативну дію при неусталених режимах терття.

5. Найбільш ефективним методом, який характеризує змащувальну дію мастильних матеріалів з присадками є вимірювання товщини змащувальних шарів.

Однак вимірювання товщини змащувальних шарів, непроста задача, тому що об'єкт вимірювання, змащувальна плівка, знаходиться між двома поверхнями, які рухаються з великою швидкістю, підвержені деформаціям та биттям, що в більшості випадків перевищує вимірювальну величину. Тому, метод вимірювання товщини змащувального шару, який використовується в цій дисертації, повинен мати високу чутливість, точність, стабільність, та безінерційність. Найбільш повно цим вимогам задовольняє метод вимірювання на змащувальному шарі падіння напруги в режимі нормального жевріючого розряду (метод ВПН в режимі НЖР), пропорційний його товщині.

6. Використання данного методу разом з оцінкою змащувальної дії дозволяє вирішувати більш широке коло питань: прогнозувати зносостійкість, визначати режими змащування, вимірювати гідродинамічну та граничну складову мастильного шару, давати оцінку ефективності роботи мастильних матеріалів та присадок в різних умовах терття.

7. Дослідження ефективності змащувальної дії отримані на модернізованій машині терття СМЦ-2 (обладнаної системою вимірювання товщини мастильного шару, моменту терття, плавною зміною частоти обертів, системою пуск-зупинка), дозволили розробити методики оцінки ефективності мастильних матеріалів та присадок за показниками змащувальної дії:

- на усталеному режимі в процесі припрацювання зубчастих передач;
- на неусталеному режимі роботи зубчатих передач з урахуванням динамічного (пуски-зупинки) та температурного (швидкість нагріву) режимів нестационарності;
- оцінки ефективності мастильних матеріалів з присадками за інтегрованим показником масляної дії;
- методу визначення складових змащувального шару в локальному контакті зубчастих передач.

8. В дисертації наведені відомі сучасні методи металографії, оптичної та електронної растрової мікроскопії, які використовувались для вивчення мікроструктури поверхонь терття після трибологічних випробувань Тонкоплівкову будову поверхневих шарів досліджували методами мікросондової оже-електронної

спектроскопії та ступінчастого стравлювання характерних мікроділянок поверхонь тертя йонами аргону

9. Забезпечення низького рівня тертя, зношування та контактної втоми поверхонь тертя деталей в аерокосмічній техніці ускладнюється наявністю високих навантажень, швидкостей, розрідженістю або відсутністю атмосфери, ускладненнями або неможливістю застосування мастил. Однією з технологій, що враховує зазначені особливості зношування, є утворення на поверхнях тертя захисних фторміських плівок. Об'єктами первинного застосування та апробації розроблених при участі автора, технологій були: роликові та кулькові підшипники кочення компресора, турбіни та редуктора, а також зубчасті колеса планетарного редуктора турбостартера ТС-12М.

Узагальнення результатів лабораторних і стендових випробувань деталей турбостартера ТС-12М показало, що інтенсивність зносу при реалізації технології утворення фторвмісних захисних плівок на поверхнях тертя зменшується не менше ніж на 25-30%; число циклів навантаження до настання викришування в підшипниках зростає в 1,2-1,5 рази; навантажувальна здатність мастильного шару підвищується на 35...40%; навантаження заїдання збільшується до 2 разів.

10. Збільшення процентного вмісту певної присадки може покращити одну властивість олії та водночас погіршити іншу. Коли зазначені концентрації присадок стають незбалансованими, це може вплинути на загальну якість масла.

Деякі добавки конкурують між собою за однакове місце на металевій поверхні. Якщо до оливи додати високу концентрацію протизносної присадки, інгібітор корозії може стати менш ефективним. Результатом може бути збільшення проблем, пов'язаних з корозією.

11. Проведені дослідження узгоджуються з положеннями КГДТЗ, в якій вказується, що в умовах контактно-гідродинамічного тертя виявляються не тільки в'язкісні властивості мастила та пружні – твердих тіл, але й вплив процесів адсорбції, що реалізують умови прояву ефекту, гідродинамічного стану мастильного шару. Така дія підтверджується тим, що зі збільшенням навантаження на контакт збільшується вплив присадок. Відомо, що навантаження має

першорядну роль в деструкційних процесах [8], у яких утворюються вільні радикали молекул з адсорбційної активністю. Надмірне зниження товщини мастильного шару у присутності ПАР може призвести до безпосереднього контакту виступів нерівностей. Захист від схоплювання в цьому випадку забезпечують адсорбційні та окисні плівки. Зокрема, присадка мурашиної кислоти, вочевидь, утворює недостатньо ефективні адсорбційні плівки. Разом з тим, мурашина кислота є гарним відновником і знаходить у цій якості широке застосування у техніці. Зменшення товщини плівки оксидів при невеликій товщині в'язкого та адсорбційних шарів є причиною розвитку схоплювання.

12. На основі роздільного вимірювання товщини мастильних шарів були визначені області в яких проявляються різні механізми мастильної дії олив.

В зоні низьких температур і малих швидкостей кочення превалюють поверхневі шари адсорбційного походження. Ця область характерна для роботи тихохідних зубчастих передач.

В зоні середніх температур, навантажень і великих швидкостей кочення превалююче значення мають шари гідродинамічного походження. В цій зоні працює більшість зубчастих передач.

В зоні підвищених температур мастильна дія олив відбувається за рахунок твердо подібних плівок. В цій зоні працюють важко навантажені зубчасті передачі.

13. Введення до мінеральної оливи МК-8 мурашиної кислоти як поверхнево-активної присадки призводить до зменшення інтенсивності утворення СОП, а при збільшенні концентрації навіть припинення, що прискорює процес припрацювання та покращує якість поверхонь.

Подальше нагрівання олив з поверхнево-активними речовинами до температури десорбції молекул ПАР призводить до інтенсифікації утворення СОП, що в свою чергу підвищує зносостійкість та контактну витривалість пар тертя.

14. З наведених результатів експериментів можна дійти висновку, що традиційне використання хімічно-активних присадок не завжди покращує змащувальну дію, а в деяких випадках і погіршує, блокуючи формування хемосорбційних граничних плівок (СОП). Тому для повної оцінки присадок, окрім

їх випробувань на специфічну дію, необхідно враховувати ще інші показники змащувальної дії, насамперед здатність масел розділяти поверхні тертя та їх вплив на несучу спроможність змащувального шару.

Узагальнюючи проведені дослідження, можна зробити висновок, що плівки СОП інтенсивніше формуються, в даних умовах тертя, в середовищі з більш в'язким маслом, містять більшу кількість вуглецю та кисню, мають спадаючий характер концентрації до поверхні сплаву (сталі).

