

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Ільїна Ольга Андріївна

УДК 621.891

ДИСЕРТАЦІЯ
«ПОЛІПШЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАР ТЕРТЯ
УПРАВЛІННЯМ ПРОЦЕСАМИ САМООРГАНІЗАЦІЇ ДИСИПАТИВНИХ
СТРУКТУР ПРИ НЕСТАЛИХ УМОВАХ РОБОТИ»

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
_____ Ольга ІЛЬІНА

Науковий керівник: Мікосянчик Оксана Олександрівна, доктор технічних наук,
професор



Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Ільїна О. А. Поліпшення триботехнічних характеристик пар тертя управлінням процесами самоорганізації дисипативних структур при несталих умовах роботи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка. Державний університет «Київський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2025.

Дисертація присвячена підвищенню зносостійкості пар тертя за рахунок формування дисипативних структур шляхом утворення граничних плівок мастильного матеріалу та формування неоднорідного деформаційного мікрорельєфу з дрібнозернистою структурою в приповерхневих шарах металу.

Тертя підпорядковується рівнянню енергетичного балансу і характеризується етапами пристосування та дисипації енергії. Найбільш характерною властивістю етапу пристосування при терті є властивість самоорганізації. Недисипативна складова механічної енергії витрачається на утворення вторинних структур і реалізацію зношування. При цьому, формування дисипативних структур при терті, які характеризуються ефективними зносостійкими властивостями, слід розглядати як поєднання процесів механоактивації у верхніх поверхневих шарах контактних поверхонь та хімічної модифікації активованого при терті поверхневого шару активними компонентами базової основи та присадок, раціональний підбір яких сприяє підвищенню довговічності пар тертя в умовах експлуатації.

Мета роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні та практичній реалізації заходів підвищення зносостійкості вузлів тертя шляхом підбору мастильного матеріалу з ефективними змащувальними, реологічними, антифрикційними і протизношувальними характеристиками для забезпечення процесів самоорганізації дисипативних структур в несталих умовах тертя..

У **вступі** зазначені актуальність обраної теми, мета та завдання дослідження, наведено науково-дослідні роботи, в рамках яких проводилось дисертаційне

дослідження, охарактеризовано застосовані методи дослідження, представлено особистий внесок здобувача, наукову новизну результатів дослідження та їх практичне значення.

Перший розділ включає аналіз процесів самоорганізації при терті та зношуванні та їх вплив на надійність трибосистеми. Одним з найважливіших факторів забезпечення надійної роботи вузлів повітряних суден є використання високоякісних мастильних матеріалів. Забезпечення процедур якісного аналізу мастильних матеріалів авіаційного призначення є важливим інструментом в обслуговуванні повітряних суден. Для цього потрібні спеціально розроблені методи випробувань для оцінки фізико-хімічних і експлуатаційних параметрів. Актуальним питанням оцінки якості мастильних матеріалів авіаційного призначення є розширення переліку нормативних показників. Насамперед це стосується і триботехнічних властивостей мастильних матеріалів. Розробка ефективних методик діагностики триботехнічних параметрів фрикційного контакту направлена на захист від передчасного зносу, деформації та корозії основних функціональних вузлів і механізмів.

Тертя і зношування - це загальні енергетичні процеси, в яких механічна робота або кінетична енергія перетворюються в інші форми роботи. Проявом зазначених перетворень може бути зростання питомої роботи тертя, інтенсивності зношування як наслідок підвищення роботи руйнування, інтенсифікація деформаційних процесів в поверхневих шарів пар тертя внаслідок зростання роботи пластичногодеформування. Зазначені приклади характеризують перетворення роботи у внутрішню енергію (тепло), хімічну енергію, потенціальну енергію та інші види енергії. Утворення дисипативних структур на поверхні тертя може мати важливі наслідки для роботоздатності та довговічності поверхонь.

Проаналізовано закономірності зношування в процесі самоорганізації дисипативних структур. Увага приділена енергоємності поверхневих шарів пар тертя, яка являється характеристикою, за якою можливо проводити оцінку поверхневих шарів металу щодо накопичення деформації в широкому діапазоні зміни навантажувально-

швидкісних параметрів при терті, а також даний параметр характеризує протизношувальні характеристики контактних поверхонь.

Проаналізовано сучасні напрями трибомоніторингу якості мастильних матеріалів для підвищення ресурсу трибоспряження на прикладі гідравлічних олив повітряних суден.

Сформульовано висновки, мету та задачі дослідження на основі проведеного аналізу.

В другому розділі представлено типи мастильних матеріалів та марки сталей, які були обрані для триботехнічних досліджень.

Обґрунтовано вибір програмно-апаратного комплексу для дослідження триботехнічних характеристик контакту при лабораторних випробуваннях мастильних матеріалів в нестаціонарних умовах роботи в режимі кочення з проковзуванням, що імітує роботу зубчастих передач за допомогою роликової аналогії.

Обґрунтовано вибір методу падіння напруження в режимі нормального тліючого розряду для оцінки змащувальної здатності мастильних матеріалів з метою встановлення закономірностей зміни трибологічних та реологічних показників граничного шару мастильного матеріалу.

Зазначено методи визначення мікротвердості та лінійного зносу, оцінки структурного стану приповерхневих шарів контактних поверхонь, визначення хімічного мікрорентгено-спектрального аналізу масової частки елементів у зоні контакту растровою електронною мікроскопією, представлено аналіз структурних змін в поверхневих шарах металу по глибині та метод безперервного вдавлювання індентора для оцінки деформаційного мікрорельєфу та спектральної щільності контактних поверхонь для комплексної оцінки дисипативних структур.

В третьому розділі експериментально визначено триботехнічні характеристики локального контакту в нестаціонарних режимах при змащуванні гідравлічними оливами та проведено моделюванні зубчатого зачеплення шестеренного насосу в ANSYS Workbench.

Для гідравлічної оливи «Бора Б» АМГ-10 (товарна партія ТОВ «Бора Б» за ТУ У 19.2-38474081-010:2016 зі зм. 1) експериментально визначені більш ефективні змащувальні, реологічні, антифрикційні та протизношувальні характеристики в нестационарних режимах при коченні з проковзуванням (30%), в порівнянні з оливою АМГ-10 (товарна партія ООО «НПП Квалитет», ГОСТ 6794-75 зм. 1 – 5).

На основі експериментальних даних запропонована емпірична залежність лінійного зносу пар тертя кочення від найбільш значимих триботехнічних параметрів, до яких можна віднести питому роботу тертя, коефіцієнт тертя, ефективну в'язкість оливи в контакті, товщину граничних шарів мастильного матеріалу та об'ємну температуру оливи. Збіжність експериментальних показників лінійного зносу пар тертя зі сталі 30ХГСА при змащуванні гідравлічною оливою АМГ-10 та оцінка зносу за запропонованою емпіричною залежністю на рівні 95-97% доводить перспективність запропонованої залежності для прогнозування протизношувальних властивостей трибоконтакту в нестационарних умовах роботи.

Розроблено алгоритм визначення розподіленого дотичного зусилля по довжині примикання граничного шару мастильного матеріалу до деталі з урахуванням анізотропних властивостей дисипативних структур та гіпотези про хвилеподібний стан поверхневого шару ущільненого мастильного матеріалу на абсолютно плоскій (недеформованій) шорсткій поверхні з пружною основою.

Запропоновано розрахункові формули визначення величини і знаку максимальних дотичних напружень в зоні зачеплення зубців з найбільшим проковзуванням, які узгоджуються з результатами моделювання методом скінченних елементів.

У четвертому розділі визначено механізми формування зносостійких дисипативних структур в нестационарних умовах тертя при змащуванні трансмісійними оливами.

В роботі запропоновано визначати ефективну в'язкість мастильного матеріалу при формуванні структурованих анізотропних шарів в процесі тертя на основі

реологічної моделі псевдопластичних неньютонівських рідин за законом Оствальда-де Вейля. Доцільно припустити, що при розрахунку в'язкості мастильного матеріалу за рівнянням Баруса необхідно враховувати зміну п'єзокоефіцієнта в'язкості залежно від прояву неньютонівських властивостей мастильного матеріалу, які проявляються при формуванні граничних шарів.

Доведено, що підвищенню зносостійкості елементів трибосистеми сприяють процеси зміцнення поверхневих шарів при напрацюванні внаслідок утворення дрібнозернистої дисипативної структури, яка є результатом механо-хімічних реакцій між активованою в процесі тертя поверхнею металу та активними компонентами мастильного матеріалу.

Наукова новизна одержаних результатів визначається наступним.

Вперше:

– визначено механізми самоорганізації дисипативних структур в нестационарних умовах тертя, що полягають в механічних активаційних процесах та хімічній модифікації поверхонь тертя активними компонентами мастильного матеріалу за рахунок синергетичної дії високов'язкого ароматизованого продукту, присадок диалкілдитіофосфату цинку та алкіламінів і забезпечують формування трибоплівки і підвищення протизношувальних властивостей контактних поверхонь;

– встановлено підвищення зносостійкості елементів трибоспряження та зниження питомої роботи тертя в умовах кочення з проковзуванням за рахунок формування дрібнозернистої дисипативної структури при треті.

Удосконалено:

– оцінку визначення реологічних показників мастильного матеріалу в трибоконтакті з урахуванням прояву неньютонівських властивостей, надбанням властивостей псевдопластичних рідин та визначено показники градієнту швидкості зсуву, при яких домінує пружна або в'язкісна компоненти напруження, що виникають в анізотропному мастильному шарі при терті;

– оцінку змінних за величиною і за знаком максимальних дотичних напружень в зоні зачеплення зубців з найбільшим проковзуванням.

Отримали подальший розвиток:

– методологія оцінки триботехнічних властивостей локального контакту для визначення найбільш значимих показників, які впливають на лінійний знос контактних поверхонь;

– застосування систем автоматизованих розрахунків при симуляції, візуалізації та моделюванні зубчастого зачеплення для оцінки напружено-деформованого стану локального контакту.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено методику діагностики товарних партій олив для гідравлічних систем вертольотів за кінетикою зміни товщини мастильних шарів та реологічних характеристик оливи в триботехнічному контакті, за якою можливо визначити стійкість компонентів мастильного матеріалу при нестационарних режимах тертя до механо-термічної деструкції (акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 07.12.2023 року, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ з безпеки польотів: рекомендовано розглянути можливість стендових випробувань оцінки якості оливи «Бора Б» АМГ-10 для гідравлічної системи вертольотів типу Мі з встановленням оптимального інтервалу заміни мастильного матеріалу в умовах всесезонної експлуатації).

2. Розроблено методику контролю експлуатаційних властивостей оливи «Бора Б» АМГ-10, що дозволяє оцінити антифрикційні та протизношувальні характеристики (акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 19.03.2024 року, ТОВ «БОРА Б»: на підставі оцінки триботехнічних властивостей оливи, з урахуванням сертифіката якості виробника, можуть бути надані рекомендації застосування даної оливи для гідравлічних машин та пристроїв різноманітної техніки, що експлуатуються в інтервалі температур від мінус 60 °С до 55 °С).

Зазначені методики впроваджені у навчальний процес Державного університету «Київський авіаційний інститут»: розроблено в співавторстві практикум для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» Триботехніка та основи надійності машин, методики використовуються здобувачами вищої освіти ОС магістр при підготовці кваліфікаційних робіт (акт про впровадження теми в навчальний процес від 14.12.2022 року).

Ключові слова: самоорганізація, мастильний матеріал (мастило), коефіцієнт тертя, реологічні та триботехнічні властивості, товщина мастильного шару, зношування, зносостійкість, моделювання, зачеплення, контактний тиск, оксиди заліза, напружено-деформований стан, рельєф поверхні.

ABSTRACT

Ilina O. A. Improvement of Friction Pair Tribotechnical Characteristics through the Control of Self-Organization Processes of Dissipative Structures under Unsteady Operating Conditions. – Qualification Scientific Work (Manuscript).

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 131 – Applied Mechanics. State University "Kyiv Aviation Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2025.

This dissertation is dedicated to enhancing the wear resistance of friction pairs by forming dissipative structures through the creation of boundary films of lubricant material and the development of a heterogeneous deformation microrelief with a fine-grained structure in the near-surface layers of metal.

Friction follows the energy balance equation and exhibits an adaptive-dissipative nature. The most distinctive property of friction evolution is the phenomenon of self-organization. The non-dissipative component of mechanical energy is expended on the formation of secondary structures and the process of wear. The formation of wear-resistant dissipative structures in friction should be considered as a combination of mechanical activation processes in the upper surface layers of tribological contact elements and the chemical modification of friction surfaces by active components of the lubricant material. A rational selection of lubricants ensures the possibility of increasing the durability of friction pairs under operational conditions.

The aim of this study is to provide theoretical justification and practical implementation of measures to improve the wear resistance of friction units by selecting a lubricant with effective lubricating, rheological, antifriction, and anti-wear properties to facilitate the self-organization processes of dissipative structures under unsteady friction conditions.

The introduction outlines the relevance of the chosen topic, the research objectives, and the tasks of the study. It presents the scientific research conducted within the framework

of the dissertation, describes the applied research methods, and highlights the author's personal contribution, the scientific novelty of the research findings, and their practical significance.

The first chapter includes an analysis of self-organization processes in friction and wear and their impact on the reliability of tribosystems. One of the key issues in ensuring the reliable operation of aircraft components is the use of high-quality lubricants. A qualitative analysis of aviation lubricants is an essential tool for the technical maintenance of aircraft and should be based on specially developed test methodologies for assessing their physico-chemical and operational properties. A relevant aspect of aviation lubricant quality assessment is the expansion of the standardized set of parameters, which should include the tribotechnical properties of lubricants. The improvement of these properties should primarily focus on protecting key functional components and mechanisms from premature wear, deformation, and corrosion.

Friction and wear are typical energy-intensive processes in which mechanical work or kinetic energy is converted into other forms of energy. Such transformations include an increase in specific friction work, the work of plastic deformation of surface layers in friction pairs, and wear work, which involves the conversion of energy into internal (thermal), chemical, potential, and other forms. The formation of dissipative structures on friction surfaces can have significant implications for the performance and durability of surfaces.

The dissertation analyzes the wear patterns that occur during the self-organization of dissipative structures. The energy capacity of the surface layers of metal serves as a characteristic for evaluating their ability to accumulate deformation during friction and their resistance to wear.

Modern approaches to tribological monitoring of lubricant quality are examined to enhance the durability of tribological contacts, with a focus on hydraulic oils used in aircraft.

Based on the conducted analysis, conclusions, research objectives, and tasks have been formulated.

The second chapter presents the types of lubricants and steel grades selected for tribotechnical research.

The selection of the software-hardware complex for studying the tribotechnical characteristics of contact during laboratory tests of lubricants under non-stationary operating conditions in a rolling-slip mode is justified. This approach simulates the operation of gear transmissions using a roller analogy.

The choice of the stress drop method in the normal glow discharge mode is substantiated for assessing the lubricating ability of lubricants to establish patterns of changes in tribological and rheological properties in the boundary layer of the lubricant.

Methods for determining microhardness and linear wear, evaluating the structural state of near-surface layers of contact surfaces, and performing chemical micro-X-ray spectral analysis of the elemental mass fraction in the contact zone using scanning electron microscopy are outlined. Structural changes in the surface layers of metal in-depth analysis and the continuous indentation method for assessing the deformation microrelief and spectral density of contact surfaces are also presented for a comprehensive evaluation of dissipative structures.

In the third chapter, the tribotechnical characteristics of local contact under non-stationary friction conditions with lubrication by hydraulic oils were experimentally determined. Additionally, a simulation of the gear engagement of a gear pump was performed in ANSYS Workbench.

Experimental results show that the "Bora B" AMG-10 oil (produced by "Bora B" LLC, TU U 19.2-38474081-010:2016 with amendment 1) has more effective lubricating, antifriction, anti-wear, and rheological properties under non-stationary friction conditions in a rolling-slip mode (30%) compared to AMG-10 oil produced by "NPP Kvalitet" LLC, GOST 6794-75 amendments 1–5.

An empirical dependence of linear wear in friction pairs on the most significant tribotechnical characteristics was obtained. These include maximum specific friction work, minimum friction coefficient, minimum effective viscosity of the oil in contact, minimum

boundary layer thickness of the lubricant, and bulk oil temperature. The high convergence of experimental wear measurements (95–97%) of 30KhGSA steel lubricated with AMG-10 hydraulic oil and wear estimation using the empirical dependence allows predicting the anti-wear properties of lubricants under non-stationary tribosystem operating conditions.

An algorithm was developed for determining the distributed tangential force along the length of the boundary layer adhesion to the part, taking into account the anisotropic properties of dissipative structures and the hypothesis of a wave-like state of the surface layer of compressed lubricant on a perfectly flat (undeformed) rough surface with an elastic foundation.

Formulas were proposed for calculating the magnitude and sign of maximum tangential stresses in the gear meshing zone with the highest slip, which agree with finite element method (FEM) simulation results.

The fourth chapter determines the mechanisms of wear-resistant dissipative structure formation under non-stationary friction conditions with transmission oil lubrication.

A method for evaluating the effective viscosity of lubricants in contact during the formation of structured boundary layers is proposed, based on the rheological model of pseudoplastic non-Newtonian fluids and the Ostwald-de Waele power law. It is substantiated that when using the Barus equation to calculate the viscosity of lubricants, changes in the piezoviscosity coefficient must be considered, taking into account the manifestation of non-Newtonian properties during boundary layer formation.

It is proven that the enhancement of tribosystem component wear resistance is facilitated by the strengthening of surface layers during operation due to the formation of a fine-grained dissipative structure. This structure results from mechanochemical reactions between the friction-activated metal surface and active lubricant components.

Scientific Novelty of the Obtained Results

For the first time:

- Mechanisms of self-organization of dissipative structures under non-stationary friction conditions have been identified. These mechanisms involve mechanical activation

processes and chemical modification of friction surfaces by active lubricant components due to the synergistic action of highly viscous aromatic products, zinc dialkyldithiophosphate additives, and alkylamines. This ensures the formation of a tribofilm and enhances the anti-wear properties of contact surfaces.

- An increase in wear resistance of tribo-pair elements and a reduction in specific friction work under rolling-slip conditions were established. This is achieved through the formation of a fine-grained dissipative structure during friction, strengthening of the surface layers of the metal, and reducing the propagation of elastoplastic deformations in the near-surface metal layers in-depth.

Improvements:

- The rheology of lubricants in tribocontact was refined, considering the manifestation of non-Newtonian properties and the acquisition of pseudoplastic fluid behavior. The velocity gradient thresholds were determined at which either elastic or viscous stress components dominate in the anisotropic lubricant layer during friction.

- The evaluation of variable magnitude and sign of maximum tangential stresses in the gear meshing zone with the highest slip was improved.

Further Developments:

- The methodology for assessing the tribotechnical properties of local contact was expanded to determine the most significant indicators affecting linear wear of contact surfaces.

- The application of automated calculation systems in simulation, visualization, and modeling of gear meshing was extended for evaluating the stress-strain state of local contact.

Practical Significance of the Results:

1. A methodology for diagnostic control of hydraulic oil quality assessment was developed based on the kinetics of lubricant layer thickness changes, shear stresses of the lubricant, and effective viscosity in a tribotechnical contact using a roller analogy that simulates gear transmission operation under 30% rolling-slip conditions. This allows determining the resistance of lubricant components to mechano-thermal degradation under

non-stationary lubrication conditions. (Implementation Act of Research Results dated December 7, 2023, Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs on flight safety: it is recommended to consider stand tests for evaluating the quality of "Bora B" AMG-10 oil for the hydraulic system of Mi-type helicopters, with the establishment of an optimal lubricant replacement interval for all-season operation.)

2. A methodology for controlling the operational properties of "Bora B" AMG-10 oil was developed, allowing the evaluation of antifriction and anti-wear characteristics. (Implementation Act of Research Results dated March 19, 2024, "Bora B" LLC: Based on the assessment of the tribotechnical properties of the oil, considering the manufacturer's quality certificate, recommendations can be made for the use of this oil in hydraulic machines and devices of various equipment operating within a temperature range from -60°C to $+55^{\circ}\text{C}$.)

The mentioned methodologies have been implemented in the educational process of the State University "Kyiv Aviation Institute". A practical guide was co-developed for PhD students specializing in 131 "Applied Mechanics" on Tribology and Fundamentals of Machine Reliability. These methodologies are also used by master's students in preparing qualification theses. (Implementation Act in the Educational Process dated December 14, 2022.)

Keywords: self-organization, lubricant material (lubricant), coefficient of friction, rheological and tribotechnical properties, thickness of lubricating layer, wear, wear resistance, modeling, gearing, contact pressure, iron oxides, stress-strain state, surface relief.

Список публікацій здобувача

Розділ монографії

1. Mikosianchyk O., **Ilna O.** Research of Tribological Characteristics of Modern Aviation Oils. *Research Developments in Sustainable Aviation. Proceedings of International Symposium on Sustainable Aviation 2021* / In: Karakoc T.H., Atipan S., Dalkiran A., Ercan A.H., Kongsamutr N., Sripawadkul V. (eds). Springer, Cham, 2023. P. 371-377 https://doi.org/10.1007/978-3-031-37943-7_49

У фахових виданнях категорії Б:

2. **Ilna O.A.**, Mikosianchyk O.O., Mnatsakanov R.H., Yakobchuk O.Ye. Development of methods for evaluation of lubrication properties of hydraulic aviation oils. *Problems of Tribology*. 2021. V. 26, No 3/101. P.42-47. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-101-3-42-47>

3. **Ільїна О. А.**, Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Мельник В.Б., Печеришний О.В. Оцінка якості гідравлічних авіаційних олив за енергетичними та протизношувальними показниками. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. No. 4(93). С. 39-47. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(93\).16255](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(93).16255)

4. Токарук В. В., Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко А. М, **Ільїна О. А.** Оцінка напружено-деформованого стану трибоконтакту за зміною усередненої потужності акустичної емісії. *Проблеми тертя та зношування*. 2022. №. 3(96). С. 30-40. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(96\).16833](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(96).16833)

5. **Ilna O.A.**, Mikosianchyk O.O., Yashchuk O. P., Mnatsakanov R.H., Berezivskyi N.M. Tribomonitoring of the quality of aviation hydraulic oils according to lubricity and rheological indicators. *Problems of Tribology*. 2023. V. 28, No 1/107. P.34-40. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-34-40>

6. **Ilna O.A.**, Mikosianchyk O.O., Mnatsakanov R.H., Kostyunik R.E., Yashchuk O. P., Shteinyk M. A. Mechanisms of formation of wear-resistant dissipative structures in non-

stationary lubrication conditions. *Problems of Tribology*. 2023. V. 28, No 3/109. P. 49-55.
<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-109-3-49-55>

7. Мікосянчик О. О., Ільїна О. А. Оцінка реологічних характеристик трансмісійних оли в нестационарних умовах тертя. *Problems of friction and wear*. 2024. 2 (103). С.43-55. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(103\).18671](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(103).18671)

8. Malinovskiy Y., **Ilina O. A.**, Vlasenkov D., Oliinyk S., Mikosianchyk O. O. Self-organization of the tribosystem under non-stationary conditions of friction from the standpoint of deformation-wave representations. *Problems of Tribology*. 2024. V. 29, № 3(113). P. 15-23. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-113-3-15-23>

У іноземних спеціалізованих виданнях:

9. T. M.A. Al-Quraan, **Ilina O.**, Kulyk M., Mnatsakanov R., Mikosianchyk O., Melnyk V. Dynamic processes of self-organization in non-stationary conditions of friction. *Advances in Tribology*. 2023. Vol. 2023. Article ID 6676706. P. 13.
<https://doi.org/10.1155/2023/6676706> (Scopus, Quartile Q3).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

10. **Ільїна О.А.**, Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Харченко О.В., Токарук В.В. Моделювання процесів зношування зубчастого зачеплення. *Science and practice, actual problems, innovations: proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference, Milan, 19 – 22 July 2022. Milan, Italy, 2022*. P. 280-284. DOI: 10.46299/ISG.2022.1.28

11. **Ilina O.**, Borodiy V., Mikosyanchik O. The influence of slip rate on the nature of distribution of microhardness of the surface layers of metal. *Polish Conference on Crystal Growth: proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Gdańsk, 19 -24 June, 2022. Gdańsk, Poland, University of Technology*. P.95

12. Бородій В.М., Скворцов О.О., **Ільїна О.А.** Оцінка елестогідродинамічних показників зубчастої передачі героторного масляного насосу. *Безпека в авіації та космічні технології*: матеріали X Всесвітнього конгресу “Авіація в XXI столітті”, м. Київ, 28-30 вересня 2022 р., Київ, 2022. Р.1.3.27-1.3.30.

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8867/7018>

13. **Ільїна О.А.**, Мікосянчик О.О., Бородій В.М., Голембієвський Г.Г. Процеси самоорганізації трибосистеми при структурній пристосованості. *ABIA-2023*: матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції, Київ, 18–21 квіт. 2023 р. К.: НАУ, 2023. С.1.15-1.19.

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2023/paper/view/9247/7530>

14. **Ilina O.**, Mikosianchyk O. The influence of self-organization processes during friction and wear on the reliability of the tribosystem. *Theory and Practice of Rational Use of Traditional and Alternative Fuels and Lubricants*. Book of Abstracts IX International Scientific-Technical Conference, Kyiv, 03–07 July, 2023: K.: Center for Education Literature, 2023. P.116-118.

Навчально-методичні праці

15. Мікосянчик О.О., Мнацаканов Р.Г., Харченко О.В., Ільїна О.А. Триботехніка та основи надійності машин: практикум для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» – К.: НАУ, 2023. – 96с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ САМООРГАНІЗАЦІЇ ПРИ ТЕРТІ ТА ЗНОШУВАННІ НА НАДІЙНІСТЬ ТРИБОСИСТЕМИ	28
1.1. Адаптивно-дисипативні закономірності еволюції трибосистем	30
1.2. Закономірності зношування в процесі самоорганізації дисипативних структур	37
1.3. Сучасні напрями трибомоніторингу якості мастильних матеріалів для підвищення ресурсу трибоспряження	48
1.3.1. Вплив якості гідравлічних олиव на надійність гідравлічної системи повітряних суден.....	51
1.3.2. Оцінка ефективності мащення в локальному контакті зубчастих передач за реологічними параметрами.....	55
Висновки до розділу 1.	62
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИ ТА УСТАНОВКА ДЛЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	65
2.1. Мастильні матеріали для авіаційної та наземної техніки	65
2.2. Досліджувані матеріали пар тертя.....	70
2.3. Установка для дослідження експлуатаційних показників мастильних матеріалів.....	73
2.4. Методологія оцінки якості мастильних матеріалів на основі вхідного контролю.....	76
2.4.1. Визначення гідро- та негідродинамічної складових товщини мастильного шару	78
2.4.2. Визначення реологічних показників мастильних матеріалів в локальному контакті.....	82
2.5. Методи оцінки рельєфу поверхні та стану поверхневих шарів	

контактних поверхонь.....	84
Висновки до розділу 2.....	87
РОЗДІЛ 3. ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОКАЛЬНОГО КОНТАКТУ В НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ ТЕРТЯ ПРИ ЗМАЩУВАННІ ГІДРАВЛІЧНИМИ ОЛИВАМИ	90
3.1. Кінетика зміни антифрикційних, змащувальних та реологічних параметрів гідравлічних олив при напрацюванні в нестационарних умовах тертя	90
3.2. Взаємозв'язок енергетичних та протизношувальних характеристик локального контакту в умовах кочення з проковзуванням.....	95
3.3. Самоорганізація трибосистеми в нестационарних умовах тертя з позицій деформаційно-хвильових уявлень.....	101
3.3.1. Моделювання пружних деформаційних та хвильових процесів в дисипативних структурах.....	104
3.3.2. Оцінка напружено-деформованого стану в зоні зачеплення зубців при терті.....	108
Висновки до розділу 3.....	115
РОЗДІЛ 4. МЕХАНІЗМИ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ДИСИПАТИВНИХ СТРУКТУР В НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ ТЕРТЯ ПРИ ЗМАЩУВАННІ ТРАНСМІСІЙНИМИ ОЛИВАМИ	118
4.1. Антифрикційні, змащувальні та реологічні характеристики трансмисійних олив в нестационарних умовах тертя	119
4.2. Динамічні процеси самоорганізації в нестационарних умовах тертя.	129
4.3. Оцінка триботехнічних параметрів локального контакту залежно від твердості сталі.....	138
Висновки до розділу 4.....	142
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	150
ДОДАТКИ.....	170

ВСТУП

Актуальність теми. Системне управління якістю машин та механізмів на сьогоднішній день є основним способом забезпечення конкурентоспроможності продукції. Головний інструмент управління якістю – контроль – останнім часом зазнає великих змін. За останні роки отримали подальше вдосконалення методологія та принципи оцінки якості як мастильних матеріалів, так і контактних поверхонь, що розширює можливість впровадження більш сучасних правил та процедур контролю трибосполучень з метою прогнозування їх роботоздатності.

Великий досвід механо-фізико-хімічних досліджень природи поверхневих шарів елементів трибосполучень та накопичений великий експериментальний матеріал дозволили В.В. Ауліну, В.А. Войтову, О.В. Дихі, Б.І. Костецькому, Р.Г. Мнацаканову, В.В. Шевелі, R. Müller, N. P. Suh, D. Xia, Y. Wang та ряду інших вчених розробити критерії та запропонувати свої моделі зношування матеріалів. Однак, отримати універсальні критерії та застосувати їх для прогнозування довговічності трибосполучень без проведення експериментальних досліджень не вдається у зв'язку з численними додатковими конкретними умовами, що відрізняють роботу тих чи інших трибосполучень.

Основними тенденціями сучасного машинобудування є підвищення продуктивності і потужності машин і агрегатів, що випускаються, і одночасне збереження енергоресурсів. Перший напрямок призводить до підвищення температурно-швидкісного навантаження насамперед на вузли тертя, другий - до пошуку шляхів, що знижують витрати на подолання сил опору руху.

Статистичний аналіз відмов показує, що понад 70% рухомих елементів машин виходять з ладу внаслідок їх підвищеного зносу. Тому для збільшення терміну служби машин та механізмів необхідно проведення подальших досліджень, що призводять до розробки заходів для підвищення зносостійкості матеріалів пар тертя.

Тертя підпорядковується рівнянню енергетичного балансу і має адаптивно-дисипативний характер. Найбільш характерною властивістю еволюції тертя є властивість самоорганізації.

З термодинамічної точки зору тертя являє собою конкуренцію двох одночасно протікаючих, взаємопов'язаних і протилежних процесів: накопичення прихованої (потенційної) енергії різного роду дефектів та пошкоджень структури контактних об'ємів та її вивільнення (розсіювання) за рахунок перебігу різноманітних релаксаційних процесів. Перша тенденція визначає ефект деформаційного зміцнення та інтегрально характеризує міру ушкоджуваності (параметр стану); друга тенденція визначає тепловий ефект тертя та відповідальна за квазів'язку складову процесу.

Правильний вибір мастильних матеріалів, своєчасна та якісна їх діагностика є однією з основних умов, що дозволяють збільшити довговічність, підвищити працездатність та зберегти на тривалий період технологічну точність машин та механізмів. Розробка ефективних заходів трибомоніторингу мастильних матеріалів направлена на раціональне їх використання та зменшення зносу деталей обладнання.

Вибір мастильного матеріалу для конкретного вузла тертя має сприяти реалізації механізмів самоорганізації дисипативних структур, що забезпечить зниження інтенсивності зношування трибосистеми. Роль мастильного матеріалу полягає в формуванні змащувального шару, який проявляє стійкість до механодеструкції внаслідок збільшення градієнта швидкості зсуву при коченні з проковзуванням або ковзанні, що є визначальним фактором для забезпечення ефективної роботи пар тертя в нестаціонарних режимах. Руйнування змащувального шару в критичних режимах роботи трибосистеми – це провідний фактор, що спричинює інтенсифікацію енергетичних процесів в зоні контакту та призводить до порушення структурної пристосованості контактних поверхонь і мастильного матеріалу, яке може проявлятися збільшенням інтенсивності зношування, домінуванням граничного режиму мащення, проявом процесів схоплювання контактних поверхонь та ін.

Таким чином, розробка заходів управління процесами самоорганізації дисипативних структур за рахунок застосування мастильних матеріалів з ефективними змащувальними, реологічними, антифрикційними і протизношувальними характеристиками направлено на вирішення наукового завдання, що полягає в підвищенні зносостійкості пар тертя за рахунок екрануючих властивостей граничних шарів мастильного матеріалу щодо зниження деформаційних та енергетичних процесів в поверхневих шарах пар тертя, поліпшення якості контактуючих поверхонь, утворення неоднорідного деформаційного мікрорельєфу з дрібнозернистою структурою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Державного університету «Київський авіаційний інститут». Дослідження проводились в рамках науково-дослідних робіт:

№ 368/ДБ21 «Розроблення апаратно-методологічного нанотриботехнологічного комплексу для підвищення триботехнічних характеристик та ресурсу високонавантажених вузлів тертя авіакосмічної техніки». Автором розроблено методику оцінки вхідного контролю мастильних матеріалів за триботехнічними характеристиками. характеристик діагностування трибопар авіаційних матеріалів за допомогою акустичних методів неруйнівного контролю;

№ 16-2022/ 07.01.01. «Підвищення довговічності та забезпечення міцності елементів конструкцій авіаційної техніки» (0125U001009). Автором проведено моделювання зубчатого зачеплення шестеренного насосу НШ-39М та визначено напружено-деформований стан в зоні зачеплення зубців при терті.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в поліпшенні триботехнічних характеристик пар тертя шляхом управління процесами самоорганізації дисипативних структур при несталих умовах тертя підбором мастильного матеріалу з ефективними змащувальними, реологічними, антифрикційними і протизношувальними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні завдання:

- провести аналіз типових видів зношування шестеренних насосів та гіпоїдних передач;
- дослідити триботехнічні характеристики контакту в нестационарних умовах роботи при застосуванні мастильних матеріалів з різними поліфункціональними присадками та базовою основою;
- визначити триботехнічні показники, які впливають на лінійний знос контактних поверхонь;
- провести оцінку напружено-деформованого стану зубчатого зачеплення шестеренного насосу моделюванням в ANSYS Workbench;
- дослідити реологічні характеристики мастильного матеріалу та визначити умови прояву неньютонівських властивостей в мастильному матеріалі;
- визначити механізми структурної пристосованості контактних поверхонь та умови переходу трибосистеми до стану самоорганізації.

Об’єкт дослідження – процеси самоорганізації трибосистем в несталих умовах роботи в режимі кочення з проковзуванням.

Предмет дослідження – закономірності впливу граничних плівок мастильного матеріалу, енергетичних процесів, якості контактуючих поверхонь на триботехнічні характеристики пар тертя в несталих умовах роботи.

Методи дослідження. Дослідження триботехнічних характеристик пар тертя проводились на програмно-апаратному комплексі з реєстрацією товщини мастильного шару, моменту тертя, температури оливи, частоти обертання контактних поверхонь та ін. параметрів в режимі on-line. Для комплексної оцінки дисипативних структур обрано прилад ПМТ-3 (визначення мікротвердості та лінійного зносу), мікроскоп MIM-8M із цифровою фотокамерою Nikon Coolpix-4500 (визначення структурного стану приповерхневих шарів контактних поверхонь), мікроскоп TESCAN Mira 3 LMU з енергодисперсійним мікроаналізатором OXFORD X-MAX (визначення хімічного мікрорентгено-спектрального аналізу масової частки елементів у зоні контакту

растровою електронною мікроскопією), растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И (аналіз структурних змін в поверхневих шарах металу по глибині), прилад "Мікрон-гамма" (безперервне вдавлювання індентора для оцінки деформаційного мікрорельєфу та спектральної щільності контактних поверхонь). Визначення напружено-деформованого стану зубчастого зачеплення проводилось на моделі шестеренного насоса, модель побудована в системі Dassault Systems Catia V5 R30 та експортована в ANSYS Workbench 2019 R3.

Наукова новизна одержаних результатів.

Вперше:

– визначено механізми самоорганізації дисипативних структур в нестационарних умовах тертя, що полягають в механічних активаційних процесах та хімічній модифікації поверхонь тертя активними компонентами мастильного матеріалу за рахунок синергетичної дії високов'язкого ароматизованого продукту, присадок диалкілдитіофосфату цинку та алкіламінів і забезпечують формування трибоплівки і підвищення протизношувальних властивостей контактних поверхонь;

– встановлено підвищення зносостійкості елементів трибоспряження та зниження питомої роботи тертя в умовах кочення з проковзуванням за рахунок формування дрібнозернистої дисипативної структури при треті.

Удосконалено:

– оцінку визначення реологічних показників мастильного матеріалу в трибоконтакті з урахуванням прояву неньютонівських властивостей, надбанням властивостей псевдопластичних рідин та визначено показники градієнту швидкості зсуву, при яких домінує пружна або в'язкісна компоненти напруження, що виникають в анізотропному мастильному шарі при терті;

– оцінку змінних за величиною і за знаком максимальних дотичних напружень в зоні зачеплення зубців з найбільшим проковзуванням.

Отримали подальший розвиток:

– методологія оцінки триботехнічних властивостей локального контакту для визначення найбільш значимих показників, які впливають на лінійний знос контактних поверхонь;

– застосування систем автоматизованих розрахунків при симуляції, візуалізації та моделюванні зубчастого зачеплення для оцінки напружено-деформованого стану локального контакту.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено методику діагностики товарних партій оливи для гідравлічних систем вертольотів за кінетикою зміни товщини мастильних шарів та реологічних характеристик оливи в триботехнічному контакті, за якою можливо визначити стійкість компонентів мастильного матеріалу при нестационарних режимах тертя до механо-термічної деструкції (акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 07.12.2023 року, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ з безпеки польотів: рекомендовано розглянути можливість стендових випробувань оцінки якості оливи «Бора Б» АМГ-10 для гідравлічної системи вертольотів типу Мі з встановленням оптимального інтервалу заміни мастильного матеріалу в умовах всесезонної експлуатації).

2. Розроблено методику контролю експлуатаційних властивостей оливи «Бора Б» АМГ-10, що дозволяє оцінити антифрикційні та протизношувальні характеристики (акт про реалізацію результатів наукових досліджень від 19.03.2024 року, ТОВ «БОРА Б»: на підставі оцінки триботехнічних властивостей оливи, з урахуванням сертифіката якості виробника, можуть бути надані рекомендації застосування даної оливи для гідравлічних машин та пристроїв різноманітної техніки, що експлуатуються в інтервалі температур від мінус 60 °С до 55 °С).

Зазначені методики впроваджені у навчальний процес Державного університету «Київський авіаційний інститут»: розроблено в співавторстві практикум для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» Триботехніка та основи надійності машин, методики використовуються

здобувачами вищої освіти ОС магістр при підготовці кваліфікаційних робіт (акт про впровадження теми в навчальний процес від 14.12.2022 року).

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, теоретичні та практичні результати, які виносяться на захист, одержані автором самостійно. З публікацій у співавторстві використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: проведено оцінку товарних партій авіаційних гідравлічних олив за експлуатаційними показниками – [1]; розроблено методiku оцінки змащувальних та реологічних властивостей гідравлічних олив в триботехнічному контакті– [2, 5]; визначено найбільш значимі показники гідравлічних олив, які впливають на лінійний знос контактних поверхонь – [3, 10]; проведено оцінку напружено-деформованого стану поверхневих шарів матеріалів контактних поверхонь при терті – [4, 11]; визначено вплив процесів надмолекулярної самоорганізації в мастильному шарі на закономірності зношування пар тертя – [6]; розглянуто неньютонівські властивості олив за степеневим законом Оствальда-де Вейля та обґрунтовано прояв псевдопластичних властивостей мастильними матеріалами – [7]; проведено моделювання пружньо-пластичних властивостей дисипативних структур з урахуванням анізотропних властивостей поверхневих шарів пар тертя та граничних шарів змащувального матеріалу – [8]; досліджено вплив базової основи та присадок на самоорганізацію дисипативних структур – [9, 13]; проаналізовано закономірності формування мастильного шару в зубчастому зачепленні – [12]; проведено оцінку впливу процесів самоорганізації при терті та зношуванні на надійність трибосистеми – [14]; розроблено практичні роботи щодо оцінки антифрикційних та реологічних показників мастильного матеріалу – [15].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи представлені та обговорені на:

– XXVIII International Scientific and Practical Conference «Science and practice, actual problems, innovations», Milan, Italy, липень 2022 року;

- International Scientific and Practical Conference «Polish Conference on Crystal Growth», University of Technology, Gdańsk, Poland, червень 2022 року;
- X Всесвітньому конгресі “Авіація в XXI столітті”, Безпека в авіації та космічні технології, Національний авіаційний університет, м. Київ, вересень 2022 року;
- XVI міжнародній науково-технічній конференції ABIA-2023 в Національному авіаційному університеті, м. Київ, квітень 2023 року;
- IX International Scientific-Technical Conference «Theory and Practice of Rational Use of Traditional and Alternative Fuels and Lubricants», м. Київ, липень 2023 року.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, у тому числі: 1 розділ в колективній монографії, 7 статей у фахових виданнях переліку МОН України (категорія Б); 1 стаття у міжнародному спеціалізованому виданні (Scopus, Quartile Q3); 5 праць апробаційного характеру. Опублікована 1 навчально-методична праця.

Відповідно до п.3.6 «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук», затвердженого Постановою КМУ № 261 (із змінами в редакції постанови КМУ від 19.05.2023 № 502) від 23.03.2016 р., та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р.: наукові результати дисертації висвітлені у 6 наукових публікаціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація містить анотації українською та англійською мовами, вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додатки. Список використаних джерел із 166 найменувань на 19 сторінках. Додаток – 10 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 128 сторінок, загальний обсяг дисертації складає 179 сторінок. Всього в роботі 19 таблиць, 43 ілюстрації та 3 додатки.

РОЗДІЛ 1

ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ САМООРГАНІЗАЦІЇ ПРИ ТЕРТІ ТА ЗНОШУВАННІ НА НАДІЙНІСТЬ ТРИБОСИСТЕМИ

Забезпечення надійності машин і механізмів під час експлуатації має вирішальне значення для запобігання дорогих простоїв, витрат на обслуговування та ремонт. Для досягнення цієї мети можна застосувати різні нормативні акти та найкращі практики, включаючи регулярне технічне обслуговування, належне використання, перевірку та тестування, якісні матеріали та компоненти, адекватне змащення, а також належне зберігання та транспортування.

Для справної та надійної роботи машин і механізмів необхідне регулярне технічне обслуговування. Належні процедури технічного обслуговування можна знайти в посібнику виробника обладнання, а графіки технічного обслуговування повинні бути розроблені на основі рекомендацій виробника та умов експлуатації машини. Необхідно суворо дотримуватися графіка технічного обслуговування, а будь-які виявлені проблеми слід негайно вирішувати, щоб запобігти виходу обладнання з ладу. Надійність машин та механізмів забезпечується на етапах проектування, виготовлення та експлуатації. Мастильний матеріал з ефективними фізико-хімічними та триботехнічними характеристиками може значно підвищити показники надійності трибосистеми. Сучасні вимоги до надійності трибомеханічних систем пов'язані з удосконаленням мастильних матеріалів, їх компонентів і в цілому базуються на ретельному аналізі стану мастильного середовища і поверхні контакту метал-метал при терті. У сучасних умовах технологія виробництва мастильних матеріалів і їх компонентів стрімко розвивається і вдосконалюється. Виробляються нові мастильні матеріали на мінеральній і синтетичній основі, ведуться важливі розробки щодо синтезу поліфункціональних присадок та добавок. Дані шляхи направлені на

поліпшення як фізико-хімічних, так і триботехнічних властивостей мастильних матеріалів. [1].

Забезпечення найвищих показників надійності на всіх етапах життєвого циклу повітряного судна (ПС) безпосередньо пов'язано з питаннями якісного проведення контролю, діагностування, профілактичного забезпечення та ремонту авіаційної техніки. Роль проблеми забезпечення надійності сучасних ПС зростає внаслідок їх ускладнення, постійного збільшення навантажень та інтенсивності використання, значного розширення діапазону умов експлуатації та галузей застосування, підвищення рівня автоматизації ПС. До одних з найважливіших питань забезпечення надійної роботи вузлів ПС слід віднести застосування високоякісних мастильних матеріалів. Якісний аналіз авіаційних мастильних матеріалів є важливим інструментом технічного обслуговування повітряних суден, який має ґрунтуватися на спеціально розроблених тестових методиках оцінки їх фізико-хімічних та експлуатаційних показників. Актуальним аспектом оцінки якості авіаційних мастильних матеріалів є розширення нормованого переліку їх показників, до яких можна віднести триботехнічні властивості мастильних матеріалів [2]. Удосконалення останніх насамперед має бути направлено на захист основних функціональних вузлів і механізмів від передчасного зносу, деформацій і корозії.

В даний час існує два підходи до проведення аналізу мастильних матеріалів: аналіз мастильних матеріалів під час виробництва (вхідний контроль базових компонентів, присадок, товарних партій готової продукції) та аналіз експлуатаційної оливи (діагностичний контроль). Правильний вибір мастильних матеріалів, своєчасна та якісна їх діагностика є однією з основних умов, що дозволяють збільшити довговічність, підвищити працездатність та зберегти на тривалий період технологічну точність машин та механізмів. Своєчасний та якісний трибомоніторинг мастильних матеріалів надає перспективу щодо їх раціонального використання, зменшення зносу деталей обладнання. Тому розробка методик оцінки якості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті є актуальним напрямком досліджень, за результатами яких

можливо надати рекомендації щодо роботоздатності олив в певних експлуатаційних режимах [1].

Важливим чинником забезпечення високої роботоздатності вузлів тертя є якісний вибір мастильних матеріалів з високими змащувальними, антифрикційними та протизношувальними характеристиками [3]. Адекватне змащування має важливе значення для зменшення тертя та зносу контактних поверхонь, що може допомогти подовжити термін служби машин і механізмів. Змащування можна досягти за допомогою різних типів мастильних матеріалів, включаючи масла, мастила та тверді мастильні матеріали. Графік змащування слід розробляти з урахуванням рекомендацій виробника та умов експлуатації машини.

1.1. Адаптивно-дисипативні закономірності еволюції трибосистем.

Одним із найважливіших процесів, що протікають у зоні трибоконтакту при граничному терті, є, безперечно, процес надмолекулярної самоорганізації в мастильному шарі. Від особливостей протікання процесів надмолекулярної самоорганізації, що визначають товщину, структуру та екрануючі можливості граничного мастильного шару, залежатимуть такі значущі характеристики процесу тертя, як інтенсивність зношування матеріалів пари тертя, температура в трибоконтакті і сила тертя.

Первинні джерела самоорганізації трибосистем мають енергетичну природу, тому багато досліджень направлено на встановлення взаємозв'язку між зміною параметрів і властивостей утворених дисипативних структур при терті та необоротними перетвореннями енергії в області фрикційного контакту відповідно до виконаної роботи [4].

З енергетичної точки зору фрикційний контакт при терті можна уявити як сукупність локальних процесів взаємодії контактуючих поверхонь з потоком механічної енергії, яка розподіляється на площині контакту за законом, подібним до закону розподілу епюр дотичних напружень та відносних швидкостей ковзання. Це

спричинює зміну внутрішнього структурно-енергетичного стану поверхневих шарів пар тертя та мікрогеометричних параметрів контакту, при цьому більша частина механічної енергії трансформується у теплову та розсіюється в зовнішнє середовище. Згідно [5], недисипативну складову механічної енергії можна представити як енергію, яка витрачається при формуванні вторинних структур і реалізації зносу.

Енергію, яка витрачається на тертя, можна зменшити за допомогою мастильних матеріалів або інших засобів обробки поверхні, які зменшують силу тертя між поверхнями. Мастильні матеріали можуть зменшувати силу тертя, утворюючи тонку плівку між поверхнями, що зменшує імовірність безпосереднього контакту між поверхнями та пов'язану з цим втрату енергії через деформаційні процеси при терті. Обробка поверхні, наприклад нанесення зносостійкого або антифрикційного покриття або модифікація поверхні, також може зменшити силу тертя шляхом зміни властивостей поверхні, таких як шорсткість і твердість.

Енергія при терті перетворюється в теплоту, що нагріває механізми і вузли машин. Їх надмірне нагрівання в багатьох випадках призводить до відмов і аварій. Дослідження показують, що приблизно 80-90% відмов машин відбувається через зношування вузлів і деталей машин, а також робочого інструменту [6].

Згідно [7] процеси тертя та зношування відповідають енергетичним процесам, які характеризуються перетворенням механічної роботи або кінетичної енергії в інші форми роботи. До таких перетворень можна віднести збільшення питомої роботи тертя, пластичну деформацію контактних поверхонь, зростання внутрішньої роботи (теплота), хімічної та потенціальної енергії трибосистеми. У роботі [8] параметри енергетичного рівняння трибосистеми проаналізовано за допомогою феноменологічних (емпіричних) залежностей, що характеризують конкретні процеси під час тертя та зношування. Визначено основні необоротні чинники енергетичних моделей фрикційного контакту, а саме розподіл роботи при подоланні сил зчеплення, роботу, що витрачається на пластичні деформації, утворення тріщин та формування продуктів зношування. До необоротних процесів, згідно [4], слід віднести процеси

зміни агрегатного стану речовини, утворення речовин під час хімічних реакцій, процеси дифузії та теплопровідності.

У зазначених перетвореннях механічної роботи або кінетичної енергії полягає спрямованість еволюції трибосистем через стадії: стаціонарну, нестаціонарну, біфуркаційну, нову стаціонарну і т.д. Спрямованість еволюції пов'язана з її ускладненням через самоорганізацію процесів, станів та структур систем [6]. На основі експериментальних та аналітичних закономірностей в праці [9] представлено перебіг еволюційних змін незворотних перетворень трибосистеми при експериментально-математичному моделюванні енергопідведення в зону тертя. Зазначено, що запропонована авторами біфуркаційна діаграма показує значення роботи за певними траєкторіями. Біфуркаційна діаграма та приклади зміни траєкторії в просторі пружних деформаційних переміщень демонструють велику різноманітність процесів, які змінюються в міру виконання роботи сил тертя. При цьому в ході роботи виділяються певні області, де топологія фазового простору залишається незмінною, а також точки біфуркації, де топологія змінюється. Слід підкреслити, що трансформація топології фазового простору деформаційних переміщень, як наслідок зміни взаємодій контактуючих поверхонь, змінює такі властивості контакту, як потужність необоротних перетворень введеної в контакт енергії. Тому, наприклад, такі параметри, як інтенсивність зношування, трансформація шорсткості поверхні, включаючи формування рівноважної шорсткості тощо, не залишаються незмінними після точок біфуркації в процесі еволюції системи. Ці властивості, що впливають на функціональну придатність пар тертя в процесі експлуатації, можуть принципово змінюватися в залежності від параметрів взаємодіючих підсистем.

Енергія, яка витрачається на деформаційні перетворення, відіграє вирішальну роль у визначенні механічних властивостей і поведінки матеріалів. Наприклад, на міцність і пластичність матеріалу впливає кількість енергії, необхідної для пластичної деформації. Матеріали, які потребують великої кількості енергії для пластичної

деформації, як правило, міцніші, але менш пластичні, ніж матеріали, які потребують меншої кількості енергії.

Всі види трансформації і руйнування в трибосистемах можна поділити на групи: нормальні теоретично неминучі, але практично допустимі процеси зношування, і не припустимі явища пошкоджуваності, що виникають при порушенні умов самоорганізації [10]. При цьому сутність самоорганізації елементів трибосистеми в цілому полягає в енергетичній доцільності перетворення початкової структури в найбільш вигідну, економну і стійку структуру за даних умов навантаження [6].

В роботі [11] експериментально підтверджено, що для збереження нормальної роботи трибосистеми в критичних умовах першочергове значення належить стійкості граничного шару мастильного матеріалу до механічної деструкції, спричиненої збільшенням градієнта швидкості зсуву. Зазначено, що пошкодження суцільності змащувального шару при терті є провідним чинником, що обумовлює інтенсифікацію енергетичних процесів в зоні тертя, які призводять до порушення структурної пристосованості метал-мастильний матеріал та руйнування утворених метастабільних дисипативних структур.

Результатом структурної пристосованості елементів трибоспряження є формування зносостійких структур. Різні літературні джерела трактують їх як вторинні структури (термін в пострадянських країнах поширений) або дисипативні структури (термін запропонував І. Пригожин). Результат, якого досягає трибосистема при формуванні дисипативних структур – це зменшення зносу. Це підтверджується і принципом Ле-Шательє [12]: трибосистема пристосовується до зовнішнього впливу, результатом такого пристосування є зміни, направлені на зменшення цього впливу.

Вторинні структури відносяться до змін у формі, текстурі та складі поверхонь, які відбуваються в результаті фрикційної взаємодії. Ці структури можуть приймати різні форми, такі як ділянки зносу, канавки, ямки та тріщини.

Утворення вторинних структур на поверхні тертя може мати важливі наслідки для роботоздатності та довговічності поверхонь. У деяких випадках ці структури

можуть знизити ефективність поверхонь, збільшуючи силу тертя, зменшуючи площу поверхні, доступну для контакту, або спричиняючи пошкодження поверхні.

Відомо, що під дією швидкості ковзання, прикладеного тиску і температури в зоні тертя при роботі матеріалу з твердим змащувальним матеріалом на повітрі у ньому протікають процеси, котрі призводять до утворення вторинних структур: мастильних плівок, які формуються при високій концентрації сухих твердих мастильних матеріалів; деформованих, змінених по складу, структурі, структурному стану і механічним властивостям тонких шарів матеріалу з включеннями твердих мастил, так званих суцільних вторинних структурних [13].

Незважаючи на визнану важливість, механізми самоорганізації залишаються частково зрозумілими, в основному через складність і нелінійність, властиву таким системам. Розкриття механізмів утворення дисипативних структур може покращити розуміння їх функціонування та скерувати проектування більш ефективних систем. Під час роботи трибосистем на етапі припрацювання починається формування вторинних структур на робочих контактних поверхнях. Стан припрацювання у трибосистемі залежить від протікання незворотних процесів, які призводять до зміни ентропії та дисипативної самоорганізації. Дослідження дисипативних структур на початковому етапі їх утворення дозволяє вносити корективи (вибір мастильного матеріалу, навантаження, температури, швидкості та ін.) на початковому етапі напрацювання [14]. Зменшення ентропії свідчить про впорядкованість системи тертя. За інших рівних умов поява дисипативних структур призводить до зниження виробництва ентропії та швидкості зношування [15]. Основна причина цього полягає в тому, що частина енергії тертя, яка за відсутності самоорганізації була б витрачена на знос, натомість витрачається на формування дисипативних структур у результаті процесу самоорганізації.

Фізичні показники сумісності трибосистем впливають із сформульованого Л. А. Бершадським принципу дисипативної (вторинної) гетерогенності, що управляє структурною пристосовністю трибосистем [16]. Відповідно до цього принципу в

процесі тертя всі види взаємодії локалізуються в вторинних структурах, які необхідні для розсіювання енергії при її переході із зони тертя в тіла, що труться. Причому розсіювання енергії має відбуватися з найменшою швидкістю приросту ентропії. Процеси тертя розвиваються в сильно нерівноважних областях [17, 18] Оскільки виробництво ентропії в поверхневих шарах під час тертя зменшується, швидкість зношування також падає. Зменшення виробництва ентропії процесів, що відбуваються в поверхневих шарах, може бути досягнуто як наслідок самоорганізації при формуванні дисипативних структур [19]. У роботі [20] показано, що швидкість зношування тіл тертя змінюється відповідно до процесів виробництва ентропії, які відбуваються всередині трибоплівок, що утворюються на поверхні тертя.

Самоорганізація та умови її виникнення представляють особливу увагу під час процесів тертя. На даний момент не існує попередніх ознак, здатних вказувати на можливість самоорганізації та утворення дисипативних структур [21]. Проте існує достатня умова можливості самоорганізації – втрата системою термодинамічної стійкості [22].

Відповідно до [23], максимальне виробництво ентропії є умовою ініціювання в трибоплівках процесу самоорганізації, здатного суттєво знизити швидкість зношування. Авторами розглядається можливість застосування припрацювання тіл тертя у жорстких режимах, наближених до схоплювання. В таких умовах прискорюється активація трибопроцесів, відбувається кореляційне зменшення періоду припрацювання та часу початку самоорганізації, що призводить до зниження загального зносу. У роботі [24] розглянуто нову технологію вибору зносостійких матеріалів, засновану на виборі матеріалів, що прискорюють формування дисипативних структур. Авторами показано, що інтенсивність процесу зношування для формування дисипативних структур нижче, ніж для формування рівноважних поверхневих структур.

Представлена в [25, 26] методика дослідження процесів самоорганізації за параметрами термоокислювальної стабільності мастильних матеріалів при циклічній

зміні температури дозволяє визначити кількісні показники процесів самоорганізації, при яких надмірна теплова енергія переходить на нижчі енергетичні рівні з утворенням продуктів окислення та випаровування, за якими встановлюють температурну область працездатності мастильних матеріалів та їх ресурс.

У роботі [27] встановлено, що при терті сталі в мастильному середовищі (трансмісійні оливи на основі ефірів пентаеритриту та органосилоксанових рідин) на поверхні сталі формуються захисні поверхневі плівки із сполук сірки та кремнію. Зазначено, що наявність неокисленого заліза на доріжці тертя сприяє виникненню каталітичних реакцій, що призводять до утворення поверхневих плівок з молекул мастильного матеріалу, які знижують коефіцієнт тертя на 70–80%.

Результати досліджень [17, 27] свідчать, що в процесі тертя на формування дисипативних структур витрачається понад 90% від загальної підведеної до трибосистеми енергії, внаслідок чого утворюється дисипативна зона з підвищеним рівнем внутрішньої енергії в поверхневих шарах.

У роботі [28] встановлено утворення граничних плівок під час нормальних процесів припрацювання, що сприяло зменшенню тертя та швидкості зношування. Утворення плівки на поверхні може відбутися в перші 40 секунд за рахунок сил взаємодії активованого металу з вільними радикалами або ненасиченими зв'язками молекул органічного мастила [29]. Ефективне утворення граничних плівок відбувається за рахунок додавання до базових олив поліфункціональних присадок [30].

В роботі [31] виявлено що, в залежності від режиму тертя робочої поверхні композиційних антифрикційних матеріалів Fe-W-CaF_2 нагріваються до різних температур. Крім того, наявність у вторинних плівках інтерметалідів Fe_7W_6 свідчить, що температура, індукована тертям в робочій поверхні, може бути вищою за 570 °C. Такі високі температури сприяють, згідно результатам роботи [32], формуванню у структурі метал-мастильна плівка композиційних антифрикційних матеріалів зони зародженню оксидів, котрі сприяють збільшенню адгезії до робочої поверхні плівок композиційних антифрикційних матеріалів і зростанню міцності та товщини останніх.

Вторинні структурні мастильні плівки за рахунок присутності в них твердого мастила зменшують коефіцієнт тертя і запобігають механічному контакту робочих поверхонь пари тертя, витримуючи підвищені швидкості ковзання.

Термін служби, надійність, міцність конструкцій і техніко-економічні характеристики деталей машин і обладнання значною мірою визначаються механічними властивостями сталі і сплавів, з яких вони виготовлені. Тому поліпшення якості поверхні деталей машин і механізмів збільшує термін їх служби, особливо якщо це визначається механічними і триботехнічними властивостями поверхні [33].

Найважливіші зміни матеріалу, що відбуваються при терті, знаходяться в тонкому (декілька мікрометрів) поверхневому шарі, в якому відбувається генерація дефектів деформації (точкові дефекти, переміщення, смуги ковзання і т. д.) внаслідок локалізації напружень і їх імпульсного характеру в приповерхневих шарах контактуючих при терті елементів трибоспряження [34].

Підсумовуючи, утворення вторинних структур на поверхні тертя є результатом складної взаємодії фізичних і хімічних процесів, які відбуваються під час взаємодії двох поверхонь. Ці структури можуть мати різні форми, від простих натирів/задирів від зносу до складних виривів у вигляді канавок і ямок. Формування вторинних структур може мати важливі наслідки для роботоздатності та довговічності поверхонь тертя, а глибше розуміння цих процесів може допомогти оптимізувати проектування та роботу фрикційних систем у широкому діапазоні застосувань.

1.2. Закономірності зношування в процесі самоорганізації дисипативних структур.

Тертя є дисипативним процесом, у якому значна частка роботи зовнішніх сил направлена на поглинання енергії матеріалом поверхневих шарів і утворення теплоти. Процес дисипації проявляється в пружно-пластичній деформації поверхневих шарів металів. Фізико- механічні й хімічні властивості цих шарів, що істотно впливають на взаємодію твердих тіл при зовнішньому терті та їх зношування, відрізняються від

аналогічних властивостей основного матеріалу – внаслідок надлишку потенційної енергії поверхневі шари проявляють високу адсорбційну активність. При цьому напружено-деформований стан поверхневих шарів при терті, який обумовлений дискретністю контакту й виникненням максимальних напружень у мікрооб'ємах поверхневого шару, визначає механізм пластичної деформації [35].

Трибосистема в процесі експлуатації зазнає еволюційних змін, які проявляються у зміні властивостей і стану компонентів триботехнічної системи та посилюються в точках біфуркації. Встановлено, що зростання точок біфуркації призводить до підвищення ймовірності прояву деформаційних процесів з домінуванням пластичної складової, що прискорює реалізацію катастрофічної стадії зношування трибосистеми [36].

Експериментально визначені показники питомої роботи тертя в триботехнічному контакті в умовах масляного голодування, одержані в [37], свідчать про прояв процесів схоплювання у фрикційному контакті відбувається при поглинанні енергії граничної величини поверхневим об'ємом металу, що спричинює інтенсифікацію руйнування матеріалу контактних поверхонь. У періоди нормальної роботи трибосистеми та при формуванні та відновленні дисипативних структур відбувається збільшення питомої роботи тертя, але цей показник швидко зменшується на стадії схоплювання контактних поверхонь. Руйнівні процеси, ознаки хаотичної динаміки можуть проявлятися і в мастильному матеріалі, який у процесі експлуатації піддається механохімічним перетворенням і насичується продуктами зношування, що призводить до зниження його змащувальних властивостей. Наслідками інтенсифікації трибохімічних процесів на межі між мастилом і активованими поверхнями тертя можуть бути корозійні явища та втомне зношування з періодичною зміною тиску в зоні тертя [38]. Наприклад, при попаданні дизельного палива в моторну оливу погіршуються його трибологічні характеристики, прискорюється деградація оливи і підвищується ступінь його окислення [39].

Аналіз особливостей мікродеформації поверхневих шарів та механізмів зношування титану представлено в роботі [40]. Встановлено, що зниження роботи пружно-пластичної деформації титану спричинює зменшення опору його руйнування при терті у 2-3 рази, в порівнянні з вихідним станом. Основні механізми зношування полягають в утворенні тріщин і крихкому руйнуванні поверхневих шарів.

Аналіз триботехнічних показників трибосистеми при змащуванні пластичними мастилами встановив найбільший вплив на зношування сталі таких параметрів, як контактне навантаження, питома робота тертя, товщина мастильного шару [2]. Авторами запропоновано емпіричну залежність зносу елементів трибомуфти від зазначених факторів, що дозволяє прогнозувати інтенсивність їх зношування в критичних умовах, до яких відносяться умови переходу трибосистеми на режим напівсухого змащування з обмеженою подачею мастила до зони тертя. За таких умов змащування посилюється руйнування раніше утворених граничних плівок і зростає енергетична напруженість фрикційного контакту за рахунок збільшення пружнопластичних деформацій, що призводить до збільшення інтенсивності зношування сталевих поверхонь.

В роботі [41] представлено результати експериментального визначення енергоємності поверхневих шарів перлітної основи чавунів. Зазначено, що робота деформації знаходиться в зворотній залежності від механічних властивостей чавуну. При цьому енергоємність поверхневих шарів металу являється функцією сил деформації, за якою можливо встановлювати межі силових характеристик контактних поверхонь при зношуванні в абразивному середовищі. За енергоємністю поверхневих шарів металу також можна оцінювати здатність поверхневих шарів до накопичення деформації та здатність чинити опір зносу за умов впливу абразивного зерна.

Тертя спричинює появу деформаційних процесів в поверхневих та приповерхневих шарах контактних поверхонь, призводить до зародження та формування мікротріщин, подальший розвиток яких викликає руйнування поверхневих мікрооб'єктів.

Згідно [42], система перетворень трибохімічних процесів починається з накопичення енергії на поверхні активованих в процесі тертя твердих тіл. У результаті контактної взаємодії велика кількість енергії накопичується за дуже короткий час і на дуже малій площі поверхні. Причиною накопичення енергії є низька швидкість електронних збуджень у реальній системі. У деяких випадках утворюються сильно заряджені стани, які за енергією наближаються до трибоплазми. Вони характеризуються неупорядкованістю кристалічної структури та наявністю неупорядкованих кристалічних фрагментів у вигляді компонентів кристалічної решітки (іонів, електронів). Ця фаза характеризується накопиченням енергії з утворенням великої кількості електронів, через що реакційна здатність трибосистеми в кожному місці дуже висока. Надлишкова емісія електронів змінює синергетичний характер процесу, що пов'язано з утворенням ювенільних поверхонь, рухом дислокацій, утворенням дефектів кристалічної решітки, розтріскуванням, а в кінцевому випадку протіканням трибохімічних реакцій.

Абразивний знос, що проявляється при роботі вузлів і агрегатів машин, спричинений нерівностями контактних поверхонь, або частинками, що знаходяться між двома поверхнями, що рухаються в протилежних напрямках. Швидкість стирання значно відрізняється для абразивів різної твердості, розміру та форми. Швидкість зношування зростає приблизно лінійно зі збільшенням прикладеного навантаження на одиницю площі, аж до навантажень, при яких відбувається значне руйнування абразиву [43]. Зносостійкість, як правило, зростає зі збільшенням твердості матеріалу, за винятком випадків, коли матеріали зміцнюються попередньою пластичною деформацією, яка зменшує деформацію при руйнуванні.

Якщо взаємодію абразивних часток з перлітною основою чавунів розглядати з позицій міцністних і мікрогеометричних параметрів, то, згідно [43], не можливо узагальнити характеристики поведінки поверхневих шарів та визначити критерії зміни механічних характеристик металу в процесі абразивного зношування. Автор пропонує в якості узагальненої характеристики використовувати енергоємність структурних

складових металів. Саме цей параметр дозволяє оцінювати стан поверхневих шарів щодо накопичення деформації та характеризує їх здатність чинити опір зношуванню в умовах дії абразивного середовища. Оскільки параметр «енергоємність поверхневих шарів металу» є функцією деформаційних впливів в зоні контакту, то можливо встановлювати межі силових характеристик контактних поверхонь при абразивному зношуванні [42]. Рівняння зносу Арчарда часто використовується для оцінки швидкості зносу конструкційних матеріалів, яке стверджує, що втрата об'єму матеріалу внаслідок зносу обернено пропорційна його твердості, а пропорційна нормальному навантаженню і шляху ковзання.

В роботі [45] представлено аналіз термодинамічних систем та їх складових. Як зазначають автори, в одній підсистемі протікають лише деформаційні процеси, а в іншій підсистемі домінують трибохімічні реакції. Процеси незворотнього пошкодження системи обумовлені накопиченням та взаємодією дефектів структури, хімічною чи електрохімічною взаємодією металу та середовища. Загалом термодинамічна система є ізотропною, а процеси втомного характеру проявляються за ізобарно-ізотермічних умов, що характерно для зубчастих передач.

При терті в поверхневих шарах елементів трибоспряжень протікають необоротні процеси зміни вихідного стану поверхні, до яких можна насамперед віднести приріст густини дислокацій, зміну параметрів кристалічної решітки, пружно-пластичні деформації, утворення дисперсних фаз та ін. [46].

Розглянемо механізм реалізації процесів втоми. Початковий етап малоциклової втоми внаслідок дії знакозмінного контактного навантаження спричинює деформацію поверхневих шарів, зміцнюючи їх до стану, наближеного до активного статичного зміцнення. Подальші значні навантаження пов'язані з пружною попередньою деформацією поверхневих шарів. Перехід до пружного циклічного режиму деформування пов'язаний, з одного боку, зі зменшенням ефективної амплітуди еквівалентного навантаження за рахунок зміцнення металу, а з іншого – з полегшенням умов тертя з появою продуктів зношування. Далі процеси розвиваються за звичайними

законами втоми [47]: раніше знеміщені шари спочатку руйнуються до певного рівня, а потім (в умовах попередньої деформації) знову зміцнюються з подальшим знеміченням [46]. Процеси втоми супроводжуються інтенсивним утворенням вакансій, злиття яких призводить до утворення пор і мікротріщин [48].

У результаті багаторічних досліджень методи розрахунку зубчастих передач розроблено для циліндричних та конічних прямо- і косозубих передач, а також черв'ячних передач. Вони базуються на відомій у літературі методології дослідження кінетики зношування при терті ковзання як процесу поверхневого фрикційно-втомного руйнування матеріалів [49]. В основу математичної моделі процесу, яка описує кінетику зношування, покладено, що швидкість зношування є функцією питомої сили тертя у фрикційному контакті. Ця гіпотеза зайшла своє підтвердження не лише у авторській методології, а й у численних працях інших дослідників. За результатами численних модельних трибоекспериментальних досліджень було встановлено, що інтенсивність зношування нелінійно залежить від питомої сили тертя [50].

Основними типами відмов зубчастих передач є втомне зношування, абразивний знос і поломка зубців внаслідок перевантаження, на частку яких припадає 77% всіх відмов. Результати досліджень [51] показують, що динамічні навантаження істотно впливають на цей тип відмови передач у процесі експлуатації. Вони виникають у процесі роботи зубчастої передачі та діляться на внутрішні та зовнішні. Джерелом внутрішніх динамічних навантажень є зубчасті колеса трансмісії, що працюють в умовах навантаження та здійснюють корисну роботу.

Залишкові напруження суттєво впливають на межу втоми матеріалу зубців шестерні. Для сталей із високою твердістю наявність стискаючих залишкових напружень забезпечує суттєве підвищення межі втоми, а розтягуючі напруження знижують межу витривалості. Зазначено [52], що знак залишкових напружень залежить не тільки від методів обробки, а й від режимів їх виконання. Зношування зубців із загартованих і малопластичних матеріалів зумовлене в першу чергу шорсткістю оброблених поверхонь – із зменшенням шорсткості знос зменшується. Це

підтверджено дослідженнями на зразках із загартованої сталі У8: зменшення шорсткості з 4,7 до 2,9 мкм дозволяє зменшити знос на 30%. Шліфування поверхневих шарів зубців, проведене після термічної обробки, значно підвищує втомну міцність в залежності від початкової шорсткості поверхні.

Механізм виникнення заїдання зуб'ів коліс у працюючих з мастилом закритих передачах складається з трьох етапів: перехід від контактної- гідродинамічного режиму мащення до граничного; перехід від граничного режиму мащення до металевого контакту; схоплювання матеріалів та руйнування ділянок схоплювання. Руйнування граничної плівки мастильного матеріалу між зубцями виникає насамперед на окремих виступах мікронерівностей і відбувається внаслідок великих пластичних деформацій матеріалів, від високих температур у зоні контакту, або з обох причин разом [53].

Одна і та ж величина деформації в поверхневих шарах контактних поверхонь зубчастих передач, залежно від матеріалу зубчастих коліс, може привести до їх крихкого/в'язкого руйнування або руйнування від втоми [54]. Оцінку напружено-деформованого стану зубчастого зачеплення проводять на основі фізико-математичних моделей [55, 56, 57] та за розподілом навантаження в зоні контакту, наприклад, поляризаційно-оптичним та іншими методами [58].

Розглянемо типові види зношування шестерених насосів та відмови гідравлічних систем, які використовуються в авіаційній техніці на основі «Методики проведення технічної експертизи насосів шестерених виробництва ПАТ «Гідросила»» [44]. Використання в гідросистемах оливи, які були в експлуатації, без попередньої перевірки їх на вміст механічних домішок і води, і навіть оливи, марка та характеристики яких не відповідають вимогам технічної документації механізмів, призводить до забруднення фільтрів та жиклерів, зависання золотників та клапанів, що входять до складу гідросистеми, швидкому зносу її вузлів. (в тому числі і насоса). Робота насоса під навантаженням при низьких робочих температурах рідини (підвищена в'язкість) також може призвести до швидкого зношування насоса (робоча рідина повинна бути попередньо прогріта на холостих оборотах насоса до 15 °С). При

несвоєчасній заміні гідравлічної рідини її в'язкість зменшується, що призводить до погіршення умов змащення насоса та його заклинювання [44].

Мастильний матеріал бракується в випадку перевищення механічних домішок 0,016% (рис. 1.1). Висушена крапля досліджуваного мастильного матеріалу утворює масляну пляму, яка порівнюється з еталонними пробами, і таким чином визначається забрудненість оливи.

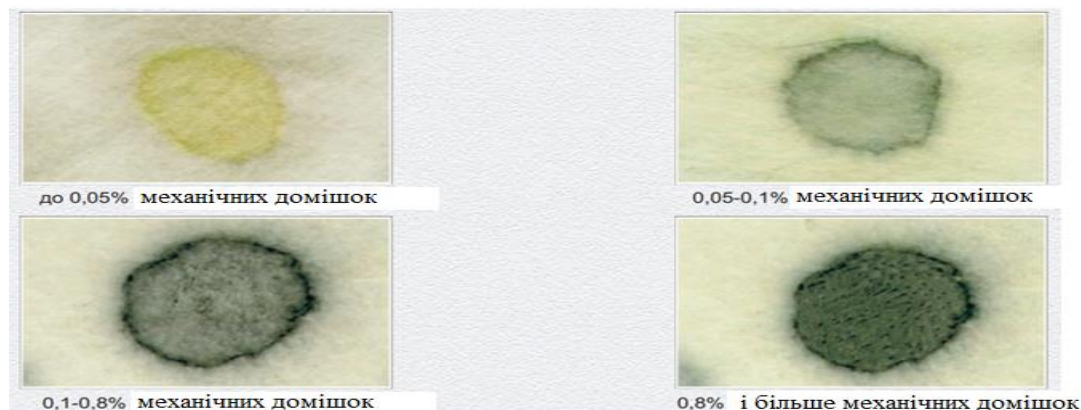


Рис. 1.1. Зразки масляних плям для візуального визначення забруднення оливи.

Існує низка причин відмов шестеренних насосів, які представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Причини відмов шестеренних гідравлічних насосів [44]

Абразивний знос	Зношування, викликане абразивною дією забруднень і дрібнозернистих механічних домішок у маслі.
Ерозія	Відфарбовування частинок металу з поверхні деталі утворенням шорстких ділянок із ямками.
Висока температура	Температура вище 93°C, при якій олійна плівка втрачає свою міцність і, частково, змащувальну здатність.
Відсутність оливи	Низький рівень оливи у баку. У цих випадках переміщення оливи в бак може залишити відкритим отвір з боку всмоктування.
Металеві домішки	Дрібні частинки металу в гідравлічному маслі, ймовірно, утворені в результаті зношування частин системи, видимі або невидимі неозброєним оком.
Кавітація	Виникнення та розрив пухирців пари в гідравлічній оливі.

Найчастіше причиною відмов насоса є абразивне зношування, обумовлене дрібними частинками. Ознакою абразивного зносу зазвичай є поступове зниження потужності та швидкості спрацьовування гідравлічної системи.

Дрібні частинки, що викликають абразивне зношування, зазвичай невидимі неозброєним оком. Вони мають діаметр трохи більше 40 мкм. Гідравлічна олива, в якій присутні такі частинки, може виглядати чистою і одночасно містити достатньо абразивних частинок, щоб викликати поломку насоса. Зовнішні прояви абразивного зношування, обумовленого присутністю в гідравлічній оливі дрібних частинок, наведені нижче на фото основних робочих деталей насосів.

На торці шестерень, у зонах основи зуб'ів, з'являється матова поверхня, схожа на слід піскоструминевої обробки. Поверхня цапфи шестерень є матовою, начебто від полірування тонкого наждакового паперу. Причиною є вдавлювання в поверхню дрібних абразивних частинок, що знаходяться в робочій рідині (рис 1.2, 1.3).



Рис 1.2. Прояви абразивного зношування.



Рис. 1.3. Абразивне зношування дрібними частинками, проникаючими під манжету: утворення канавок на поверхні валу.

Зазвичай відсутність робочої рідини призводить до швидкого виходу з експлуатації насоса. Причини відмови бувають наступні:

- низький рівень оливи в баку;
- пропускання великої кількості повітря через всмоктуючий трубопровід.

Сильний знос упорних пластин, шестерень, металофторопластових підшипників, оплавлення пластмасових та руйнування гумових деталей – наслідки недостатньої кількості мастильного матеріалу (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Ознаки зношування деталей шестеренного насоса за умов обмеження гідравлічної рідини.

Відповідно до теорії N. Suh [58, 59, 60] початок деструктивних процесів у матеріалах деталей обумовлений наявністю зон напружень на певній глибині поверхневого шару. Справедливість даної теорії доводять результати комп'ютерного моделювання [61], на основі якого побудована узагальнена схема розташування характерних областей, що визначаються локалізацією напружень по певній глибині поверхневого шару однорідного полімерного матеріалу деталей, що знаходяться в відносно рухомому та нерухомому станах. Дослідження показують, що в процесі переміщення пар тертя, в зоні контакту від западин до вершин мікровиступів глибина

локалізації локальних полів напруження в поверхневому шарі досліджуваного полімерного матеріалу істотно не змінюється.

Аналіз моделювання [61] свідчить, що на основі вхідних параметрів контактування зразків, взаємного розташування локальних областей та товщини активного поверхневого шару, можна надавати рекомендації щодо цілеспрямованої зміни умов контактування, забезпечуючи найбільш сприятливі режими тертя в трибоспряженні.

Загальні закономірності і особливості напружено-деформованого стану поверхневих шарів на ділянках виступів мікронерівностей виявлені в залежності від товщини деформованого шару, рівня діючих напружень на спряжених деталях, форми виступів, їх висоти і кроку [55, 62, 63].

У дослідницькій роботі [64] проаналізовано зв'язок між відносною швидкістю переміщення поверхонь тертя та пружною деформацією в мастильному шарі з урахуванням основних положень термодинамічної теорії структурних станів граничного режиму мащення [65].

Імовірність руйнування структурованого адсорбційного шару під дією критичного напруження зсуву проаналізовано в [66]. Встановлено, що протизношувальні властивості поверхнево-активних речовин (ПАР) підвищуються як із збільшенням теплоти їх адсорбції на активованій при терті поверхні металу, так і з інтенсифікацією процесів, що призводять до хімічної адсорбції цих речовин на контактних поверхнях.

Мастильний шар сприяє зростанню гідродинамічного тиску та надійному роз'єднанню пар тертя, локалізації зсувних напружень у мастильному шарі та зниженню коефіцієнта тертя. Важливий вплив на формування шару мастильного матеріалу в трибоконтакті створює мікрорельєф контактних поверхонь. Результати дослідження пар тертя з неоднорідністю мікрорельєфу 15% і глибиною 19 мкм при змащуванні літєвим мастилом в умовах ковзання свідчать про високі антифрикційні властивості трибосистеми, наявність запасу мастила в поглибленнях мікрорельєфу та

підвищення ефективної в'язкості мастила, що зумовлює підвищення протизносних показників трибосистеми [67].

Значні похибки в розрахункових оцінках зносостійкості дають похибки і в оцінці ресурсу пар тертя, що пов'язано з складністю протікання процесів зношування і заїдання в певних експлуатаційних умовах. Також необхідно враховувати і додаткові причини – зміну мікрогеометричних, навантажувально-кінематичних і температурних параметрів контакту в процесі зносу, а також взаємного впливу різних пошкоджень зубців [68].

Для зубчастих передач зміни форми поверхонь тертя призводять до суттєвих змін – в результаті зносу змінюються радіуси кривизни контактних поверхонь, мікрогеометричні показники поверхні, що спричинює зміну розподілу нормальних контактних напружень і коефіцієнту тертя [69].

Застосування сучасних високопродуктивних технологічних засобів обробки зубчастих передач можуть забезпечити широкі можливості зміни мікрогеометричних показників поверхні, що потенційно може підвищити їх зносостійкість в процесі експлуатації [70].

Таким чином, огляд типів відмов та причини їх появи в зубчастих передачах ходових механізмах транспортних засобів, показав актуальність розробки заходів, направлених на підвищення їх зносостійкості. Несуча здатність зубчастої передачі визначається такими характеристиками зубців, як контактна міцність, втомна міцність на згинання і зносостійкість. Домінуючими причинами відмов зубчастих передач є зниження міцності зубців в зоні ніжки зуба, втомне викришування контактної поверхні в полюсній зоні зачеплення та знос профілю зуба [71].

1.3. Сучасні напрями трибомоніторингу якості мастильних матеріалів для підвищення ресурсу трибоспряження.

Серед факторів, що впливають на надійність пар тертя, особливе місце займають процеси тертя і зношування. Оцінка цих процесів є складною, оскільки кінетика їх

перебігу залежить від питомого тиску між взаємодіючими поверхневими шарами, мікроструктурних змін поверхневого шару та хімічних реакцій між матеріалами пар тертя [72, 73, 74].

Фундаментальні уявлення про правила вибору матеріалів триботехнічного призначення, розроблені І.В. Крагельським і його школою, лежать в основі матеріалознавчого аспекту зниження тертя і зношування, пов'язаного, передусім, з оптимальним структурним станом сплавів, наявністю в них гетерофазних структур, що забезпечують високу зносостійкість. Підбираючи поєднання конструкційних і мастильних матеріалів, необхідно передбачати умови для реалізації позитивного градієнта механічних властивостей по нормалі до поверхні тертя. В цьому випадку зсувні деформації концентруються в тонкому приповерхневому шарі матеріалу, що забезпечує мінімальну інтенсивність зношування сполучення [22].

В даний час існує два підходи до проведення аналізу мастильних матеріалів: аналіз мастильних матеріалів під час виробництва (вхідний контроль базових компонентів, присадок, товарних партій готової продукції) та аналіз експлуатаційної оливи (діагностичний контроль).

Ці два напрями відрізняються один від одного. Так, при виробництві, а також при вхідному контролі, необхідно, щоб показники якості потрапляли у задані, заздалегідь відомі межі, визначені стандартами та технічними умовами. При діагностичному контролі необхідно стежити не так за абсолютними значеннями тих чи інших показників якості, як за зміною цих величин у часі. Для кожного із зазначених напрямків контролю якості товарного або експлуатаційного мастильного матеріалу важливо правильно вибрати найбільш зручні методи аналізу показників, що цікавлять. До таких показників відносяться в'язкість, температура спалаху, вміст присадок, загальне кислотне/лужне число, вміст води, сажі, загальний вміст феромагнітних та інших частинок зносу, нітрування, сульфурвання та багато інших показників.

Правильний вибір мастильних матеріалів, своєчасна та якісна їх діагностика є однією з основних умов, що дозволяють збільшити довговічність, підвищити

працездатність та зберегти на тривалий період технологічну точність машин та механізмів. Своєчасний та якісний трибомоніторинг мастильних матеріалів надає перспективу щодо їх раціонального використання, зменшення зносу деталей обладнання. Дані заходи направлені на здешевлення ремонту машин і механізмів, скорочення їх простою та сприяють зниженню собівартості продукції, що випускається.

Розкриття механізму самоорганізації метастабільних дисипативних структур при терті допоможе проводити відповідний підбір мастильних матеріалів, який дозволить підвищити ймовірність процесу самоорганізації для зниження інтенсивності зношування трибосистеми.

Таким чином, формування зносостійких дисипативних структур при терті необхідно розглядати як сукупність механічних активаційних процесів в верхніх поверхневих шарах елементів трибоспряження та хімічної модифікації поверхонь тертя активними компонентами мастильного матеріалу, раціональний вибір якого забезпечить можливість підвищити довговічність пар тертя в експлуатаційних умовах [4].

У роботі [73] розроблена експрес-методика визначення ресурсних показників мастильних матеріалів у процесі їх експлуатації. Проведено дослідження мастильних матеріалів при додаванні присадок на чотирьохкульковій машині тертя згідно ГОСТ 9490-75 [74]. Проводилось моделювання процесів старіння мастильних матеріалів випробуванням у локальному об'ємі під меншим з двох навантажень.

Розроблена методика дослідження процесів самоорганізації за параметрами термоокислювальної стабільності мастильних матеріалів при циклічній зміні температури дозволяє визначити кількісні показники процесів самоорганізації, при яких надмірна теплова енергія переходить на нижчі енергетичні рівні з утворенням продуктів окислення та випаровування, за якими встановлюють температурну область працездатності оливи [75].

Отримано функціональні залежності та регресійні рівняння зміни коефіцієнтів поглинання світлового потоку, відносної в'язкості, леткості та термоокислювальної стабільності при циклічній зміні температури випробування, що дозволяють кількісно оцінити: процеси самоорганізації; опірність олів температурним впливам; схильність до забруднення масляних систем; пускові властивості; температурну область працездатності та ресурс, а також ідентифікувати та встановлювати групи експлуатаційних властивостей, що спрощує процедуру їх вибору для машин та агрегатів різного ступеня навантаженості [76].

1.3.1. Вплив якості гідравлічних олів на надійність гідравлічної системи повітряних суден.

Гідравлічні агрегати і пристрої застосовують на сучасних повітряних судах (ПС) досить широко. Гідравлічна система (ГС) літака забезпечує управління системами та механізмами, що визначають безпеку польоту. Довговічність, експлуатаційна живучість і надійність гідросистеми забезпечує досконалість конструкції агрегатів. Гідравлічні системи призначені для управління стабілізатором та рулями, для прибирання та випуску шасі, злітно-посадкової механізації та ін. Головний недолік ГС – робота агрегатів системи під високим тиском: тут переважає підвищене зношування деталей, в результаті якого відбувається забруднення робочої рідини, тому гідравлічна система повинна піддаватися своєчасному технічному обслуговуванню [77]. До складу авіаційних гідравлічних систем входять форсовані гідравлічні насоси. Забезпечення їх працездатності вимагає достатнього рівня трибологічних властивостей олів. Умови роботи гідравлічних рідин у гідросистемах характеризуються такими параметрами: тиск – 20 МПа; діапазон робочих температур від -50 °С до +80 ... 100 °С; швидкості ковзання пар тертя становить 20..25 м/с [78].

На характер роботи ГС та її надійність суттєво впливають властивості робочої рідини. Оливи для авіаційних гідравлічних систем повинні володіти оптимальним рівнем в'язкості, високими в'язкісно-температурними властивостями в широкому

діапазоні температур, стійкістю до окислення і антипінними властивостями. Оливи також повинні мати достатній рівень трибологічних характеристики і бути сумісними з конструкційними і ущільнювальними матеріалами вузлів і агрегатів гідравлічної системи. Знижена в'язкість гідравлічної оливи обумовлює найбільш інтенсивний прояв втомних видів зношування контактуючих деталей гідросистеми. Підвищена в'язкість значно збільшує механічні втрати приводу, ускладнює відносне переміщення деталей насоса і клапанів, унеможлиблює роботу гідросистем в умовах знижених температур.