Плівки СОП, сформовані в більш в'язких мастилах, по інтенсивності зв'язку в кілька разів перевищують плівки, утворені в малов'язких оливах і оливах без присадок. Для малов'язких масел спостерігається значна дифузія кисню через СОП вглиб металу, що свідчить про більш (дефектну) пухку будову СОП, що формуються в малов'язких маслах.

15. Проведено дослідження змащувальних процесів при терті пар сталь-бронза та сталь-спечений матеріал, а також визначено зв'язки між товщиною мастильного шару, моментом тертя та зносом поверхонь. У результаті проведених випробувань встановлено, що більшому зносу відповідають менші втрати на тертя, тобто втрати на деформування та руйнування поверхні металу є малими порівняно з силами тертя в змащувальному шарі, а протизносні характеристики значною мірою визначаються здатністю матеріалів до утворення в результаті взаємодії з мастилом граничних структур з різними реологічними, фізико-хімічними та хімічними властивостями. Перспективами подальших досліджень окрім аналізування тонких поверхневих прошарків металу є визначення властивостей і експлуатаційних характеристик протизносних та антифрикційних хемосорбційних плівок СОП, які утворюються вуглеводневими компонентами мастильних матеріалів.

16. Порівняння результатів дослідження показує, що існує зв'язок між товщиною мастильного шару та часом до появи викришування на поверхнях тертя зубчастих коліс (більшій товщині відповідає більша кількість циклів до викришування на всіх оливах).

У зв'язку з тим, що утворення хемосорбційних плівок, які проявляють підвищену стійкість проти викришування, не пов'язано з гідродинамічним ефектом, обґрунтовано вивчення негідродинамічної змащувальної дії СОП та її впливу на втомне зношування контактних поверхонь. Використання протизносних та противіттингових властивостей СОП є найбільш перспективним і найбільш економічним шляхом для подальшого підвищення зносостійкості та довговічності зубчастих передач, підшипників кочення та інших деталей, що не вимагає ускладнення технології виробництва та підвищення якості конструкційних матеріалів.

17. Таким чином, в широкому діапазоні температур (60...200°C) використання традиційних присадок ПАР та ХАР малоефективно, в зв'язку з чим є доцільним дослідити механізм змащувальної дії присадок принципово нового типу – карбонофторидів  $(CF_x)_n$ , які мають у своєму складі сполуки фтору та вуглецю, та здатні, поряд з високою адсорбційною активністю та хімічною реакційністю формувати на поверхні тертя хемосорбційні плівки, які мають високі протизносні та антифрикційні властивості.

18. З описаних результатів випливає, що ефективність протизносної дії присадок не є однозначним поняттям і суттєво залежить від умов тертя та режиму змащування. Так, стосовно екстремальних умов тертя, що характеризується високими контактними тисками і швидкостями ковзання, перевага має бути віддана сполукам, в механізмі дії яких домінує хімічний фактор. При помірному ж режимі тертя доцільніше використовувати присадки, що мають високу адсорбованість і помірну реакційну здатність.

У зв'язку з тим, що відомі присадки ефективні або в першому випадку, або в другому, виникла необхідність пошуку спеціальних багатофункціональних добавок до олив, що забезпечують працездатність вузлів тертя в широкому діапазоні умов: від припрацювання або обкатки до режимів, близьких до заїдання.

19. На підставі адсорбційно-хімічної теорії запропоновано модель механізму мастильної дії КФ- середовищ, що складається з наступних процесів: фізичної адсорбції КФ-присадок та полярно-активних молекул олії; хемосорбції

фторвуглецевих сполук на поверхні тертя ВГВ олії з утворенням на поверхні органічних плівок СОП та КФ-присадки з утворенням елементоорганічних плівок ЕОП; хімічного розкладання присадки та взаємодії продуктів розкладання з металом поверхні тертя з утворенням металофторидних сполук.

20. Методами бомбандувальної ОЖЕ-спектроскопії встановлено вміст хімічних елементів та їх розподіл за глибиною органічних плівок СОП для індустріальних масел серії ІТД різної в'язкості без присадок та з хімічно активними присадками. Показано, що до складу плівки СОП входять, в основному, сполуки елементів С, О, Н. Плівки СОП інтенсивніше формуються в умовах тертя, в середовищі з більш в'язким маслом, містять більшу кількість вуглецю і кисню. Плівки СОП, сформовані в більш в'язких оліях, за міцністю зв'язку в кілька разів перевищують плівки, утворені малов'язкими оліями, що мають більш пухку (дефектну) будову за рахунок дифузії кисню через СОП углиб металу.

21. Сучасними методами металофізичного аналізу поверхонь, після тертя в КФ-містять середовищах, виявлені в поверхневому шарі групи  $\text{CF}_2/\text{CF}_3$  а також металофторидні сполуки типу  $\text{MeF}_3$ . Причому перші, володіючи екрануючою дією, локалізують у собі зсувні деформації, внаслідок чого значно знижуються втрати на тертя контактуючих поверхонь, а другі підвищують протизносні та протизадирні властивості пар тертя, за рахунок утворення хімічно модифікованого фтором на глибину близько 5 мкм протизносного поверхневого шару.

22. З метою оцінки складу карбонофторидних присадок на змащувальну дію мастильних матеріалів були проведені дослідження їх складових при динамічних та температурних режимах нестационарності. Найкращою змащувальну дію показало введення в оливу ТАП-15 1% присадки, що відповідає її складу 27,8 %КФ + 5,6 NB+ 66,6 КУА. Товщина мастильного шару в період тимчасового зниження змащувальної дії (ТЗМД) зменшилася незначною мірою з 1,5 до 0,9 мкм, потім зросла до 1,2 мкм і за температури 170<sup>0</sup>С стабілізувалася. Введення в невеликих концентраціях до КФ-місткої присадки нітриду бору в 3 рази (з 0,3 до 0,9 мкм) підвищило мінімальну товщину мастильного шару, а стали товщину мастильного шару на 0,2 мкм. Нітрид бору дещо збільшив коефіцієнт тертя карбоновмісної