В роботі [79] проведено аналіз властивостей гідравлічних рідин, що використовується в літаках сімейства А320 та надані рекомендації щодо визначення інтервалу їх заміни. Однак, дослідження якості експлуатаційних олив базувалися на оцінці фізико-хімічних показників мастильних матеріалів – кислотного числа, густини, наявності домішок та кінематичної в'язкості олив. В наданих рекомендаціях щодо термінів заміни гідравлічних олив не приділяється увага оцінці триботехнічних показників розглянутих матеріалів.

Проаналізовано, що олива АМГ-10, як і інші гідравлічні рідини із загусником базової фракції, у процесі роботи піддаються механічній деструкції, що призводить до падіння їх в'язкості [80]. Інтенсивність механічної деструкції залежить від умов експлуатації; температури, тиску в системі та характеру його перепадів при роботі, від конструкції насоса, його продуктивності, а також від об'єму робочої рідини. У гідросистемах сучасних ПС термін служби АМГ-10 різко скорочується і може становити трохи більше 100-200 год. В даний час експлуатація оливи АМГ-10 проводиться до падіння її кінематичної в'язкості при 50 °С до 7 мм²/с (сСт) і появи в ній механічних домішок вище допустимої норми.

Встановлено [81], що необоротне зниження в'язкості обумовлено механічним руйнуванням (деструкцією) основи рідини або присадки, що застосовується для поліпшення в'язкісно-температурних властивостей, і зазвичай властиво рідинам, що мають великі молекули з довгими ланцюгами. При зміні температури з мінус 60⁰С до + 100⁰С в'язкість зазвичай зменшується від 3000...4000 до 5...10 сСт, що необхідно

враховувати при проектуванні та моніторингу стану ГС, застосовуючи відповідні конструктивні заходи щодо нагрівання або охолодження рідини.

Проведені дослідження щодо визначення експлуатаційного стану авіаційних гідравлічних рідин з ефірів фосфорної кислоти на основі принципу зондування із застосуванням інфрачервоного неруйнівного поглинання встановили FTIR-спектри ліній поглинання, що залежать від типу забруднення [82]. Такі спектри відповідають двом важливим параметрам хімічного забруднення гідравлічних рідин – утворення води та кислоти, що можна відстежувати за змінами смуг валентних коливань О-Н у середньому інфрачервоному діапазоні від 3,12 до 2,63 мкм. Спроековано сенсорну систему для онлайн-моніторингу стану гідравлічних рідин, чутливість якої з виявлення води становить 0-1,5%, що відповідає діапазону забруднення води, яке може виникнути при практичній експлуатації ПС. При цьому доступний діапазон виявлення загального кислотного числа становить 0-1 мг КОН/г, що менше, ніж максимальне нормоване значення допустимого загального кислотного числа при заміні оливи, яке становить 1,5 мг КОН/г.

В роботі [83] фізико-хімічні та експлуатаційні властивості оптимізованих зразків олив досліджуються в розширеному обсязі методів кваліфікаційних випробувань. Експлуатаційні властивості нових олив порівнюються зі штатними аналогами системою порівняльної оцінки якості олив. Всі результати розрахунково-експериментальних досліджень властивостей дослідних зразків включаються в електронну базу даних, на основі якої розробляються рекомендації по впровадженню нових олив.

У багатьох ПС в гідросистемі застосовується гідравлічна авіаційна олива АМГ-10. Змащувальна здатність оливи АМГ-10 цілком достатня для запобігання зносу гідропристроїв. Для забезпечення стабільності протягом тривалого терміну служби (2-3 роки) з нафтової основи оливи АМГ-10 видалені ненасичені вуглеводні і додається антиокислювальна присадка. Основним недоліком оливи АМГ-10 є його низька пожежна безпека (температура спалаху у відкритому тиглі не перевищує 90 °С). Крім

того, при експлуатації гідравлічних систем на оливі АМГ-10 відбувається зниження його в'язкості через поступову деструкцію загущуючої присадки. Це призводить до занадто грубої роботи механізмів, перетікання всередині гідропрстроїв або до зовнішнього витоку [84].

Для підвищення експлуатаційних характеристик мінеральних олив для гідравлічних систем їх готують з високоочищених нафтових фракцій з індексом в'язкості не менше 85 з малосірчаних або сірчаних нафт, що пройшли кислотно-лужну або селективну очистку [85]. В табл. 1.2 представлена бальна оцінка якості гідравлічних олив залежно від базової основи.

Таблиця 1.2

Залежність фізико-хімічних показників гідравлічних олив від базової основи

Показники	Основа				
	Мінеральна	Силоксанова		Ефірна	
Температура застигання	3*	1		1	
Індекс в'язкості	4	1		2	
Низькотемпературна плинність	3	2	1	2	
Окислювальна стабільність	4	2		2	1
Мастильні властивості	2	4		1	
Здатність розчиняти присадки	1	3		1	
Сумісність із мінеральними основами	-	3		3	2
*Характеристика рівня показників: 1 – чудовий; 2 – хороший; 3 – середній; 4 – недостатній [86].					

Важливим чинником забезпечення високої роботоздатності вузлів тертя є якісний вибір мастильних матеріалів з високими змащувальними, антифрикційними та протизношувальними характеристиками [87]. Аналіз публікацій щодо оцінки зазначених характеристик олив для гідравлічних систем показав, що комплексних досліджень в цьому напрямку не проводилося. Серед різних виробників товарних партій олив важливо підібрати такий мастильний матеріал, який відповідає не лише заявленим фізико-хімічним характеристикам, але й володіє ефективними

триботехнічними властивостями. Однак, для широкого спектру мастильних матеріалів не нормуються триботехнічні показники. Тому розробка методик оцінки якості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті є актуальним напрямком досліджень, за результатами яких можливо надати рекомендації щодо роботоздатності олив в певних експлуатаційних режимах.

1.3.2. Оцінка ефективності мащення в локальному контакті зубчастих передач за реологічними параметрами.

Тертя між поверхнями за умов проковзування при контакті зубів шестерні є основним джерелом втрат потужності в зубчастих передачах. Визначення сили тертя є важливим параметром для прогнозування опору задирам і довговічності поверхні шестерень як на етапі їх проектування, так і на етапі експлуатації [88]. Тонка плівка мастильного матеріалу розділяє пружно деформовані тверді тіла, забезпечуючи мінімальний контакт між мікронерівностями поверхонь при високих навантаженнях. Існування цієї плівки можливе через дуже велике збільшення в'язкості мастильного матеріалу зі збільшенням тиску в еластогідродинамічному контакті. У сильно навантажених еластогідродинамічних контактах зубчастих передач мастильний матеріал може піддаватися швидкому підвищенню тиску від атмосферного до більш ніж одного гігапаскаля всього за 0,1 мілісекунди. У той самий час мастильний матеріал піддається зсуву, що зумовлює виділення тепла. Температура може досягати кількох сотень градусів за Цельсієм. Крім того, швидкість ковзання при проковзуванні та контактне навантаження швидко змінюються у міру проходження зубів по лінії контакту. Дуже складна реологічна поведінка мастильного матеріалу у цих екстремальних умовах виключає використання стаціонарних (статичних) вимірів з метою оцінки властивостей рідини.

Основна мета будь-якого мастильного матеріалу – підтримувати оптимальну мастильну плівку між контактуючими поверхнями, і важливість в'язкості для досягнення цієї мети однозначно відома в практиці промислового обслуговування.

Однак при такому простому розумінні в'язкості мастильного матеріалу часто не беруть до уваги різницю між ефективною в'язкістю і заявленою (виміряною в лабораторії) в'язкістю будь-якого мастильного матеріалу. На в'язкість мастильного матеріалу може фізично та/або хімічно впливати ряд факторів; однак найбільш важливими факторами, що впливають, є температура, тиск і напруження зсуву [89]. Ці фактори, у свою чергу, залежать від тертя, навантаження, швидкості та умов експлуатації машин та механізмів. Крім того, хімічний склад мастильного матеріалу та будь-які його зміни під час експлуатації є також важливими причинами, що впливають на ефективну в'язкість мастильного матеріалу. Таким чином, виміряна в лабораторії в'язкість різко відрізняється від в'язкості всередині трибосистеми під час роботи. Ця різниця неминуча, оскільки будь-яка механічна система схильна до зміни зовнішніх і механічних робочих факторів (температури, навантаження, швидкості, тертя і т. д.).

В'язкість будь-якого промислового мастильного матеріалу часто вказується в каталозі виробника в стандартизованих одиницях вимірювання. Однак, динамічна в'язкість зазвичай вимірюються в лабораторіях при атмосферному тиску і часто за допомогою стендових приладів, таких як віскозиметри з вантажем. Основними обмеженнями цих приладів є обмежений діапазон низьких напружень зсуву.

Класична гідродинамічна теорія мащення розглядає стан мастильного матеріалу як рідини, яка підпорядковується реологічному закону Ньютона-Стокса [90]:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}, \quad (1.1)$$

де τ – напруження зсуву; η – динамічна в'язкість мастильного матеріалу, яка є функцією температури та тиску в мастильному шарі; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву.

Ньютонівська реологічна модель мастильного матеріалу покладена в основу багатьох інженерних методик розрахунку слабонавантажених підшипників ковзання, де нормальне напруження та напруження зсуву в мастильному шарі невеликі [91]. На основі експериментальних досліджень еластогідродинамічного режиму мащення проаналізовано тертя та температура в масляному шарі залежно від швидкості ковзання [92]. У цьому аналізі передбачалося, що масляна плівка поводить як

ньютонівська рідина з в'язкістю, яка залежить тільки від тиску та температури. Автори припустили, що зміна в'язкості в залежності від температури та тиску є експоненційною з постійними коефіцієнтами ступеня. У роботі [93] встановлено, що при крутному моменті 80 Нм і частоті обертання зубів 800 об/хв розрахункові значення максимального тиску по Герцу склали 1,41 Гпа, товщина мастильного шару 0,49 мкм, а півширина контакту за Герцем 0,19 мм. Висока в'язкість мастильного матеріалу, обумовлена лише тиском, змінюється під впливом температур вище 140 °С. Теоретичний розрахунок сили тертя при низьких швидкостях спричинив нереально високі значення сили тертя, що підтвердило обмеження застосованої моделі.

Огляд експериментальних досліджень поведінки мастильних матеріалів в умовах дії високих напружень для підшипників кочення та зубчастих передач [94, 95] показує, що ньютонівська модель поведінки мастильних матеріалів недостатня для пояснення їхньої несучої здатності. Найбільш відомими неньютонівськими властивостями є: залежність в'язкості від швидкості зсуву та від величини зазору; вплив на в'язкість структурних компонентів мастильного матеріалу; релаксація дотичних та поява нормальних напружень у мастильному шарі.

Згідно [96], мастильний матеріал характеризується неоднорідністю реологічних властивостей по товщині плівки в фрикційному контакті: біля стінки утворюються поверхневий граничний шар з реологічними властивостями, відмінними від властивостей основної частини матеріалу в центрі. Так як у процесі роботи системи в ній створюється тиск, мастило починає текти прямо біля стінки. При цьому швидкість потоку дорівнює нулю, а в'язкість мастила максимальна [97]. На реологічні властивості мастильного матеріалу суттєвий вплив може створювати матеріал контактних поверхонь. У дослідницькій роботі [98] представлені результати досліджень формування граничних шарів у промислових літєвих (ЛТ4-С3) та кальцієвих (СТП) мастилах поблизу стінок з шести різних матеріалів: два еластомірні матеріали (нітрил-бутадієновий каучук (NBR), силіконовий каучук (MVQ/VMQ)), два термопластичні матеріали (поліоксиметилен (POM), поліетилен (PE)) і два металеві

сплави (мідь C11000 і сталь 304). Випробування показали, що сплави металів мають найбільшу здатність адсорбувати на своїй поверхні частинки мастила. Найменший вплив на зміну структурної в'язкості поблизу стінки надають еластомірні матеріали, що свідчить про їхню низьку здатність утворювати поверхневий шар у випробуваних товарних мастилах.

В роботі [99] розглянуто механізм прилипання граничного шару мастила до поверхонь, що утворюють гідродинамічний клин: якщо молекули мастильного матеріалу знаходяться в безпосередній близькості до твердого тіла, то їхнє поведіння багато в чому обумовлюється впливом сил з боку цього тіла. Для масляної плівки, що перебуває в таких „межових” умовах, характерна особлива реологія, проміжна між реологією твердих тіл і рідин. З віддаленням від поверхні твердого тіла, вплив створюваного ним силового поля послаблюється, і до мастила повертаються його об'ємні властивості. При цьому межові плівки мають товщину $0,01 \div 0,05$ мкм і менше.

Мастильні матеріали поведуться неньютонівським способом, коли вони проходять через контактну еластогідродинамічну зону, яка характеризується надзвичайно високим тиском, зазвичай вище 0,5 Гпа, і дуже високою швидкістю зсуву, як правило, 10^6 - 10^8 с⁻¹ [100]. Ці умови призводять до того, що в мастильному матеріалі забезпечується велике збільшення в'язкості та він піддається дії високого напруження зсуву, що створює неньютонівську поведінку мастильного матеріалу. Неньютонівська поведінка може демонструвати потоншення/потовщення при зсуві, граничне напруження зсуву, в'язкопружність або поведінку Максвелла.

Джонсон і Кемерон виявили значне зниження швидкості збільшення в'язкості при тиску вище 0,7 Гпа та висунули гіпотезу пластичного зсуву при досягненні критичного напруження [101]. Аналогічно, в роботі [102] запропоновано рівняння ізотермічного зсуву плівок мастильного матеріалу в контактах кочення та ковзання: модель можна описати як нелінійну Максвелла, оскільки вона включає нелінійну в'язку течію, накладену на лінійну пружну деформацію. Запропоноване рівняння охоплює весь діапазон ізотермічного стану плівок: лінійний та нелінійний в'язкий,

лінійний в'язкопружний, нелінійний в'язкопружний та пружно-пластичний при будь-якій деформації. Нелінійне рівняння Максвелла виражається через три незалежні параметри рідини: модуль зсуву G , в'язкість при нульовій швидкості η і початкове напруження τ_0 .

З розвитком комп'ютерної технології та чисельного аналізу можливо моделювати різноманітні процеси змащування за допомогою різних складових рівнянь, які узгоджуються з експериментами та практикою. Основними методами вирішення неньютонівської проблеми змащення є отримання модифікованого рівняння Рейнольдса через складну залежність між напруженням зсуву та швидкістю зсуву [103]. В таких розрахунках рівняння Нав'є-Стокса виводиться за допомогою рівняння Коші та визначення тензора напруження через в'язкість і швидкість рідини за допомогою основного рівняння. Його розв'язком є швидкість течії з припущенням сталої густини та в'язкості. Ці припущення призводять до значних похибок у швидкості течії, що обмежує застосування такого підходу.

При математичному моделюванні поведінки ньютонівських/неньютонівських рідин використовують реологічні моделі псевдопластичних і в'язкопластичних рідин та їх параметри. Наприклад, при побудові моделей неньютонівських рідин використовують принцип механічного моделювання, запропонований Рейнером [104]. За цим принципом поведінку різних речовин визначають як паралельне або послідовне поєднання елементів з в'язкою, пружною або пластичною деформацією. В роботі [105] запропоновано загальну термодинамічну модель плавлення ультратонкої плівки мастила та визначено значення критичної швидкості зсуву, при якому мастило плавиться за механізмом зсувного плавлення. Встановлено, що дія зсувних напружень призводить до зростання об'єму мастильного матеріалу, і, як наслідок, до підвищення товщини мастильного шару в контакті. Математичну залежність між об'ємом та товщиною мастильного шару можна представити у вигляді:

$$\frac{\delta V}{V_0} = \frac{A \delta h}{A h} = \frac{\delta h}{h}, \quad (1.2)$$

де δV – зміна об'єму, V_0 – початковий об'єм, h - товщина мастильного шару, A – площа контакту.

Неньютонівські рідини характеризуються тим, що характер і закономірності їх течії визначаються особливим впливом градієнта швидкості на опір зсуву. Загальне рівняння, за допомогою якого описується реологічна крива для неньютонівських рідин [106]:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{ef} \left(\frac{dV}{dy} \right)^n = \tau_0 + \eta_{ef} \dot{\gamma}, \quad (1.3)$$

де τ_0 – межа текучості, η_{ef} – ефективна в'язкість, $\dot{\gamma} = dV/dy$ – градієнт швидкості, n – показник степені.

При $\tau_0 = 0$ розглядається течія псевдопластичних ($n < 1$, $\tau_0 = 0$) та дилатантних ($n > 1$, $\tau_0 = 0$) рідин. Бінгамівські рідини ($n = 1$, $\tau_0 > 0$) характеризуються тим, що вони можуть текти тільки при напруженні зсуву більшому, ніж межа текучості τ_0 . Найбільш відомі реологічні моделі мастильних матеріалів представлені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Реологічні моделі для неньютонівських рідин [107]

Модель	Формули
Бінгама	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau > \tau_0$ $\dot{\gamma} = 0, \quad \tau < \tau_0$
Кессона	$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + \eta \dot{\gamma}^{1/2}, \quad \tau > \tau_0$ $\dot{\gamma} = 0, \quad \tau < \tau_0$
Гершеля – Балклі	$\tau = \text{sign} \tau_0 + k \dot{\gamma} ^{n-1} \dot{\gamma}^n, \quad \tau > \tau_0$ $\dot{\gamma} = 0, \quad \tau < \tau_0$
Шульмана	$\tau^{1/n} = \tau_0^{1/n} + (\eta \dot{\gamma})^{1/n}, \quad \tau > \tau_0$ $\dot{\gamma} = 0, \quad \tau < \tau_0$
Освальда – де Вейля	$\tau = k \dot{\gamma} ^{n-1} \dot{\gamma}^n$
Шведова – Бінгама	$\tau = \tau_0 \text{sign} \dot{\gamma} + \eta \dot{\gamma}$

В процесі структурної пристосованості при терті на активованих поверхнях металу формуються граничні змащувальні шари різної природи. Початково сформований мастильний шар має тверду структуру, характеризується неньютонівськими властивостями та зв'язується з обома поверхнями. При прикладанні напруження шар

деформуватиметься при зсуві до тих пір, поки прикладене напруження зсуву не стане достатньо великим, щоб подолати зчеплення з поверхнею. Відповідно до [108] за межами цієї умови зсув шар мастильного матеріалу може проявлятися за двома схемами. За першою схемою, мастильний матеріал в контакті поводить себе як рідина або залишається адгезійно з'єднаним з обома контактними поверхнями, але «плавиться» в центрі. За другою схемою – мастильний шар зберігає свою тверду структуру і проявляється міжшарове ковзання між площинами мастильного матеріалу. Коли дія зовнішньої сили зсуву припиняється, мастильний матеріал відновлює свою структуру до вихідного стану, але з постійним зсувом між двома його поверхнями (рис. 1.5).

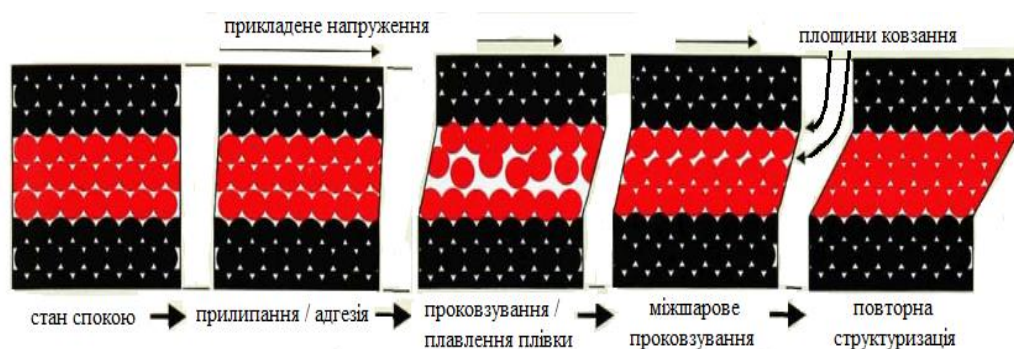


Рис. 1.5. Вплив напруження зсуву на деформацію мастильної плівки та реорганізацію її структури [108].

Стійкість мастильної плівки до механічної деструкції внаслідок збільшення градієнта швидкості зсуву є визначальним фактором, що забезпечує нормальну працездатність пар тертя в критичних умовах. Руйнування мастильної плівки при терті є одним з провідних чинників, що обумовлюють інтенсифікацію енергетичних процесів, що відбуваються в зоні контакту. Перш за все, це проявляється в порушенні структурної пристосованості контактних поверхонь і мастильного матеріалу в критичних умовах тертя, руйнуванням раніше утворених метастабільних структур [109].

Встановлення закономірностей зміни реологічних показників мастильного матеріалу в триботехнічному контакті обумовлено можливістю прогнозувати ефективність формування граничного шару на активованих тертям контактних

поверхнях. Особливо це важливо при граничному режимі мащення, оскільки стійкість граничної плівки до механічної деструкції забезпечує підвищення антифрикційних та протизношувальних показників контакту. Тому актуальним напрямком оцінки якості мастильного матеріалу являється аналіз його реологічних характеристик при домінуванні різних режимів мащення.

Висновки до розділу 1.

1. Проаналізовано критерії вибору мастильного матеріалу для вирішення конкретної технічної задачі, що може дати значний ефект за рахунок економії енергії, зниження зносу, витрат на технічне обслуговування і ремонт, збільшення терміну служби машин і устаткування.

2. Аналіз типових видів зношування шестеренних насосів та відмов гідравлічних систем визначив значну роль мастильного матеріалу для забезпечення роботоздатного стану насосів: недостатня кількість мастильного матеріалу призводить до домінування граничного режиму мащення, руйнування граничної плівки мастильного матеріалу між зубцями виникає насамперед на окремих виступах мікронерівностей і відбувається внаслідок впливу великих пластичних деформацій матеріалів та високих температур у зоні контакту.

3. Проаналізовано, що завдяки раціональному вибору мастильного матеріалу вдається зменшити інтенсифікацію енергетичних процесів як на межі мастильний матеріал-метал, так і в поверхневих шарах металу. Застосування олив, виготовлених за різними рецептурами, дозволяє підвищити антифрикційні характеристики трибоконтакту, збільшити товщину граничних адсорбційних шарів і створити умови для реалізації змішаного або гідродинамічного режимів змащування. Формування зносостійких метастабільних дисипативних структур із збільшеною кількістю активних компонентів оливи, до яких належать кисень, сірка та фосфор, сприяє підвищенню трибологічних властивостей контакту.

4. На основі аналізу сучасних експериментальних даних визначено, що підвищенню зносостійкості елементів трибосистеми сприяють процеси зміцнення поверхневих шарів пар тертя під час експлуатації за рахунок утворення дрібнозернистої дисипативної структури, яка є результатом механохімічних реакцій між активованою в процесі тертя поверхнею металу і активними компонентами мастильного матеріалу, що в сукупності підвищує довговічність пар тертя в умовах експлуатації.

5. Проаналізована інформативність та ефективність використання фізико-математичних моделей при оцінці напружено-деформованого стану за розподілом навантаження в зоні контакту зубчастого зачеплення, результати комп'ютерного моделювання дають можливість побудувати узагальнену схему зародження руйнуючих процесів в матеріалах деталей.

6. Вивчення реологічної поведінки мастильного матеріалу в умовах кочення з проковзуванням дозволить оцінити особливості мастильних матеріалів щодо впливу градієнта швидкості зсуву на їх ефективну в'язкість з метою прогнозування ефективності мащення в локальному контакті. Стійкість мастильної плівки до механо-термічної деструкції внаслідок збільшення градієнта швидкості зсуву є визначальним фактором, що забезпечує нормальну працездатність пар тертя в критичних умовах. Руйнування мастильної плівки при терті є одним з провідних чинників, що обумовлюють інтенсифікацію енергетичних процесів, порушення структурної пристосованості контактних поверхонь і мастильного матеріалу в критичних умовах тертя, руйнування дисипативних структур.

З урахуванням аналізу впливу процесів самоорганізації при терті та зношуванні на надійність трибосистеми визначено, що **мета роботи** полягає в теоретичному обґрунтуванні та практичній реалізації заходів підвищення зносостійкості вузлів тертя шляхом підбору мастильного матеріалу з ефективними змащувальними, реологічними, антифрикційними і протизношувальними характеристиками для забезпечення процесів самоорганізації дисипативних структур в несталих умовах тертя..

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні **завдання**:

- провести аналіз типових видів зношування шестеренних насосів та гіпоїдних передач;
- дослідити триботехнічні характеристики контакту в нестаціонарних умовах роботи при застосуванні мастильних матеріалів з різними поліфункціональними присадками та базовою основою;
- визначити триботехнічні показники, які впливають на лінійний знос контактних поверхонь;
- провести оцінку напружено-деформованого стану зубчатого зачеплення шестеренного насосу моделюванням в ANSYS Workbench;
- дослідити реологічні характеристики мастильного матеріалу та визначити умови прояву неньютонівських властивостей в мастильному матеріалі;
- визначити механізми структурної пристосованості контактних поверхонь та умови переходу трибосистеми до стану самоорганізації.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИ ТА УСТАНОВКА ДЛЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Мастильні матеріали для авіаційної та наземної техніки.

Для досліджень обрано гідравлічну оливу АМГ-10, яка призначена для використання в якості робочої рідини для гідравлічних пристроїв авіаційної та наземної техніки, роботоздатність оливи рекомендовано виробниками в інтервалі температур навколишнього середовища від мінус 60°C до +55 °C.

Олива АМГ-10 виготовляється на основі глибокодеароматизованої низькозастигаючої фракції, яку одержують з продуктів гідрокрекінгу суміші парафіністих нафт. Зазвичай олива АМГ-10 містить загущувальну та антиокислювальну присадки, а також спеціальний органічний барвник червоного кольору.

За міжнародними специфікаціями олива АМГ-10 відповідає: ISO 6743(DIN 51524) HH (HLP), ISO VG 15.

Основні вимоги до показників оливи АМГ-10 представлено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики оливи АМГ-10

Показник	Норма за ГОСТ (ТУ)
Зовнішні ознаки	Прозора рідина червоного кольору
Густина при 20°C, кг/м ³ , не більше	0,850
В'язкість кінематична, при (+50°C), мм ² /с, не менше	10
В'язкість кінематична, при (-50°C), мм ² /с, не більше	1250
Температура спалаху (в відкритому тиглі), °C, не нижче	93
Температура початку кипіння, °C, не нижче	210
Температура застигання, °C, не вище	-70
Кислотне число, мг КОН на 1 г оливи, не більше	0,03
Вміст води	Відсутність

Продовження таблиці 2.1

Масова доля механічних домішок	0,003
Випробування на корозію	Витримує
Зміна маси гуми марки УИМ-1,%, в межах	5,5 – 7,5
Стабільність проти окислення, %, не більше – масова доля осаду після окислення	0,05

В якості мастильних матеріалів для досліджень обрано дві товарні партії гідравлічної оливи АМГ-10:

– зразок №1 – олива «Бора Б» АМГ-10 (продукція випускається за ТУ У 19.2-38474081-010:2016 зі зм. 1, виробництво ТОВ «Бора Б»);

– зразок №2 – масло АМГ-10 (продукція випускається за ГОСТ 6794-75 зі зм. 1 – 5, виробництво: ООО «НПП Квалитет»).

Зразок №1 розроблено з метою організації робіт з імпортозаміщення та подолання критичної залежності оборонної промисловості України від імпорتنих поставок оливи АМГ-10.

В паспорті якості на зразок 1 олива «Бора Б» АМГ-10, виробництво ТОВ «Бора Б» заявлені технічні характеристики оливи, наведені в табл. 2.2.

*Таблиця 2.2***Основні показники оливи «Бора Б» АМГ-10**

Показник	Фактичне значення
Густина при 20°C, кг/м ³	848
Температура спалаху, °C	102
В'язкість кінематична при 50°C, мм ² /с	10,5
Температура застигання, °C	-70
Кислотне число, мг КОН на 1 г оливи	0,02
Масова доля води, %	відсутність

За рецептурами виробників дослідних зразків №1 та №2 в них ідентичні базова основа (мінеральна олива на основі глибокодеароматизованої низькозастигаючої

фракції, яка одержується з продуктів гідрокрекінгу суміші парафінистих нафт і складається з нафтових і ізопарафінових вуглеводнів), загущуюча присадка, спеціальний оливорозчинний барвник червоного кольору. Виробник дослідного зразка №1 заявляє про наявність в оливі комплексу багатофункціональних присадок, виробник дослідного зразка №2 заявляє про наявність в оливі лише антиокислювальної присадки.

До переваг застосування гідравлічної оливи АМГ-10 в якості робочої рідини для гідравлічних пристроїв авіаційної та наземної техніки можна віднести наступні складові:

- низька температура застигання оливи, що забезпечує роботоздатність гідросистем за найнижчих температур;
- висока стабільність компонентів оливи до механічної деструкції;
- олива проявляє ефективні в'язкісно-температурні характеристики: мінімальна зміна в'язкості у всьому діапазоні робочих температур;
- високі антиокислювальні властивості.
- тривалий термін служби оливи забезпечує підвищення ресурсу обладнання;
- ефективна фільтрація оливи.

Для авіаційної наземної техніки широко застосовуються трансмісійні оливи. Наприклад, ТСгіп – це універсальна багатофункціональна олива, що містить високоефективні протизадирні присадки. Може використовуватися як всесезонна олива для гіпоїдних передач вантажних автомобілів та спеціальних машин, що працюють в умовах помірної кліматичної зони.

Згідно [110] олива для гіпоїдних передач ТСгіп належить до групи універсальних олив з протизадирними присадками високої ефективності та багатофункціональної дії. Зокрема, дана олива здатна забезпечувати нормальне функціонування гіпоїдних передач, які працюють в умовах дії ударних навантажень при контактному тиску вище 3000 МПа, температура мастильного матеріалу може досягати до 150 °С. Тому ця олива застосовується в авіаційній техніці як для змащування вертикальних та горизонтальних

шарнірів втулок гвинтів вертольотів, так і для виробництва маслосумішей для хвостових та проміжних редукторів.

В якості мастильних матеріалів для досліджень було обрано трансмісійну оливу для гіпоїдних передач (ТСгіп) двох виробників.

Зразок №1 – олива трансмісійна «Бора Б» ТСгіп (ТУ У 19.2-38474081-017:2018 / SAE 140 / API GL-5). За хімічним складом дана олива – це суміш високов'язкого ароматизованого продукту з дистилатною оливою високого ступеня очищення та композицією присадок (Infineum C9425 (цинк-диалкілдитіофосфат), поліалкілметакрилатний сополімер та алкіламін).

Зразок №2 – трансмісійна олива для гіпоїдних передач ТСгіп (ТУ 38.1011332-90). Склад оливи: мінеральна очищена олива (складна суміш вуглеводнів (C24-C50), одержана шляхом селективної очистки та гідруванням нафтового дистилату) та комплекс функціональних присадок (диалкілдитіофосфат цинку та метилен-біс).

Присадки в зазначених зразках мастильних матеріалів додаються з метою поліпшення протизадирних і низькотемпературних властивостей.

Основні фізико-хімічні характеристики досліджуваних олив представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Фізико-хімічні показники трансмісійної оливи для гіпоїдних передач ТСгіп

Показник	Зразок №1 (олива трансмісійна «Бора Б» ТСгіп)	Зразок №2 (трансмісійна олива для гіпоїдних передач ТСгіп)
В'язкість кінематична, мм ² /с (сСт) при 100°C	25,0	18,5
Вміст водорозчинних кислот та лугів	відсутність	відсутність
Масова частка механічних домішок, %	0,001	0,005
Вміст води, %	сліди	сліди
Масова частка сірки, %	2,3	2,01
Температура застигання, °C	-22	-46
Температура спалаху, °C	225	187
Корозійна дія на пластинки з: - сталі марок 40 або 50 по ГОСТ 1050; - міді марки М2 по ГОСТ 859	Витримує Дає потемніння	Витримує Дає потемніння

Слід зазначити, що умови роботи агрегатів, в яких використовуються мастильні матеріали, обрані для досліджень, характеризуються змінним навантажувально-швидкісним режимом та широким діапазоном робочих температур. Наприклад, олива АМГ-10 використовується в гідравлічній системі літака для керування рулями та стабілізатором, випуску та прибирання шасі, для роботи агрегатів злітно-посадкової механізації. При цьому основними властивостями оливи є: мастильна здатність, термоокислюваність, в'язкість, корозійність, випаровуваність, спінюваність, прокачування, стисливість, гідролітична стійкість та інші [111]. Діагностика оцінки експлуатаційної якості гідравлічної оливи проводиться переважно за кінетикою зміни її в'язкості в процесі експлуатації [112]. Однак, оцінці триботехнічних показників приділено мало уваги. Зміна в'язкості, високі градієнти швидкості зсуву в контакті, спрацювання присадок може призвести до погіршення антифрикційних, змащувальних та протизношувальних показників оливи. Тому оцінка триботехнічних параметрів надасть більше можливостей щодо прогнозування надійності мастильного матеріалу та агрегату в цілому при експлуатації.

2.2. Досліджувані матеріали пар тертя.

Олива АМГ-10 використовується, наприклад, в гідросистемі вертольота Мі-8, до якої входять два насоси НШ-39М (Додаток А). Зазначений тип насосів – це насоси шестеренного типу високого тиску, які призначені для подачі оливи АМГ-10 під тиском до гідропідсилювачів КАУ-ЗОВ та РА-60Б. Насоси кріпляться до головного редуктора вертольота [113]. Зазначені насоси призначені для створення робочого тиску в гідросистемі вертольота. Насос шестеренний НШ-39М одноступінчастий, складається з корпусу, кришки, веденого і ведучого зубчастих коліс (рис. 2.1).

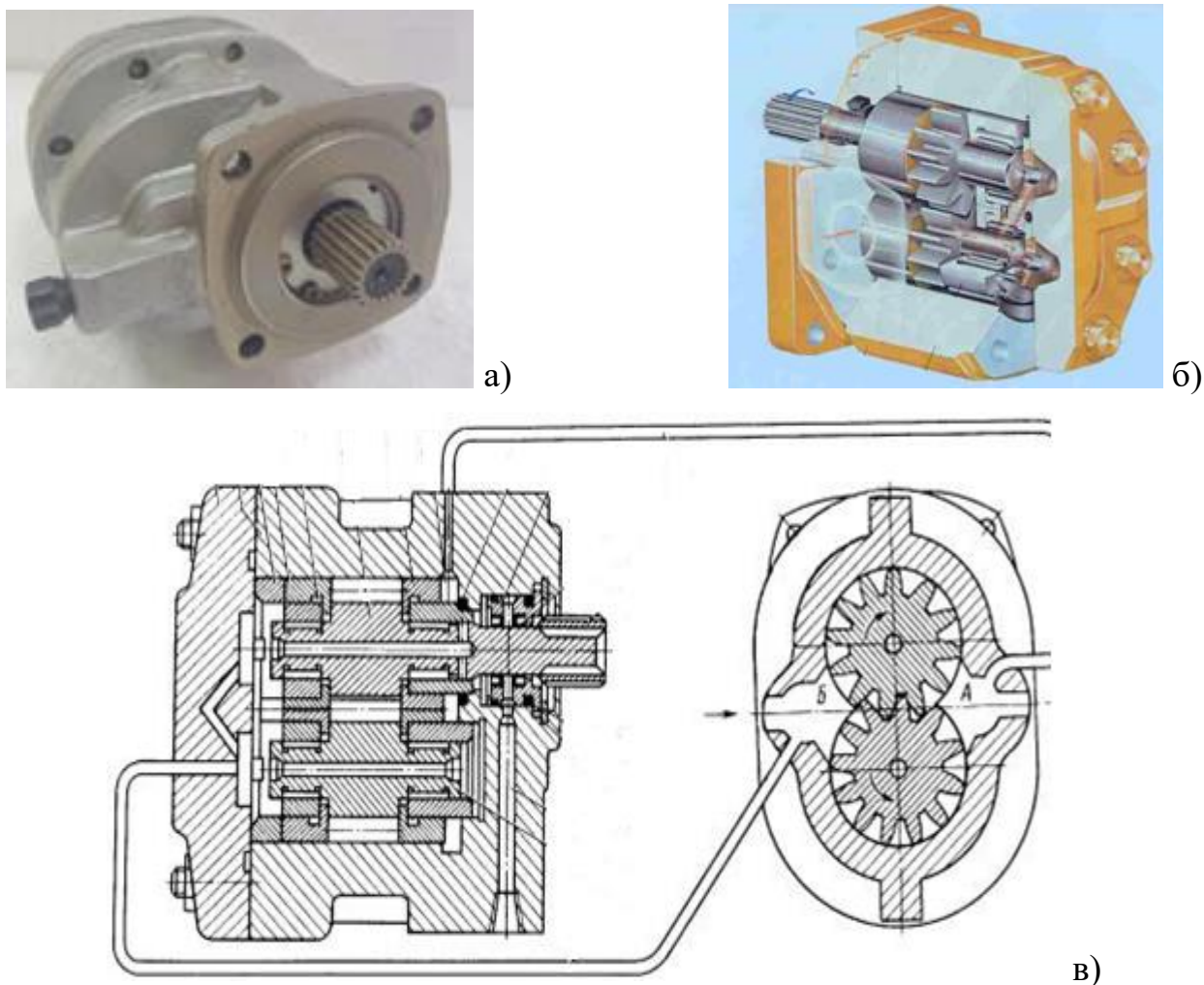


Рис. 2.1. Насос шестеренний НШ-39М: зовнішній вигляд (а), насос в розрізі (б), схема насосу (в).

Зазначимо принцип роботи насоса НШ-39М [114]. За рахунок входу зубців шестерень у зачеплення та виходу із зачеплення відбувається переміщення робочої рідини через насос. У литому корпусі, виготовленому з алюмінієвого сплаву, встановлені ведуче і ведоме зубчасті колеса. Під час обертання зубчастих коліс рідина з порожнини всмоктування Б заповнює западини зубів і переноситься в камеру нагнітання А (рис. 2.1, в). Об'єм камери А за рахунок зубчастого зачеплення зменшується, і рідина витісняється в нагнітальну порожнину насоса. Ведуча шестерня входить у зачеплення з веденою деталлю, обертаючи її. Вхід та вихід із зачеплення утворюють збільшення та зменшення об'єму. На вході відбувається збільшення (коли

зуб`я вийшли із зачеплення) і рідина надходить у корпус. Далі вона забирається зуб`ями і переміщується на інший бік шестерні – туди, де зуб`я виходять із зачеплення. Таким чином, відбувається зменшення об`єму в корпусі і робоча рідина виштовхується далі в гідросистему. Для контролю герметичності приводного вала до корпусу насоса кріпиться дренажна трубка. Продуктивність насоса при тиску 65 кгс/см^2 становить 30 л/хв. Робочий тиск 45-65 кгс/см^2 , максимальний тиск 90 кгс/см^2 . Насос основної гідросистеми встановлений на лівій коробці приводів головного редуктора, а насос дублюючої гідросистеми – на правій коробці приводів головного редуктора.

Для виготовлення зубчастих коліс вибираються конструкційні матеріали з урахуванням необхідності забезпечення їх міцнісних властивостей, довговічності при експлуатації та технологічності при виготовленні даної конструкції. До основних матеріалів, з яких виготовляють зубчасті колеса, належать різні марки зносостійких сталей та чавунів, а також зносостійкі полімерні матеріали або композиційні полімерні матеріали. Найчастіше для виготовлення зубчастих коліс використовуються конструкційні сталі марок 35, 40, 45, 50, 50Г, 40Х, 40ХН, які призначені для передавання середньої потужності без значних динамічних навантажень. При проектуванні та виготовленні особливо відповідальних зубчастих передавачів, експлуатація яких передбачає наявність робочих умов при ударних навантаженнях, використовують леговані сталі таких марок, як сталі 45ХН, 40ХНМА, 12ХНЗА та ін.

Зубчасті колеса насоса шестеренного НШ-39М зазвичай виготовляють із сталі 45 або зі сталі 40Х із загартуванням при нагріванні струмами високої частоти.

В якості матеріалу контактних поверхонь для досліджень використовувались ролики – сталь 30ХГСА (HRC 48 – 52, Ra 0,34 мкм). Сталь 30ХГСА – легований хромом (надає сталі корозійну стійкість), марганцем (збільшує механічний опір ударним та динамічним навантаженням, підвищує загальну міцність та зносостійкість сплаву) та кремнієм (модифікує кристалічну структуру металу, підвищуючи величину ударної в'язкості) залізовуглецевий сплав. Є якісною конструкційною сталлю. Хімічний склад сталі 30ХГСА наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

**Хімічний склад сталі 30ХГСА в відсотковому відношенні за ДСТУ 7806 /
ГОСТ 4543-71**

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
0.28 – 0.34	0.9 – 1.2	0.8 – 1.1	до 0.3	до 0.025	до 0.025	0.8 – 1.1	до 0.3	~96

Для досліджень також використовувалась сталь 45. Марка сталі 45 – одна з найпопулярніших марок конструкційних вуглецевих сталей ферито-перлітного класу. Дана марка сталі застосовується у всіх галузях промисловості, де до виробів пред'являються вимоги щодо підвищеної міцності: вал-шестерні, колінчасті та розподільні вали, шестерні, шпинделі, бандажі, циліндри, кулачки та інші нормалізовані деталі, що поліпшуються і піддаються поверхневій термічній обробці. Продукція із сталі 45 може витримувати часті перепади температур, зокрема в інтервалі від 200 до 600 °С. Також ця сталь має високу межу витривалості [115]. Хімічний склад сталі 45 наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

**Хімічний склад сталі 45 в відсотковому відношенні
за ГОСТ 1050/ ДСТУ 7809**

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
0.42...0.5	0.17...0.37	0.5...0.8	до 0.25	до 0.04	до 0.035	до 0.25	до 0.25	~97

2.3. Установка для дослідження експлуатаційних показників мастильних матеріалів.

Існує складність, пов'язана з процесом оптимізації умов тертя мастильних рідин, якою є сам метод/умова оцінки. Важливо звернути увагу на те, як метод стендового випробування може якомога ближче відтворити реальні умови експлуатації. Це добре відоме питання, яке обговорюється протягом багатьох десятиліть. Ноеhn та ін. намагалися знайти відповідь, порівнюючи триботехнічні характеристики трансмісійних олив за допомогою різних трибометрів, включаючи FZG, апарат

Тімкена, апарат Альмена-Віланда, дводискову машину SAE, тестер з кулькою на диску, тестер з 4 кульками, штифт-на-диску тестер Reichert frictional wear rig тощо [116]. Їхнє дослідження підкреслило відмінності в цих трибометрах і показало, що більшість установок використовують прості зразки в умовах чистого ковзання, які в більшості випадків не мають прямого відношення до фактичного контакту шестерні.

Багато існуючих досліджень підкреслюють відсутність кореляції між стендовим випробуванням і фактичним контактом шестерні та попереджають дослідників щодо використання певних трибометрів, оскільки кожен з них був розроблений для певного застосування або для вивчення реакції мастильного матеріалу на певні явища, такі як задири, мікропіттинг, знос, тертя тощо. Не менш важливо відзначити різницю в типах геометрії контакту (кругова або еліптична) і контактного руху (кочення-ковзання або чисте ковзання), для моделювання яких був розроблений певного типу трибометр, і вибрати правильний, який, можливо, моделює найбільш наближений до реального контакту контакт шестерні. У той час як більшість досліджень, про які повідомляється в літературі, зосереджені на чистих контактах ковзання, мало досліджень можна знайти щодо контактів кочення-ковзання [117, 118]. Зокрема, дослідження Brandao J. та ін. було направлене на дослідження фрикційної поведінки трансмісійних олиव у контактах кочення-ковзання та показало, що збільшення коефіцієнта ковзання-кочення (SRR) від 0,1 до 0,5 збільшує силу тертя в еластогідродинамічному режимі [119].