присадки, але він був нижчим, ніж у оливи без присадок, а також у оливи ТАП-І5 з присадкою нітриду бору, але без КФ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Suh NP, Sin HC. The genesis of friction. *Wear*. 1981;69(1):91–114.
2. Melnyk V.B., Mikosyanchik O.O., Kindrachuk M.V., Leusenko D.V. The influence of carboxylic acid additives on the hydrodynamic lubricating layer in local contact of gear transmissions. *Current issues and prospects for the development of scientific research: Scientific Collection IV International Scientific and Practical Conference (December 07-08, 2021) Orléans (France) 2021. Orléans of the Desember 2021. № 90. p.465-474*].
3. Troyer D. *Practicing Oil Analysis*. 2002;
4. Mayer A. *Practicing Oil Analysis*. 2007;
5. Minami I. *Molecular Science of Lubricant Additives*. *Appl Sci*. 2017;7(5):445.
6. Hamrock BJ, Schmid SR, Jacobson BO. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. Taylor & Francis; 2004.
7. Corporation N. *Machinery Lubrication. Lubrication Regimes Explained*.
8. Ghanbarzadeh A, Wilson M, Morina A, Dowson D, Neville A. Development of a new mechano-chemical model in boundary lubrication. *Tribol Int*. 2016; 93:573–82.
9. Gohar R, Rahnejat H. *Fundamentals of Tribology: Second Edition*. 2012.
10. Bhushan B. *Introduction to Tribology*. Wiley; 2013. (Tribology in Practice Series).
11. Spikes H. The history and mechanisms of ZDDP. *Tribol Lett*. 2004; 17(3):469–89.
12. Bares JA, Konicek AR, Mangolini F, Gosvami NN, Carpick RW, Yablon DG. Mechanisms of antiwear tribofilm growth revealed in situ by single-asperity sliding contacts. *Science (80- )*. 2015;348(6230):102–6.
13. Aldara Naveira Suárez. *The Behaviour of Antiwear Additives in Lubricated Rolling-Sliding Contacts*. 2011. 278 p.
14. Fujita H, Glovnea RP, Spikes HA. Study of zinc dialkydithiophosphate antiwear film formation and removal processes, part I: Experimental. *Tribol Trans*. 2005;48(4):558–66.
15. Mosey NJ, Müser MH, Woo TK. Molecular mechanisms for the functionality of lubricant additives. *Science (80- )*. 2005;307(5715):1612–5.
16. Shimizu Y, Spikes HA. The Influence of Slide–Roll Ratio on ZDDP Tribofilm Formation. *Tribol Lett*. 2016;64(2):1–11.
17. Zhang J, Spikes H. On the Mechanism of ZDDP Antiwear Film Formation. *Tribol Lett*. 2016;63(2):1–15.

18. Taylor L, Dratva A, Spikes HA. Friction and wear behavior of zinc dialkyldithiophosphate additive. *Tribol Trans.* 2000;43(3):469–79.
19. Tripaldi G, Vettor A, Spikes H. Friction behaviour of ZDDP films in the mixed, boundary/EHD regime. *SAE Trans.* 1996;1819–30.
20. Taylor LJ, Spikes HA. Friction-enhancing properties of zddp antiwear additive: Part i—friction and morphology of zddp reaction films. *Tribol Trans.* 2003;46(3):303–9.
21. Taylor LJ, Spikes HA. Friction-enhancing properties of zddp antiwear additive: Part ii—influence of zddp reaction films on ehd lubrication. *Tribol Trans.* 2003;46(3):310–4.
22. Smith GC. *Surface analytical science and. Structure.* 2000;187.
23. Nicholls MA, Do T, Norton PR, Bancroft GM, Kasrai M, Capehart TW, et al. Chemical and mechanical properties of ZDDP antiwear films on steel and thermal spray coatings studied by XANES spectroscopy and nanoindentation techniques. *Tribol Lett.* 2003;15(3):241–8.
24. Society TR. Relationship between mechanical properties and structures of zinc dithiophosphate anti-wear films. 2014;455(1992):4181–203.
25. Martin JM, Onodera T, Minfray C, Dassenoy F, Miyamoto A. The origin of anti-wear chemistry of ZDDP. *Faraday Discuss.* 2012;156:311–23.
26. Minfray C, Martin JM, De Barros MI, Le Mogne T, Kersting R, Hagenhoff B. Chemistry of ZDDP tribofilm by ToF-SIMS. *Tribol Lett.* 2004;17(3):351–7.
27. Grossiord C, Varlot K, Martin J, Mogne T Le, Esnouf C. MoS<sub>2</sub> single sheet lubrication by molybdenum. *Tribol Int.* 1999;31(12):737–43.
28. De Feo M, Minfray C, De Barros Bouchet MI, Thiebaut B, Martin JM. MoDTC friction modifier additive degradation: Correlation between tribological performance and chemical changes. *RSC Adv.* 2015;5(114):93786–96.
29. Onodera T, Miura R, Suzuki A, Tsuboi H, Hatakeyama N, Endou A, et al. Development of a quantum chemical molecular dynamics tribochemical simulator and its application to tribochemical reaction dynamics of lubricant additives. *Model Simul Mater Sci Eng.* 2010;18(3).
30. Khaemba DN. Raman spectroscopic studies of friction modifier Molybdenum DialkyldiThioCarbamate (MoDTC). 2016;

31. Graham J, Spikes H, Korcek S. The friction reducing properties of molybdenum dialkyldithiocarbamate additives: part i — factors influencing friction reduction. *Tribol Trans.* 2001;44(4):626–36.
32. Komaba M, Kondo S, Suzuki A, Kurihara K, Mori S. Effect of Temperature on Tribological Performance of Modtc. 2017;2017.
33. Khaemba DN, Neville A, Morina A. A methodology for Raman characterisation of MoDTC tribofilms and its application in investigating the influence of surface chemistry on friction performance of MoDTC lubricants. *Tribol Lett.* 2015;59(3):1–17.
34. Yamamoto Y, Gondo S. Friction and wear characteristics of Molybdenum Dithiocarbamate and Molybdenum Dithiophosphate. *Tribol Trans.* 1989;32(2):251–7.
35. Trindade ED, Zuleta Durango A, Sinatora A. Friction and wear performance of MoDTC-containing and ester-containing lubricants over steel surfaces under reciprocating conditions. *Lubr Sci.* 2015;27(4):217–29.
36. Morina A, Neville A, Priest M, Green JH. ZDDP and MoDTC interactions and their effect on tribological performance - Tribofilm characteristics and its evolution. *Tribol Lett.* 2006;24(3):243–56.
37. Morina A, Neville A, Priest M, Green JH. ZDDP and MoDTC interactions in boundary lubrication-The effect of temperature and ZDDP/MoDTC ratio. *Tribol Int.* 2006;39(12):1545–57.
38. Unnikrishnan R, Jain MC, Harinarayan AK, Mehta AK. Additive-additive interaction: An XPS study of the effect of ZDDP on the AW/EP characteristic of molybdenum based additives. *Wear.* 2002;252(3–4):240–9.
39. Bec S, Tonck A, Georges JM, Roper GW. Synergistic effects of MoDTC and ZDTP on frictional behaviour of tribofilms at the nanometer scale. *Tribol Lett.* 2004;17(4):797–809.
40. Xu D, Wang C, Espejo C, Wang J, Neville A, Morina A. Understanding the Friction Reduction Mechanism Based on Molybdenum Disulfide Tribofilm Formation and Removal. *Langmuir.* 2018;34(45):13523–33.
41. Feng X, Jianqiang H, Fazheng Z, Feng J, Junbing Y. Anti-wear performance of organomolybdenum compounds as lubricant additives. *Lubr Sci.* 2007;

19(2):81–5.