Незважаючи на все це, трибометри все ще широко використовуються і залишатимуться у використанні, доки не буде знайдено краще рішення. Це означає, що трибологам все ще доведеться покладатися на існуючі трибометри. Таким чином, надзвичайно важливо приділяти особливу увагу застосуванню результатів лабораторних випробувань до контактів передач у реальних застосуваннях. З таким розумінням метою роботи було застосування установки, яка імітує роботу зубчастих передач за умов реалізації кочення з проковзуванням.

Дослідження мастильних матеріалів проводилось на програмно-апаратному комплексі (ПАК) для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів. ПАК

представляє собою комплекс, до складу якого входить установка тертя (УТ), електронний блок (ЕБ), програмне забезпечення (ПЗ) «Тертя», встановлене на персональному комп'ютері (ПК) типу IBM PC. Програмний блок математичної обробки даних виконує обчислення за заданим алгоритмом розрахунку. В створеній програмі є окремий канал для візуальної оцінки кінетики зміни основних триботехнічних показників трибоконтакту в режимі on-line [120].

На програмно-апаратному комплексі за допомогою роlikової аналогії моделюється робота зубчастих передач в умовах кочення з проковзуванням (рис. 2.2).

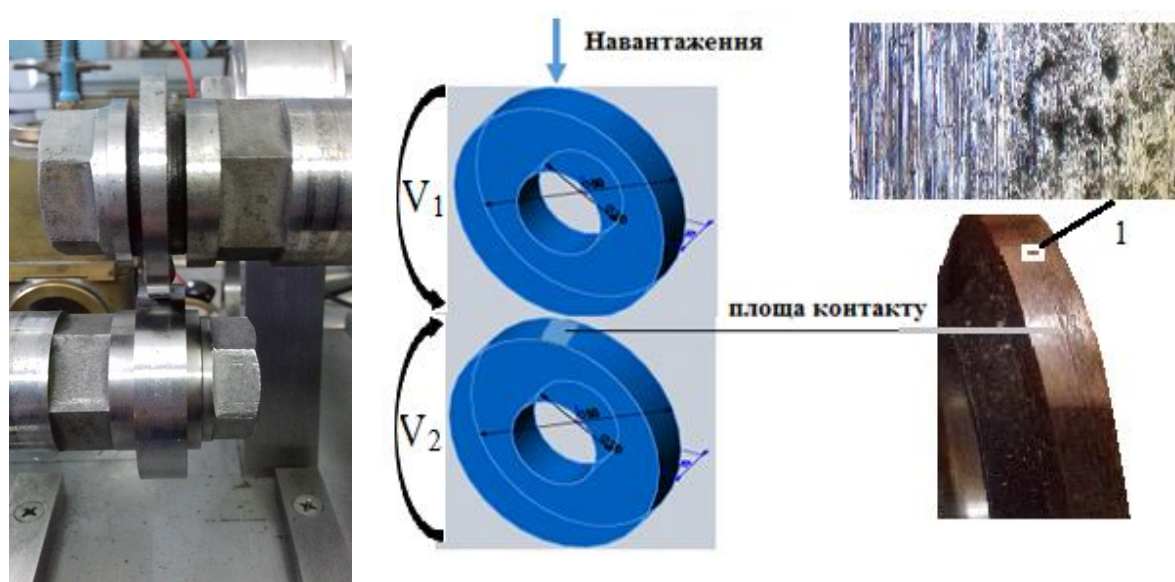


Рис. 2.2. Схема вузла навантаження дослідних зразків із обертанням з швидкостями V_1 і V_2 та зовнішній вигляд доріжок тертя зразка сталі 30ХГСА; 1 – ділянка контактної поверхні зразка для структурних досліджень.

Дослідження проводились в нестационарних умовах, що передбачають циклічність повторення в режимі пуск – стаціонарна робота – гальмування – зупинка (рис. 2.3). Загальна тривалість циклу – 80 с.

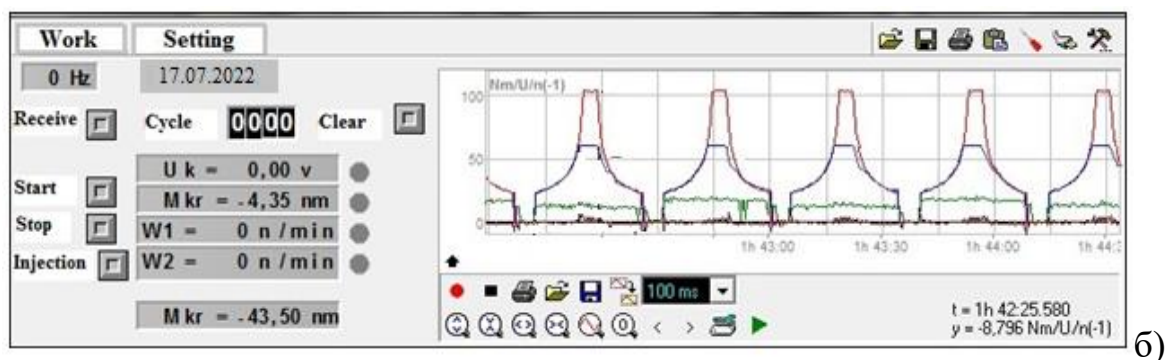
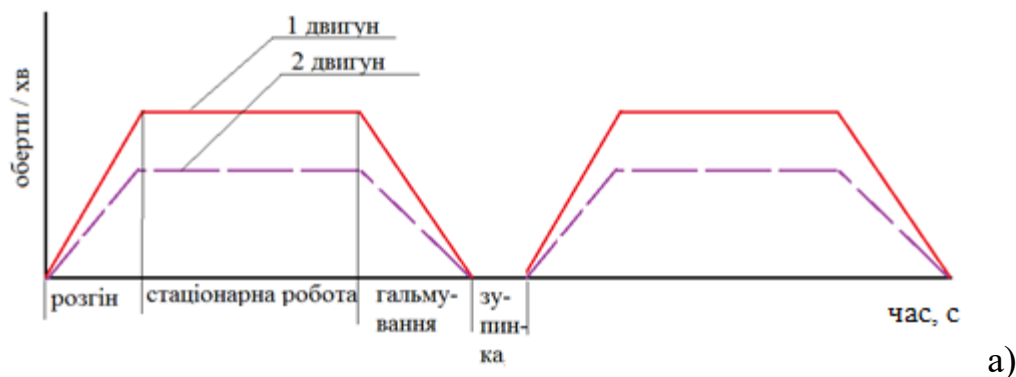


Рис. 2.3. Схема роботи двигунів установки тертя (а) та інтерфейс підпрограми обробки даних (б) при роботі трибосистеми в нестационарних умовах.

Максимальна частота обертів для випереджаючої поверхні становила 700 об/хв, для відстаючої поверхні – 500 об/хв. Проковзування – 30%. Максимальне контактне навантаження по Герцу – 200 МПа. Загальна кількість циклів в експерименті – 100 циклів (з 1-го по 45 цикл – температура оливи 20 °С, з 46 по 50 цикл – нагрівання оливи, з 51 по 100 цикл – температура оливи 100 °С).

2.4. Методологія оцінки якості мастильних матеріалів на основі вхідного контролю.

Вхідний контроль мастильних матеріалів лише за фізико-хімічними показниками, які нормуються в паспорті якості на товарні партії, не дає повного уявлення про експлуатаційні характеристики мастильних матеріалів. Для надання рекомендацій щодо експлуатації певної партії мастильних матеріалів в

навантажувальному, швидкістному, температурному діапазонах, необхідно проводити лабораторні та стендові випробування. Узагальнений алгоритм контролю якості мастильних матеріалів представлено на рис.2.4.

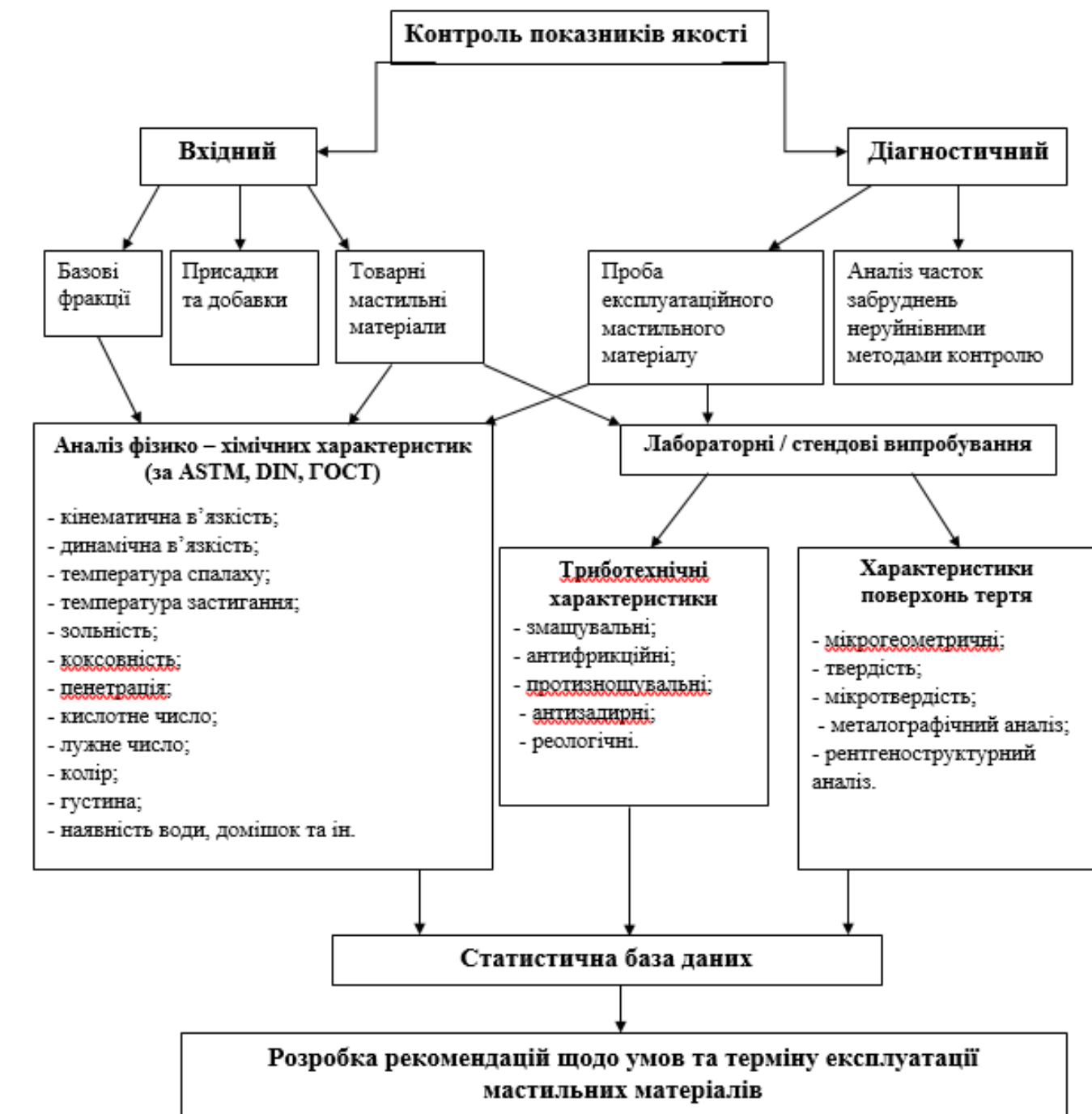


Рис. 2.4. Схема оцінки якості товарних партій та експлуатаційних зразків мастильних матеріалів.

2.4.1. Визначення гідро- та негідродинамічної складових товщини мастильного шару.

При визначенні трибологічних характеристик вузлів тертя слід враховувати будову та властивості шарів граничної плівки, яка утворюється молекулами поверхнево-активних речовин [166]. Такі шари мають різний ступінь впорядкованості по мірі віддалення від поверхні тертя, вони являють собою твердий молекулярний кристал для моношару та окремі полімолекулярні шари рідких кристалів. Кожен з таких шарів має різну за значеннями несучу здатність та коефіцієнт тертя, і, як наслідок, трибологічні характеристики вузла тертя залежать від того, який шар сприймає зовнішні навантаження [121].

Про різну структуру граничних шарів зазначено в роботі [122]. За допомогою простої двовимірної моделі авторами змодельовано трибологічні властивості тонкої плівки мастильного матеріалу, що складається з лінійних (ланцюгових) молекул у режимі гідродинамічного мащення. Встановлено, що тертя зазвичай зростає з довжиною ланцюга відповідно до їх більшої об'ємної в'язкості. Порівнюючи трибологічні властивості молекул, які мають міцні адгезійні зв'язки з металом по всій довжині ланцюга молекули («лежача» орієнтація), з іншими молекулами, які мають один адгезійний зв'язок (орієнтація «головка» / «ворсинки»), встановлено, що останні зазвичай створюють більше тертя, ніж перші (рис. 2.5).

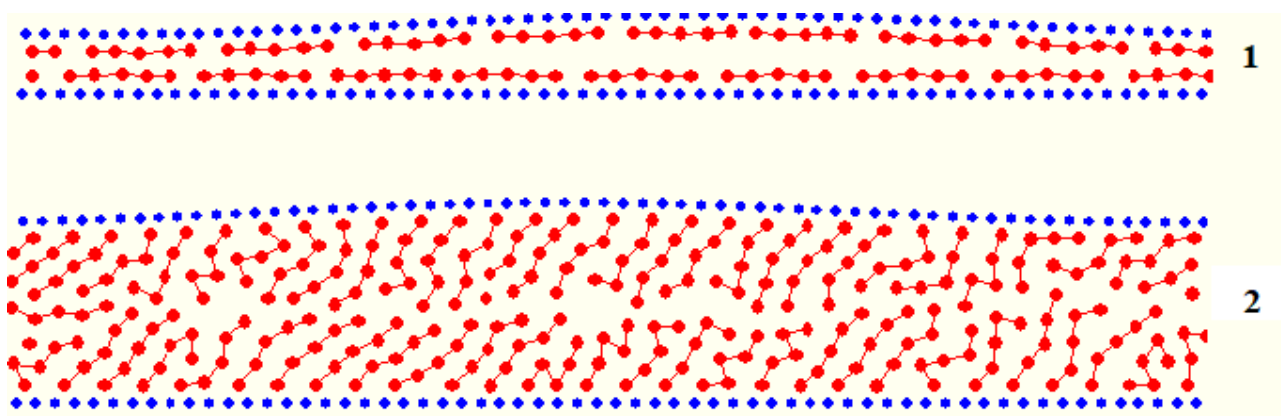


Рис. 2.5. Орієнтація молекул граничного мономолекулярного шару при терті: 1 – «лежача», 2 – у вигляді «ворсу» [122].

Автори зазначеної роботи з'ясували роль довжини молекул мастильного матеріалу при визначенні антифрикційних характеристик для тонкої (кілька молекулярних шарів) плівки мастильного матеріалу при «лежачій» орієнтації. Довші молекули мастильного матеріалу важче видавити з зони контакту, і саме тому вони забезпечують кращі змащувальні властивості. Таким чином, довші алкани працюють краще в граничному режимі мащення, ніж коротші, оскільки вони ефективніше запобігають появі холодно-зварених з'єднань і, як наслідок, зносу.

Існує низка способів визначення товщини граничного шару, яка є однією з основних характеристик, що характеризує його міцність та здатність чинити опір нормальним навантаженням. Наприклад, одним із методів отримання інформації про особливості орієнтаційної впорядкованості органічних рідин у тонких шарах є аналіз залежності форми їх спектрів поглинання від товщини [123]. Для цього може бути використаний метод дихроїзму поглинання домішкових молекул. Ступінь орієнтаційної впорядкованості молекул у граничному шарі мастильного матеріалу оцінювався за усередненим значенням оптичної анізотропії пристінного шару. За допомогою цього методу визначалася товщина граничного мастильного шару порядку 8...15 мкм для пари вал-вкладиш.

В проведених дослідженнях щодо оцінки змащувальної здатності мастильних матеріалів використано метод падіння напруження в режимі нормального тліючого розряду [124]. Згідно з цією методикою, проводилось вимірюється падіння напруження в змащувальному шарі при силі струму 2 і 4 А, надалі, за тарувальними таблицями визначалась товщина мастильного шару:

$$h = \frac{2U_{2A} - U_{4A}}{k}, \quad (2.1)$$

де U_{2A} і U_{4A} – падіння напруги в шарі мастильного матеріалу при силі струму 2 и 4 А, k – коефіцієнт.

В процесі тертя активовані молекули мастильного матеріалу можуть формувати змащувальні шари різної природи. В роботі [125] встановлено, що мінеральні оливи

адсорбують на поверхні металу первинну моно-плівку з органічних кислот та спиртів, при цьому полярні групи розташовуються до металу, а зовнішня поверхня плівки утворюється метильними групами вуглеводневих радикалів адсорбованих молекул. Далі мономолекулярний шар добудовується нашаруванням бімолекулярними димерами поверхнево-активних речовин. В залежності від умов тертя товщина граничної мастильної плівки може становити від декількох до 400...500 молекулярних шарів і досягати товщини близько 1 мкм. Такі плівки мають анізотропність механічних властивостей, яка викликана силами взаємодії активних груп молекул з поверхнею металу значно більше сил взаємодії в площинах, що утворюються метильними групами молекул сусідніх шарів. Неполарні молекули вуглеводнів також орієнтуються та адсорбуються під дією силового поля металу, але утворюють неміцні моноплівки, які легко руйнуються через слабкий зв'язок сусідніх молекул. Молекули полярних і неполярних речовин можуть формувати плівки змішаної будови, що володіють нестійкістю [126].

В умовах роботи трибосистеми пуск-стаціонарна робота-зупинка розрахунок товщини мастильного шару за падінням напруження в режимі нормального тліючого розряду здійснювався на ділянках «зупинка» та «стаціонарна робота» (рис. 2.6).

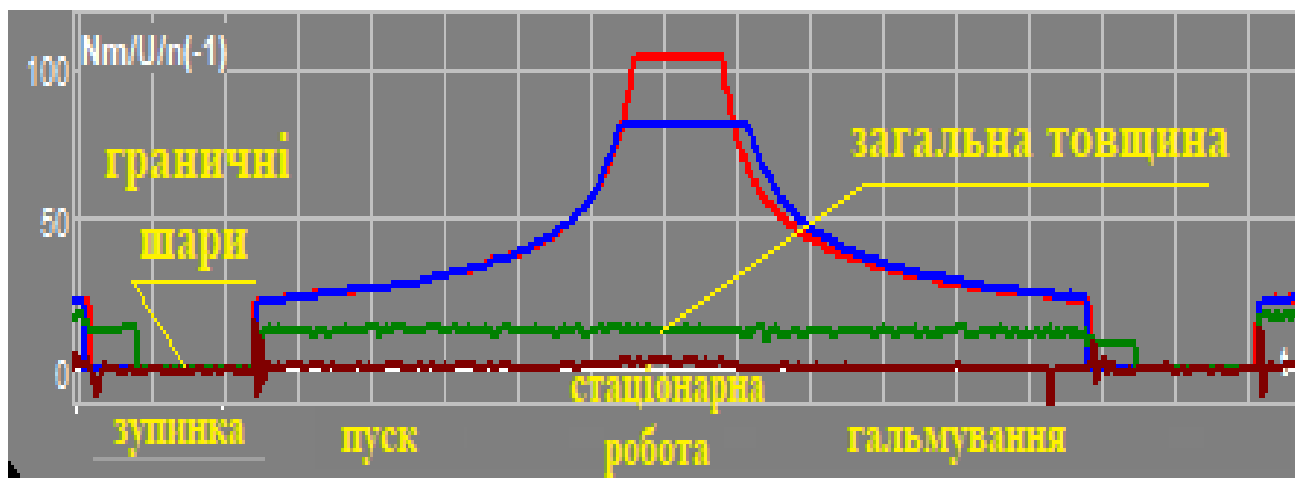


Рис. 2.6. Реєстрація падіння напруження (зелена крива) в локальному контакті.

На ділянці «зупинка» існує лише граничний шар змащувального матеріалу

(негідродинамічна складова), в період пуску дослідної установки відбувається приріст змащувального шару (гідродинамічна складова) (рис. 2.7).

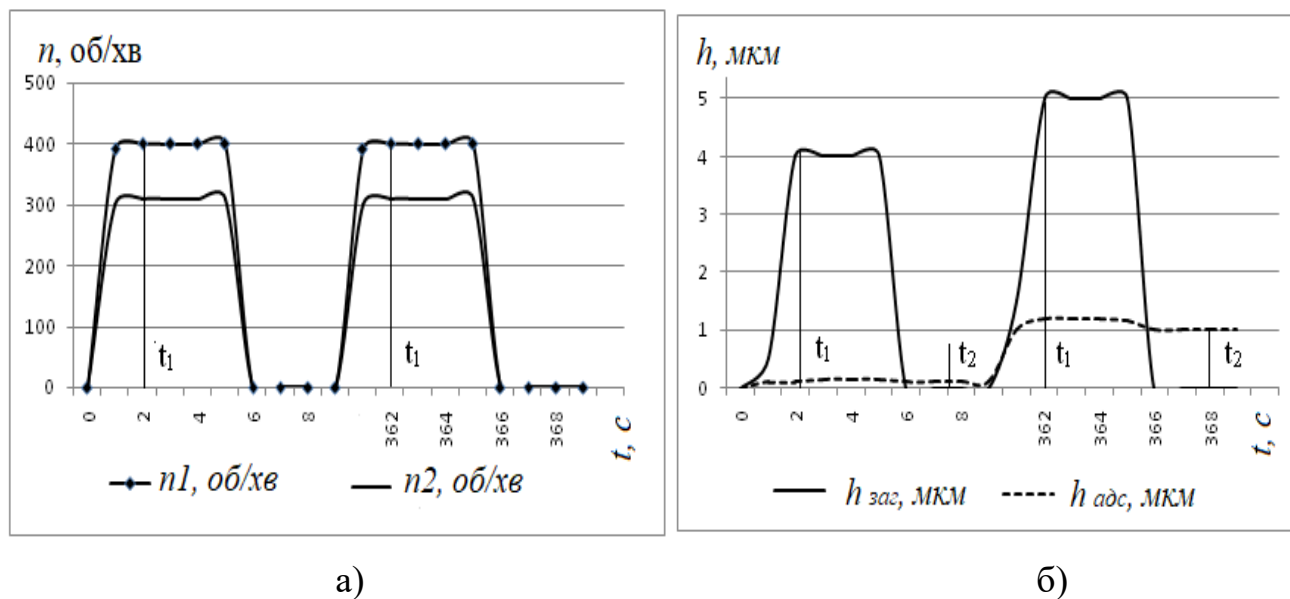


Рис. 2.7. Залежність частоти обертання дослідних зразків (а) та загальної товщини мастильного шару і товщини граничних шарів мастильного матеріалу (б) від часу роботи трибосистеми.

Залежно від товщини змащувального шару визначено режим мащення в фрикційному контакті за критерієм λ :

$$\lambda = \sqrt{\frac{h}{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}, \quad (2.2)$$

де h – товщина змащувального шару; R_a – середнє арифметичне відхилення профілю контактуючих поверхонь.

Інформативним показником умов переходу від сухого режиму мащення до гідродинамічного є діаграма Герсі – Штрібека. На рис. 2.8 представлені значення λ для різних режимів мащення.

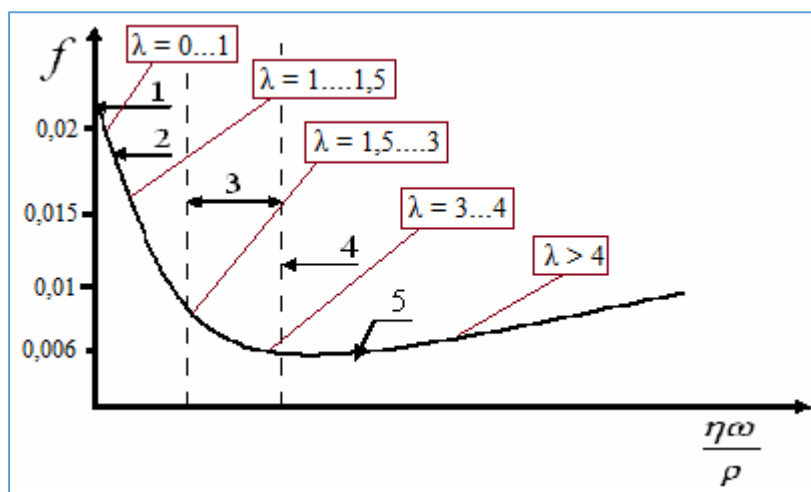


Рис. 2.8. Коефіцієнт тертя (f) та режим мащення (λ) за діаграмою Герсі – Штрібека: 1 – сухий, 2 – граничний, 3 – змішаний; 4 – еластогідродинамічний; 5 – гідродинамічний режими мащення.

2.4.2. Визначення реологічних показників мастильних матеріалів в локальному контакті.

Внаслідок складності фізико-хімічних процесів в зоні фрикційного контакту, властивості контактних поверхонь та мастильного матеріалу при терті важко описати з точки зору класичної механіки. Наприклад, в роботі [127] проаналізовано зміна в'язкості оливи АМГ-10 в діапазоні температур від 20 до 80 °С при постійному градієнті швидкості течії. Встановлено, що ця рідина змінює свої реологічні властивості наступним чином: при температурі менше 50 °С – це ньютонівська рідина, а при більш вищих температурах – неньтонівська типу рідини Освальда де Вейля.

З метою встановлення закономірностей трибологічних та реологічних показників фрикційних систем в граничному режимі мащення активно проводяться дослідження механо-термічної стійкості граничної плівки [128], впливу градієнту швидкості зсуву на зміну ефективної в'язкості та напружень зсуву в мастильному матеріалі [129] з метою прогнозування ефективності утворення товщини мастильної плівки в контакті.

Для визначення ефективної в'язкості мастильного матеріалу (η) в контакті при формуванні загальної товщини мастильного шару використовували залежності [130]:

$$\eta = \tau / \gamma . \quad (2.3)$$

Напруження зсуву масляного шару:

$$\tau = \frac{f \cdot N}{S} , \quad (2.4)$$

де f – коефіцієнт тертя; N – навантаження; S – площа контакту:

$$S = 2 \left[1,128 \sqrt{\frac{r_{np} \cdot (N/l)}{E_{np}}} \right] , \quad (2.5)$$

де l – довжина контакту; r_{np} – приведений радіус кривизни контактних поверхонь: $r_{np} = r_1 \cdot r_2 / (r_1 + r_2)$, де $r_{1,2}$ – радіуси роликів; E_{np} – приведений модуль пружності: $E_{np} = E_1 \cdot E_2 / (E_1 + E_2)$, де $E_{1,2}$ – модулі пружності роликів.

Градiєнт швидкості зсуву:

$$\gamma = \frac{V_{ковз}}{h} , \quad (2.6)$$

де $V_{ковз}$ – швидкість ковзання; h – товщина мастильного шару.

Вплив тиску на зміну в'язкості мастильного матеріалу визначався за формулою Баруса:

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha \sigma_{max}) , \quad (2.7)$$

де η_0 – динамічна в'язкість при атмосферному тиску, α – п'єзокоефіцієнт в'язкості, σ_{max} – контактне навантаження по Герцу.

Динамічна в'язкість оливи при атмосферному тиску:

$$\eta_0 = \nu_0 \cdot \rho_{Ti} , \quad (2.8)$$

де ν_0 – кінематична в'язкість при досліджуваній температурі (T_i , °C); ρ_{Ti} – густина оливи.

Кінематична в'язкість оливи при досліджуваній температурі:

$$\nu_0 = \nu_{50} \cdot \exp[\beta \cdot (50 - T_i)] , \quad (2.9)$$

де ν_{50} – кінематична в'язкість при 50°C; β – в'язкістно-температурний коефіцієнт; T_i – температура оливи при поточному вимірюванні

Для визначення ефективної в'язкості мастильного матеріалу (η) в контактi при формуванні структурованих граничних шарів мастильного матеріалу використовували

реологічну модель псевдопластичних неньютонівських рідин та степеневий закон Оствальда-де Вейля [131]:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n, \quad (2.10)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що характеризує міру консистенції мастильного матеріалу; n – ступінь неньютонівської поведінки мастильного матеріалу.

Для швидкості деформації мастильного матеріалу ($\dot{\gamma}$) використовували залежність [128]:

$$\dot{\gamma} = \frac{V_{\text{ковз}}\tau_e}{h}, \quad (2.11)$$

де τ_e – максвеловський час релаксації внутрішніх напружень.

2.5. Методи оцінки рельєфу поверхні та стану поверхневих шарів контактних поверхонь.

Мікротвердість поверхневих шарів металу визначалась шляхом вдавлюванням під навантаженням від 2 (5) до 200 Г алмазної піраміди з квадратною основою і кутом при вершині між протилежними гранями 136° на приладі ПМТ-3 (рис. 2.9) [132].

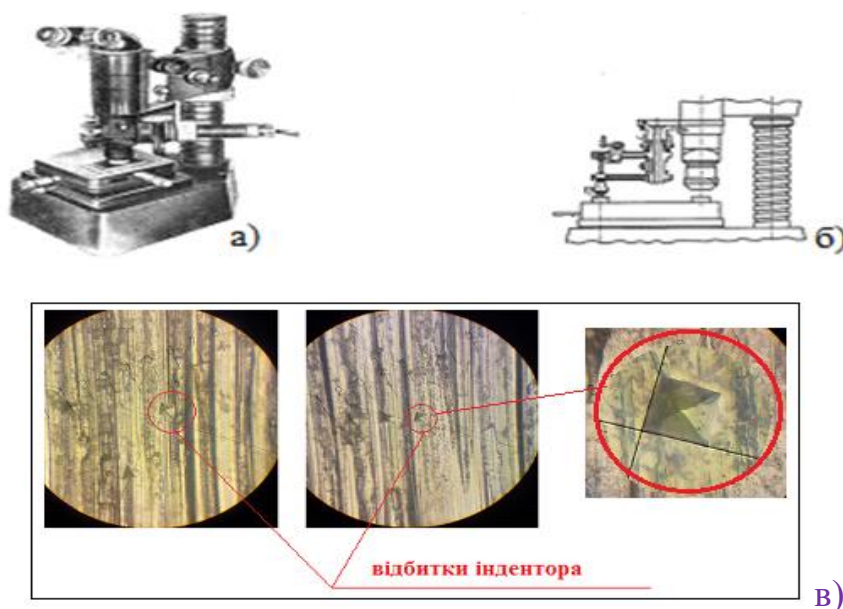


Рис. 2.9. Прилад ПМТ-3: а – зовнішній вигляд; б – схема, в – фото діагоналі відбитку індентора.

Розрахунок мікротвердості проводили за формулою:

$$H_{\mu} = \frac{1854P}{d^2} [\text{кг/мм}^2] \text{ або } H_{\mu} = \frac{18540P}{d^2} [\text{МПа}], \text{ де } . \quad (2.12)$$

де P – навантаження, а d – добуток довжини діагоналі відбитка в поділках на ціну однієї поділки лімба барабана окулярного мікрометра.

Лінійний знос контактних поверхонь визначали методом штучних баз.

Відбитки на поверхню тертя досліджуваних зразків наносяться за допомогою приладу ПМТ-3. При куті $\alpha = 136^\circ$ при вершині індентора глибина відбитку становить:

$$h = \frac{d}{7} . \quad (2.13)$$

Лінійний знос поверхні тертя визначається як різниця глибин відбитка для вихідної поверхні та поверхні після тертя (рис. 2.10):

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \frac{(d_1 - d_2)}{7} , \quad (2.14)$$

де Δh – лінійний знос; h_1 – глибина відбитка; h_2 – глибина відбитка після; d_1 – довжина діагоналі відбитка вихідної поверхні; d_2 – довжина діагоналі відбитка після тертя.

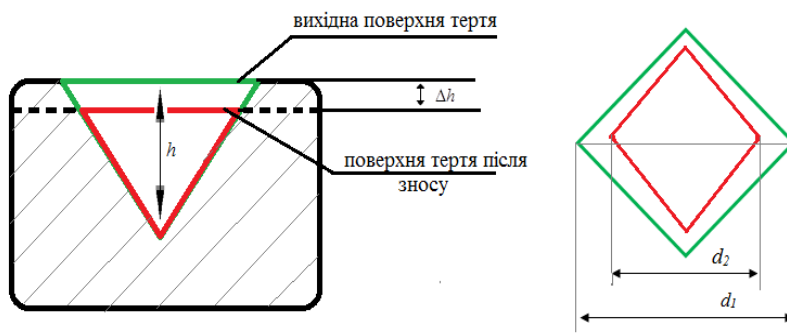


Рис. 2.10. Схема відбитків індентора (ліворуч – вид збоку, праворуч – вид зверху).

Структурний стан поперечних перерізів до і після трибологічних тестів досліджували за допомогою оптичної мікроскопії (мікроскоп МІМ-8М із цифровою фотокамерою Nikon Coolpix-4500), растрової електронної мікроскопії (мікроскоп

TESCAN Mira 3 LMU, обладнаний енергодисперсійним мікроаналізатором OXFORD X-MAX для хімічного мікрорентгеноспектрального аналізу масової частки елементів у зоні контакту) [133].

Аналіз структурних змін, глибини розповсюдження пружно-пластичних деформацій, зміни елементного складу випереджаючої та відстаючої поверхонь при терті в умовах кочення з різним ступенем проковзування проводили за допомогою растрового вимірювально електронного мікроскопу РЕМ-106И з камерою низького вакууму (рис. 2.11)



Рис. 2.11. Зовнішній вигляд растрового електронного мікроскопу РЕМ-106И.

Дослідження фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалів проводилося за допомогою приладу «Мікрон-гамма» методом безперервного вдавлювання індентора (рис. 2.12.)

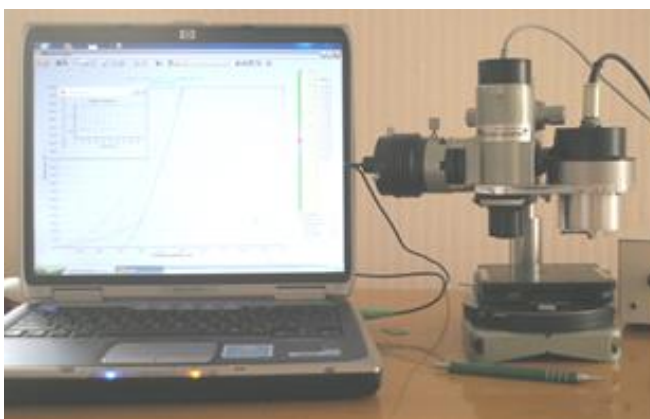


Рис. 2.12. Зовнішній вигляд приладу Мікрон-гамма.

Методом індентування визначались особливості мікродеформації матеріалів за кінетикою впровадження індентора та градієнт властивостей по глибині впровадження [134, 135].

Метод сканування заснований на безперервній реєстрації опору руху індентора по поверхні з певним заданим навантаженням. Визначення сили опору локальних мікрооб'ємів поверхневих шарів досліджуваного матеріалу контактному деформуванню дозволяє проаналізувати стан поверхневого шару (сформованих дисипативних структур при терті) на трасі сканування за параметрами:

- оцінити середню міцність поверхневого шару матеріалу на трасі сканування;
- оцінити розкид і неоднорідність властивостей міцності (зміцнені та знеміцнені фрагменти).

Основа методу сканування полягає в наступному: наявність вздовж траси сканування індентора по поверхні матеріалу твердих/м'яких і дрібних/великих фрагментів дозволяє за графіком спектральної щільності проаналізувати поверхневу міцність досліджуваного матеріалу. За спектральною щільністю можна аналізувати розміри, кількість і міцність фрагментів на трасі сканування [136].

Висновки до розділу 2.

1. Проаналізовано фізико-хімічні властивості мастильних матеріалів для авіаційної та наземної техніки. Обрано для досліджень зразки оливи для гідравлічних пристроїв авіаційної та наземної техніки АМГ-10 (за міжнародними специфікаціями оливи АМГ-10 відповідає: ISO 6743(DIN 51524) HH (HLP), ISO VG 15) на основі глибокодеароматизованої низькозастигаючої фракції з різним заявленим виробниками комплексом присадок та зразки трансмісійної оливи для гіпоїдних передач (ТСгіп) на основі мінеральних очищених фракцій з різним комплексом функціональних присадок.

2. Проаналізовано навантажувально-швидкісні режими та діапазон робочих температур агрегатів, в яких використовуються обрані для досліджень мастильні матеріали. Визначено основні вимоги до їх мастильної здатності, термоокислюваності,

в'язкості, випаровуваності та ін. показників. Визначено переваги оцінки триботехнічних параметрів мастильного матеріалу, що надасть більше можливостей щодо прогнозування надійності як мастильного матеріалу, так і агрегату в цілому при експлуатації. Розроблено методологію оцінки якості мастильних матеріалів на основі вхідного контролю триботехнічних параметрів.

3. Обґрунтовано вибір конструкційних матеріалів для дослідження, розглянуто принцип роботи насосу шестеренного НШ-39М в гідросистемі вертольота Мі-8, модельні зразки виготовлялись з якісних конструкційних сталей 30ХГСА та 45 з урахуванням необхідності забезпечення їх міцністних властивостей, довговічності при експлуатації та технологічності при виготовленні зубчастих коліс.

4. Обґрунтовано вибір програмно-апаратного комплексу для дослідження триботехнічних характеристик контакту при лабораторних випробуваннях мастильних матеріалів в нестаціонарних умовах роботи в режимі кочення з проковзуванням, що імітує роботу зубчастих передач за допомогою роlikової аналогії.

5. Обґрунтовано вибір методу падіння напруження в режимі нормального тліючого розряду для оцінки змащувальної здатності мастильних матеріалів з метою встановлення закономірностей зміни трибологічних та реологічних показників граничного шару мастильного матеріалу. Для визначення ефективної в'язкості мастильного матеріалу в контакті при формуванні структурованих граничних шарів мастильного матеріалу обрано реологічну модель псевдопластичних неньютонівських рідин та степеневий закон Оствальда-де Вейля.

6. Для комплексної оцінки дисипативних структур обрано прилад ПМТ-3 (визначення мікротвердості та лінійного зносу), мікроскоп МІМ-8М із цифровою фотокамерою Nikon Coolpix-4500 (визначення структурного стану приповерхневих шарів контактних поверхонь), мікроскоп TESCAN Mira 3 LMU з енергодисперсійним мікроаналізатором OXFORD X-MAX (визначення хімічного мікрорентгено-спектрального аналізу масової частки елементів у зоні контакту растровою електронною мікроскопією), растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И (аналіз

структурних змін в поверхневих шарах металу по глибині), прилад «Мікрон-гамма» (безперервне вдавлювання індентора для оцінки деформаційного мікрорельєфу та спектральної щільності контактних поверхонь).

РОЗДІЛ 3

ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОКАЛЬНОГО КОНТАКТУ В НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ ТЕРТЯ ПРИ ЗМАЩУВАННІ ГІДРАВЛІЧНИМИ ОЛИВАМИ

Фізико-хімічні та експлуатаційні властивості мастильних матеріалів, від яких залежить довговічність трибосистем при терті кочення з проковзуванням, піддаються систематичному вивченню. Експрес-оцінка антифрикційних та протизношувальних властивостей мастильних композицій на машинах тертя є перспективним напрямком удосконалення методів лабораторних випробувань.

В розділі представлено аналіз триботехнічних характеристик двох товарних партій гідравлічної оливи АМГ-10. В якості мастильних матеріалів обрано зразок №1 – олива «Бора Б» АМГ-10 та зразок №2 – масло АМГ-10.

Зразки контактних поверхонь: ролики – сталь 30ХГСА (HRC 48 – 52, Ra 0,34 мкм). Змащування контактних поверхонь здійснювалось шляхом занурення нижнього ролика в ванночку з оливою.

Режим тертя: нестационарні умови – циклічність проведення в режимі пуск – стаціонарна робота – гальмування – зупинка.

3.1. Кінетика зміни антифрикційних, змащувальних та реологічних параметрів гідравлічних олив при напрацюванні в нестационарних умовах тертя.

Досліджувані зразки олив характеризуються ефективними антифрикційними властивостями. Зразок №1 та зразок №2 проявляють високі припрацьовуючі властивості (рис. 3.1).

Для зразка №1 середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,012 та 0,013 при температурі оливи 20 та 100 °С відповідно, коефіцієнт тертя стабільний, діапазон коливань даного параметру знаходиться в межах 0,01...0,02. Підвищення коефіцієнта

тертя в 1,17 рази на 45 – 49 циклах обумовлено зміною природи граничних шарів при підвищенні температури мастильного матеріалу.

Для зразка №2 середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,0129 та 0,0148 при температурі оливи 20 та 100 °С відповідно. Якщо при температурі оливи 20 °С коефіцієнт тертя аналогічний показнику для зразка №1, то при підвищенні температури оливи до 100 °С даний показник в 1,13 разів перевищує показник, встановлений для зразка №1. Зростання температури оливи призводить до збільшення коефіцієнта тертя в 1,46 рази на 45-49 циклах наробітки.

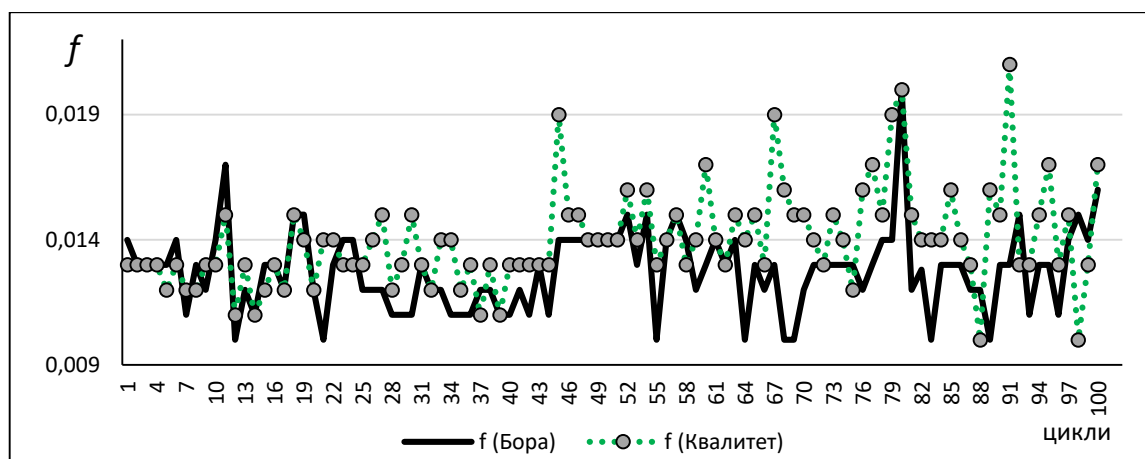


Рис. 3.1. Кінетика зміни коефіцієнта тертя.

Проаналізуємо кінетику зміни змащувальних властивостей гідравлічних олив в триботехнічному контакті.

Досліджувана олива «Бора Б» АМГ-10 (зразок 1) характеризується ефективними змащувальними властивостями як в період пуску, так і при максимальних досліджуваних обертах (рис. 3.2). При підвищенні температури в триботехнічному контакті спостерігається зниження товщини граничних адсорбційних шарів, що обумовлено зміною їх природи – граничні шари переважно фізичної природи змінюються граничними шарами хімічної природи, які характеризуються більш ефективними протизношувальними характеристиками. Зриву мастильного шару при пуску та безпосереднього металевого контакту поверхонь тертя не встановлено, лише

короткочасно, в періоди припрацювання та початкового підвищення температури встановлено напівсухий режим мащення.

При пуску, незалежно від температури мастильного матеріалу, домінує змішаний режим мащення, що свідчить про ефективні пускові властивості зразка №1 (рис. 3.3).

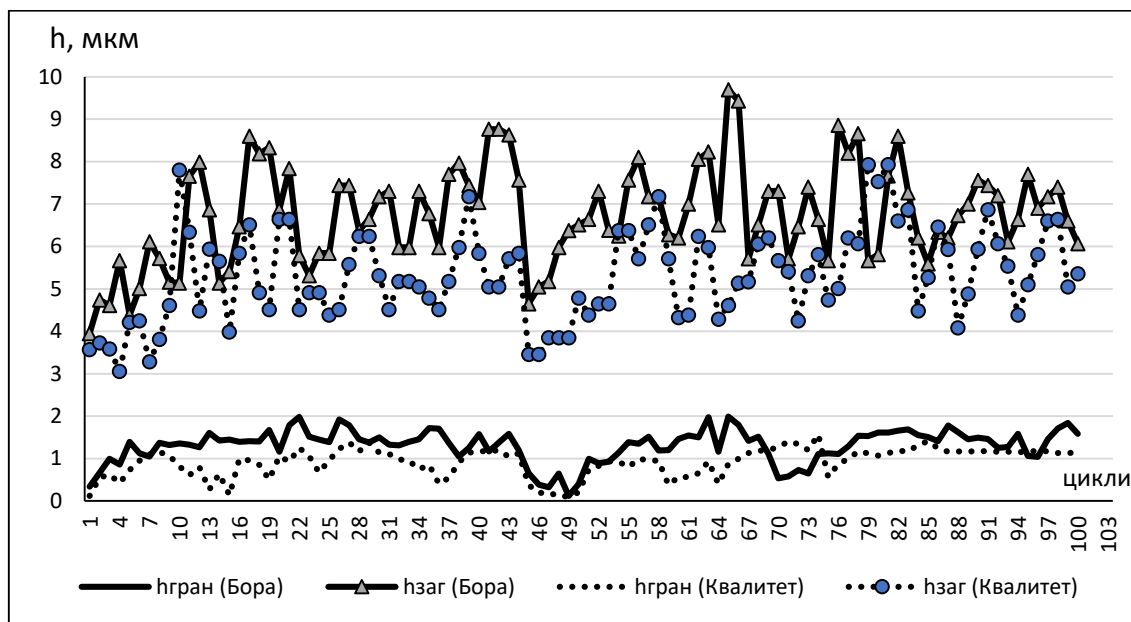


Рис. 3.2. Кінетика зміни товщини граничних адсорбційних шарів ($h_{\text{гран}}$) та загальної товщини мастильного шару ($h_{\text{заг}}$) в контактї при напрацюванні.

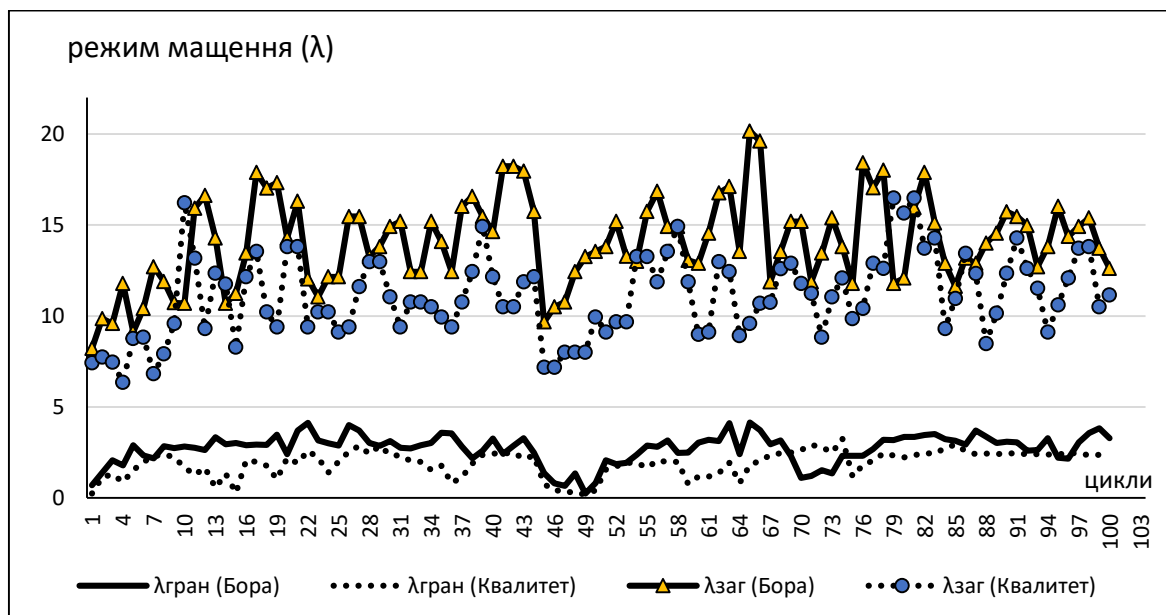


Рис. 3.3. Кінетика зміни режиму мащення в триботехнічному контактї.

При максимальних обертах досліджуваних зразків домінує гідродинамічний режим мащення, незалежно від температури оливи, що свідчить про ефективне розділення контактних поверхонь внаслідок утворення мастильного шару.

Досліджуваний зразок №2 характеризується ефективними змащувальними властивостями при максимальних досліджуваних обертах, в період пуску змащувальні властивості знижуються. При об'ємній температурі оливи 20 та 100 °С товщина граничних адсорбційних шарів становить 0,88 та 0,95 мкм відповідно, що, в середньому, в 1,44 рази менше, в порівнянні з зразком №1 (рис. 3.2). Це призводить до погіршення режиму мащення в контакті при пуску і домінуванні граничного режиму мащення в 25% циклах наробітки. При зростанні температури мастильного матеріалу відбувається тривале відновлення захисних граничних плівок оливи, період їх формування збільшується в 2,5 рази, в порівнянні з зразком №1, обумовлюючи реалізацію напівсухого режиму мащення при пуску.

При максимальних обертах досліджуваних зразків домінує гідродинамічний режим мащення, незалежно від температури оливи, що свідчить про ефективне розділення контактних поверхонь внаслідок утворення мастильного шару. Загальна товщина мастильного шару, яка включає негідро- та гідродинамічну складові, в 1,27 разів менше, в порівнянні з зразком №1, незалежно від температури мастильного матеріалу.

Проаналізуємо кінетику зміни реологічних характеристик досліджуваних олив.

Олива «Бора Б» АМГ-10 характеризується ефективними реологічними властивостями. Забезпечення гідродинамічного режиму мащення на максимальних обертах тривалості циклу, в умовах кочення з 30% проковзуванням відбувається за рахунок високої несучої здатності мастильного матеріалу, формування в контакті гідро- та негідродинамічних складових товщини мастильного шару, які характеризуються низькими напруженнями зсуву, в середньому, 9,4 МПа незалежно від температури оливи (рис. 3.4).

Незважаючи на високі градієнти швидкості зсуву мастильного шару в контакті, від $5,63 \cdot 10^3$ до $5,73 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, які виникають при максимальній швидкості ковзання $0,71 \text{ м/с}$ в умовах кочення з проковзування, мастильний матеріал характеризується ефективною в'язкістю на рівні, в середньому, 4249 та $5039 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при об'ємній температурі оливи 20 та 100°C відповідно (рис. 3.5). Це свідчить про стійкість компонентів оливи до деструкції в умовах зростання градієнту швидкості зсуву. Найбільше зниження ефективної в'язкості в контакті до $105 - 250 \text{ Па}\cdot\text{с}$ відбувається в умовах початкового підвищення температури оливи ($45 - 49$ цикли випробувань). Це обумовлено зміною природи граничних адсорбційних шарів, які характеризуються ефективною адаптацією в широкому діапазоні температур.

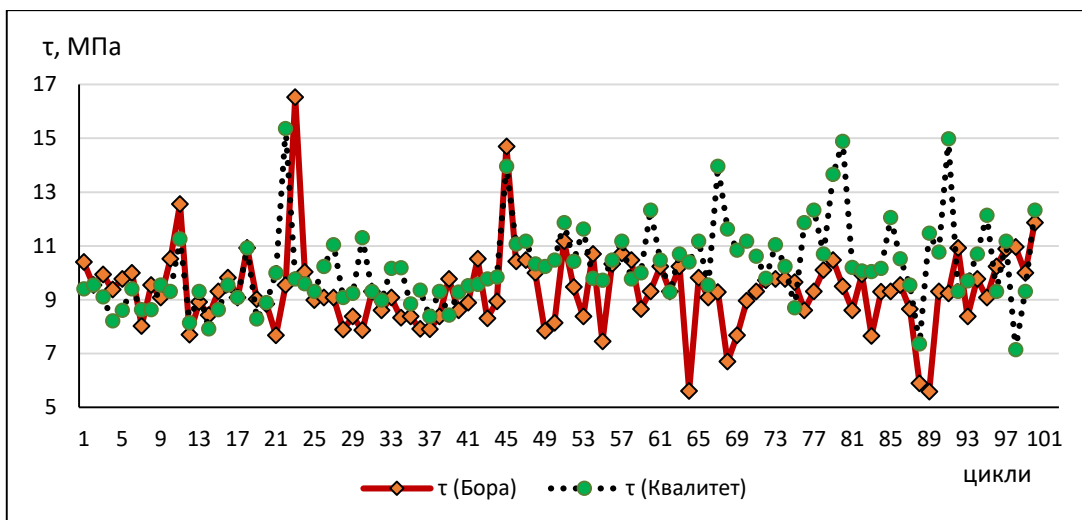


Рис. 3.4. Кінетика зміни напруження зсуву мастильного шару в контакті (τ).

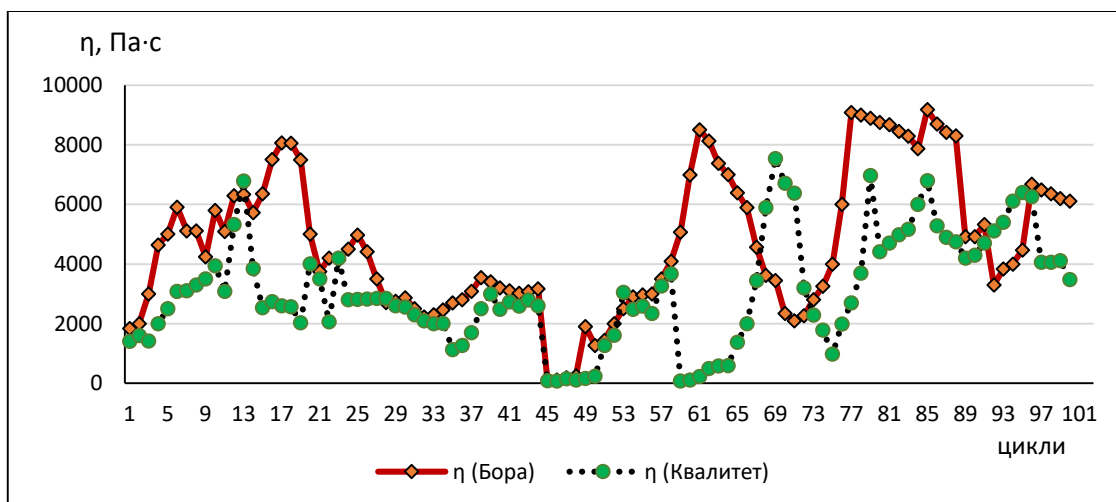


Рис. 3.5. Кінетика зміни ефективної в'язкості оливи (η) в контакті.

Зразок №2, аналогічно зразку №1, характеризується ефективними реологічними властивостями. Напруження зсуву мастильних шарів встановлено на рівні, в середньому, 9,4 МПа при температурі оливи 20 °С, що аналогічно показнику для зразка №1. При зростанні температури оливи до 100 °С даний параметр підвищується до 10,82 МПа, що незначно, в 1,15 разів більше, в порівнянні з зразком №1 (рис. 3.4).

В порівнянні з зразком №1, ефективна в'язкість в контакті знижується, в середньому, в 1,53 раз як при температурі оливи 20 °С, так і при 100 °С та становить 2764 Па·с (при 20 °С) та 3309 Па·с (при 100 °С). Із збільшенням температури при наробітці 45 – 50 циклів встановлено різке зниження цього параметру до 78 – 240 Па·с, що обумовлено адаптацією граничних шарів мастильного матеріалу до зміни температурного режиму в фрикційному контакті.

Діапазон зміни градієнту швидкості зсуву мастильного шару (γ) в контакті при максимальній швидкості ковзання 0,71 м/с в умовах кочення з проковзування для зразків №1 та №2 становить від $4,51 \cdot 10^3$ до $5,73 \cdot 10^5$ с⁻¹.

Таким чином, стійкість компонентів досліджуваного зразка №1 до механо-термічної деструкції при нестаціонарних умовах мащення сприяє ефективному формуванню мастильного шару в контакті з високою несучою здатністю, що забезпечує домінування змішаного або гідродинамічного режиму мащення. При напрацюванні трибосистеми в таких умовах будуть проявлятися оптимальні антифрикційні та протизношувальні характеристики мастильних матеріалів, що є підставою для розробки рекомендацій щодо вибору товарних партій олив для роботи в умовах кочення з проковзуванням на основі запропонованої методики оцінки реологічних та змащувальних властивостей мастильних матеріалів.

3.2. Взаємозв'язок енергетичних та протизношувальних характеристик локального контакту в умовах кочення з проковзуванням.

До важливого експлуатаційного показника триботехнічного контакту, що характеризує дисипативні процеси та енергонавантаженість фрикційного контакту,

відноситься параметр питомої роботи тертя ($A_{\text{терт}}$).

Одержані експериментальні значення $A_{\text{терт}}$ для зразка №1 в діапазоні 1055 – 7419 Дж/мм² характеризують умови роботи трибосистеми з середнім проявом енергетичних процесів в триботехнічному контакті (рис. 3.6). З підвищенням температури оливи з 20 до 100 °С, при переході трибосистеми в більш складні умови тертя, питома робота тертя незначно зростає, в середньому, в 1,1 рази. При підвищенні температури мастильного матеріалу зриву мастильного шару не встановлено, досліджуваний мастильний матеріал за таких умов забезпечує реалізацію в контакті переважно змішаного режиму мащення при пуску.

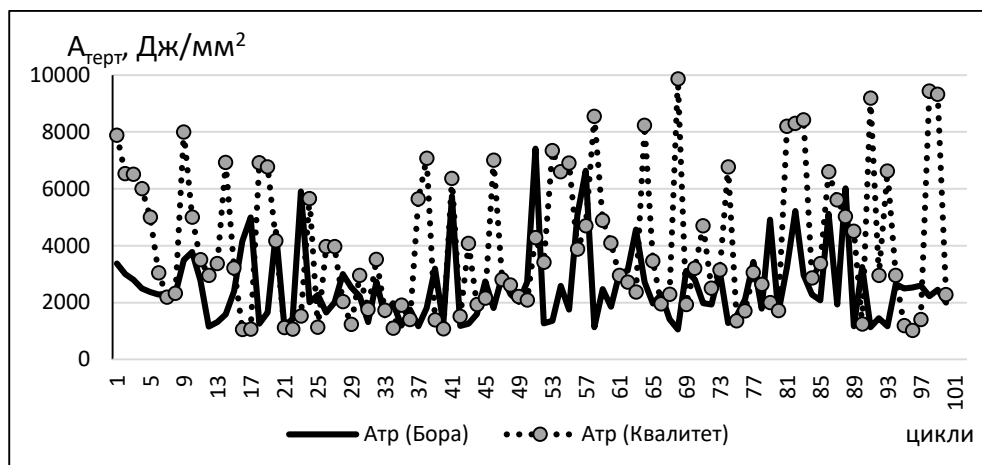


Рис. 3.6. Кінетика зміни питомої роботи тертя ($A_{\text{терт}}$) при напрацюванні.

Для зразка №2 питома робота тертя в контакті в початковий період припрацювання тривалістю до 5 циклу характеризується показниками на рівні 7880 – 5000 Дж/мм², що, в середньому, в 2 рази перевищує аналогічний параметр, встановлений для зразка №1. При подальшому напрацюванні при 20 °С питома робота становить, в середньому, 3578 Дж/мм², що в 1,49 разів вище, в порівнянні з зразком №1. Із збільшенням об'ємної температури оливи до 100 °С питома робота тертя незначно зростає та становить, в середньому, 4329 Дж/мм², що в 1,62 рази вище, в порівнянні з зразком №1. Зафіксовано періодичні стрімкі періоди підвищення $A_{\text{терт}}$ в контакті в 2.....3,5 рази, що свідчить про інтенсифікацію енергетичних процесів як на межі мастильний матеріал – метал, так і в поверхневих шарах металу. Дані процеси

зазвичай призводять до інтенсифікації зношування пар тертя, що, в свою чергу, є головною передумовою для зниження ресурсу трибосистеми.

В табл. 3.1 представлені узагальнені результати зносу та зміни мікротвердості випереджаючої та відстаючої поверхонь сталі 30ХГСА при напрацюванні за умов мащення гідравлічними оливами різних виробників.

Таблиця 3. 1

Показники зносу сталі 30ХГСА та зміни мікротвердості поверхневих шарів після 100 циклів напрацювання

Показники	Мастильний матеріал			
	зразок №1		зразок №2	
Знос контактних поверхонь (сталь 30ХГСА) після 100 циклів напрацювання				
Загальний знос дослідних зразків, мкм	2,31		3,63	
Знос, мкм	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня
	1,01	1,3	1,65	1,98
Інтенсивність зношування	1,1E-10 (1,1·10 ⁻¹⁰)	2,07E-10 (2,07·10 ⁻¹⁰)	1,7965E-10 (1,7965·10 ⁻¹⁰)	3,153E-10 (3,153·10 ⁻¹⁰)
Зносостійкість	9,09E+9 (9,09·10 ⁹)	4,83E+09 (4,83·10 ⁹)	5,57E+09 (5,57·10 ⁹)	3,17E+09 (3,17·10 ⁹)
Мікротвердість дослідних зразків (сталь 30ХГСА)				
Мікротвердість поверхні до експерименту (вихідна), МПа	6206	6124	6408	6186
Мікротвердість поверхні після 100 циклів напрацювання, МПа	6718 (зміцнення)	6641 (зміцнення)	5712 (знеміцнення)	6630 (зміцнення)

Загальний лінійний знос роликів зі сталі 30ХГСА становить 2,31 мкм та 3,63 мкм при змащуванні пар тертя відповідно оливою зразок №1 та зразок №2, при використанні оливи зразок №2 знос пар тертя зростає в 1,57 разів (рис. 3.7). Знос відстаючої поверхні в 1,29 (зразок №1) та в 1,2 (зразок №2) разів перевищує знос випереджаючої поверхні, що обумовлено, за теорією К.Т. Трубіна, зниженням межі витривалості відстаючої поверхні внаслідок зростання швидкості втомного руйнування в умовах різновекторного направлення сил тертя в контакті на випереджуючій та

відстаючій поверхнях.

Інтенсивність зношування як випереджаючої, так і відстаючої поверхонь характеризується низькими значеннями, що свідчить про високу зносостійкість контактних поверхонь та ефективні протизношувальні характеристики досліджуваних олив. При змащуванні пар тертя зразком №2 інтенсивність зношування випереджаючої та відстаючої поверхонь зростає в 1,63 та в 1,52 разів відповідно, в порівнянні з зразком №1.

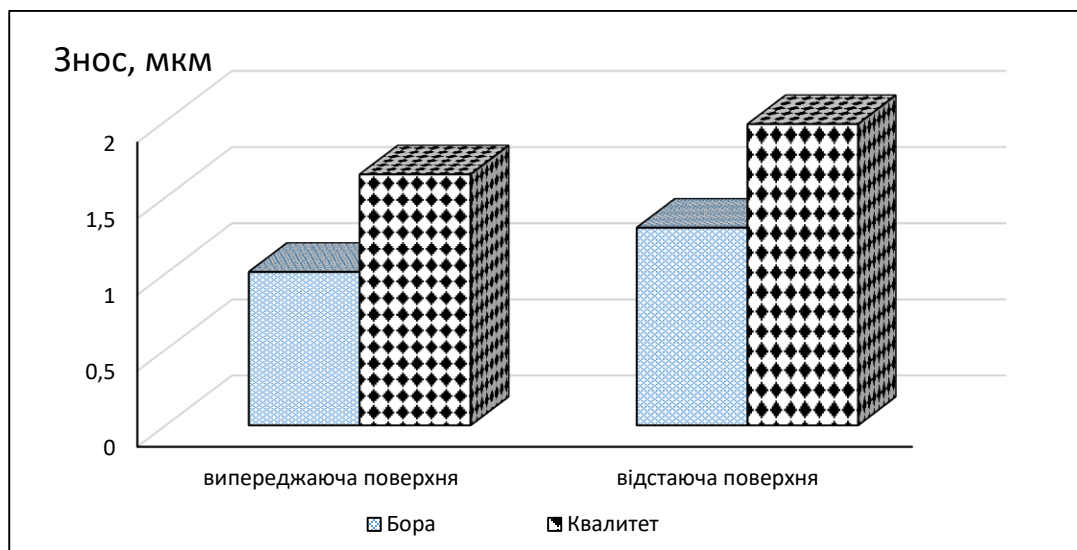


Рис. 3.7. Лінійний знос контактних поверхонь при напрацюванні.

Формування граничних плівок мастильного матеріалу при структурній пристосованості елементів трибоспряження може призвести до механо-фізико-хімічних змін в поверхневих шарах металу, що суттєво вплинуть на зносостійкість контактних поверхонь. Аналіз зміни мікротвердості поверхневих шарів сталі 30ХГСА при напрацюванні 100 циклів показав залежність цього параметру від типу досліджуваного матеріалу.

Зміна мікротвердості поверхневих шарів сталі 30ХГСА при напрацюванні 100 циклів залежить від типу досліджуваного матеріалу та відрізняється реалізацією протилежно протікаючих процесів. При використанні в якості мастильного матеріалу зразка №1 зафіксовано зміцнення як випереджаючої, так і відстаючої поверхні.

Зокрема, мікротвердість поверхневих шарів металу підвищується на 512 та 517 МПа для випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно (рис. 3.8). При змащуванні пар тертя зразком №2 встановлено знеміцнення поверхневих шарів металу для випереджаючої поверхні (зниження мікротвердості після напрацювання склало 696 МПа), а для відстаючої поверхні встановлено зміцнення поверхневих шарів металу (збільшення мікротвердості після напрацювання склало 444 МПа).

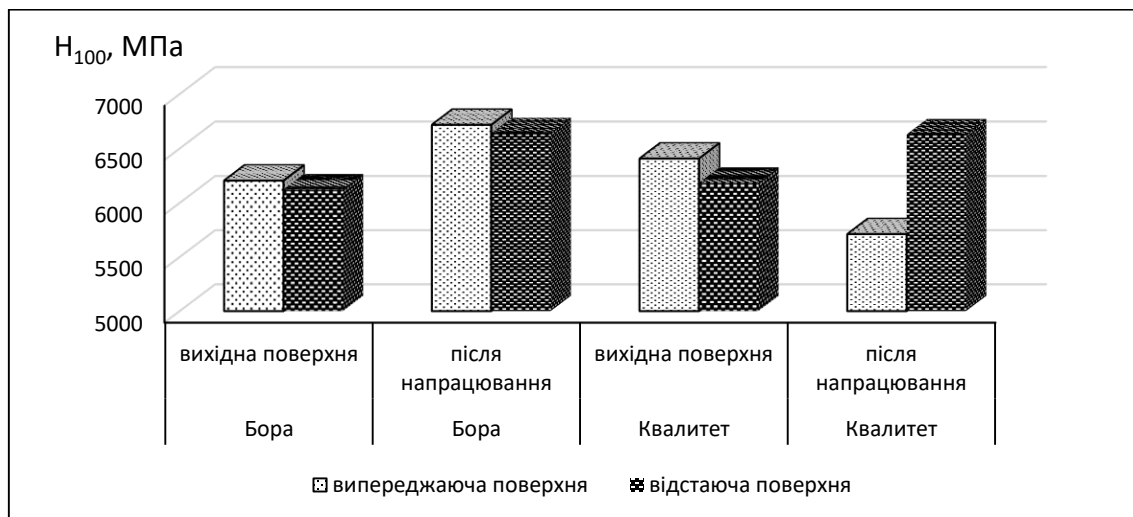


Рис. 3.8. Мікротвердість вихідної поверхні сталі 30ХГСА та після 100 циклів наробітки дослідних зразків.

За рецептурами виробників дослідних зразків №1 та №2 в них ідентичні базова основа (мінеральна олива на основі глибокодеароматизованої низькозастигаючої фракції, яка одержується з продуктів гідрокрекінгу суміші парафіністих нафт і складається з нафтових і ізопарафінових вуглеводнів), загущуюча присадка, спеціальний оливорозчинний барвник червоного кольору. Виробник дослідного зразка №1 заявляє про наявність в оливі комплексу багатофункціональних присадок, виробник дослідного зразка №2 заявляє про наявність в оливі лише антиокислювальної присадки.

Саме склад активних компонентів присадок зразків №1 та №2 впливає на кінетику зміни мікротвердості поверхневих шарів при їх активації в процесі тертя.

Присадки, наявні в зразку №1, характеризуються більш ефективними протизношувальними властивостями та обумовлюють підвищення зносостійкості контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням.

Проведений аналіз основних триботехнічних характеристик досліджуваних гідравлічних олив визначив найбільш значимі показники, які впливають на лінійний знос контактних поверхонь. Оскільки експерименти проводились в нестационарних умовах тертя, при мінливості показників залежно від циклів напрацювання, аналізувався діапазон зміни кожного параметра. До найбільш впливових з них відносяться максимальна питома робота тертя ($A_{\text{терт.макс}}$), мінімальний коефіцієнт тертя ($f_{\text{мін}}$), мінімальна ефективна в'язкість оливи в контакті ($\eta_{\text{еф.мін}}$), мінімальна товщина граничних шарів мастильного матеріалу ($h_{\text{гран.мін}}$) та об'ємна температура оливи (t) (табл. 3.2). Одержана емпірична залежність лінійного зносу пар тертя (I) від зазначених параметрів:

$$I = (A_{\text{терт.макс}}^{0,6} \times f_{\text{мін}}) / (\eta_{\text{еф.мін}}^{0,125} \times h_{\text{гран.мін}}^{0,5} \times t^{0,18}). \quad (3.1)$$

Таблиця 3. 2

Узагальнені триботехнічні характеристики контакту в нестационарних умовах тертя

Показники	Мастильний матеріал			
	зразок №1		зразок №2	
	Температура мастильного матеріалу			
	20	100	20	100
Коефіцієнт тертя	0,01 – 0,017	0,01 – 0,02	0,011 – 0,019	0,01 – 0,021
Товщина граничних адсорбційних шарів, мкм	0,34 – 1,985	0,118– 1,992	0,118 – 1,38	0,104 – 1,57
Ефективна в'язкість в контакті, Па·с	1836 – 8065	104,9 – 9182	1130 – 6789	78,67 – 7544
Питома робота тертя, Дж/мм ²	1152 – 5902	1055 – 7419	1052 – 7995	1016 – 9857

Розрахункові значення лінійного зносу контактних поверхонь в нестационарних умовах тертя, одержані за формулою (3.1), представлені на рис. 3.9.

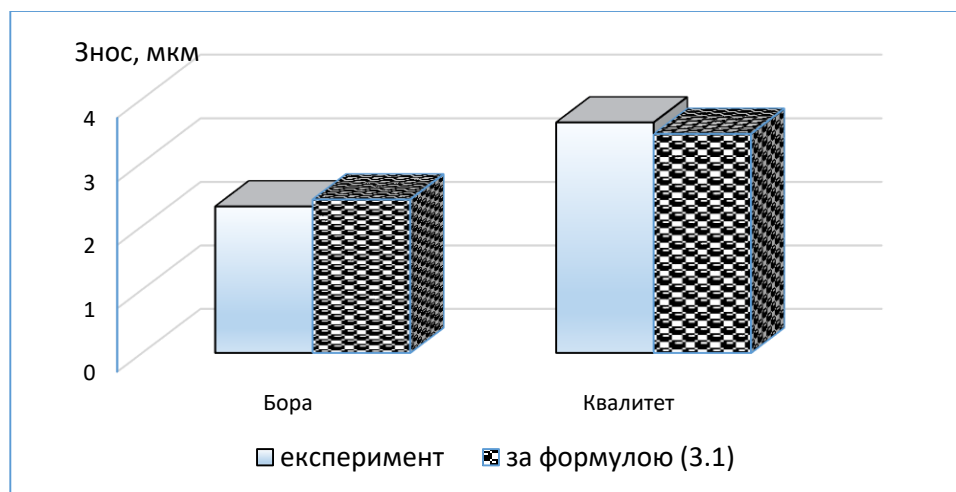


Рис. 3.9. Загальний лінійний знос випереджаючої та відстаючої поверхонь при змащуванні гідравлічною оливою АМГ-10 виробників Бора та Квалитет.

Висока збіжність результатів вимірювань (95-97%) експериментальних показників зносу сталі 30ХГСА при змащуванні гідравлічною оливою АМГ-10 та оцінка зносу за емпіричною розрахунковою формулою дає можливість прогнозувати протизношувальні властивості мастильного матеріалу в нестационарних умовах роботи трибосистеми.

3.3. Самоорганізація трибосистеми в нестационарних умовах тертя з позицій деформаційно-хвильових уявлень.

Багато ефектів при терті і зношуванні взаємодіючих поверхонь при наявності мастильного матеріалу в зоні контакту можна пояснити, виходячи з використання деформаційно-хвильового підходу, причому хвилеподібні деформації проявляються в зонах, що розташовуються попереду від рухомої деталі [137]. Дотичні зусилля, прикладені через рухому деталь (штамп), викликають деформаційно-хвильові процеси. Деформаційна хвиля виникає на лицьовій поверхні взаємодіючих напівпросторів контактних поверхонь і згасає (у статиці) в поверхневому шарі матеріалу на довжині 2 –

3 деформаційних напівхвиль. Під час руху контактної поверхні деформаційна хвиля випереджає її на 2 – 3 напівхвилі.

У даному випадку залишається відкритим питання про стрілу прогину хвилеподібної поверхні, довжину деформаційної ділянки балки-смушки ущільненого мастильного матеріалу та довжину напівхвилі деформації. Для визначення цих величин буде потрібна додаткова інформація, яка може бути отримана на підставі даних з енергетичних показників взаємодіючих деталей у зоні контакту та даних щодо загасання загальної енергії трибосистеми за довжиною простягання деформаційної хвилі.

В роботі [138] розглядаються термодинамічні системи, в яких домінують лише або деформаційні процеси, або трибохімічні реакції. При цьому незворотнє пошкодження металу пов'язане з накопиченням та взаємодією дефектів структури, хімічною чи електрохімічною взаємодією металу та середовища, утворенням нових поверхонь при розрядці дислокацій. Термодинамічна система є гомогенною та ізотропною, процеси втомі протікають в ізобарно-ізотермічних умовах.

Спочатку знакозмінне контактне навантаження в зубчастих передачах в умовах кочення з проковзуванням пластично деформує приповерхневі шари, обумовлюючи їх зміцнення до стану, який споріднений активному статичному зміцненню. Наступний вплив знакозмінного навантаження пов'язаний з пружним передеформуванням поверхневих шарів. Перехід в режим пружного циклічного деформування обумовлений, з однієї сторони, зміцненням металу, а з іншої, пониженням ефективної амплітуди знакозмінного навантаження внаслідок полегшення умов тертя при появі продуктів зношування. Далі процеси розвиваються за звичайними законами для втомі [139]: попередньо знеміцнені шари спочатку розвпорядковуються до певного рівня, а після цього (в умовах передеформування) відбувається їх повторне зміцнення, надалі ці процеси періодично повторюються [140]. Процеси від утоми супроводжуються інтенсивним утворенням вакансій, коалесценція яких приводить до виникнення пор та мікротріщин [141].

Поверхневі шари напівпросторів в зоні трибоконтакту не можуть вільно переміщатися вздовж площини зсуву деталей і зустрічають на шляху свого переміщення горизонтальні зв'язки у вигляді дотичних зусиль, які перешкоджають вільному зсуву елементів деформаційних шарів. Тому такі шари при досягненні дотичними силами своїх критичних значень набувають можливості вільно згинатися, тобто мати можливість для реалізації поздовжнього зусилля [142]. За такого механізму взаємодії деталей їх поверхневі шари або втрачають поздовжню стійкість, або знаходяться під впливом циклічних, пружних деформацій, які зникають після зняття навантаження. Зазначимо, що при взаємодії контактуючих деталей, їх поверхневі шари (дисипативні структури) спочатку схильні до пластичних деформацій в результаті розсіювання частини кінетичної енергії руху деталі і перетворення її в теплову. При подальшому переміщенні деталей відбувається поверхневе зміцнення зовнішнього шару при більш м'якій (податливій) основі нижчерозташованих шарів матеріалу контактуючих поверхонь. Зазначимо, що робота пар тертя в режимі еластогідродинамічного та граничного мащення призводить до ущільнення змащувального шару на активованих тертям контактних поверхнях та формування в результаті структурної пристосованості граничних плівок мастильного матеріалу в зонах, що примикають до поверхневих шарів деталей. Навантажені шари деталей, що розглядаються, покриваються ущільненим і в'язким граничним шаром мастильного матеріалу, який згущує свою консистенцію за рахунок надбання неньютонівських властивостей анізотропними шарами, появою дрібних продуктів зносу деталей і реакцій хімічної взаємодії металевих поверхонь і компонентів мастильного матеріалу. В результаті такої взаємодії має місце утворення на ущільненій поверхні шару металу (балки-смужки) ще й пружнопластичного покриття з мастильного матеріалу.

Якщо дотримуватися такого уявлення про утворення дисипативних структур на металевих деталях при треті, то деталі, що розглядаються, являють собою анізотропне середовище, яке сприймає навантаження (нормальне та дотичне) в дисипативних структурах (ущільнена балка-смужка з верхнім пружнопластичним шаром мастильного

матеріалу). Причому сформовані на контактних поверхнях дисипативні структури спираються через поздовжні і поперечні зв'язки на внутрішні шари деталей («пружна» основа).

Таким чином, оцінка пружно-пластичних властивостей дисипативного анізотропного шару в умовах дії дотичних напружень є важливим завданням при моделюванні процесів фізико-механічної взаємодії основного металу, оксидів та граничних шарів мастильного матеріалу. Застосуємо дані припущення для зубчастого зачеплення насосу шестеренного НШ-39М при змащуванні оливою АМГ-10.

3.3.1. Моделювання пружних деформаційних та хвильових процесів в дисипативних структурах.

Розглядаючи анізотропну дисипативну структуру кожної з взаємодіючих деталей зубчастої передачі шестеренного насоса будемо вважати, що діюче дотичне зусилля не перевищує критичного зусилля для балки-смужки $T_1 < T_{кр1}$. Це означає, що дисипативна структура, що має ущільнений масляний шар, знаходиться на абсолютно плоскій (недеформованій) шорсткій поверхні. У такому разі балка-смужка знаходиться під дією обмежувачів поперечних переміщень, які обумовлені поперечними зв'язками пружної основи. Також будемо вважати, що між ущільненим граничним шаром мастильного матеріалу та балкою-смужкою діє реактивне дотичне зусилля:

$$T = \Delta T + ql + cu(x), \quad (3.2)$$

де $q = f_{сц}Pb$ – гранична сила тертя (зчеплення) на одиницю довжини ділянки з ущільненим мастильним матеріалом (l – число дорівнює довжині балки-смужки); P – вертикальне навантаження на деталь; b – ширина балки-полоски; $u = u(x)$ – продольне переміщення граничного шару мастильного матеріалу; $f_{сц}$ – коефіцієнт граничного тертя (зчеплення) між ущільненим шаром мастильного матеріалу (з частинками зносу деталей) та балкою-смужкою (поверхневого шару деталі); c – поздовжня жорсткість ущільненого шару.

Орієнтуючись на значення безрозмірних параметрів, згідно [143], і приймаючи, що $T_1 < T_{1\text{кр}}$, де $T_{1\text{кр}}$ – критична сила для балки-смужки, представимо залежність критичної сили від довжини балки-смужки. Якщо:

$$\bar{l} = \frac{l}{\pi} \sqrt[4]{\frac{k}{E_c I}} \quad (3.3)$$

та

$$\bar{T} = \frac{T}{\sqrt{k E_c I}}, \quad (3.4)$$

то згідно [143]

$$T_{\text{кр}} \approx 2\sqrt{k E_c I}. \quad (3.5)$$

У наведених виразах (3.2) – (3.5): ΔT – надлишкове дотичне зусилля (ступінь перевантаження T порівняно з $T_{\text{кр}}$); k – коефіцієнт жорсткості пружної основи за Вінклером; E_c – модуль пружності поверхневого шару деталі.

Розглядаючи задачу з анізотропними дисипативними структурами (ущільнений граничний шар мастильного матеріалу, ущільнений поверхневий шар металу та пружна основа) допускаємо, що між шаром металу та граничним шаром мастильного матеріалу має місце пружно-фрикційний зв'язок (рис. 3.10).

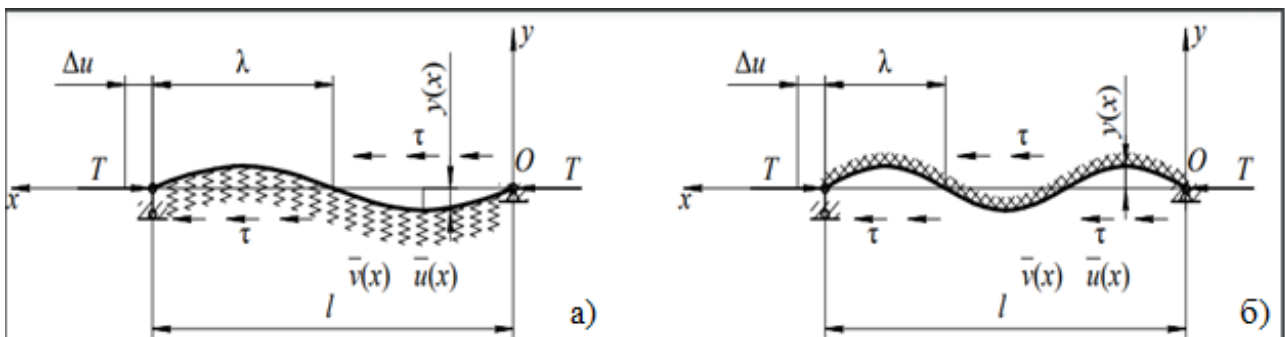


Рис. 3.10. Поздовжній вигин дисипативної структури при терті: а – форма з двома напівхвилями; б – форма з трьома напівхвилями.

Для такого завдання критична сила Ейлера обумовлена коефіцієнтом тертя для граничного режиму мащення, а також значення цієї сили не залежить від довжини балки-смужки (принаймні коли кількість напівхвиль n на зовнішній стороні балки-

смужки $n \geq 3$ [144]). Тому не допускається серйозних неточностей у постановці та вирішенні задачі: довжину граничного шару можна визначити як граничну довжину балки-смужки l за умови формування граничних шарів мастильного матеріалу на всій поверхні тертя при відносному взаємному проковзуванні контактних поверхонь.

Розглянемо граничний шар мастильного матеріалу на поверхні деталі, при цьому вважатимемо, що цей шар зазнає механо-термічної деструкції, ущільнюється, насичується продуктами зносу і взаємодіє з плоскою, зміцненою зовнішньою поверхнею деталі. Цей шар можна називати зовнішнім шаром деталі, який сприймає зовнішнє нормальне та дотичне навантаження на фрикційну пару. Саме в цьому шарі відбувається локалізація пружно-пластичних деформацій, змін при терті, розсіювання/акумуляція енергії, що призводить до формування дисипативних структур. Таким чином, граничний шар мастильного матеріалу можна вважати тонкою пружно-пластичною пластинкою, яка схильна до дії дотичних напружень, які виникають при терті (рис. 3.10).

Тоді диференціальне рівняння, яке описує поздовжній вигин граничних шарів мастильного матеріалу під дією дотичних напружень, має вигляд:

$$E_c I y^{IV} + T y'' + k y = 0, \quad (3.6)$$

де: E_c – модуль пружності граничного шару мастильного матеріалу (приведений); $T = \Delta T + q l + c u(x)$ – дотична сила, прикладена до граничних шарів мастильного матеріалу, яка впливає на втрату поздовжньої стійкості цими шарами та накопичення ними незворотних деформацій; ΔT – надмірне дотичне зусилля, що призводить до накопичення поверхневими шарами залишкових хвилеподібних деформацій (за умов максимального проковзування); $T_{кр}$ – критична сила Ейлера для граничного шару мастильного матеріалу, при якій він втрачає поздовжню стійкість; k – коефіцієнт жорсткості пружної основи деталі; I – момент інерції поперечного перерізу граничного шару мастильного матеріалу.

У наведеному виразі (3.6) зусилля T являє собою таку поздовжню силу, коли анізотропні шари дисипативної структури поверхневих шарів зубців шестерні та її

пружної основи не відповідають гіпотезі плоских перерізів (зазнають депланації плоских перерізів).

При цьому граничні умови дисипативної структури мають вигляд:

$$\begin{aligned} y(0)=0; y''(0)=0; \\ y(l)=0; y''(l)=0, \end{aligned} \quad (3.7)$$

Вважаючи спирання стрижня шарнірним, розглянемо сукупність функцій

$$y_n(x) = A_n \sin \frac{\pi n x}{l}, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.8)$$

Прийmemo $\alpha_n = \frac{\pi n x}{l}$; n – число напівхвиль на вигнутій балці завдовжки l .

Сукупність функцій (3.8) є системою власних функцій завдання (3.6). Для балки-смужки – граничних шарів мастильного матеріалу на деталі довжиною l можливі два розрахункові випадки: 1 – граничні шари мастильного матеріалу формуються на пружній основі ($k \neq 0$); 2 – граничні шари мастильного матеріалу без пружної основи ($k=0$). Випадок 1 реалізується за умов формування дисипативних структур з знеміцненими поверхневими шарами, наприклад, за умов прояву ефекта Ребіндера. Випадок 2 реалізується за умов зміцнення поверхневих шарів контактних поверхонь при терті, наприклад, згідно табл. 3.1 при змащуванні оливою «Бора Б» АМГ-10 (зразок 1).

Звертаючись до рівняння (3.8) і використовуючи уявлення про функції прогину як власних функціях завдання:

$$y(x) = A_n \sin \alpha_n x, \quad (3.9)$$

і підставляючи (3.9) в рівняння (3.6), одержуємо:

$$T_c = E_c I \alpha_n^2 + \frac{E}{2\alpha_n}. \quad (3.10)$$

Знаходимо мінімум (3.10), для чого обчислюємо:

$$\frac{\partial T_c}{\partial \alpha_n} = 0. \quad (3.11)$$

Звідки одержуємо:

$$\alpha_n = \sqrt[3]{\frac{E}{4E_c I}}. \quad (3.12)$$

Як впливає з [145], коефіцієнт жорсткості пружної основи становить:

$$k = \frac{E\alpha_n}{2} \quad (3.13)$$

або

$$k = \frac{E}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{E}{4E_c I}} \quad (3.14)$$

Розглядаючи (3.13) α_n можна трактувати як невідоме число напівхвиль на ділянці з сформованими граничними шарами мастильного матеріалу завдовжки π .

У цьому випадку $\lambda_n = \pi \sqrt[3]{\frac{4E_c I}{E}}$ представляємо як довжину напівхвилі ділянки граничного шару мастильного матеріалу, що втратила стійкість. Довжина зазначеної ділянки, що втратила стійкість, дорівнюватиме:

$$l = n\lambda_n. \quad (3.15)$$

Критичне навантаження для стійкості граничних шарів мастильного матеріалу зокрема та сформованих анізотропних дисипативних структур в цілому (аналог сили Ейлера) визначається з (3.5), (3.14).

Звертаючись до функції $y(x)$ трактуватимемо A_n як стрілу прогину балки-плівки під дією дотичної сили (сили тертя).

3.3.2. Оцінка напружено-деформованого стану в зоні зачеплення зубців при терті.