42.. Hardy W.I. Collected Scientific Papers, Cambridge, 1936.

43. Akhmatov A.S. Fizik molekilè friksyon fwonty, 1963, 472c.

44. Burrington JD, Corporation TL. Practical Advances in Petroleum Processing. 2006;(September).

45. Wan Y, Suominen Fuller ML, Kasrai M, Bancroft GM, Fyfe K, Torkelson JR, et al. Effects of detergent on the chemistry of tribofilms from ZDDP: studied by X-ray absorption spectroscopy and XPS. 2008;155–66.

46. Zhang Z, Yamaguchi ES, Kasrai M, Bancroft GM. Interaction of ZDDP with borated dispersant using XANES and XPS. Tribol Trans. 2004;47(4):527–36.

47. Greenall A, Neville A, Morina A, Sutton M. Investigation of the interactions between an overbased, organic anti-wear additive, ZDDP and overbased calcium sulphonate. Tribol Int. 2012;46(1):52–61.

48.. Komvopoulos K, Pennecot G, Yamaguchi ES, Yeh SW. Antiwear properties of blends containing mixtures of zinc dialkyl dithiophosphate and different detergents. Tribol Trans. 2009;52(1):73–85.

49. Wan Y, Kasrai M, Bancroft GM. X-ray absorption study of tribofilms from ZDDP and overbased salicylate detergents. Chinese Chem Lett. 2009; 20(1):119–22.

50.. Пінегін С.В. Наукові проблеми міцності та зносостійкості в машинобудуванні. – Вісник машинобудування, 1970 №3, с. 16-21

51. Wilson S.S. Measurement of elastic-hydrodynamic oil film thickness and wear in a ball bearing using a strain gauge. – Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. Problems of Friction and Lubrication, 1971, No. 2. P. 7-9.

52. Taku V. The Lubrication of bevel gears. Bull. ASME. 1964, vol.7, № 25, p.13-138.

53. Павлов В.М. Дослідження мастильної дії мастил у зубчастих передачах (з розробкою методів вимірювання товщини шару). - Дис. на здоб. наук. ст. к.т.н. - Київ: КІЩА, 1974. 153с.

54. Райко М.В., Павлов В.М., Вимірювання товщини мастильного шару між обертовими роликками за допомогою рентгенівських променів. – Прикладна механіка, вип.4. – Київ, КПЦА, 1971. с. 44-49.
55. Бакашвили Д.Л. Исследование качения шарика в шарикоподшипнике. -В.сб.: Контактно-гидродинамическая теория смазки и её практическое применение в технике, вып. 2. – Куйбышев, 1973. с.75-84 Бакашвілі Д.Л. Дослідження кочення кульки в шарикопідшипнику. -В.сб.: Контактно-гидродинамічна теорія змащування та її практичне застосування в техніці, вип. 2., 1973. с.75-84
56. Wedewen V., Cameron A. Fluid Film Interferometry in Labricati Studies, Nature, v. 214, N5085, May, 1967, p.39-47.
57. Коган Я.І., Богданов О.І., Янтовський Є.І. Вимірювання товщини масляної плівки в підшипниках та підп'ятниках ковзання. - Електрика, 1955 №9.С.38-43.
- 58.. Коднір Д.С. Контактна гідродинаміка змащування машин. - 1976, 303с.
59. Chistensen H. The Measurement of oil Film Thickness inRolling.-Engineering Digest, February, 1964, vol. 25, N2, p.18-26.
60. Mc Conochie J. O., Cameron A. ASME-Paper, N58,1962,p.140-142.
61. 127. Tallian T.C. Conference on Lubrication & Wear, 1967, p.16-25.
- 62 . Остраков А.А., Бершадський Л.І. Електрофізичні процеси при терті та мастильній дії. Республ. міжвід. науково-технічні. сб.: Проблеми тертя та зношування, 1978, вип.13, с.12-17.
63. Райко М.В. Дослідження мастильної дії нафтових масел за умов роботи зубчастих передач. Дис. на здоб.. наук. ст. д.т.н. - Київ: КПЦА, 1974, 369с.
64. Кадомський В.П. Дослідження мастильних шарів та твердопластичних плівок, що утворюються в контакті деталей при коченні зі ковзанням. - Дис. на зд. наук. ст. к.т.н. - Київ: КПЦА, 1971, 140 с.
65. Бавін І.І. Вплив карбонових кислот на мастильну дію мінеральних масел в умовах утворення органічних плівок, що самогенеруються. -Дис. на зд. наук. ст. к.т.н.– Київ: КПЦА, 1983, 238 с.

66. Мнацаканов Р.Г., Вплив неусталених умов роботи на мастильну здатність олив і мастил при коченні та кочення зі ковзанням. -Дис. на зд. наук. ст. к.т.н.– Київ: КПЦА,1986, 256 с.
67. Тривайло М.С. Дослідження процесу мастила в зубчастих передачах із зачепленням Новікова. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата техн. наук. Київ : КП, 1966, 175с.
- 68.. Білоус В.С. Дослідження мастильної дії олив при коченні зі ковзанням та розробка способів підвищення зносостійкості контактуючих поверхонь. - Дис. на здоб. наук. ст. к.т.н. - Київ: КПЦА, 1978, 145 с.
69. Дмитриченко Н.Ф. Дослідження впливу газових середовищ на мастильну здатність мінеральних масел, їх протизносної та демпфуючої дії у зачепленні зубів зубчастих передач. - Дис. на соіск. уч. ст. к.т.н. - Київ: КПЦА, 1979, 173 с.
70. Головач П.А. Реологічні властивості та фазові стани мастильних матеріалів у контакті кочення. . -Дис. на здоб. наук. ст. к.т.н. - Київ: КПГА,1984.
71. Райко М.В., Тривайло М.С., Мельник В.Б., Мічник Б.Х. Реалізація гідродинамічного та граничного мастильних процесів у зачепленні зубів. - Тези доповідей 5-ї ВНТК «Контактна гідродинаміка» 1991.
72. Ragnar Holm, Else Holm. Electric Contacts: Theory and Application Springer-Verlag, 1967,р. 482
73. Стадник В.А. Мастильна дія органічних плівок, утворених індивідуальними вуглеводнями в умовах тертя кочення зі ковзанням. - Дисертація на здобуття наук .ст.к.т.н.- Київ: КПЦА, 1984. 242с
74. 136. А.с. СРСР №1718031. Спосіб оцінки змащувальних властивостей олій. / В.Б.Мельник, М.В.Райко, В.В.Тиркаєв. - Заявл.05.02.90; Опубл. 07.03.92, БІ №9.- 3с.
- 75.10.Мельник В.Б., Леусенко Д.В. Метод оцінки складових змащувального шару в локальному контакті зубчатих передач. *Проблеми тертя на зношування*, зб. наук. праць. К.:НАУ, 2012. № 58. С.165 -168.],
76. Костецький Б.І. Якість поверхні тертя в машинах / Костецький Б.І., Колесниченко Н.А. - К.: Техніка, 1969. - 215с.