В даний час чисельні методи, такі як метод скінченних елементів, метод скінченних об'ємів, безсіткові методи, все частіше використовуються при моделюванні складних задач при оцінці швидких локальних змін при терті контактних поверхонь машин та механізмів.

У цьому розділі представлені важливі аспекти практичної методології, застосованої для проектування шестеренчастого насоса з використанням параметричних можливостей програмного забезпечення ANSYS. Проведено моделювання зубчатого зачеплення шестеренного насосу НШ-39М з метою оцінки напружено-деформованого стану в зоні зачеплення зубців при терті.

Модель зубчатого зачеплення була побудована в системі Dassault Systems Catia V5 R30 та була експортована в ANSYS Workbench 2019 R3.

Параметри зубчастого колеса при побудові моделі:

- модуль зачеплення: $m = 3.175$;
- кількість зуб'ів: $n = 12$
- ширина зачеплення: $b = 20$ мм
- матеріал колеса: 30ХГСА
- модуль Юнга: 215 ГПа
- коефіцієнт Пуассона: 0,3

В зонах контакту зуб'ів була створена максимально детальна сітка для отримання точних результатів: розмір ребра сітки складає 150 мкм (рис. 3.11).

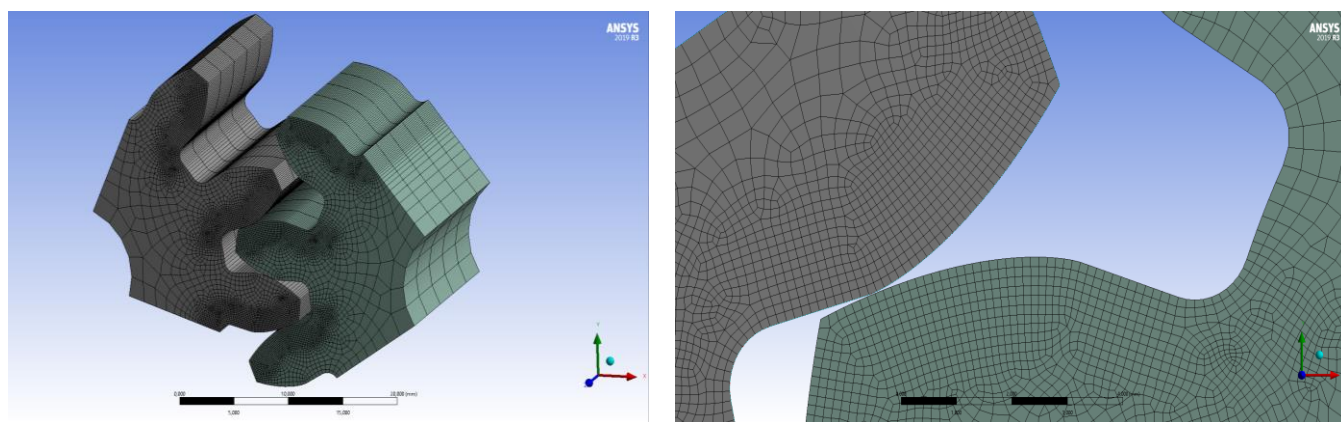


Рис. 3.11. Модель зубчастого зачеплення в ANSYS Workbench.

З урахуванням того, що в процесі тертя поверхневі шари контактних поверхонь зміцнюються (табл. 3.1), використання програмного комплексу ANSYS дозволяє врахувати даний фактор та провести розрахунок, що відповідає міцністним характеристикам матеріалу. Завдання вирішувалося в об'ємній постановці з використанням тетраедральних кінцевих елементів із квадратичною інтерполяцією поля переміщень та відповідних кінцевих елементів для контакту поверхня-поверхня.

Для аналізу розподілу контактних напружень в зоні зачеплення зубців було задано обертання ведучого зубчастого колеса з діапазоном обертання 60 градусів за

годинниковою стрілкою. При моделюванні обрано мінімальний коефіцієнт тертя в програмному забезпеченні ANSYS, який становив 0,1. Оцінку напружено-деформованого стану зубчастого зачеплення проводили на різних стадіях зачеплення, особлива увага приділялась в зоні проковзування зубців де напруження можуть досягати гранично-допустимих значень (рис. 3.12).

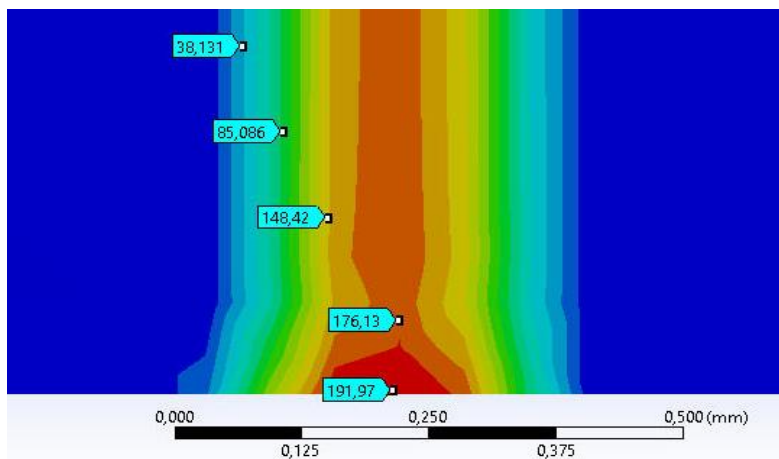


Рис. 3.12. Оцінка напружено-деформованого стану зубчастої пари в зоні проковзування на площадці контакту.

Проведено оцінку напружено-деформованого стану контактних поверхонь при контактних напруженнях за Герцем в зоні зачеплення 180, 380 та 555 МПа (рис. 3.12, табл. 3.3).

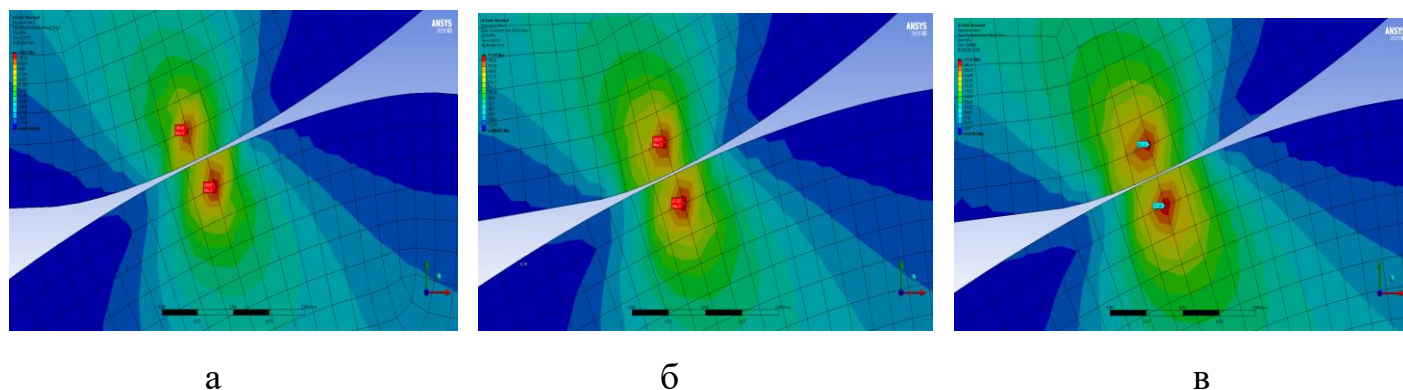


Рис. 3.12. Зона розподілу еквівалентних напружень по Мізесу в зубчастому зачепленні при контактних напруженнях за Герцем 180 МПа (а), 380 МПа (б) та 555 МПа (в).

Компоненти напружено-деформованого стану зубчастого зачеплення

Розрахункове контактне напруження за Герцем, МПа	Максимальні еквівалентні напруження по Мізесу, МПа	Глибина зони розподілу еквівалентних напружень по Мізесу, мкм	Глибина найбільших еквівалентних напружень по Мізесу, мкм
180	100	160	100
380	212	180	110
555	312	200	130

Аналіз результатів моделювання встановив, що при збільшенні контактного напруження за Герцем з 180 до 555 МПа глибина зони розподілу еквівалентних напружень по Мізесу зростає на 20%, при цьому також на 23% зростає глибина їх локалізації. Співставлення розрахункових значень контактних напружень в зубчастому зачепленні за формулою Герца (σ_{max}) та максимальних глибинних еквівалентних напружень за Мізесом ($\sigma_{глиб}^{екв}$) методом скінченних елементів відповідає співвідношенню, зазначеному в [165]:

$$\sigma_{глиб}^{екв} = 0,56\sigma_{max} \quad (3.16)$$

Нестационарні умови роботи зубчастих передач, режими пуск-зупинка призводять до циклічних змін контактних навантажень, що спричиняють такі руйнування поверхні, як викришування, зношування, деформація та ін.

Експериментально та теоретично встановлено, що руйнування зубців відбувається під впливом дотичних напружень (Shear Stress), максимум яких досягається на глибині 1...2 % діаметра тіла кочення. Для зубчастого зачеплення радіус кривизни визначається за формулою $\rho = 0,5d_w \sin 20^\circ$. В обраному шестеренному насосі НШ-39М при $d_w = 44,5$ мм, радіусі кривизни $\rho = 7,61$ мм розрахункова глибина локалізації максимальних дотичних напружень становить $\approx 76...152$ мкм, що відповідає глибині, визначеній за допомогою програмного забезпечення ANSYS тільки при контактному напруженні за Герцем 180 МПа (табл. 3.4). З збільшенням

контактного напруження за Герцем до 555 МПа глибина локалізації максимальних дотичних напружень становить 210 мкм.

Таблиця 3.4

Величина дотичних напружень та їх локалізація в зубчастому зачепленні

Розрахункове контактне напруження за Герцем, МПа	Дотичні напруження при моделюванні (Shear Stress), МПа	Розрахункове максимальне дотичне напруження по Беляєву, МПа	Глибина локалізації максимальних дотичних напружень при моделюванні, мкм
180	-38,85...+69,017	54,72	125
380	-69,01...+110,49	115,52	187
555	-89,02 ...+167,84	168,72	210

Напруження розтягу призводять до зародження та розвитку тріщини, що спричинює руйнування зуба. При моделюванні встановлено, що напруження розтягу в ніжці зубця досягають максимуму при однопарному зачепленні (рис. 3.13).

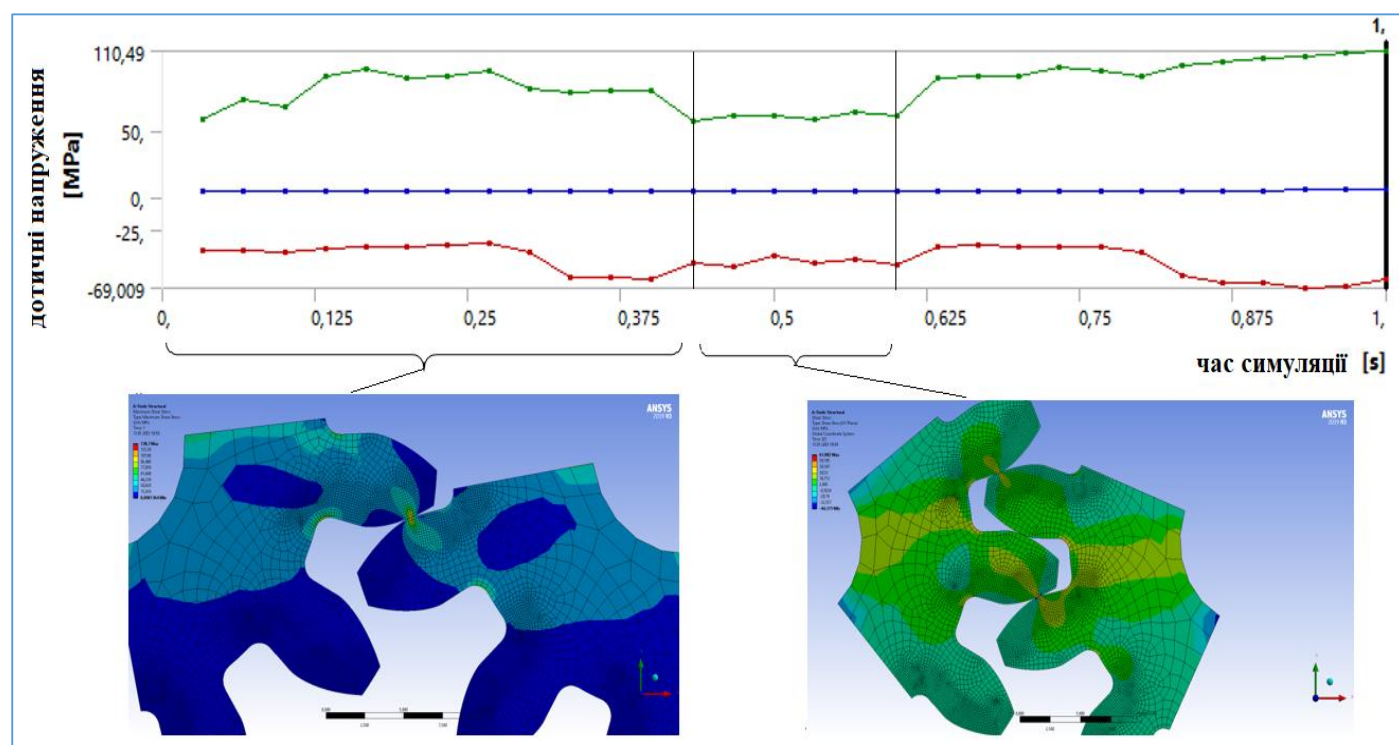


Рис. 3.13. Напружено-деформований стан та розподіл дотичних напружень при максимальному контактному напруженні за Герцем 380 МПа.

Аналіз епюр дотичних напружень (τ_{xy}) у поперечному перерізі зубців свідчить, що в зоні контакту дотичні напруження змінюються за величиною та знаком. Епюри мають два екстремуми, причому, величина максимальних напружень на випереджаючій поверхні (початковій головці зуба шестерні) приблизно на 10-15% нижче напружень на відстаючій поверхні (початковій ніжці зубця колеса) (рис. 3.14).

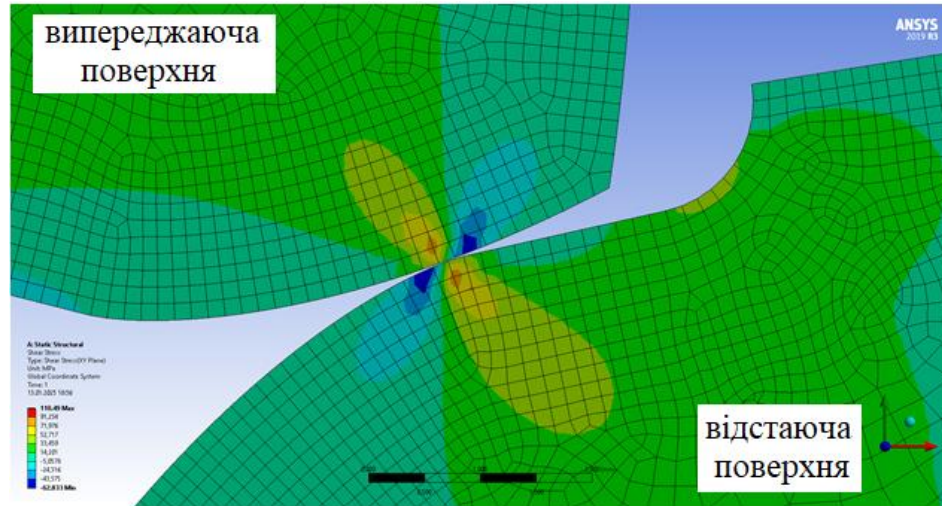


Рис. 3.14. Епюри дотичних напружень в зубчастому зачепленні в площині ХУ при максимальному контактному напруженні за Герцем 380 МПа.

В умовах кочення з проковзуванням величину максимальних дотичних напружень по Беляєву розраховують за формулою:

$$\tau = 0,304\sigma_{max} \quad (3.17)$$

Співставлення результатів величини максимальних дотичних напружень в зубчастому зачепленні, одержаних при моделюванні та за формулою (3.17) (табл. 3.4), встановило високі розбіжності до 20 % при найменшому обраному контактному напруженні за Герцем, що становило 180 МПа. З підвищенням контактного напруження за Герцем до 380 та 555 МПа розбіжність в визначенні максимальних дотичних напружень зменшується до 4,5 та 0,5 % відповідно. Припускаємо, що метод скінченних елементів, використаний при моделюванні зубчастого зачеплення в ANSYS Workbench, є більш точним та універсальним методом, оскільки в його основі лежать фундаментальні рівняння теорії пружності. Технології ANSYS дозволяють моделювати

явища на рівні вирішення лінійних та нелінійних, стаціонарних та нестаціонарних просторових завдань механіки деформованого твердого тіла та механіки конструкцій (включаючи нестаціонарні геометрично та фізично нелінійні завдання контактної взаємодії елементів конструкцій).

Результати моделювання підтверджують, що при роботі зубчастої передачі точка контакту зубців переміщується їх робочим поверхням, що призводить до появи в них змінних за величиною і за знаком дотичних напружень. Такий характер навантаження може пояснити процес зародження втомних мікротріщин і втомного викришування матеріалу зубців. У табл. 3.5 вказані розрахункові значення дотичних напружень (Shear Stress) для однієї з фаз зачеплення з найбільшим проковзуванням, визначені за запропонованими залежностями на основі проведеної симуляції роботи зубчатого зачеплення шестеренного насосу НШ-39М при оцінці напружено-деформованого стану в зоні зачеплення зубців при терті:

$$\tau = -(\sigma_{max})^{0,71} (min) \quad (3.18)$$

$$\tau = +(\sigma_{max})^{0,81} (max) \quad (3.19)$$

Таблиця 3.5

Співставлення дотичних напружень при моделюванні та розрахунках

Розрахункове контактне напруження за Герцем, МПа	Дотичні напруження при моделюванні (Shear Stress), МПа	Розрахункові дотичні напруження (Shear Stress, МПа) за формулами (3.18) та (3.19)
180	-38,85...+69,017	-39,9...+67,1
380	-69,01...+110,49	-67,9...+123
555	-89,02 ...+167,84	-88,8...+167

Представлені розрахункові результати величини і знаку дотичних напружень в зубці, одержані за формулами (3.3) та (3.4), добре узгоджуються з результатами методу скінченних елементів при моделюванні зубчастого зачеплення в ANSYS Workbench в

інтервалі діючих в зубчатому зачепленні максимальних контактних напружень за Герцем 180-555 МПа.

Таким чином, застосування систем автоматизованих розрахунків значно полегшує процес отримання функціональних залежностей щодо оцінки напружено-деформованого стану з подальшим аналізом та візуалізацією отриманих результатів.

Висновки до розділу 3.

1. Проведені дослідження на програмно-апаратному комплексі за допомогою роlikової аналогії моделювали роботу зубчастих передач в умовах кочення з проковзуванням. Досліджувались товарні оливи АМГ-10 різних виробників. Похибки одержаних експериментальних значень досліджуваних показників знаходяться в межах 7 – 10 %. Експериментально встановлено, що олива «Бора Б» АМГ-10 (виробництво: ТОВ «Бора Б», ТУ У 19.2-38474081-010:2016 зі зм. 1) характеризується більш ефективними змащувальними, антифрикційними, протизношувальними та реологічними характеристиками в нестаціонарних умовах тертя в режимі кочення з проковзуванням (30%), в порівнянні з оливою АМГ-10 (виробництво: ООО «НПП Квалитет», ГОСТ 6794-75 изм. 1 – 5).

2. Олива «Бора Б» АМГ-10 характеризується ефективними антифрикційними властивостями: середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,012 та 0,013 при температурі оливи 20 та 100 °С відповідно, коефіцієнт тертя стабільний. Для оливи АМГ-10 середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,0129 та 0,0148 при температурі оливи 20 та 100 °С відповідно, при підвищенні температури оливи до 100 °С даний показник в 1,13 разів перевищує показник, встановлений для оливи «Бора Б» АМГ-10.

3. Досліджувана олива «Бора Б» АМГ-10 характеризується ефективними змащувальними властивостями як в період пуску, так і при максимальних досліджуваних обертах. Зриву мастильного шару при пуску та безпосереднього металевих контакту поверхонь тертя не встановлено, лише короткочасно, в періоди

припрацювання та початкового підвищення температури встановлено напівсухий режим мащення. При пуску, незалежно від температури мастильного матеріалу, домінує змішаний режим мащення, при максимальних обертах досліджуваних зразків домінує гідродинамічний режим мащення, що свідчить про ефективні змащувальні властивості оливи «Бора Б» АМГ-10. Для досліджуваного масла АМГ-10 при об'ємній температурі оливи 20 та 100 °С товщина граничних адсорбційних шарів в 1,44 рази менше, що призводить до погіршення режиму мащення в контакті при пуску і домінуванні граничного режиму мащення в 25% циклах наробітки. При зростанні температури мастильного матеріалу відбувається тривале відновлення захисних граничних плівок оливи, період їх формування збільшується в 2,5 рази, обумовлюючи реалізацію напівсухого режиму мащення при пуску. Загальна товщина мастильного шару в 1,27 разів менше, в порівнянні з оливою «Бора Б» АМГ-10, незалежно від температури мастильного матеріалу.

4. Встановлено, що олива «Бора Б» АМГ-10 характеризується низькими напруженнями зсуву, в середньому, 9,4 МПа незалежно від температури оливи та високою ефективною в'язкістю на рівні, в середньому, 4249 та 5039 Па·с при об'ємній температурі оливи 20 та 100 °С відповідно. Для оливи АМГ-10 напруження зсуву мастильних шарів встановлено на рівні 9,4 МПа при температурі оливи 20 °С, що аналогічно показнику для оливи «Бора Б» АМГ-10, при зростанні температури оливи до 100 °С даний параметр збільшується в 1,15 рази. Для оливи АМГ-10 ефективна в'язкість в контакті знижується в 1,53 раз як при температурі оливи 20 °С, так і при 100 °С та становить 2764 Па·с (при 20 °С) та 3309 Па·с (при 100 °С).

5. Питома робота тертя в фрикційному контакті при використанні оливи «Бора Б» АМГ-10 знаходиться в діапазоні 1055 – 7419 Дж/мм², що характеризує умови роботи трибосистеми з середнім проявом енергетичних процесів в триботехнічному контакті. З підвищенням температури оливи з 20 до 100 °С, при переході трибосистеми в більш складні умови тертя, питома робота тертя незначно зростає, в середньому, в 1,1 рази. Для оливи АМГ-10 зафіксовано періодичні стрімкі періоди підвищення питомої роботи

тертя в контактi в 2.....3,5 рази, що свiдчить про iнтенсифiкацiю енергетичних процесiв як на межi мастильний матерiал – метал, так i в поверхневих шарах металу. Данi процеси зазвичай призводять до iнтенсифiкацiї зношування пар тертя, що, в свою чергу, є головною передумовою для зниження ресурсу трибосистеми.

6. Загальний лiнiйний знос роликiв зi сталi 30ХГСА становить 2,31 мкм та 3,63 мкм при змащуванні пар тертя вiдповiдно оливою «Бора Б» АМГ-10 та оливою АМГ-10 (знос пар тертя зростає в 1,57 рази). Знос вiдстаючої поверхнi в 1,29 (олива «Бора Б» АМГ-10) та в 1,2 (олива АМГ-10) разiв перевищує знос випереджаючої поверхнi. При змащуванні пар тертя оливою АМГ-10 iнтенсивнiсть зношування випереджаючої та вiдстаючої поверхонь зростає в 1,63 та в 1,52 разiв вiдповiдно. Присадки, наявнi в оливі «Бора Б» АМГ-10, характеризуються бiльш ефективними протизношувальними властивостями та обумовлюють пiдвищення зносостiйкостi контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням за рахунок змiцнення поверхневих шарiв металу при напруцювання, для оливи АМГ-10 встановленi процеси змiцнення – знемiцнення, що обумовлюють зниження зносостiйкостi пар тертя.

7. Одержана емпирична залежнiсть лiнiйного зносу пар тертя вiд найбільш значимих триботехнiчних характеристик, якi впливають на лiнiйний знос контактних поверхонь: максимальної питомої роботи тертя, мiнiмального коефiцiєнту тертя, мiнiмальної ефективної в'язкостi оливи в контактi, мiнiмальної товщини граничних шарiв мастильного матерiалу та об'ємної температура оливи. Висока збiжнiсть результатiв вимiрювань (95-97%) експериментальних показникiв зносу сталi 30ХГСА при змащуванні гiдравлiчною оливою АМГ-10 та оцiнка зносу за емпиричною залежнiстю дає можливiсть прогнозувати протизношувальнi властивостi мастильного матерiалу в нестационарних умовах роботи трибосистеми.

8. Розроблено алгоритм визначення розподiленого дотичного зусилля по довжинi примикання граничного шару мастильного матерiалу до деталi з урахуванням анизотропних властивостей дисипативних структур та гiпотези про хвилеподiбний стан

поверхневого шару ущільненого мастильного матеріалу на абсолютно плоскій (недеформованій) шорсткій поверхні з пружною основою.

9. Запропоновано розрахунок визначення дотичних зусиль, спрямованих на втрату пружної стійкості граничних шарів мастильного матеріалу, що призводить до безпосередньої механодеструкції граничного шару в зоні проковзування контактних поверхонь, з урахуванням пружно-фрикційної взаємодії граничного шару мастильного матеріалу з приповерхневим шаром металу.

10. При моделюванні зубчатого зачеплення шестеренного насосу встановлено, що при збільшенні контактного напруження за Герцем з 180 до 555 МПа глибина зони розподілу еквівалентних напружень по Мізесу та глибина локалізації максимальних еквівалентних напружень по Мізесу зростає на 20% та 23% відповідно.

11. Визначено зміну дотичних напружень при моделюванні зубчастого зачеплення в ANSYS Workbench у поперечному перерізі зубців за величиною та знаком; величина максимальних напружень на випереджаючій поверхні на 10-15% нижче напружень на відстаючій поверхні.

12. Запропоновано розрахункові формули визначення величини і знаку максимальних дотичних напружень в зоні зачеплення зубців з найбільшим проковзуванням, які узгоджуються з результатами моделювання методом скінченних елементів.

РОЗДІЛ 4

МЕХАНІЗМИ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ДИСИПАТИВНИХ СТРУКТУР В НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ ТЕРТЯ ПРИ ЗМАЩУВАННІ ТРАНСМІСІЙНИМИ ОЛИВАМИ

Протизношувальні та протизадирні присадки, які додають при компаундуванні товарних партій трансмісійних олив, утворюють захисний шар на поверхні контактуючих елементів трибоспряження. Таким чином, щоб ідентифікувати вірогідні механізми, які під впливом присадок забезпечують підвищення зносостійкості пар тертя, необхідно визначити параметри, що впливають на формування захисного шару, отриманого присадкою, і трибологічні властивості цього шару, оскільки вони безпосередньо пов'язані з присадкою та її реактивності і спорідненості до активованої в процесі тертя поверхні [146]. Для визначення цих параметрів необхідно провести три напрями дослідження: склад мастильного матеріалу, умов експлуатації, що відповідають застосуванню редукторів і властивості контактних поверхонь.

Природу та властивості отриманих граничних шарів при терті, як функцію взаємодії базової оливи та присадок, умов експлуатації та контактних матеріалів, з точки зору товщини мастильного шару, топографії зони тертя, хімічного складу модифікованих в процесі тертя поверхневих шарів, вивчали за допомогою ряду методів аналізу поверхні.

Умови експерименту:

- мастильний матеріал: зразок №1 – олива трансмісійна «Бора Б» ТСгіп та зразок №2 – трансмісійна олива для гіпоїдних передач ТСгіп (ТУ 38.1011332-90 зм. 1, 2);
- матеріал пар тертя: ролики зі сталі 30ХГСА (HRC 48 – 52, Ra 0,34 мкм) та сталі 45 (HRC 38 – 42, Ra 0.37 мкм);
- змащування контактних поверхонь – занурення нижнього ролика в ванночку з оливою;

– режим тертя в нестаціонарних умовах: періодична робота крокових двигунів дослідної установки в режимі пуск – стаціонарна робота – гальмування – зупинка шляхом їх програмного керування. Тривалість одного повного циклу роботи двигунів становила 80 с.

4.1. Антифрикційні, змащувальні та реологічні характеристики трансмісійних олив в нестаціонарних умовах тертя.

Останнім часом багато дослідницьких зусиль було спрямовано на розробку високоефективних та енергозберігаючих мастильних матеріалів або присадок для машинобудування. Виробники все частіше розглядають мастила як ключовий елемент для розробки механізмів ще на етапі проектування. Ефективне застосування мастильних матеріалів в важких умовах експлуатації є необхідною передумовою для підвищення довговічності трибоагрегатів. Оцінка антифрикційних та змащувальних показників мастильних матеріалів є ключовим моментом для вибору високоякісного продукту в забезпеченні нормальної роботи трибоагрегатів в період експлуатації.

В таблиці 4.1 представлені усереднені результати триботехнічних параметрів фрикційного контакту в умовах кочення з проковзуванням при використанні трансмісійних олив різних виробників.

Таблиця 4.1

Триботехнічні характеристики контакту

Показники	Мастильний матеріал			
	Зразок 1		Зразок 2	
	Температура мастильного матеріалу, °С			
	20	100	20	100
Коефіцієнт тертя	0,006 – 0,016	0,011 – 0,02	0,008 – 0,02	0,011 – 0,02
Товщина граничних адсорбційних шарів, мкм	0,17 – 1,85	0,125 – 1,88	0,16 – 1,642	0,041 – 1,52
Загальна товщина мастильного шару, мкм	3,321 – 10,76	4,65 – 9,7	2,22 – 8,37	3,188 – 9,7
Напруження зсуву масляного шару, МПа	4,53 – 11,98	8,08 – 14,43	6,03 – 15,9	8,15 – 19,31
Ефективна в'язкість в контакті, Па·с	553,9 – 3850	73,21 – 5403	253,4 – 4727	78,71 – 3866
Питома робота тертя, Дж/мм ²	736 – 9469	1364 – 11640	1116 – 36400	1507 – 17210

Кінетика зміни коефіцієнта тертя в триботехнічному контакті свідчить, що досліджувані зразки олив характеризуються ефективними припрацьовуючими властивостями, зниження коефіцієнту тертя в початковий період наробітки тривалістю 7 циклів становить, в середньому, 1,5 рази для зразка №1 та зразка №2. Встановлена загальна закономірність для досліджуваних трансмісійних олив щодо зростання коефіцієнту тертя при підвищенні температури з 20 до 100 °C (рис. 4.1).

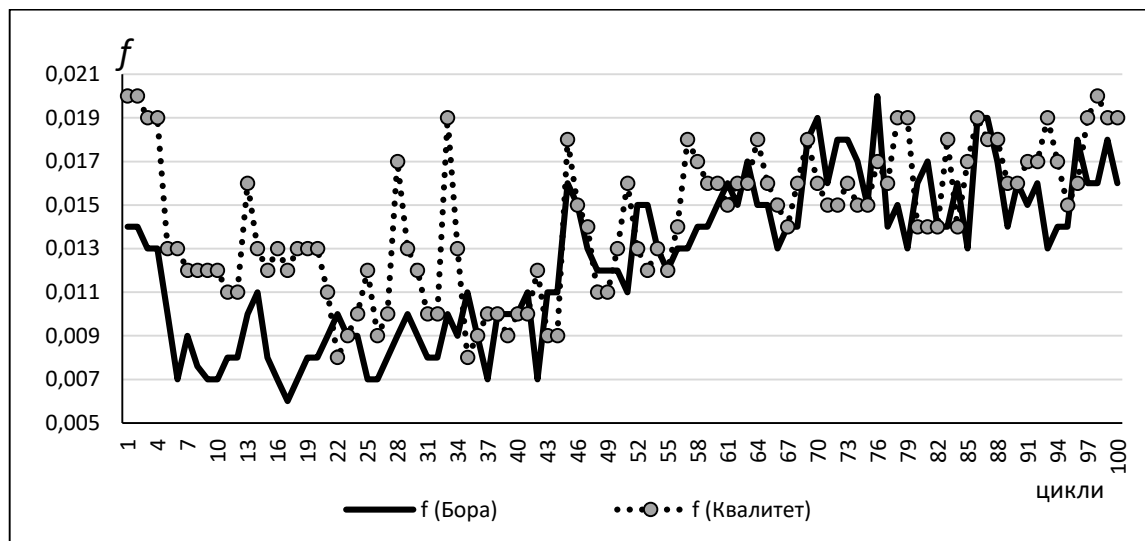


Рис. 4.1. Кінетика зміни коефіцієнта тертя при напрацюванні.

Для зразка №1 середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,009 та 0,015 при температурі оливи 20 та 100 °C відповідно, коефіцієнт тертя стабільний, діапазон коливань даного параметру знаходиться в межах 0,006...0,02. Підвищення коефіцієнта тертя в 1,66 рази на 45 – 49 циклах обумовлено зміною природи граничних шарів при підвищенні температури мастильного матеріалу.

Для зразка №2 середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,012 та 0,016 при температурі оливи 20 та 100 °C відповідно, що в 1,3 рази перевищує показники, встановлені для зразка №1. Коефіцієнт тертя в початковий період припрацювання в 1,4 рази вищий, в порівнянні з зразком №1, аналогічна закономірність зберігається протягом всього періоду напрацювання при температурі оливи 20 °C. Зростання

температури оливи призводить до збільшення коефіцієнта тертя в 2 рази на 45-49 циклах наробітки.

Досліджувані зразки олив характеризуються ефективними змащувальними властивостями як в період пуску, так і при максимальних досліджуваних обертах.

При підвищенні температури в триботехнічному контакті для зразку № 1 зниження товщини граничних адсорбційних шарів обумовлено інтенсифікацією механо-хімічних процесів – граничні шари фізичної природи з слабкими Ван-дер-Ваальсовими силами взаємодії з матеріалом контактної поверхні замінюються більш стійкими адсорбційними хімічномодифікованими шарами, які характеризуються більш ефективними протизношувальними характеристиками (рис. 4.2). Деструкції граничних шарів при пуску не встановлено, до 2 % циклів встановлено сухий режим мащення.

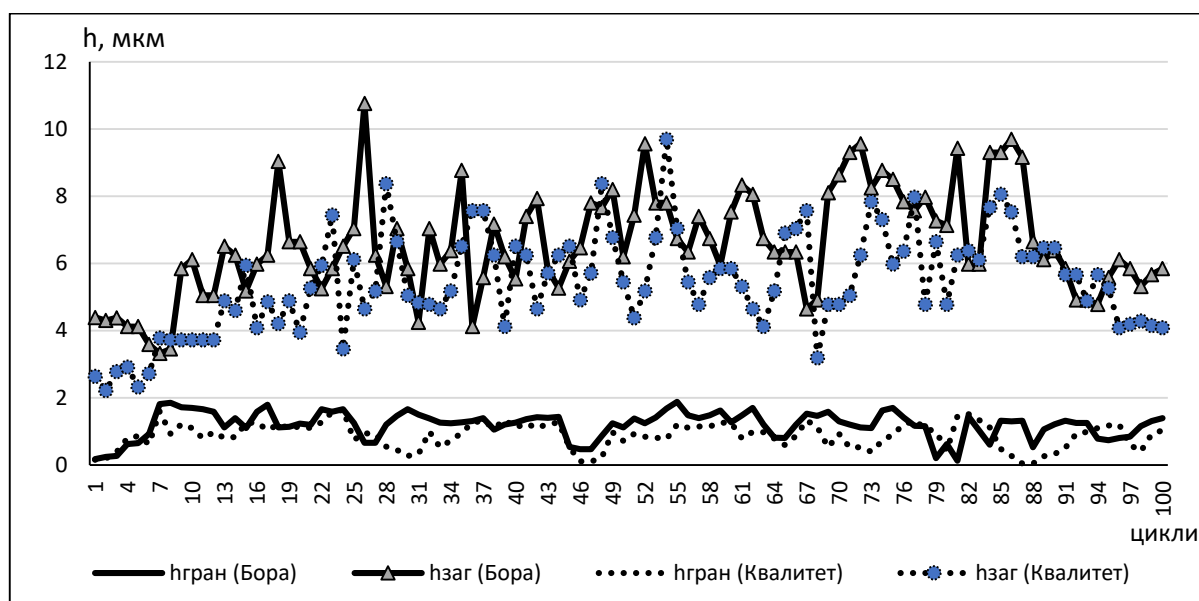


Рис. 4.2. Формування граничних адсорбційних шарів ($h_{\text{гран}}$) та загальної товщини мастильного шару ($h_{\text{заг}}$) в фрикційному контакті при напруженні.

При пуску, незалежно від температури мастильного матеріалу, переважає змішаний режим мащення, що свідчить про ефективні пускові властивості зразка №1 (рис. 4.3). Зміна температури зразка №1 в широкому діапазоні не впливає на домінування змішаного режиму мащення в початковий період циклу, що підтверджує ефективні в'язкісно-температурні властивості оливи. При максимальних обертах

досліджуваних зразків, що відповідає стаціонарному періоду циклу наробітки, відбувається значне зростання товщини мастильного шару за рахунок гідродинамічної складової, при цьому створюються умови для реалізації гідродинамічного режиму мащення, який забезпечує надійне розділення контактних поверхонь.

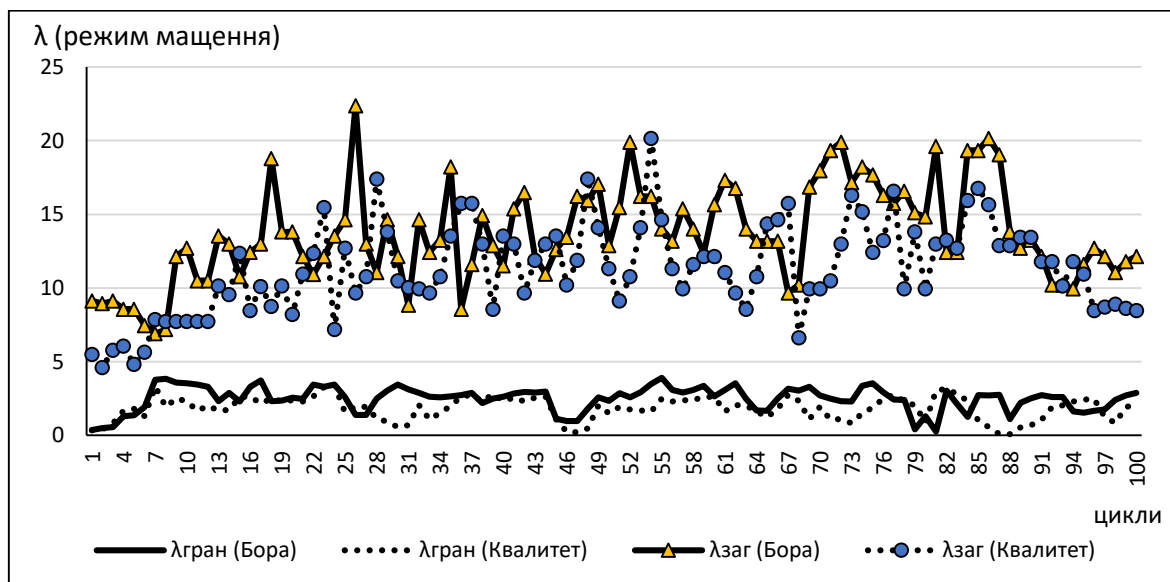


Рис. 4.3. Кінетика зміни режиму мащення в триботехнічному контакті: $\lambda = 0 \dots 1$ – домінування режиму без мастильного матеріалу; $\lambda = 1 \dots 1,5$ граничний; $\lambda = 1,5 \dots 3$ – змішаний; $\lambda = 3 \dots 4$ – еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний); $\lambda \geq 4$ – гідродинамічний.

Встановлені закономірності формування граничних адсорбційних шарів на активованих тертях контактних поверхнях та загальної товщини мастильного шару для зразку № 2 аналогічні змінам, розглянутим для зразку №1. Відмінності полягають в наступному. В період припрацювання загальна товщина мастильного шару для зразка №2 менше в 2 рази, в порівнянні з зразком №1. При об'ємній температурі оливи 20°C товщина граничних адсорбційних шарів становить, в середньому, $0,96 \text{ мкм}$, що в 1,3 рази менше, в порівнянні з зразком №1 (рис. 4.2). Зниження товщини граничних адсорбційних шарів обумовлює домінування граничного режиму мащення в період пуску в 50% циклах наробітки внаслідок підвищення імовірності їх механічної деструкції при локалізації максимальних дотичних напружень не в товщині мастильної

плівки, а на межі мастильна плівка-метал. При зростанні температури мастильного матеріалу короткочасно, на 45 – 58 циклах, товщина граничних шарів знижується в 2,5 рази, що призводить до домінування сухого режиму мащення при пуску.

Використання зразку №2 також забезпечує реалізацію гідродинамічного режиму мащення в усьому досліджуваному температурному діапазоні при максимальних обертах досліджуваних зразків (рис. 4.3). Загальна товщина мастильного шару, яка включає негідро- та гідродинамічну складові, в 1,2 разів менше, в порівнянні з зразком №1, незалежно від температури мастильного матеріалу. В період припрацювання загальна товщина мастильного шару для зразка №2 менше в 2 рази, в порівнянні з зразком №1.

Формування товщини мастильного шару різної природи призводить до зміни реологічних характеристик олив від ньютонівських до неньютонівських властивостей, що обумовлено відмінностями властивостей між структурованими граничними плівками мастильного матеріалу та об'ємними характеристиками олив.

Олива трансмісійна «Бора Б» ТСгіп (зразок №1) характеризується ефективними реологічними властивостями. Забезпечення гідродинамічного режиму мащення на максимальних обертах тривалості циклу, в умовах кочення з 30% проковзуванням відбувається за рахунок високої несучої здатності мастильного матеріалу, формування в контакті гідро- та негідродинамічних складових товщини мастильного шару, які характеризуються низькими напруженнями зсуву, в середньому, 6,67 та 11,18 МПа при об'ємній температурі оливи 20 та 100 °С відповідно (рис. 4.4).

Незважаючи на високі градієнти швидкості зсуву мастильного шару в контакті, від $1,3 \cdot 10^4$ до $7,43 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, які виникають при максимальній швидкості ковзання 0,71 м/с в умовах кочення з проковзування, мастильний матеріал характеризується ефективною в'язкістю на рівні, в середньому, 1807 та 2142 Па·с при об'ємній температурі оливи 20 та 100 °С відповідно (рис. 4.5).

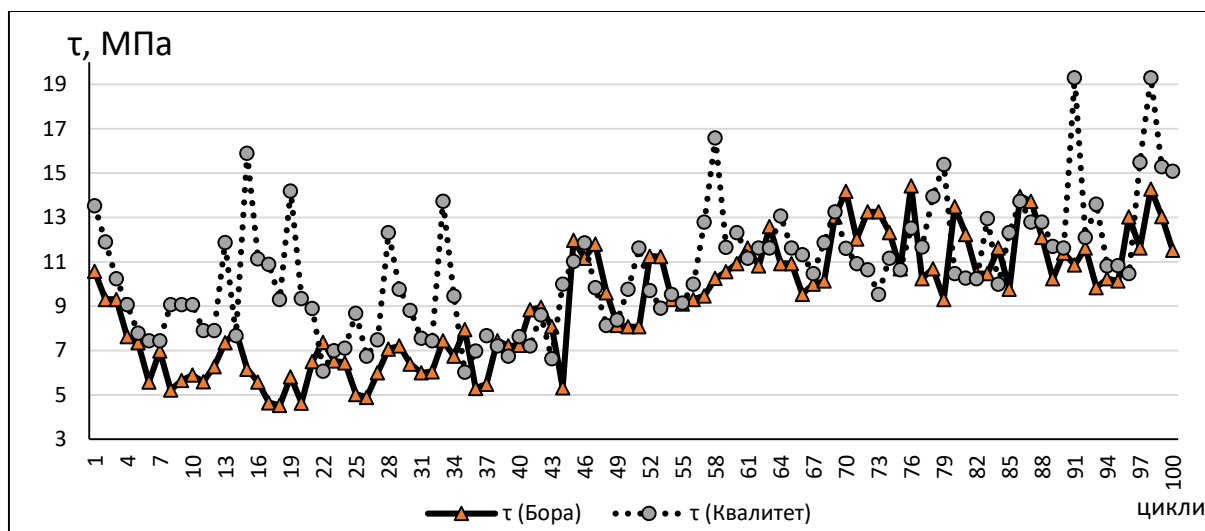


Рис. 4.4. Кінетика зміни напруження зсуву мастильного шару в контактї (τ).

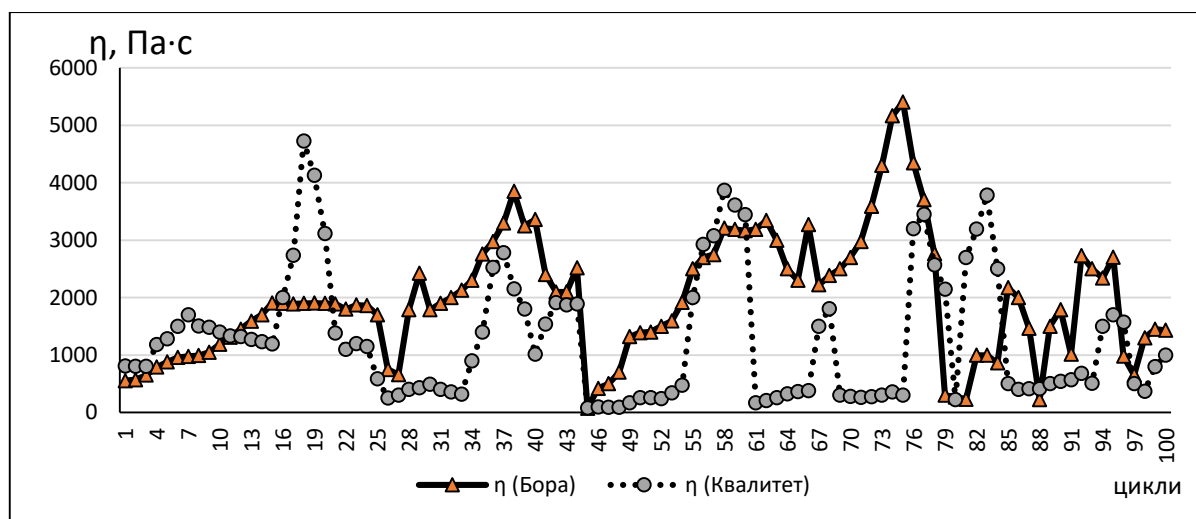


Рис. 4.5. Кінетика зміни ефективної в'язкості оливи (η) в контактї.

Це свідчить як про стійкість компонентів оливи до деструкції в умовах зростання градієнту швидкості зсуву, так і про утворення захисних плівок на поверхнях металу (до 90 % поверхні вкриті плівкою, яка проявляється при збільшенні поверхні тертя під мікроскопом). Найбільше зниження ефективної в'язкості в контактї до 73 – 500 Па·с відбувається в умовах початкового підвищення температури оливи (45 – 49 цикли випробувань). Це обумовлено зміною природи граничних адсорбційних шарів, які характеризуються ефективною адаптацією в широкому діапазоні температур.

Олива зразок №2, аналогічно зразку №1, характеризується ефективними реологічними властивостями. Напруження зсуву мастильних шарів встановлено на рівні, в середньому, 9,01 МПа при температурі оливи 20 °С, що в 1,35 разів більше, в порівнянні з зразком №1. При зростанні температури оливи до 100 °С даний параметр підвищується до 11, 91 МПа, що аналогічно показнику для зразка №1 (рис. 4.4).

В порівнянні з зразком №1, ефективна в'язкість в контакті знижується, в середньому, в 1,2 та в 1,85 раз при температурі оливи 20 та 100 °С відповідно та становить 1447 Па·с (при 20 °С) та 1158 Па·с (при 100 °С). Із збільшенням температури періодично при наробітці встановлено різке зниження цього параметру до 78 – 500 Па·с, що обумовлено тривалою адаптацією граничних шарів мастильного матеріалу. Зниження загальної товщини мастильного шару, зазначене вище, призводить до зростання градієнту швидкості зсуву мастильного шару (γ) в контакті при максимальній швидкості ковзання 0,71 м/с в умовах кочення з проковзування. В середньому, γ становить $4,85 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, діапазон зміни параметру при напрацюванні – від $6,09 \cdot 10^3$ до $2,6 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$.

Слід зазначити, що встановлена залежність ефективної в'язкості олив від градієнту швидкості зсуву свідчить про надбання мастильними матеріалами властивостей неньютоновівської рідини, що необхідно проаналізувати.

Оскільки в умовах експерименту найбільше зниження ефективної в'язкості в контакті до 73,21 та 78,71 Па·с відповідно для зразка 1 та 2 відбувається в умовах початкового підвищення температури оливи (45 – 49 цикли випробувань), що обумовлено зміною природи граничних адсорбційних шарів, прийmemo дані значення ефективної в'язкості в контакті для ньютонівської рідини, оскільки внаслідок механо- та термодеструкції імовірність утворення стабільних граничних шарів на даному етапі напрацювання низька. За формулою (2.7) значення п'єзокоефіцієнта в'язкості α становлять $0,6 \cdot 10^{-8}$ та $0,81 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$ для зразка 1 та 2 відповідно. При формуванні стійких граничних адсорбційних шарів в процесі структурної пристосованості встановлено, що при використанні в якості мастильного матеріалу зразка 1 та 2

поверхня тертя відповідно для зазначених олив на 90% та 50 % вкрита плівками мастильного матеріалу.

Прийmemo, що при оцінці змащувальних властивостей мастильного матеріалу в контактi в нестационарних умовах в період пуску, при мінімальній частоті обертання дослідних зразків (до 30 об/хв), проявляються характеристики негідродинамічної складової товщини мастильного шару – виключно граничних адсорбційних шарів. При цьому ефективна в'язкість мастильних матеріалів зростає в 60...75 разів, а при розрахунку за формулою Баруса значення п'єзокоефіцієнта в'язкості α при структуризації граничних шарів мастильного матеріалу збільшується в 4,6 та 3,5 разів для зразків 1 та 2 відповідно.

Формула Баруса враховує лише зміну в'язкості, спричинену тиском, що часто може стати проблемою, пов'язаною з роботою мастильного матеріалу в системі. У деяких випадках, особливо в неконформних, локальних і сильно навантажених контактах, таких як шарики-роликopідшипники, шестерні, кулачки і т. д., контактний тиск часто стає на кілька порядків вище за атмосферний тиск. Тому практично важливо кількісно оцінити поведінку будь-якого мастильного матеріалу в залежності від тиску, щоб оцінити ефективність його змащувальних властивостей. Математично α є дотичною до кривої рівняння Баруса при нульовому тиску і використовується в аналітичних формулах еластогідродинамічного режиму мащення. У роботі [147] відмічено, що в ідеалі α не залежить від тиску і чутливий до температури. Однак у літературі неодноразово згадувалося про значну похибку, яку дає рівняння Баруса при підвищених тисках вище 0,5 Гпа: зі зростанням тиску коефіцієнт α втрачає незалежність від тиску. Існуючі емпіричні кореляції оцінки коефіцієнтів в'язкості-тиску на основі рівняння Баруса застосовні тільки для обмеженого діапазону змінних («тиск», «температура», «напруження зсуву» і т. д.), а в деяких інших випадках вони здаються занадто неясними, щоб їх можна було осмислити та реалізувати в інженерних розрахунках [148].

У проведених дослідженнях максимальний контактний тиск по Герцу становив 200 МПа [130], що, відповідно до залежності Баруса, не повинно призводити до суттєвого збільшення в'язкості мастильного матеріалу. Однак, встановлене в експерименті збільшення ефективної в'язкості досліджуваних трансмісійних олив досить суттєве. Таким чином, при використанні формули Баруса для розрахунків в'язкості мастильного матеріалу необхідно враховувати зміну п'єзокоефіцієнта в'язкості з урахуванням прояву неньютонівських властивостей при формуванні граничних шарів мастильного матеріалу на активованих в процесі тертя контактних поверхнях.

Про неньютонівські властивості мастильного матеріалу в триботехнічному контакті свідчить залежність ефективної в'язкості олив від градієнту швидкості зсуву (рис. 4.6). За степеневим законом Оствальда-де Вейля згідно залежності (2.10), модель поведінки трансмісійних олив відповідає псевдопластичним рідинам з показником степені n 0,45 та 0,85 для зразку 1 та 2 відповідно. Згідно [128], напруження, що виникають в мастильному шарі при терті, обумовлені пружною та в'язкістною компонентами. Пружна компонента досягає максимальних значень при структуризації граничних шарів і надбанні мастильним матеріалом властивостей неньютонівських рідин. За умов зростання градієнту швидкості зсуву при максимальних обертах контактних поверхонь при терті в умовах кочення з проковзуванням збільшується швидкість деформації мастильного матеріалу ($\dot{\gamma}$) за залежністю (2.11). При збільшенні градієнта швидкості зсуву з $2,5 \cdot 10^2$ до $7,4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ швидкість деформації зростає в $2,9 \cdot 10^3$ разів, при $\dot{\gamma} \geq 7,4 \cdot 10^3$ відбувається деструкція граничних шарів, мастильний матеріал втрачає псевдопластичні властивості, стає ньютонівською рідиною (рис. 4.6), пружна компонента напружень за таких умов дорівнює нулю. При градієнті швидкості зсуву $\geq 7,4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ залишається лише в'язкісна компонента напружень.

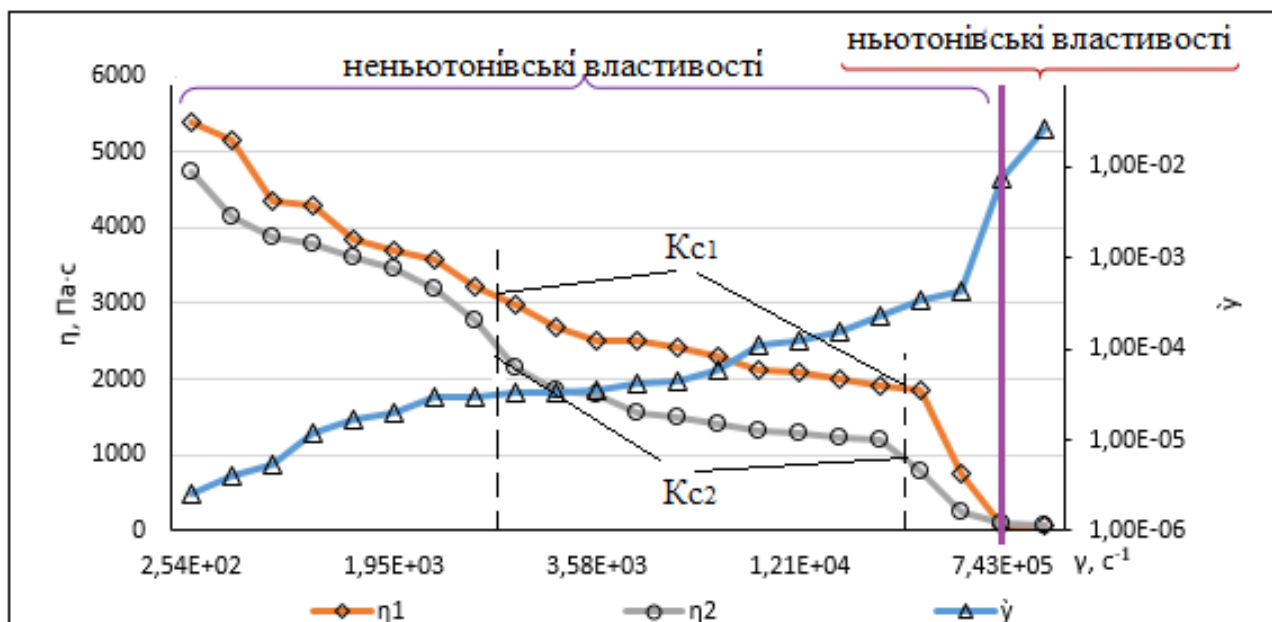


Рис. 4.6. Характер зміни ефективної в'язкості олив зразка 1 та 2 (η_1, η_2) і зміна швидкості деформації ($\dot{\gamma}$) мастильного матеріалу в контактi від градієнта швидкості зсуву (γ).

У роботі [149] з урахуванням нелінійної поведінки в'язкості встановлено, що ньютонівські моделі не в змозі точно прогнозувати характеристики підшипників ковзання, що змащуються загущеними мастильними матеріалами. Для двох зразків олив за типових робочих умов модель неньютонівської в'язкості показала до 40 % зниження навантажувальної здатності внаслідок зниження в'язкості при зсуві.

За умов кочення з проковзуванням в нестаціонарних режимах роботи максимальна товщина граничних шарів, утворених компонентами трансмісійних олив зразка 1 та 2 складає відповідно 1,88 та 1,64 мкм, що призводить до зростання ефективної в'язкості олив в 73 та 60 разів. Стійкість структурованих граничних шарів до градієнту швидкості зсуву визначає ступінь їх стабільності та забезпечує зниження втрат на тертя внаслідок локалізації дотичних напружень зсуву в мастильному анізотропному шарі. Характеристикою стабільності мастильного матеріалу по відношенню до швидкості зсуву є параметр K_c , який, згідно [149], розраховується за залежністю в'язкості від другого інваріанта швидкості зсуву. Порівнюючи даний

параметр для двох досліджуваних трансмісійних олив, встановлено, що для зразку 1 $K_{c1} > K_{c2}$, в середньому, в 1,4 рази, що свідчить про більшу стійкість граничних шарів оливи трансмісійної «Бора Б» ТСгіп до механо- та термодеструкції в нестационарних умовах тертя.

4.2. Динамічні процеси самоорганізації в нестационарних умовах тертя.

Механізм формування негідродинамічної складової товщини мастильного шару суттєво відрізняється для двох досліджуваних олив. Структурна пристосованість елементів трибоспряження внаслідок необоротних механо-хімічних процесів в поверхневих та приповерхневих шарах контактних поверхонь полягає в утворенні зносостійких дисипативних структур, які забезпечують зниження енергонавантаженості фрикційного контакту. Тому доцільно проаналізувати механізми зміни питомої роботи тертя ($A_{\text{терт}}$) залежно від типу досліджуваного мастильного матеріалу.

Одержані експериментальні значення $A_{\text{терт}}$ для зразка №1 в діапазоні 736.....11640 Дж/мм² характеризують умови роботи трибосистеми з середнім проявом енергетичних процесів в триботехнічному контакті (рис. 4.7). З підвищенням температури оливи з 20 до 100 °С питома робота тертя зростає, в середньому, в 1,68 разів, що свідчить про перехід трибосистеми в більш складні умови тертя. В початковий період підвищення температури мастильного матеріалу питома робота тертя зростає незначно, до 4730 Дж/мм², зриву мастильного шару не встановлено, досліджуваний мастильний матеріал за таких умов забезпечує реалізацію в контакті напівсухого режиму мащення при пуску з швидким переходом до змішаного режиму мащення.

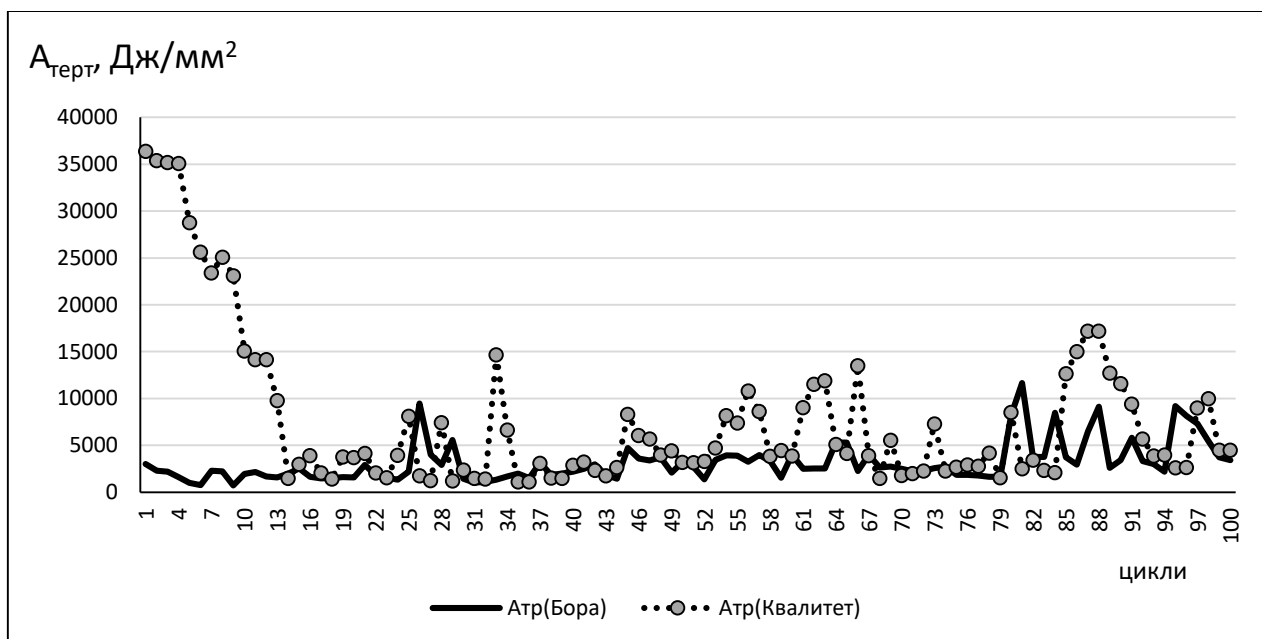


Рис. 4.7. Кінетика зміни питомої роботи тертя ($A_{\text{терт}}$) при напрацюванні.

Для зразка №2 питома робота тертя в контакті в початковий період припрацювання тривалістю до 13 циклу характеризується високими показниками на рівні 14000 – 36000 Дж/мм², що, в середньому, в 10 разів перевищує аналогічний параметр, встановлений для зразка №1. При подальшому напрацюванні при 20⁰С питома робота становить, в середньому, 3191 Дж/мм², що в 1,37 разів вище, в порівнянні з зразком №1. Із збільшенням об'ємної температури оливи до 100 ⁰С питома робота тертя зростає вдвічі та становить, в середньому, 6213 Дж/мм², що в 1,6 разів вище, в порівнянні з зразком №1. Зафіксовано періодичні стрімкі періоди підвищення $A_{\text{терт}}$ в контакті в 3.....5 разів, що свідчить про інтенсифікацію енергетичних процесів як на межі мастильний матеріал – метал, так і в поверхневих шарах металу. Дані процеси зазвичай призводять до інтенсифікації зношування пар тертя, що, в свою чергу, є головною передумовою для зниження ресурсу трибосистеми.

Параметри оцінки протизношувальних властивостей досліджуваних мастильних матеріалів представлені в табл. 4.2

Протизношувальні характеристики

Показники	Мастильний матеріал			
	зразок №1 олива трансмісійна «Бора Б» ТСгіп (виробництво: ТОВ «Бора Б»)		зразок №2 трансмиссионное масло для гипоидных передач ТСгіп (виробництво: ООО «Квалитет Авиа»)	
	Знос контактних поверхонь (сталь 30ХГСА) після 100 циклів напрацювання			
Загальний знос дослідних зразків, мкм	3,259		5,21	
Знос, мкм	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня
	1,039	2,22	2,11	3,1
Інтенсивність зношування	1,13E-10 (1,13·10 ⁻¹⁰)	3,535E-10 (3,535·10 ⁻¹⁰)	2,2973E-10 (2,2973·10 ⁻¹⁰)	4,94E-10 (4,94·10 ⁻¹⁰)
Зносостійкість	8,84E+9 (8,84·10 ⁹)	2,83E+09 (2,83·10 ⁹)	4,35E+09 (4,35·10 ⁹)	2,03E+09 (2,03·10 ⁹)

Загальний лінійний знос роликів зі сталі 30ХГСА становить 3,259 мкм та 5,21 мкм при змащуванні пар тертя відповідно оливою зразок №1 та зразок №2. Знос відстаючої поверхні в 2,14 (зразок №1) та в 1,47 (зразок №2) разів перевищує знос випереджаючої поверхні, що обумовлено, зниженням межі витривалості відстаючої поверхні внаслідок зростання швидкості втомного руйнування в умовах різновекторного напрямлення сил тертя в контакті на випереджаючій та відстаючій поверхнях [150, 151].

На знос контактних поверхонь суттєво впливає як утворення захисних хімічномодифікованих граничних шарів мастильного матеріалу, так і утворення дисипативних структур на поверхні металу з підвищеною твердістю.

Зміна мікротвердості (ΔH) поверхневих шарів сталі 30ХГСА при напрацюванні залежить від типу досліджуваного матеріалу та відрізняється реалізацією протилежних процесів. При змащуванні пар тертя зразком №1 зафіксовано зміцнення випереджаючої ($\Delta H = + 425$ МПа) та відстаючої ($\Delta H = + 705$ МПа) поверхонь (табл. 4.3).

Показники мікротвердості доріжки тертя сталі 30ХГСА

Показники	Мастильний матеріал			
	зразок №1		зразок №2	
	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня
Мікротвердість поверхні до експерименту (вихідна), МПа	6082	6438	6476	7717
Мікротвердість поверхні після 100 циклів напрацювання, МПа	6507 (зміцнення)	7143 (зміцнення)	6176 (знеміцнення)	7618 (знеміцнення)

При змащуванні пар тертя зразком №2 встановлено знеміцнення поверхневих шарів металу – зниження мікротвердості після напрацювання зафіксовано для випереджаючої ($\Delta H = - 300$ МПа) та відстаючої ($\Delta H = - 100$ МПа) поверхонь. Мікроскопічне дослідження поверхні тертя показало, що при використанні в якості мастильного матеріалу зразка №1 та зразка №2 поверхня тертя на 90% та 50 % вкрита плівками мастильного матеріалу відповідно для зазначених олив (рис. 4.8).

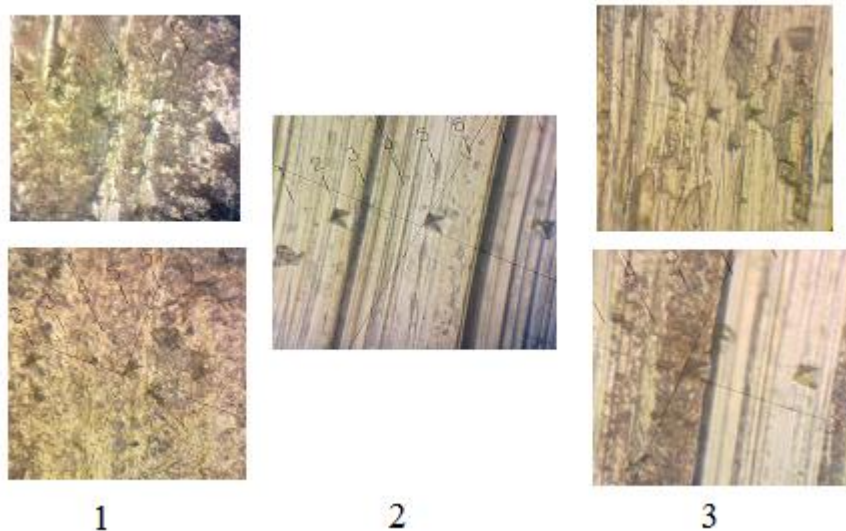


Рис. 4.8. Фотографії ділянок фрикційного контакту: 1 – при змащуванні

мастильним матеріалом зразок № 1, 2 – вихідна поверхня, 3 – при змащуванні мастильним матеріалом зразок № 2.

Оскільки досліджувані трансмісійні оливи містять протизадирні присадки, активні компоненти яких при активації поверхневих шарів металу при терті утворюють на їх поверхні захисні хімічномодифіковані шари, то площа поверхні, вкрита цими плівками і є ведучим показником щодо прояву протизношувальних властивостей оливи, оскільки утворені граничні шари мастильного матеріалу захищають пари тертя від безпосереднього контакту в жорстких умовах мащення, до яких відносяться досліджувані нестационарні процеси. Підтвердженням цьому є кореляція площі поверхні, вкритої захисними плівками, і зносостійкістю пар тертя – при використанні в якості мастильного матеріалу зразка №1 зносостійкість випереджаючої і відстаючої поверхонь зростає в 2 та в 1,4 рази відповідно, в порівнянні з аналогічним показником при використанні зразка №2.

Для оцінки міцнісних характеристик утворених при терті дисипативних структур застосовано метод склерометрії контактної поверхні після тертя при навантаженні 20 Н [152]. Глибина впровадження індентора при склерометрії – основний параметр, за яким можливо встановити ступінь опору приповерхневих шарів металу при дії навантаження.

Формування дисипативних структур при змащуванні елементів трибоспряження зразком № 1 внаслідок зміцнення поверхневих шарів металу при терті призводить до зниження розповсюдження пружно-пластичних деформацій в приповерхневих шарах металу по глибині на 23%, в порівнянні дисипативними структурами, утвореними при використанні в якості мастильного матеріалу зразку № 2 (рис. 4.9).

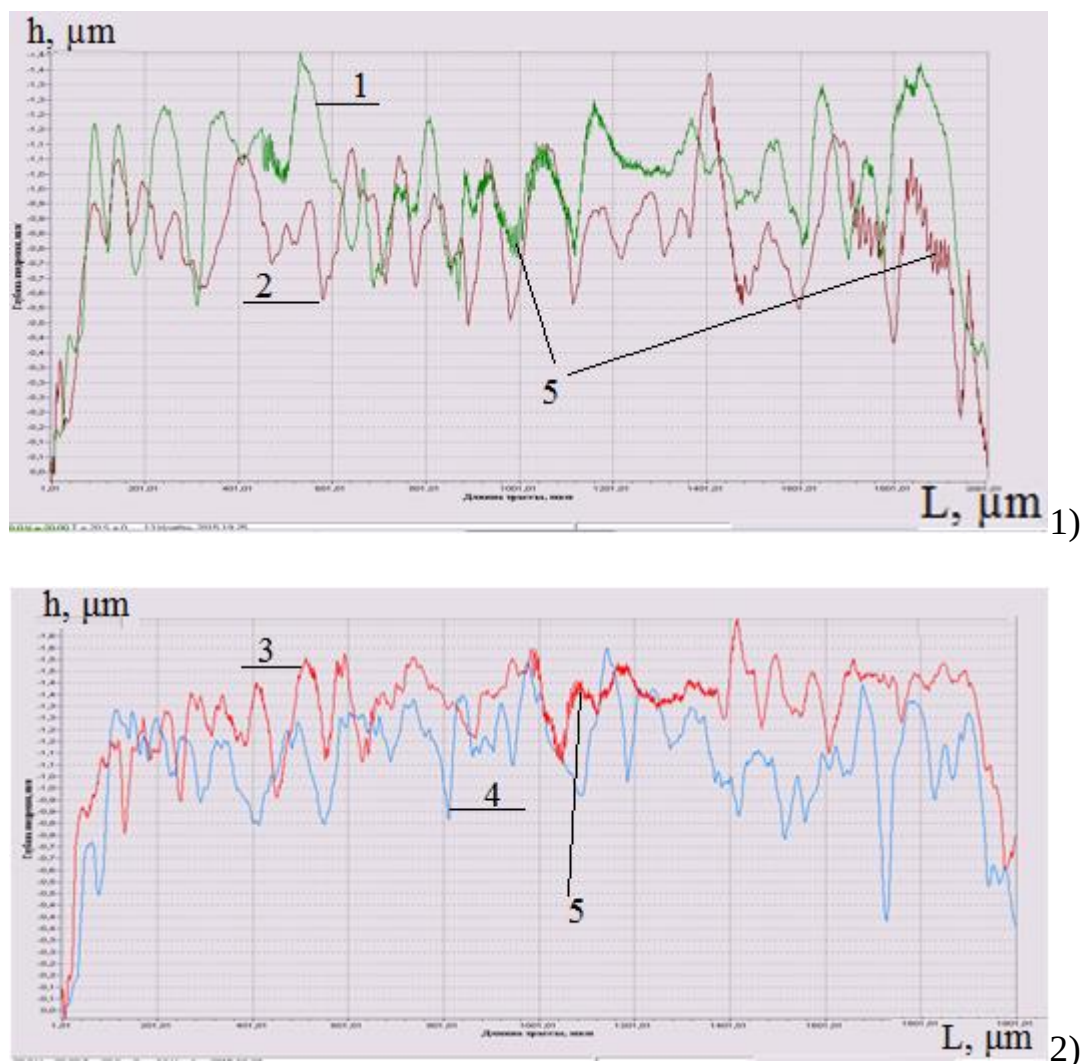


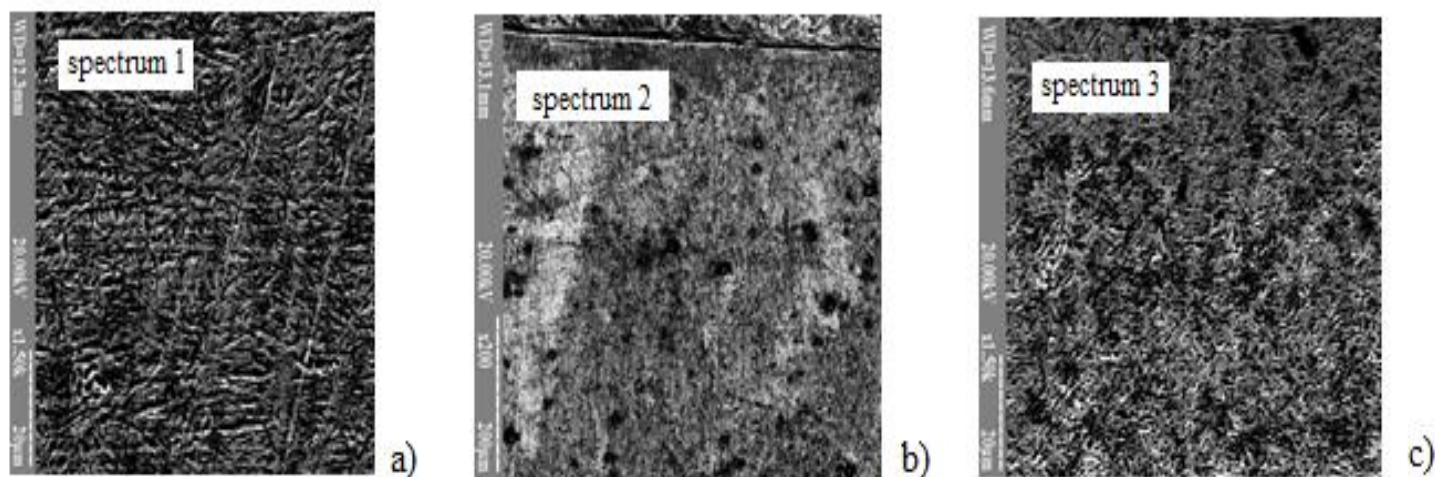
Рис. 4.9. Глибина вдавлення індентора при склерометрії: змащування зразком № 1 – випереджаюча (1) та відстаюча (2) поверхні, змащування зразком № 2 – випереджаюча (3) та відстаюча (4) поверхні, 5 – ділянки неоднорідного деформаційного мікрорельєфу.

При використанні в якості змащувального матеріалу зразку № 1 на 60% та 30% відповідно для випереджаючої та відстаючої поверхні встановлено утворення неоднорідного деформаційного мікрорельєфу, що проявляється в нерівномірному розподілі тонких слідів ковзання в зонах з дрібнозернистою структурою. При змащуванні пар тертя зразком № 2 ступінь неоднорідної пластичної деформації для випереджаючої поверхні становить до 30% довжини траси сканування індентора, для відстаючої поверхні не зафіксовано утворення дрібнозернистої структури.

Утворення дрібнозернистої дисипативної структури при треті забезпечує підвищення зносостійкості елементів трибоспряження, оскільки покриття, плівки та нанорозмірна багат шарова структура, що утворилися на поверхні, можуть проявляти екрануючий ефект для рухливих дислокацій, при якому утруднюється їх вихід назовні; в результаті чого підвищуються межа міцності та повзучості, а також втомна довговічність підповерхневого шару [153, 154].

Встановлений позитивний вплив утворення приповерхневих шарів з дрібнозернистою структурою на зносостійкість контактних поверхонь та зниження питомої роботи тертя при напрацюванні в нестационарних умовах забезпечується екрануючими властивостями граничних плівок мастильного матеріалу внаслідок прояву пластифікуючого ефекту поверхнево-активних речовин на поверхневі шари досліджуваних сталевих поверхонь з наступним їх зміцненням при збільшенні щільності дислокацій. В роботі [155] спостерігалось зниження показників поглинання енергії металами із зменшенням об'єму їхнього зерна (у діапазоні від десятків до кількох мікрометрів), що обумовлено зниженням рівня внутрішнього тертя.

Приповерхневі шари сталі 30ХГСА в процесі механо-хімічних реакцій зазнають структурного перетворення, результатом якого є утворення метастабільних дисипативних структур з підвищеною кількістю активних компонентів мастильного матеріалу, до яких можна віднести кисень, сірку та фосфор (рис. 4.10, табл. 4.4).



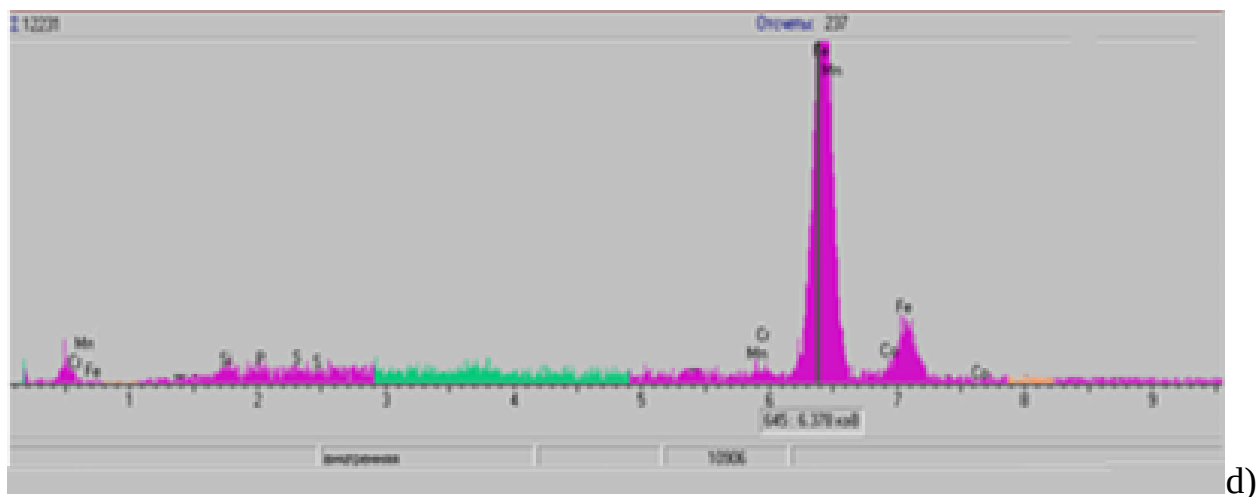


Рис. 4.10. Растрове електронно-мікроскопічне зображення в обернено-розсіяних електронах мікроструктури поперечних перерізів зразків сталі 30ХГСА до (а, d) і після трибологічних випробувань при змащуванні зразком № 1 (b) та зразком № 2 (c). Прямокутні зони вказують на області мікрорентгенівського спектрального аналізу хімічного складу.

Таблиця 4.4

Хімічний склад (ат. %) виділених мікроструктурних елементів поперечного перерізу зразків сталі 30ХГСА

Спектр	Елемент									
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe	O
1	0.28	1.23	1.08	0.10	0.01	0.02	1.01	0.21	~ 95.88	~0.18
2	0.30	1.20	1.05	0.08	0.12	0.07	1.10	0.23	~ 94.83	1.02
3	0.31	1.19	1.03	0.08	0.05	0.03	0.99	0.20	~ 95.54	0.58

При змащуванні пар тертя мастильним матеріалом зразок № 1 концентрація зазначених активних елементів в приповерхневих шарах металу на глибині до 10 мкм в 2 рази вища, в порівнянні з парами тертя, які змащувались зразком № 2. В двох застосовуваних зразках трансмісійних олив міститься поліфункціональна (протизношувальна, антиокислювальна та антикорозійна) присадка

диалкілдитіофосфат цинку, яка являється основним джерелом активних елементів фосфору та сірки. Згідно з уявленнями про механізм дії протизношувальних присадок, диалкілдитіофосфати цинку ініціюють полімолекулярну адсорбцію вуглеводневих молекул мастильного матеріалу [156]. При цьому умовна товщина та механічні властивості адсорбційного шару залежать як від властивостей та концентрації присадки, так і від параметрів вуглеводневих молекул: при введенні присадок у базові оливи, що містять вуглеводневі компоненти з більшою молекулярною масою, протизношувальні властивості присадок виявляються сильнішими, ніж в оливах, що складаються з вуглеводнів з меншою молекулярною масою. На відміну від зразка № 2, що містить в якості базової основи лише дистильовану оливу високого ступеня очищення, зразок № 1 містить до 15 % високов'язкого ароматизованого продукту, який посилює активність диалкілдитіофосфат цинку. Ефективні трибологічні характеристики присадок до мастильних матеріалів пояснюються синергетичною дією довгих аліфатичних ланцюгів та високоактивних елементів фосфору та сірки, які утворюють трибохімічну граничну мастильну плівку [157, 158].

Підвищенню протизношувальних властивостей дисипативних структур, утворених при використанні зразку №1 також сприяє наявність інгібітору корозії алкіламіну, який забезпечує утворення трибоплівки, збагаченої киснем [159]. Утворення тонких оксидних шарів в результаті механо-хімічних реакцій окислення імовірно можна розглядати як формування градієнтного оксидного шару на кілька сотень нанометрів у глибину, що складається в основному з аморфних оксидів [160, 161].

Таким чином, формування зносостійких дисипативних структур при терті необхідно розглядати як сукупність механічних активаційних процесів в верхніх поверхневих шарах елементів трибоспряження та хімічної модифікації поверхонь тертя активними компонентами мастильного матеріалу, раціональний вибір якого забезпечить можливість підвищити довговічність пар тертя в експлуатаційних умовах.

4.3. Оцінка триботехнічних параметрів локального контакту залежно від твердості сталі.

Аналогічні експерименти проведені для пар тертя сталь 45 [162]. В таблиці 4.5 представлені усереднені результати триботехнічних параметрів фрикційного контакту в умовах кочення з проковзуванням.

Таблиця 4.5

Триботехнічні характеристики контакту (матеріал контактних поверхонь – сталь 45)

Показники	Мастильний матеріал			
	Зразок 1		Зразок 2	
	Температура мастильного матеріалу, °С			
	20	100	20	100
Коефіцієнт тертя	0,009	0,015	0,013	0,021
Мінімальна товщина граничних шарів, мкм	0,12	0,09	0,1	0,038
Загальна товщина мастильного шару, мкм	5,14	4,7	4,5	3,95
Питома робота тертя, Дж/мм ²	12569	15440	39100	19000
Ефективна в'язкість в контакті, Па·с	490,9	58,21	190,4	41,71

Підвищення антифрикційних властивостей трибоконтакту на 30% при використанні в якості мастильного матеріалу зразка 1 обумовлено більшою несучою здатністю мастильного шару. Загальна товщина мастильного шару, яка складається з гідро- та негідродинамічної складових в середньому, на 12...14% вища для зразка 1. Активація контактних поверхонь в режимі частих пусків – зупинок призводить до активної взаємодії компонентів мастильного матеріалу та поверхневих шарів металу, що проявляється в формуванні граничних адсорбційних шарів (рис. 4.11).

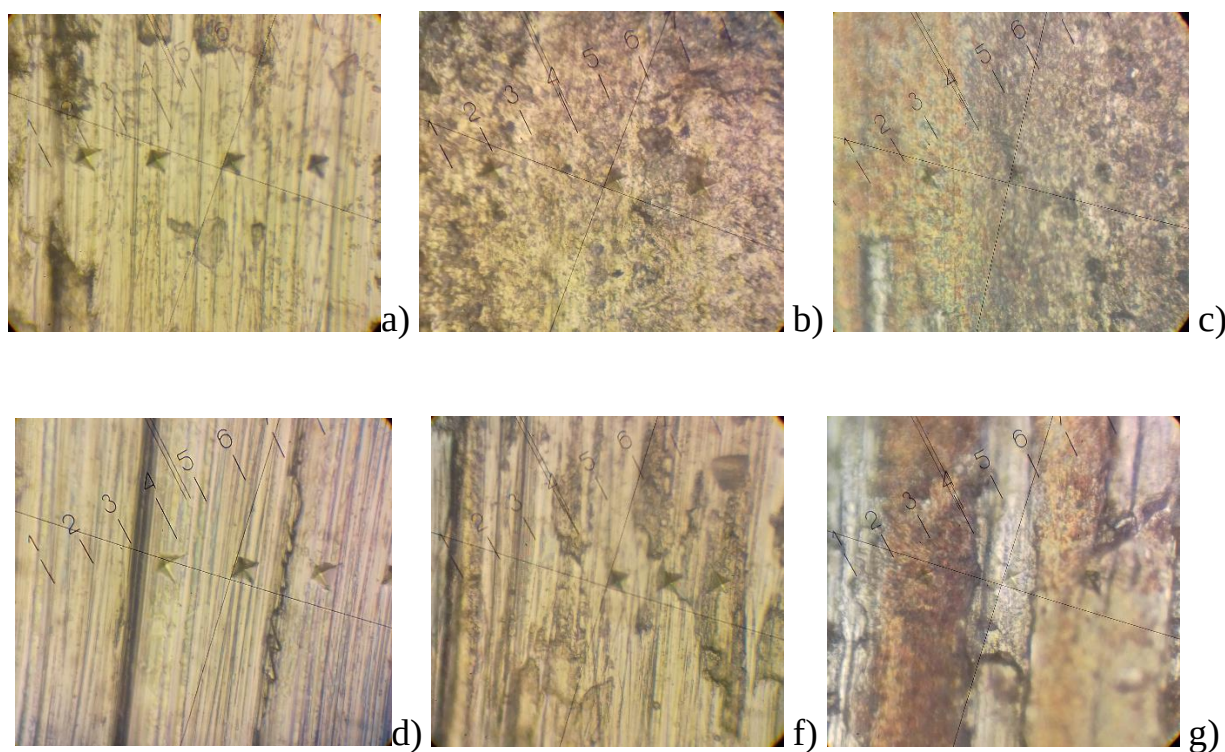


Рис. 4.11. Вихідна поверхня сталі 45 (а, d) та після напрацювання 100 циклів при змащуванні зразком 1 (b, c) та зразком 2 (f, g).

Однак, механізм формування негідродинамічної складової товщини мастильного шару суттєво відрізняється для двох досліджуваних олив. Розглянемо цей механізм з енергетичним параметром контакту – питомою роботою тертя. Активація поверхневих шарів сталі 45 внаслідок пружно-пластичної деформації обумовлює хімічну активність протизношувальної присадки диалкілдитіофосфат цинку та вуглеводневих компонентів базової основи досліджуваних трансмісійних олив, які формують на поверхні металу граничні плівки. На відміну від зразка № 2, що містить в якості базової основи лише дистилатну оливу високого ступеня очищення, зразок № 1 містить до 15 % високов'язкого ароматизованого продукту, який посилює активність диалкілдитіофосфат цинку [163, 164]. Використання зразку 1 забезпечує формування стабільних граничних плівок на 90-95% площі контакту (рис. 4.11, b, c) товщиною 0,09...1,2 мкм, які ефективно екранують поверхню щодо розповсюдження пружно-пластичних деформацій в верхні приповерхневі шари. Зміна мікроструктури

фіксується на глибині до 20 мкм і свідчить про структуризацію (рис. 4.12, b). Показники питомої роботи тертя знаходяться в діапазоні 12000...16000 Дж/мм².