77. F P Bowden, D Tabor. The Friction and Lubrication of Solids Get access Arrow  
Published in print: February 2001, Published online: October 2023, 347p.
78. Канарчук Є. А., Канарчук В. Є. Вплив режимів роботи на зношування двигунів внутрішнього згоряння. К.: Наук. думка, 1970. - 312 с.
79. Калиновський М., Недель Р. Пусковий знос двигунів // Автомоб. промисловість США. - Т.128, №4. - 1963. - С. 2 – 4.
80. Райко М. В., Мнацаканов Р. Г., Дмитриченко Н. Ф., Мельник В. Б. Мастильна дія і зношування в умовах пусків, що часто повторюються // Механізація та електрифікація сільського господарства». - К., Урожай, 1985. - Вип. 61. - С. 78 - 82.
81. Райко М.В, Мнацаканов Р. Г., Мельник В. Б. Підвищення працездатності вузлів тертя з локальним контактом при режимах роботи, що не встановилися, шляхом оптимізації процесів мастильної дії. // Наук.-техн. конф. "Забезпечення надійності вузлів тертя машин": Тези доп. (Ворошиловград, 1988), - 71 с.
82. By N. K. Adam. The Physics and Chemistry of Surfaces. 1947. 552 с.
83. Morrison S. Chemical Physics of Solid Surfaces, 1980. 488 с.
84. А. с. СРСР №1536263. Спосіб оцінки змащувальних властивостей мастильних матеріалів для пари тертя / Р. Г. Мнацаканов, М. В. Райко, В. Б. Мельник та ін. – Заявл. 29.02.88; Опубл. 15.01.90, БІ №2. - 4 с.
85. Райко М. В., Мнацаканов Р. Г., Дмитриченко Н. Ф. Установка для дослідження процесів тертя, зношування та змащення при запуску та зупинці // Удосконалення ремонту авіаційної техніки. - К.: КІЩА, 1983. - С. 37 - 39.
86. Atkinson I. B., Waghoxne R. M. The Tribochemistry of Graphite Fluoride Studied Using XPS, Wear, 37, –1978. – P. 123 – 128.
87. Raja PM V, Barron AR. ICP-AES Analysis of Nanoparticles. Rice University; 2021.
88. Patty DJ, Lokollo RR. FTIR Spectrum Interpretation of Lubricants with Treatment of Variation Mileage. Adv Phys Theor Apl. 2016;52:2225– 638.
89. Abdul-Munaim AM, Holland T, Sivakumar P, Watson DG. Absorption wavebands for discriminating oxidation time of engine oil as detected by FT-IR spectroscopy. Lubricants. 2019;7(3):22–5.

90. Thornley B, Beadling R, Bryant M, Neville A. Investigation into the Repassivation Process of CoCrMo in a Simulated Biological Environment. CORROSION. 2020;
91. Komaba M, Kondo S, Suzuki A, Kurihara K, Mori S. The effect of temperature on lubrication property with MoDTC-containing lubricant —temperature dependence of friction coefficient and tribofilm structure—. Tribol Online. 2018;13(5):275–81.
92. Soltanahmadi S, Morina A, Van Eijk MCP, Nedelcu I, Neville A. Investigation of the effect of a diamine-based friction modifier on micropitting and the properties of tribofilms in rolling-sliding contacts. J Phys D Appl Phys. 2016;49(50).
93. Zhang S-L. Raman spectroscopy and its application in nanostructures. John Wiley & Sons; 2012.
94. Khaemba DN, Neville A, Morina A. A methodology for Raman characterisation of MoDTC tribofilms and its application in investigating the influence of surface chemistry on friction performance of MoDTC lubricants. Tribol Lett. 2015;59(3):1–17.
95. Xu D, Wang C, Espejo C, Wang J, Neville A, Morina A. Understanding the Friction Reduction Mechanism Based on Molybdenum Disulfide Tribofilm Formation and Removal. Langmuir. 2018;34(45):13523–33.
96. Мельник В.Б. Оцінка ефективності масляної дії олів з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя /Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Мамай Б.М. // Проблеми тертя та зношування . 2023.Вип. № 4(101). С. 29-39.
97. Леусенко Д.В. Вплив фторвуглецевих сполук на антифрикційні та протизносні властивості трибосполучень. // Проблеми тертя та зношування . 2023.Вип. № 1(102). С.84-88.
98. Кіндрачук М.В., Леусенко Д.В., Мельник В.Б., Василик М.В., Харченко В.В. Технології поверхневого зміцнення зубчастих зачеплень та підшипників в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту. *Проблеми тертя та зношування*, 2024. №3 (104), с. 23-34.
99. Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Титаренко В.В. Підвищення зносостійкості вузлів тертя аерокосмічної техніки утворенням на поверхнях тертя фторвмісних нано - мікро - розмірних антифрикційних протизносних структур. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024) : матеріали

тез доповідей XIV МНПК (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.]– Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – Т. 1. – 108-110 с.

100. Кіндрачук М.В., Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Герасимов В.О. Вибір редукторних олив за фізико-хімічними характеристиками Проблеми тертя та зношування, 2023. №3 (100), с.30-39.

101. Matveevsky R.M. Temperature resistance of boundary lubricating layers and solid lubricating coatings during friction of metals and alloys. Izdatelstvo «Science», 1971, 228p.

102. Мельник В.Б. Вплив карбонофторидних присадок на показники якості змащувальної дії мастильних матеріалів в процесі припрацювання зубчатих передач. / В.Б.Мельник, Ю.С. Леусенко // Проблеми тертя та зношування Наук.-техн. зб. – К. НАУ, 2013, - вип. 1(60). – с. 74-77.

103. Мельник В.Б. Оцінка шорсткості поверхні в зоні контакту деталей машин. / В.Б. Мельник, В.В. Нечипорук // Проблеми тертя та зношування: Наук.- техн. зб. – К.: НАУ, 2015 – вип. 3(68) - С.74-77.

104.. Морісон С. Хімічна фізика поверхні твердого тіла: М.: Світ, 1980. 488 с.

105. Райко М.В., Бавін І.І., Троїцький В.А., Стадник В.А., Деякі особливості мастильної дії у важких умовах тертя стали по бронзі та стали за спеченим матеріалом. Республ. міжвід. науково-технічні. СБ: Деталі машин, 1983, вип.36, с.98-102.

106. Doi Heba. Antifriction properties of bearing alloys under boundary lubrication conditions. Problems of friction and lubrication, 1979, No.4, pp. 92-99

107. Корабльов А.І., Решетов Д.І, Підвищення несучої здатності та довговічності зубчастих передач.- 1968, -288с.

108. Слупський В.І., Стадник В.А. Про вплив фізичних властивостей на механізм втомного викришування зубів редукторів. – Проблеми тертя та зношування., 1974, - №6.-с.148-152

109. M. V. Kindrachuk, V. V. Kharchenko, V. Ye. Marchuk, I. A. Humeniuk,

D. V. Leusenko Methodology for selection of compatible metal materials for friction pairs under fretting-corrosion wear. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2024, vol. 46, No. 7, pp. 637–648.

110. Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Мамай Б.М. Оцінка вмісту хімічних елементів у поверхневому шарі органічних плівок (СОП) пар терття з локальним контактом методом бомбардувальної спектроскопії. AVIA-2024 : The International Scientific Conference. (Kyiv, 26-28, September 2024), Kyiv, с.1.3.55.-1.3.59.

111. Мирослав Кіндрачук, Дар'я Леусенко Визначення зносостійкості та втомної міцності деталей машин деякими стандартними методами оцінювання показників якості мастильних матеріалів. 16-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 18 – 19 травня 2023 р.) : Матеріали симпозіуму. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2023.- 60-61с.

112. Мельник В.Б., Кіндрачук М.В., Нечипорук В.В. Управління якістю та експлуатаційними властивостями граничних змащувальних шарів у локальному контакті зубчастих передач. // Мат. 17-го міжнародного научно-технічного семінара «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте», 20-24 февраля 2017 г. – Свалява, 2017, - с. 188 -190.

113. Мельник В.Б., Радько О.В., Скуратовський А.К., Каширська І.А., Ткаченко Т.С. Вплив мастильних матеріалів на втомне зношення і якість поверхонь терття зубчастих передач. // Проблеми тертя та зношування . 2018.Вип. № 4(81). С. 45-49.

114. Stosk A.J. Grafite Molybdenum Disulfade & PTFE-A Comparison. *Lubr. Eng.* 19 333-338 (1963).

115. Fusaro D. Sliney H. Grapfhide Fluoride  $(CF_x)_n$  -A New Solid Lubricant. *ASLE Trans.*, 13, pp. 56-65, 1970.

116. Oshikawa T. Application of Polycarbon Monofluoride Fluoride, Symposium, 1969, (See ref. 9).

117. Taku V.The Lubrication of bevel gears. *ASME*,1964,v.7, №25, p.130-138.

118.. Rudorff W. Rudorff G. The Catalytik Influnse of Hydrofluori Asid on the Fortation of Carbon Monoftoride *Chem. Ber.* 80. pp.413-417. 1947.

119. Ruuf O. Bretschneider O. Ebert F. The Reactions Products of Various Forms of Carbon with Fluoride. 2. Carbon Monofluoride Z. Anorg. Allgem. Chem. 217 pp.1-19 1934.
120. Підвищення довговічності вузлів тертя шляхом застосування карбонофторидів /Н.Д.Кузнєцов, Д.Г.Громаковський, Л.І.Куксьонова та ін// Вісник. машинобудування, 1987. - №8. - с.13-16.
121. Мельник В.Б. Мастильна дія олив з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя/Мельник В.Б., Мнацаканов Р.Г., Федіна В.П. // Проблеми тертя та зношування: зб. наук. праць.: НАУ, 2007. № 47. С. 250-267
122. Мельник В.Б. Адсорбційно-хімічна модель механізму змащувальної дії карбонофторидних присадок/Мельник В.Б., Нечипорук В.В.// Проблеми тертя та зношування: зб. наук. праць.К: НАУ, 2014. № 62. С. 104-108.
123. Мельник В.Б. Вплив карбонофторидних присадок на показники якості змащувальної дії мастильних матеріалів в процесі припрацювання зубчатих передач. /Мельник В.Б., Леусенко Ю.С.// Проблеми тертя та зношування, 2013,Вип. 1(60). С.74-78.
124. Мельник В.Б. Оцінка ефективності масляної дії олив з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя /Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Мамай Б.М. // Проблеми тертя та зношування . 2023.Вип. № 4(101). С. 29-39.
125. Devine M.J. Lamson E.R. Boven J.H. Inografik Solid Film Labricants, Journal of Chem. & Eng., Data 6, pp. 79-82 (1961)
126. Мельник В.Б., Громаковський Д.Г., Білякович О.М. Механізм мастильної дії карбонофторидних присадок // Міжнар. НТК «Вдосконалення конструктивних та експлуатаційних параметрів автомобілів і машин» (Київ, 1995): Тези доп. -К., 1995. -95с.
127. Cadman P. Gossedge G.M. The Chemical Nature of Vetal PTFE Tribological Interactions as Studied by XPS. -Wear, 54, pp.211-215, 1979.
128. Fusaro R.L. Labrication and wear mechanisms a hemisphere aliding on a polimide graphite-bonded graphite - fluoride film.NASA, Tech. Publ. 1524,1979

129. Леусенко Д.В. Вплив фторвуглецевих сполук на антифрикційні та протизносні властивості трибосполучень. // Проблеми тертя та зношування . 2023.Вип. № 1(102). С.84-88.
130. Soltanahmadi S, Morina A, Van Eijk MCP, Nedelcu I, Neville A. Investigation of the effect of a diamine-based friction modifier on micropitting and the properties of tribofilms in rolling-sliding contacts. J Phys D Appl Phys. 2016;49(50).
131. Кіндрачук М.В., Леусенко Д.В., Мельник В.Б., Василик М.В., Харченко В.В. Технології поверхневого зміцнення зубчастих зачеплень та підшипників в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту. *Проблеми тертя та зношування*, 2024. №3 (104), с. 23-34.
132. Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Титаренко В.В. Підвищення зносостійкості вузлів тертя аерокосмічної техніки утворенням на поверхнях тертя фторвмісних нано - мікро - розмірних антифрикційних протизносних структур. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024) : матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.]– Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – Т. 1. – 108-110 с.
133. Мельник В.Б. Мазильна дія олив з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя / В.Б.Мельник , Р.Г.Мнацаканов, В.П.Федіна // Проблеми тертя та зношування: Науково-техн. зб. – К.: НАУ, 2007 – Вип. 47. – С.250-267.
134. Мельник В.Б., Леусенко Д.В., Мамай Б.М. Оцінка ефективності масляної дії олив з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя *Проблеми тертя та зношування*, 2023. №4 (101), 29-41.
135. Basset D., Herman M., Martin J. Oil-soluble fluorinated compounds as antiwear and antifricition additives. ASLE, Transactions v.27,№4, 1984.
136. Cadman P., Gossedge G.M. The Chemical Nature of Vetal PTFE Tribological Interactions as Studied by XPS.- Wear, 54 pp.211-215, 1979.
137. Kuriakose A.K., Margrave I.L. Kinetics of the reactions Elemental Fluorine. 4 Fluorination of Graphite. – J. Phys. Chem. 69, pp.2772-2775, 1965.