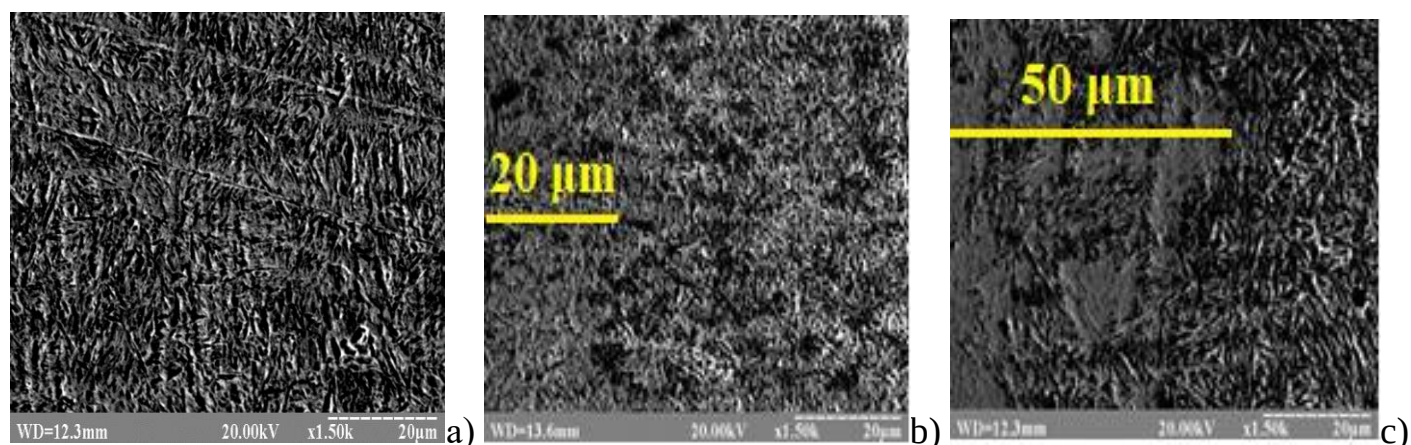


Рис. 4.12. Мікроструктура приповерхневих шарів сталі 45 ($\times 1500$) до тертя (a) та після напрацювання 100 циклів при змащуванні зразком 1 (b) та зразком 2 (c).

При використанні зразку 2 граничні шари мастильного матеріалу товщиною 0,038...1,2 мкм формуються на 20...50% площі поверхні (рис. 4.11, f, g). Якщо максимальна товщина граничних шарів аналогічна показникам, встановленим для зразку 1, то мінімальне їх значення менше в 1,2 та 2,37 разів відповідно при температурі оливи 20 та 100 °С. Відбувається в 10-15% циклів деструкція граничних шарів. Відповідно, менш ефективна екрануюча дія граничної плівки зразку 2 спричинює розповсюдження пружно-пластичної деформації при треті на глибину до 50 мкм, при цьому показники питомої роботи тертя в 3,11 та в 1,23 рази перевищують аналогічні показники для зразка 1 відповідно при температурі оливи 20 та 100 °С.

Кінетика формування граничних плівок мастильним матеріалом та показники питомої роботи тертя в контакті корелюють з інтенсивністю зношування контактних поверхонь.

Загальний лінійний знос роликів зі сталі 45 становить 3,97 мкм та 7,6 мкм при змащуванні пар тертя відповідно оливою зразок 1 та зразок 2 (табл. 4.6).

Показники лінійного зносу та мікротвердості пар тертя

Показники	Мастильний матеріал			
	зразок №1		зразок №2	
	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня
Знос, мкм	1,4	2,57	3,1	4,5
Мікротвердість поверхні до експерименту (вихідна), МПа	4382	4380	4376	4385
Мікротвердість поверхні після 100 циклів напрацювання, МПа	5100 (зміцнення)	4590 (зміцнення)	4116 (знеміцнення)	3890 (знеміцнення)

На знос контактних поверхонь суттєво впливає як утворення захисних граничних шарів мастильного матеріалу, так і утворення дисипативних структур на поверхні металу з підвищеною твердістю. Зміна мікротвердості (ΔH) поверхневих шарів сталі 45 при напрацюванні залежить від типу досліджуваного матеріалу. Якщо при змащуванні пар тертя зразком 1 відбувається зміцнення випереджаючої ($\Delta H = + 718$ МПа) та відстаючої ($\Delta H = + 210$ МПа) поверхонь, то при використанні зразку 2 встановлено знеміцнення поверхневих шарів металу для випереджаючої ($\Delta H = - 260$ МПа) та відстаючої ($\Delta H = - 495$ МПа) поверхонь (табл. 4.6).

Таким чином, утворення стійких граничних плівок мастильного матеріалу на активованих тертям контактуючих поверхнях є ведучим процесом щодо прояву їх демпфуючих властивостей стосовно локалізації пружно-пластичної деформації по глибині металу та протизношувальних властивостей в жорстких умовах мащення, до яких відносяться досліджувані нестационарні процеси.

Вплив твердості матеріалу дослідних зразків (сталь 30ХГСА (HRC 48 – 52, Ra 0,34 мкм та сталь 45 (HRC 38 – 42, Ra 0.37 мкм) на триботехнічні показники локального контакту при змащуванні мастильними матеріалами зразок 1 та 2 можна охарактеризувати наступними залежностями:

- твердість матеріалу не впливає на антифрикційні показники контакту;
- сформована товщина граничних адсорбційних шарів (негідродинамічна складова) та загальна товщина мастильного шару на 30 та 38 % менша відповідно для зразка 1 та 2 при використанні сталі 45;
- ефективна в'язкість мастильного матеріалу до 20 та 48 % менше відповідно для зразка 1 та 2 при використанні сталі 45;
- при використанні сталі 45 показники питомої роботи тертя на 10-15% більше, незалежно від типу мастильного матеріалу;
- твердість матеріалу контактних поверхонь в досліджуваному діапазоні не суттєво впливає на адсорбційну здатність активованих поверхневих шарів – при використанні сталі 45 до 5% знижується площа поверхні доріжки тертя, вкрита граничними адсорбційними шарами;
- загальний лінійний знос сталі 45 збільшується в 1,2 та 1,46 раз при змащуванні зразком 1 та 2 відповідно;
- ступінь глибини розповсюдження пластичної деформації при терті збільшується, в середньому, в 2 рази для сталі 45, незалежно від типу мастильного матеріалу.

Отже, збільшення твердості контактних поверхонь підвищує їх зносостійкість в умовах кочення з проковзуванням.

Висновки до розділу 4.

1. Проведені дослідження на програмно-апаратному комплексі, моделюючи роботу зубчастих передач в умовах кочення з проковзуванням, встановили, що зразок олива трансмісійна «Бора Б» ТСгіп (виробництво: ТОВ «Бора Б», ТУ У 19.2-38474081-

017:2018) характеризується більш ефективними змащувальними, антифрикційними, протизношувальними та реологічними характеристиками в нестаціонарних умовах тертя в режимі кочення з проковзуванням (30%), в порівнянні з трансмісійною оливою для гіпоїдних передач ТСгіп (виробництво: ООО «Квалитет Авиа», ТУ 38.1011332-90 изм. 1, 2).

2. Встановлено підвищення в 1,3 рази антифрикційних властивостей контакту при використанні оливи трансмісійної «Бора Б» ТСгіп, в порівнянні з трансмісійною оливою для гіпоїдних передач ТСгіп: середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,009 та 0,015 при температурі оливи 20 та 100 °С відповідно, коефіцієнт тертя стабільний.

3. Олива трансмісійна «Бора Б» ТСгіп характеризується ефективними змащувальними властивостями як в період пуску, так і при максимальних досліджуваних обертах, порівняно з трансмісійною оливою для гіпоїдних передач ТСгіп: товщина граничних адсорбційних шарів та загальна товщина мастильного шару в локальному контакті в 1,3 рази більша. Зриву мастильного шару при пуску та безпосереднього металевих контакту поверхонь тертя не встановлено, до 2 % циклів встановлено напівсухий режим мащення. При пуску, незалежно від температури мастильного матеріалу, переважає змішаний режим мащення, при максимальних обертах досліджуваних зразків домінує гідродинамічний режим мащення, незалежно від температури оливи, що свідчить про ефективні змащувальні властивості оливи.

4. Олива трансмісійна «Бора Б» ТСгіп характеризується низькими напруженнями зсуву, в середньому, 6,67 та 11,18 МПа при об'ємній температурі оливи 20 та 100 °С відповідно та ефективною в'язкістю на рівні, в середньому, 1807 та 2142 Па·с при об'ємній температурі оливи 20 та 100 °С відповідно. Для оливи для гіпоїдних передач ТСгіп напруження зсуву мастильних шарів при температурі оливи 20 °С в 1,35 разів більше; ефективна в'язкість в контакті знижується, в середньому, в 1,2 та в 1,85 раз при температурі оливи 20 та 100 °С відповідно, із збільшенням температури періодично при напруженні встановлено різке зниження цього параметру до 78 – 500 Па·с, що

обумовлено тривалою адаптацією граничних шарів мастильного матеріалу.

5. Запропонована оцінка визначення ефективної в'язкості мастильного матеріалу в контакті при формуванні структурованих граничних шарів мастильного матеріалу на основі реологічної моделі псевдопластичних неньютонівських рідин та степеневого закону Оствальда-де Вейля. Обґрунтовано, що при використанні залежності Баруса для розрахунку в'язкості мастильного матеріалу необхідно враховувати зміну п'єзокоефіцієнта в'язкості з урахуванням прояву неньютонівських властивостей при формуванні граничних шарів мастильного матеріалу.

6. Встановлено, що питома робота тертя в фрикційному контакті при використанні оливи трансмісійної «Бора Б» ТСгіп знаходиться в діапазоні 736.....11640 Дж/мм², що характеризує умови роботи трибосистеми з середнім проявом енергетичних процесів в триботехнічному контакті, з підвищенням температури оливи з 20 до 100 °С питома робота тертя зростає, в середньому, в 1,68 разів, що свідчить про перехід трибосистеми в більш складні умови тертя, зриву мастильного шару не встановлено, досліджуваний мастильний матеріал за таких умов забезпечує реалізацію в контакті напівсухого режиму мащення при пуску з швидким переходом до змішаного режиму мащення.

7. Для оливи для гіпоїдних передач ТСгіп питома робота тертя в контакті в початковий період припрацювання в 10 разів перевищує аналогічний параметр, встановлений для оливи «Бора Б» ТСгіп. При подальшому напрацюванні при 20°С та 100 °С питома робота тертя в 1,37 та в 1,6 разів вище відповідно. Зафіксовано періодичні стрімкі періоди підвищення $A_{\text{терт}}$ в контакті в 3.....5 разів, що свідчить про інтенсифікацію енергетичних процесів як на межі мастильний матеріал – метал, так і в поверхневих шарах металу.

8. Встановлено зменшення в 1,6 раза загального лінійного зносу роликів зі сталі 30ХГСА при змащуванні пар тертя оливою трансмісійною «Бора Б» ТСгіп, в порівнянні з оливою для гіпоїдних передач ТСгіп. Знос відстаючої поверхні в 2,14 (олива трансмісійна «Бора Б» ТСгіп) та в 1,47 (олива для гіпоїдних передач ТСгіп)

разів перевищує знос випереджаючої поверхні. При використанні в якості мастильного матеріалу оливи трансмісійної «Бора Б» ТСгіп зафіксовано зміцнення як випереджаючої, так і відстаючої поверхні, а при змащуванні пар тертя оливою для гіпоїдних передач ТСгіп встановлено знеміцнення поверхневих шарів металу для випереджаючої та відстаючої поверхонь, що призводить до зниження їх зносостійкості.

9. Підвищенню зносостійкості елементів трибосистеми сприяють процеси зміцнення поверхневих шарів при напрацюванні внаслідок утворення дрібнозернистої дисипативної структури, яка є результатом механо-хімічних реакцій між активованою в процесі тертя поверхнею металу та активними компонентами мастильного матеріалу. Утворення зносостійких метастабільних дисипативних структур з підвищеною кількістю активних компонентів мастильного матеріалу, до яких можна віднести кисень, сірку та фосфор, залежить як від базової основи мастильного матеріалу, так і від функціональних присадок, які можуть проявляти синергетичну дію щодо підвищення трибологічних властивостей контакту.

10. Встановлена кореляційна залежність лінійного зносу сталі від кінетики формування граничних плівок мастильним матеріалом, показників питомої роботи тертя в контакті та утворення дисипативних структур на поверхні металу з підвищеною твердістю. При використанні сталі 30ХГСА, в порівнянні зі сталлю 45, експериментально встановлено підвищення зносостійкості в 1,3 рази умовах кочення з проковзуванням за рахунок формування товщини мастильного шару на 30% вище, підвищення ефективної в'язкості мастильного матеріалу до 20...45 %, зменшення на 10-15% питомої роботи тертя, зниженням в 2 рази глибини розповсюдження пластичної деформації при терті.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу типових видів зношування шестеренних насосів та гіпоїдних передач, критеріїв вибору мастильного матеріалу для збільшення терміну служби машин і устаткування, обрано для досліджень зразки оливи для гідравлічних пристроїв авіаційної та наземної техніки АМГ-10 та зразки трансмісійної оливи для гіпоїдних передач (ТСгіп) з різним заявленим виробниками комплексом присадок та обґрунтовано вибір програмно-апаратного комплексу для дослідження триботехнічних характеристик контакту при лабораторних випробуваннях мастильних матеріалів в нестационарних умовах роботи в режимі кочення з проковзуванням, що імітує роботу зубчастих передач за допомогою роlikової аналогії.

2. Експериментально встановлено, що олива «Бора Б» АМГ-10, в порівнянні з оливою АМГ-10 (виробництво: ООО «НПП Квалитет») характеризується ефективними антифрикційними властивостями (коефіцієнт тертя в 1,13 рази менше), зриву мастильного шару при пуску не встановлено, товщина граничних адсорбційних шарів та загальна товщина мастильного шару відповідно в 1,44 та в 1,27 рази більша, питома робота тертя в фрикційному контакті знаходиться в діапазоні 1055 – 7419 Дж/мм², що характеризує умови роботи трибосистеми з середнім проявом енергетичних процесів.

3. Загальний лінійний сталі 30ХГСА при змащуванні пар тертя оливою «Бора Б» АМГ-10 зменшується в 1,57 рази, в порівнянні з оливою АМГ-10. Присадки, наявні в оливі «Бора Б» АМГ-10, характеризуються більш ефективними протизношувальними властивостями та обумовлюють підвищення зносостійкості контактних поверхонь за рахунок зміцнення поверхневих шарів металу при напручування, для оливи АМГ-10 встановлені процеси зміцнення – знеміцнення, що обумовлюють зниження зносостійкості пар тертя.

4. Одержана емпірична залежність лінійного зносу пар тертя від найбільш значимих триботехнічних характеристик, які впливають на лінійний знос контактних поверхонь: максимальної питомої роботи тертя, мінімального коефіцієнту тертя,

мінімальної ефективної в'язкості оливи в контакті, мінімальної товщини граничних шарів мастильного матеріалу та об'ємної температура оливи. Висока збіжність результатів вимірювань (95-97%) експериментальних показників зносу сталі 30ХГСА при змащуванні гідравлічною оливою АМГ-10 та оцінка зносу за емпіричною залежністю дає можливість прогнозувати протизношувальні властивості мастильного матеріалу в нестационарних умовах роботи трибосистеми.

5. При моделюванні зубчатого зачеплення шестеренного насосу в ANSYS Workbench встановлено, що при збільшенні контактного напруження за Герцем з 180 до 555 МПа глибина зони розподілу еквівалентних напружень по Мізесу та глибина локалізації максимальних еквівалентних напружень по Мізесу зростає на 20% та 23% відповідно. Величина максимальних дотичних напружень у поперечному перерізі зубців на випереджаючій поверхні на 10-15% нижче напружень на відстаючій поверхні. Запропоновано розрахункові формули визначення величини і знаку максимальних дотичних напружень в зоні зачеплення зубців з найбільшим проковзуванням, які узгоджуються з результатами моделювання методом скінченних елементів.

6. Встановлено підвищення в 1,3 рази антифрикційних властивостей контакту та змащувальної здатності при використанні оливи трансмісійної «Бора Б» ТСгіп, в порівнянні з трансмісійною оливою для гіпоїдних передач ТСгіп. При пуску, незалежно від температури мастильного матеріалу, переважає змішаний режим мащення, при максимальних обертах досліджуваних зразків домінує гідродинамічний режим мащення.

7. Доведено, при використанні формули Баруса для розрахунків в'язкості мастильного матеріалу необхідно враховувати зміну п'єзокоефіцієнта в'язкості з урахуванням прояву неньютонівських властивостей мастильного матеріалу. Встановлено, що в нестационарних умовах тертя в період пуску, ефективна в'язкість трансмісійних олив зростає в 60...75 разів, а п'єзокоефіцієнт в'язкості при структуризації граничних шарів мастильного матеріалу збільшується в 3,5...4,6 разів.

Розглянуто неньютонівські властивості олив за степеневим законом Оствальда-де Вейля: модель поведінки трансмісійних олив відповідає псевдопластичним рідинам з показником степені n 0,45...0,85.

8. Встановлено закономірності зміни пружної та в'язкісної компонентів напруження в мастильному матеріалі за умов збільшення градієнта швидкості зсуву при терті з $2,5 \cdot 10^2$ до $7,4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. При швидкості деформації мастильного матеріалу $\dot{\gamma} \geq 7,4 \cdot 10^{-3}$ відбувається деструкція граничних шарів, мастильний матеріал втрачає псевдопластичні властивості, стає ньютонівською рідиною, пружна компонента напружень дорівнює нулю, при градієнті швидкості зсуву $\geq 7,4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ залишається лише в'язкісна компонента напружень.

9. Встановлено зменшення в 1,6 раза загального лінійного зносу сталі 30ХГСА при змащуванні пар тертя оливою трансмісійною «Бора Б» ТСгіп, в порівнянні з оливою для гіпоїдних передач ТСгіп за рахунок зміцнення як випереджаючої, так і відстаючої поверхні та утворення дрібнозернистої дисипативної структури.

10. Встановлена кореляційна залежність лінійного зносу сталі від кінетики формування граничних плівок мастильним матеріалом, показників питомої роботи тертя в контакті та утворення дисипативних структур на поверхні металу з підвищеною твердістю. При використанні сталі 30ХГСА, в порівнянні зі сталлю 45, встановлено підвищення зносостійкості в 1,3 рази за рахунок формування товщини мастильного шару на 30% вище, підвищення ефективної в'язкості мастильного матеріалу до 20...45 %, зменшення на 10-15% питомої роботи тертя, зниженням в 2 рази глибини розповсюдження пластичної деформації при терті.

11. Визначені механізми структурної пристосованості елементів трибоспряження, що характеризують перехід трибосистеми до стану самоорганізації: активація контактних поверхонь в режимі частих пусків – зупинок призводить до активної взаємодії компонентів мастильного матеріалу та поверхневих шарів металу з поступовим формуванням граничних адсорбційних шарів. Визначено, що утворення стійких граничних плівок мастильного матеріалу є ведучим процесом щодо прояву їх

демпфуючих властивостей стосовно локалізації пружно-пластичної деформації по глибині металу. При формуванні граничних плівок на 90-95% площі контакту зміна мікроструктури приповерхневих шарів фіксується на глибині до 20 мкм, при формуванні граничних плівок на 20...50% площі поверхні розповсюдження пружно-пластичної деформації при треті сягає глибини до 50 мкм. Кінетика формування граничних плівок мастильним матеріалом та показники питомої роботи тертя в контакті корелюють з інтенсивністю зношування контактних поверхонь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhang K., Yao J., Jiang T. Degradation assessment and life prediction of electro-hydraulic servo valve under erosion wear. *Engineering failure analysis*. 2014. Т. 36. С. 284-300. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.10.017>
2. Mnatsakanov R. G., Mikosianchyk O. A., Yakobchuk O. E., Khalmuradov B. D. Lubricating properties of boundary films in tribosystems under critical operation conditions. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. Vol. 50, no. 3, P. 229–235, 2021. <https://doi.org/10.3103/S1052618821030110>
3. Ilina O. A., Mikosianchyk O. O., Mnatsakanov R. H. Yakobchuk O. Ye. Development of methods for evaluation of lubrication properties of hydraulic aviation oils. *Problems of Tribology*. 2021. V. 26, No 3/101. P. 42-47 <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-101-3-42-47>
4. Ільїна О.А., Мікосянчик О.О., Бородій В.М., Голембієвський Г.Г. Процеси самоорганізації трибосистеми при структурній пристосованості. *AVIA-2023: матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції*, Київ, 18–21 квіт. 2023 р. К.: НАУ, 2023. С.1.15-1.19. <https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2023/paper/view/9247/7530>
5. Якубов Ф.Я. Синергетика і процеси самоорганізації при терті і зношуванні. *Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць*. Харків :НТУ «ХПІ», 2010. Вип. 5. С. 56. http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/sutech5_2010.pdf
6. Аулін В. В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: Розділ монографії. Кіровоград: ТОВ "КОД", 2014. - 369 с. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/10513>
7. Al-Quraan, T. M., Ilina, O., Kulyk, M., et al. Dynamic Processes of Self-Organization in Nonstationary Conditions of Friction. *Advances in Tribology*. 2023. Т. 2023. №. 1. P. 6676706. <https://doi.org/10.1155/2023/6676706>

8. Banjac M., Vencel A., Otović S. Friction and wear processes—thermodynamic approach. *Tribology in Industry*. 2014. T. 36. №. 4. P. 341-347.
9. Zakovorotny V. L., Gvindjiliya V. E. Self-organization and evolution in dynamic friction systems. *Journal of Vibroengineering*. 2021. Vol. 23, No. 6. P. 1418–1432. <https://doi.org/10.21595/jve.2021.22033>
10. Arrgibay N, Chandross M, Cheng S, Michael J.R. Linking microstructural evolution and macro-scale friction behavior in metals. *Journal of Materials Science*. 2017. 52. 2780e99. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0569-1>
11. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О.О., Якобчук О. Є., Токарчук В. В. Прогнозування лінійного зносу контактних поверхонь в екстремальних умовах тертя. *Проблеми тертя та зношування*. 2018. 4 (81). С. 4 - 12. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptz_2018_4_3
12. Glansdorff P., Prigogine I. Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations. Wiley-Interscience, 1971. 306p.
13. Федорченко И. М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. К.: Наук. думка, 1980. 440 с.
14. Аулін А. В., Барановський Д. М., Кузнецов В. Г. Вторинні структури поверхні тертя контактного проводу. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2005. №. 9. С. 36-40. <https://core.ac.uk/download/pdf/84825677.pdf>
15. Yu G., Zhang Z., Tian P. et al. Macro-scale superlow friction enabled when MoS₂ flakes lubricate hydrogenated diamond-like carbon film. *Ceramics International*. 2021. Vol. 47, Is. 8. P. 10980-10989 <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.219>
16. Бершадський Л. И. Структурна термодинаміка трибосистем *Знання*. 1990. Т. 253. С. 3.
17. Amiri M., Khonsari M. M. On the thermodynamics of friction and wear—a review. *Entropy*. 2010. T. 12. №. 5. P. 1021-1049. <https://doi.org/10.3390/e12051021>

18. Nosonovsky M. Entropy in tribology: in the search for applications. *Entropy*. 2010. T. 12. №. 6. P. 1345-1390. <https://doi.org/10.3390/e12061345>
19. Martyushev L. M. Entropy and entropy production: Old misconceptions and new breakthroughs. *Entropy*. 2013. T. 15. №. 4. P. 1152-1170. <https://doi.org/10.3390/e15041152>
20. Gershman I.S., Bushe N.A. Realization of dissipative self-organization on the friction surface of tribosystems. *Journal of Friction and Wear*. 1995. T. 16. №. 1. P. 61-70.
21. Fox-Rabinovich G. S., Veldhuis S. C., Dosbaeva G. K., et al. Nanocrystalline coating design for extreme applications based on the concept of complex adaptive behavior. *Journal of Applied Physics*. 2008. T. 103. №. 8. <https://doi.org/10.1063/1.2904907>
22. Županović P., Kuić D., Juretić D., Dobovišek A. On the problem of formulating principles in nonequilibrium thermodynamics. *Entropy*. 2010. T. 12. №. 4. P. 926-931. <https://doi.org/10.3390/e12040926>
23. Fox-Rabinovich G., Gershman I. S., Locks E., et al. The relationship between cyclic multi-scale self-organized processes and wear-induced surface phenomena under severe tribological conditions associated with buildup edge formation. *Coatings*. 2021. T. 11. №. 8. P. 1002. <https://doi.org/10.3390/coatings11081002>
24. Gershman J.S., Bushe N.A. Thin films and self-organization during friction under the current collection conditions. *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 186, Is. 3. P. 405-411. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.11.016>
25. Kovalsky B. I., Bezborodov Y. N., Lysyannikova N. N., et al. Research of engine and transmission oils for thermo-oxidative stability with cyclic temperature changes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. T. 537. №. 6. P. 062074. DOI 10.1088/1757-899X/537/6/062074
26. Grebe M., Ruland M. Influence of mechanical, thermal, oxidative and catalytic processes on thickener structure and thus on the service life of rolling bearings. *Lubricants*. 2022. T. 10. №. 5. C. 77. <https://doi.org/10.3390/lubricants10050077>

27. Sidashov A. V., Boiko M. V., Kozakov A. T., Lesnyak V. V. Formation of surface structures under friction in synthetic oils. *Journal of Friction and Wear*. 2020. T. 41. P. 417-420. <https://doi.org/10.3103/S1068366620050165>
28. Zhang Y., Kovalev A., Meng Y. Combined effect of boundary layer formation and surface smoothing on friction and wear rate of lubricated point contacts during normal running-in processes. *Friction*. 2018. T. 6. P. 274-288. <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0228-4>
29. Boiko M. V., Sidashov A. V., Boiko T. G., et al. The mechanism of formation of boundary lubricating films during friction in a medium of disubacate. *Tribology International*. 2022. T. 165. P. 107222. DOI:10.1016/j.triboint.2021.107222
30. Tasdemir H. A., Tokoroyama T., Kousaka H., et al. Influence of zinc dialkyldithiophosphate tribofilm formation on the tribological performance of self-mated diamond-like carbon contacts under boundary lubrication. *Thin Solid Films*. 2014. T. 562. P. 389-397. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.05.004>
31. Косторнов А. Г., Фущич О. І., Горбань В. Ф., Чевичелова Т. М., Костенко О. Д. Вплив параметрів сухого тертя на формування вторинних структур у зоні трибосинтезу композиційного антифрикційного матеріалу на основі заліза. *Проблеми тертя та зношування*. 2012. Вип. 57. С.170–187. DOI: 10.18372/0370-2197.57.3601
32. Moshkovich A., Rapoport L.S. The effect of the structural parameters on the friction and wear properties of some FCC metals. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 24. P. 3913-3924 <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.034>
33. Павлов М. Д., Чердинцев В. В., Степашкін А. А., Данилов В. Д. Структура та властивості сталі 30ХГСА після лазерно-плазмового азотування та наноструктурування. *Сучасні проблеми науки та освіти*. 2013. No 6. С. 62.
34. Straffelini G., Pellizzari M., Bernardi N. Microstructure and impact behaviour of ASTM A105/AISI 304L friction weldments. *Materials Science and Technology*. 2004. 20(5). P. 634-640. doi:[10.1179/026708304225016699](https://doi.org/10.1179/026708304225016699)

35. Дмитриченко М. Ф., Глухонець А. О. Структурні зміни поверхневих і приповерхневих шарів металу при терті. *Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки"*. 2010. Т. 2, №. 2 (53). С. 45-46.
36. Rainforth W. M., Stevens R., Nutting J. Deformation structures induced by sliding contact. *Philosophical Magazine A*. 1992. 66(4). P. 621–641.
<https://doi.org/10.1080/01418619208201580>
37. Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. H., Lopata L. A., et al. Wear resistance of 30KhGSA steel under the conditions of rolling with sliding. *Materials Science*. 2019. Т. 55. P. 402-408. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00317-9>
38. Lubas J., Szczypin'ski-Sala W., Wo's P., et al. Experimental analysis of tribological processes in friction pairs with laser borided elements lubricated with engine oils. *Materials*. 2020. Т. 13. №. 24. P. 5810.
39. Kuti R., Ko'nczo'l F., Csapo' L., Fo'ldi L., Toth A'. D. Detection of the possible engine damages in case of a continuous track military vehicles with tribological investigations. *FME Transactions*. 2022. Vol. 50, № 3, P. 526–534.
40. Похмурський В. І. Особливості мікрODEФОРМАЦІЇ поверхневих шарів та механізми зношування α -титану за водневого впливу. *Проблеми трибології*. 2013. №. 2. С. 21-26.
41. Журавель Д. П. Вплив забрудненості абразивом біопаливо-мастильних матеріалів на енергоємність поверхневих шарів металів вузлів і агрегатів мобільної техніки. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2017. №. 5. С. 56 – 65.
42. Журавель Д. П. Моделювання енергетичного балансу трибосистеми мобільної техніки в середовищі змащувальних матеріалів. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2013. №. 1. С. 126-131.
43. Журавель Д. П., Юдовинський В. Б. Деформація та енергоємність поверхневого шару перлітної основи чавунів при абразивному зношуванні. *Праці ТДАТА*. 2005. С. 76-80.

44. Методика проведення технічної експертизи насосів шестеренних (НШ) виробництва ПАТ «Гідросила» 2018 р. С. 40.
<https://www.hydrosila.com/files/brochure/ru-broshure-18.pdf>

45. Шевеля В. В., Г.С. Калда Фреттинг-усталость металлов. Хмельницький: Поділля, 1998. 234 с.

46. Ганзюк А. Л., Олександренко В. П. Розвиток основ еволюційної моделі фретиг-корозії з позицій фізичної хімії та хімії твердого тіла із урахуванням факторів зовнішнього впливу. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. №. 2. С. 20-28.

47. Шалапко Ю.І. Прихованість фретинг-процесів у з'єднаннях автомобільної техніки та їх вплив на безпеку експлуатації. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2010. №. 5. С. 165–169.

48. Shanyavskiy A.A., Soldatenkov A.P. The fatigue limit of metals as a characteristic of the multimodal fatigue life distribution for structural materials. *Procedia Structural Integrity*. 2019. 23. P. 63-68. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.064>

49. Андрейкив А.Е., Чернец М.В. Оценка контактного взаимодействия трущихся деталей машин. К.: Наук. думка, 1991. 160 с.

50. Чернець М. В., Кіндрачук М. В., Корнієнко А. О., Гловин М. А.. Про методи розрахунку зношення довговічності металевих, металополімерних та полімерних зубчастих передач. *Проблеми тертя та зношування*. 2019. Т. 84. №. 3. С. 14- 25. DOI: 10.18372/0370-2197.3(84).13845

51. Васильєва О.Е., Чалий Д.О., Придатко О.В. Аналіз методів покращення роботи зубчастих передач редукторів загального призначення. Матеріали III всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Сучасність. наука, час. Взаємодія та взаємовплив». Київ, 22-24 листопада 2007. С. 64-67.

52. Клименко О.Д., Муравинець Ю.В., Пуць В.С. Підвищення надійності зубчастих передач. *Наукові нотатки*. 2022. №. 74. С. 140-144.
<https://doi.org/10.36910/775.24153966.2022.74.23>

53. Singh P. K., Mausam K., Islam A. Achieving better results for increasing strength and life time of gears in industries using various composite materials. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Т. 45. Р. 3068-3074. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.062>
54. Casaroli A., Boniardi M., Conrado E. et al. Mechanical and metallurgical characterization of contact fatigue mechanisms in ADI spur gears. *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 165. 108775. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108775>
55. Сорокати́й Р.В. Метод трибоелементів. *Розділ монографії. Хмельницький: ХНУ*. 2009. 242 с.
56. Аулін В. В. Поле напружень в композиційному матеріалі та композиційному покритті в умовах тертя ковзання. *Зб. наук. праць Луганського нац. аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2006. №. 65. С. 88.
57. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В. та ін. Напружено-деформований стан поверхневого шару деталей при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення. *Центральноукраїнський науковий вісник: Технічні науки*. 2019. № 1 (32). С.103-113. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).103-113](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).103-113)
58. Аулін В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. д-ра. техн. наук : 05.02.04 / КНТУ. Кіровоград, 2014. 447 с.
58. Suh N. P. The delamination theory of wear. *Wear*. 1973. Vol. 25, Is. 1. P. 111-124. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(73\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(73)90125-7)
59. Meng H.C., Ludema K.C. Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear*. 1995. Vol. 181–183, Part 2. P. 443-457. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(95\)90158-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(95)90158-2)
60. Jahanmir S., Suh N.P., Abrahamson E.P The delamination theory of wear and the wear of a composite surface. *Wear*. 1975. Vol. 32, Is. 1. P. 33-49. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(75\)90203-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(75)90203-3)
61. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Лівіцький О.М., Бабій А.В. Закономірності впливу високомодульних наповнювачів на розподіл полів напружень в

поверхневих шарах деталей машин, виготовлених з полімерних композитних матеріалів. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2022. Вип. 5(36)_ I. С. 55-70. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).I.55-70](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).I.55-70)

62. Marchenko D., Matvyeyeva K. Study of the Stress-Strain State of the Surface Layer During the Strengthening Treatment of Parts. *Problems of Tribology*. 2022. 27(3/105). P. 82–88. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-105-3-82-88>

63. Аулін В.В., Кузик О.В. Динамічне матеріалознавство зон тертя деталей сільськогосподарської техніки. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету* : наук.-теорет. зб. – Житомир : ЖНАЕУ, 2014. Т. 2. № 1 (39). С. 102-110.

64. Lyashenko I. Description of the Stationary Structural States of a Boundary Lubricant Making Use of the Relation between the Density-Modulation and Excess-Volume Order Parameters. *Ukrainian Journal of Physics*. 2021. 66(11), 993. <https://doi.org/10.15407/ujpe66.11.993>

65. Lyashenko I. A., Filippov A. E., Popov M., Popov V. L. Effect of stress nonhomogeneity on the shear melting of a thin boundary lubrication layer. *Physical Review E*. 2016. 94, 5. P. 053002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.94.053002>

66. Mukhortov I., Zadorozhnaya E., Levanov I., Pochkaylo K. The influence of poly-molecular adsorption on the rheological behaviour of lubricating oil in a thin layer. *FME Transactions*. 2015. Т. 43. №. 3. P. 218-222.

67. Hua X., Puoza J. C., Zhang P., et al. Experimental analysis of grease friction properties on sliding textured surfaces. *Lubricants*. 2017. Т. 5. №. 4. P. 42.

68. Гасанов М.І., Клочко О.О., Заковоротний О.Ю., Пермінов Є.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних 33 властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні (Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry): зб. наук. пр.:

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків : НТУ «ХПІ», 2018. № 6 (1282) 2018. С. 107–112.

69. Імітаційне моделювання в задачах машинобудівного виробництва: навч. пос. / за ред. О. М. Шелкового. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. 500 с.
http://library.kpi.kharkov.ua/files/imitacyne_modelyuvannya.pdf

70. Ключко О. О., Пермінов Є. В. Технологічне забезпечення точності та довговічності зубчастих передач приводів верстатів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я*. 2018. Ч. I. С. 100.

71. Воронцов Б., Доля А. Підвищення стійкості та поверхневої твердості зубчастих коліс іонним азотуванням. Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації»: Зб. наук. праць. Переяслав, 2019. Вип. 52. С. 426-428.
<http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/8583/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%2052-%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%8B-1-2%2C4%2C434-437%2C471-482.pdf>

72. Hanaor D. A. H., Gan Y., Einav I. Static friction at fractal interfaces. *Tribology International*. 2016. Т. 93. Р. 229-238.

73. Sędlak P., Białobrzaska B., Stawicki T., Kostencki P. Effect of polypropylene modification by impregnation with oil on its wear and friction coefficient at variable load and various friction rates. *International Journal of Polymer Science*. 2017. Т. 2017. №. 1. Р. 9123586.

74. Mikosyanchik O. A., Mnatsakanov R. G. Tribotechnical characteristics of cast iron with a steel coating in lubrication medium under unsteady modes. *Journal of Friction and Wear*. 2017. Т. 38. Р. 279-285. <https://doi.org/10.3103/S1068366617040109>

75. Grebe M., Ruland M. Influence of mechanical, thermal, oxidative and catalytic processes on thickener structure and thus on the service life of rolling bearings. *Lubricants*. 2022. Т. 10. №. 5. Р. 77. <https://doi.org/10.3390/lubricants10050077>

76. Kovalsky B. I., Bezborodov Y. N., Lysyannikova N. N., et al. Research of engine and transmission oils for thermo-oxidative stability with cyclic temperature changes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2019. T. 537. №. 6. C. 062074. doi:10.1088/1757-899X/537/6/062074
77. Jani D.B., Ashish S., Aditya S. et al. An overview on aircraft hydraulic system. *International journal of innovative research in technology*. 2019. Vol. 6, Is. 5. P.10.
78. Boichenko S.V., Zakharchuk M.M. Aviation Fuels and Lubricants: Manual. K.: NAU, 2012. 184 p.
79. Obergruber M., Hönig V., Procházka P., Táborský J. Diagnostics of hydraulic fluids used in aviation. *Agronomy Research*. 2018. 16(S1). P. 1133-1141.
80. Shumilov I. S., Chursova L. V., Sedova L. S. Process fluids of aero-hydraulic systems and their properties. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii*. 2014. P. 187-226.
81. Hantoro R., Dwi Cahyo B., Faizah, F. Design of a flight control system rudder simulator on an arduino uno-based BOEING 737-900ER aircraft as a supporting facility for practical activities at the surabaya aviation polytechnic. *Proceeding of International Conference of Advanced Transportation, Engineering, and Applied Social Science*. 2023. 2(1), 874–879. <https://doi.org/10.46491/icateas.v2i1.1754>
82. Paul S. Optochemical sensor systems for aerospace applications Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Physik der Justus Liebig Universität, Gießen zur Erlangung des akademischen Grades eines. 2014. 154 p. <https://d-nb.info/1068772816/34>
83. Xia D., Wang Y., Liu H. et al. Research Progress of Antioxidant Additives for Lubricating Oils. *Lubricants*. 2024. 12. P.115. <https://doi.org/10.3390/lubricants12040115>
84. Obergruber, M., Hönig, V., Procházka, P., Táborský, J. Diagnostics of hydraulic fluids used in aviation. *Agronomy Research*. 2018. 16 (S1). P. 1133-1141, <https://doi.org/10.15159/AR.18.122>
85. Kazmi B., Taqvi S.A.A., Naqvi M. et al. Process system analysis on oil processing facility and economic viability from oil well-to-tank. *SN Applied Sciences*. 2021. 3. P. 682. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04635-z>

86. Müller R. Production of Lubricants. In: Mang T. (eds) Encyclopedia of Lubricants and Lubrication. Springer, Berlin, Heidelberg. 2014. P.1428–1450. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22647-2_326
87. Mikosyanchyk, O.O., Mnatsakanov, R.H., Lopata. Wear resistance of 30KhGSA steel under the conditions of rolling with sliding. *Materials Science*. 2019. T. 55. P. 402-408. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00317-9>
88. Jedliński Ł. Analysis of the influence of gear tooth friction on dynamic force in a spur gear. *Journal of Physics Conference Series*. 2021. T. 1736. №. 1. P. 012011. doi:10.1088/1742-6596/1736/1/012011
89. Mikosianchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Yakobchuk O. Ye. Development of methods of monitoring and diagnostics of operational properties of lubricants according to tribotechnical parameters. *Problems of friction and wear*. 2021. 1 (90). P.11-18.
90. Szeri A.Z. Navier-Stokes Equation and Applications in Lubrication. *Encyclopedia of Tribology*. 2013. P. 2405-2416. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_144
91. Jacobson B.O. Rheological models for non-Newtonian fluids. *Tribology Series*. Elsevier. 1991. T. 19. P. 53-68. [https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(08\)70044-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(08)70044-0)
92. D. Dowson, Higginson G. R. Elasto-hydrodynamic Lubrication: The Fundamentals of Roller and Gear Lubrication. *Pergamon Press*. 1966. P. 235.
93. Rebbeschi B., Oswald F. B., Townsend D. P. Measurement of Gear Tooth Dynamic Friction. Prepared for the Seventh International Power Transmission and Gearing Conference sponsored by the American Society of Mechanical Engineers San Diego, California, October 6-9, 1996. №. NAS 1.15: 107279 P. 11.
94. Masjedi M., Khonsari M. M. On the prediction of steady-state wear rate in spur gears. *Wear*. 2015. T. 342. P. 234-243.
95. Sivayogan G., Dolatabadi N., Johns-Rahnejat P., et al. Non-Newtonian thermo-elastohydrodynamics and sub-surface stress field of high-performance racing spur gears. *Lubricants*. 2022. T. 10. №. 7. P. 146. <https://doi.org/10.3390/lubricants10070146>

96. Czarny R. The influence of surface material and topography on the wall effect of grease. *Lubrication Science*. 2002. T. 14. №. 2. P. 255-274.
97. Jahno O. M., Gnativ R. M., Gnativ I. R., Razavi S. F.. Розподіл локальних швидкостей в круглій трубі за розгінного руху рідини. *Journal of Mechanics and Advanced Technologies NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*. 2018. Vol. 84, № 3. P. 86 – 90
98. Czarny R., Paszkowski M., Кноп P. The wall effect in the flow of commercial lubricating greases. *Journal of Tribology*. 2016. T. 138. №. 3. P. 031803.
99. Максименко О. П., Перемітько В. В., Самохвал В. М. Теорія і практика змащування металургійних машин. *Системні технології*. 2006. С. 172.
100. Renardy M. Current issues in non-Newtonian flows: a mathematical perspective. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2000. T. 90. №. 2-3. P. 243-259.
[https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(99\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(99)00081-6)
101. Johnson K. L., Cameron R. Shear Behaviour of Elastohydrodynamic Oil Films at High Rolling Contact Pressures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1967. Vol. 182, Part 1, № 14. P. 307-330. doi:[10.1243/PIME_PROC_1967_182_029_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1967_182_029_02)
102. Johnson K. L., Tevaarwerk J. L. Shear Behaviour of Elastohydrodynamic Oil Films. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1977. Vol. 356, No. 1685. P. 215-236
103. Yang Q., Huang P., Fang Y. A novel Reynolds equation of non-Newtonian fluid for lubrication simulation. *Tribology International*. 2016. T. 94. P. 458-463.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.011>
104. Landau L., Lifshitz E. Chapter I—Ideal Fluids. *Fluid Mechanics*. 1987. T. 6. P. 30-31.
105. Metlov L.S., Khomenko A.V., Lyashenko I.A., Chepul'skyi S.N.. Non-Equilibrium Evolutional Thermodynamics of Boundary Friction. *Journal of Nano-and Electronic Physics*. 2010. T. 2. №. 2. P. 120.

106. Radulescu A. V., Radulescu I. Rheological models for lithium and calcium greases. *Mechanics*. 2006. T. 59. №. 3. P. 67-70.
<https://www.mechanika.ktu.lt/index.php/Mech/article/view/14674>
107. Мустафаєва Г. Р. Реологічні моделі, властиві потоку неньютонівських масел. *Транспортування і зберігання нафтопродуктів і вуглеводневої сировини*. 2018. No 4. P. 40-42.
108. Hähner G., Spencer N. Rubbing and