138. Pocock G., Gossedge G.M. The Application of DSC Elektron & Electron Microcopy to PTFE Reactions of Interest in Dry Bearing Technology. – *Wear*, 37, p/129, 1976.

## ДОДАТОК А

Програма оцінки інтегрованого показника ефективності масляної дії (Q) оливи з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах роботи зубчастих передач.

```
public class MatrixCalculationGUI {
public static void main(String[] args) {

    double[][] matrixA1 = {
        {55, 90, 0.7, 0.95, 0.3, 0.38, 0.22, 22, 2.5},
        {45, 90, 0.65, 0.85, 0.12, 0.38, 0.22, 20, 2.8},
        {30, 35, 0.8, 0.9, 0.15, 0.33, 0.17, 12, 0.75},
        {30, 50, 0.85, 0.95, 0.47, 0.31, 0.18, 14, 0.47},
        {40, 100, 0.9, 1, 0.25, 0.37, 0.23, 15, 0.65}
    };

    double[][] matrixA1_1 = {
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
    };

    double[][] matrixA2 = {
        {20, 70, 1.2, 1.25, 0.41, 0.41, 0.26, 16, 0.69},
        {30, 40, 0.8, 0.9, 0.45, 0.34, 0.15, 12, 0.8},
        {50, 60, 0.7, 0.9, 0.56, 0.38, 0.21, 11, 0.75},
        {20, 30, 0.85, 0.9, 0.65, 0.34, 0.19, 16, 1.74},
        {30, 85, 0.8, 0.85, 0.45, 0.34, 0.19, 13, 1.1}
    };

    double[][] matrixA2_2 = {
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
    };

    double[][] matrixA3 = {
        {5, 20, 1.05, 1.4, 0.71, 0.36, 0.23, 21, 1.28},
        {50, 60, 0.85, 1.1, 0.64, 0.34, 0.21, 22, 1.2},
        {20, 30, 0.9, 1.15, 0.64, 0.33, 0.2, 20, 0.75},
        {10, 30, 0.9, 1.2, 0.62, 0.32, 0.2, 21, 1},
        {10, 30, 0.75, 1.2, 0.51, 0.32, 0.2, 18, 0.9}
    };

    double[][] matrixA3_3 = {
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
        {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
    };

    double[][] matrixA4 = {
        {90, 90, 0.4, 1, 0.25, 0.32, 0.19, 21, 1.44},
        {20, 85, 0.9, 1, 0.07, 0.32, 0.19, 16, 0.34},
        {50, 85, 0.9, 0.95, 0.25, 0.34, 0.2, 15, 1},
        {45, 55, 0.25, 0.55, 0.08, 0.36, 0.2, 17, 0.4},
        {20, 20, 0.25, 0.6, 0.08, 0.33, 0.2, 15, 1.31}
    }
}
```

```

};

double[][] matrixA4_4 = {
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
};

double[][] matrixA5 = {
    {10, 110, 0.8, 1, 0.1, 0.32, 0.2, 17, 0.65},
    {15, 80, 0.55, 0.65, 0.05, 0.32, 0.2, 23, 0.7},
    {0, 5, 0.65, 0.65, 0.45, 0.32, 0.2, 21, 0.85},
    {15, 30, 0.65, 0.75, 0.05, 0.33, 0.17, 21, 0.6},
    {0, 10, 0.65, 0.6, 0.05, 0.31, 0.2, 22, 0.75}
};

double[][] matrixA5_5 = {
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
};

double[][] matrixA6 = {
    {25, 50, 0.45, 0.55, 0.05, 0.33, 0.17, 23, 0.4},
    {20, 50, 0.65, 0.95, 0.28, 0.34, 0.15, 18, 0.42},
    {20, 40, 1, 1.05, 0.15, 0.31, 0.17, 21, 0.43},
    {20, 85, 0.9, 1.1, 0.125, 0.35, 0.19, 22, 0.56},
    {20, 40, 0.85, 1.05, 0.08, 0.341, 0.18, 22, 0.44}
};

double[][] matrixA6_6 = {
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1},
    {1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1}
};

String[] matrixNames = {
    "KΦ - 0%",
    "KΦ - 0.1%",
    "KΦ - 0.25%",
    "KΦ - 0.5%",
    "KΦ - 1%"
};

double[][][] matricesP = {matrixA1, matrixA2, matrixA3, matrixA4, matrixA5,
matrixA6};
double[][][] matricesV = {matrixA1_1, matrixA2_2, matrixA3_3, matrixA4_4,
matrixA5_5, matrixA6_6};
int[] totalSums = new int[matricesP.length];

for (int k = 0; k < matricesP.length; k++) {
    double[][] currentMatrixP = matricesP[k];
    double[][] currentMatrixV = matricesV[k];

    int numRowsP = currentMatrixP.length;
    int numRowsV = currentMatrixV.length;
    int[] rowSums = new int[numRowsP];

    if (numRowsP != numRowsV) {
        System.out.println("Матриці мають різну кількість рядків, множення

```

```

неможливе.");
    return; }

    int totalSum = 0;

    for (int i = 0; i < numRowsP; i++) {
        int rowSum = 0;
        for (int j = 0; j < currentMatrixP[i].length; j++) {
            rowSum += currentMatrixP[i][j] * currentMatrixV[i][j]; }
        System.out.println(matrixNames[i] + ": " + rowSum);
        rowSums[i] = rowSum;
        totalSum += rowSum; }

    totalSums[k] = totalSum;
    System.out.println("Кількісне значення " + (k + 1) + ": " + totalSum);
    System.out.println(); }

    int maxSum1 = totalSums[0];
    int minSum1 = totalSums[0];
    int maxSumIndex = 0;
    int minSumIndex = 0;

    for (int i = 1; i < totalSums.length; i++) {
        int sum = totalSums[i];
        if (sum > maxSum1) {
            maxSum1 = sum;
            maxSumIndex = i; }
        if (sum < minSum1) {
            minSum1 = sum;
            minSumIndex = i; } }

    System.out.println("Найбільший кількісний показник якості мастила: " + maxSum1
+ " (Належить мастилу " + (maxSumIndex + 1) + ")");
    System.out.println("Найменший кількісний показник якості мастила: " + minSum1
+ " (Належить мастилу " + (minSumIndex + 1) + ")"); }
}

```

В цій програмі описано:

1. MatrixA1, MatrixA2, MatrixA3, MatrixA4, MatrixA5, MatrixA6 – основні оціночні показники мастильної дії згідно Таблиці 1, де:
  - матриця MatrixA1 заповнена даними оливи ВНИИ НП 50-1-4у
  - матриця MatrixA2 заповнена даними оливи ПІМ-10
  - матриця MatrixA3 заповнена даними оливи МС-8п
  - матриця MatrixA4 заповнена даними оливи І-20А
  - матриця MatrixA5 заповнена даними оливи ІГП-18
  - матриця MatrixA6 заповнена даними оливи М-10Г<sub>2</sub> К
2. MatrixA1\_1, MatrixA2\_2, MatrixA3\_3, MatrixA4\_4, MatrixA5\_5, MatrixA6\_6 – ваговий коефіцієнт, який в нашому випадку заданий як одиниця і однаковий для всіх показників.
3. За Формулою 1, проведено розрахунки кількісних показників кожного коефіцієнту концентрації присадки (0%, 0.1%, 0.25%, 0.5%, 1%). Де значення  $P_{ik}$  взяті з матриць: MatrixA1, MatrixA2, MatrixA3, MatrixA4, MatrixA5, MatrixA6, а значення  $v_{ik}$  з матриць: MatrixA1\_1, MatrixA2\_2, MatrixA3\_3, MatrixA4\_4, MatrixA5\_5, MatrixA6\_6 відповідно.

4. Після опрацювання результатів дослідження за цією програмою ми отримуємо інтегрований показник ефективності масляної дії Q (Таблиця 1).

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Директор СООП «Романенко Ігор Віталійович»  
 Романенко І.В.  
 (підпис) (ініціали) (прізвище)  
 (дата)



АКТ  
 ПРО РЕАЛІЗАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
 ЛЕУСЕНКО Дар'ї Володимирівни

Встановлено, що результати наукових досліджень, які отримані особисто Леусенко Д.В. реалізовані в методиці оцінки ефективності масляної дії олів з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя. За розробленими критеріями оцінено ефективність мастильної дії шести марок олів з КФ-присадками при нестационарних режимах тертя. Ефективність застосування КФ-присадок залежить від властивостей базової олії та їх концентрації. Для випробуваних олів різного складу та призначення оптимальна масова частка присадки становила 0,25 - 0,5 %. У зв'язку з тим, що компоненти олів можуть конкурувати з КФ-присадками та перешкоджати утворенню ними твердоподібних плівок, доцільно застосовувати КФ-присадки в умовах слабого утворення СОП (самогенеруючих органічних плівок). Введення присадки КФ у мастильні середовища значно зменшує, а в окремих випадках повністю усуває тимчасове погіршення ефективності мастильної дії при нестационарних режимах за рахунок високих адсорбційних властивостей та хімічної активності карбонофторидів. Розроблена програма оцінки ефективності масляної дії олів з карбонофторидними присадками при нестационарних режимах тертя за інтегрованим показником ефективності масляної дії Q є дієвим інструментом для визначення областей для поліпшень та для відстеження ефективності масляної дії олів з присадками при нестационарних режимах тертя. Даний акт не передбачає фінансових зобов'язань.

Голова комісії \_\_\_\_\_ Романенко І.В.  
 Члени комісії \_\_\_\_\_ Щерба Л.Б.



**АКТ 03/325**  
**про реалізацію результатів наукових досліджень**  
**ЛЕУСЕНКО Дар'ї Володимирівни**

Результати наукових досліджень, які отримані особисто Леусенко Д.В. реалізовані в ресурсопідвищуючій технології поверхневого зміцнення в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту, яка реалізується шляхом дифузійного впровадження мікро-нано-часток, або активних органічних молекул у поверхневий шар металу по виходах дефектів кристалічної решітки.

Технологія містить два етапи:

- на першому етапі проводять підготовку поверхонь до молекулярного армування – їх миття та слабке травлення;

- на другому етапі відбувається процес молекулярного армування. Деталі, контактні поверхні яких зміцнюються, занурюють у термоактивовану (порядку 30-50 °С) органічну – рідину, наприклад, масло індустріальне 20, що містить частинки фторованого графіту  $(CF_x)_n$  у концентрації порядку 1,5...2,0%, а потім у рідині задавали вібрацію ( $f \approx 10...50$  Гц,  $A \approx 1...5$  мм). Вібрація викликає руйнування органічних молекул мастила. У місцях розриву молекул мастила утворюються активні реакційні зв'язки. Ці зв'язки та активні частинки  $(CF_x)_n$  взаємодіють з активними центрами на поверхнях деталей та армують їх поверхні.

В результаті армування на зміцнювальній поверхні утворюється модифікований шар, «прошитий» міцними ланцюжками хімічно зв'язаних частинок, що виконують у металевих ґратах роль арматури.

Зміцнення проводять на вібростенді в камері, заповненої – технологічною рідиною (наприклад, сумішшю масел МС20 і МС8П в рівних співвідношеннях) з присадкою 2 ... 3% фторованого графіту  $(CF_x)_n$  при задаванні резонансних коливань робочої рідини, в яку занурюють зміцнювані деталі. Наприклад, при армуванні підшипників ( $\phi = 50...150$  мм) у робочій камері задавали резонансні коливання рідини при амплітуді в межах 5...7 мм. Час обробки – близько 5 хвилин. Контроль зміцнення проводили методами мікротвердості та склерометрування.

Проведено дослідження та апробація технології поверхневого зміцнення контактних поверхонь в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту зубів конічних шестерен і підшипників кочення.

Для реалізації цієї технології розроблені: робоча камера; рецептура робочої рідини (суміш двох олій із введенням присадки  $(CF_x)_n$ ) і визначено параметри реалізації рекомендованої технології (температура, часу витримки, частоти резонансного збудження



робочої рідини) та ін. Для зміцнення зубів конічних шестерень приводу стартера при молекулярному армуванні також розроблено і апробовано технологію реалізації поверхневого зміцнення контактних поверхонь в масляному середовищі з присадкою фторованого графіту, що підвищувала міцність поверхонь зубів до 20%. З цією метою запропоновано два варіанти зміцнення зубів шестерень сталевими кульками: 1 - при збудженні коливань кульок на вібростенді та при встановленні камери на токарному верстаті, коли зміцнюючу дію кульок обумовлено обертанням камери.

Обидва способи показали ідентичні результати - зміцнення оптимальні при підвищенні твердості близько 20%.

Прикладами успішного застосування даної технології є її використання для зміцнення зубчастих коліс конічних шестерень. Подібні технології можуть створюватися для широкого кола деталей

Даний акт не передбачає фінансових зобов'язань.

Директор департаменту якості  
ТОВ «НД Продакшн»



(підпис)



(ініціали, прізвище)

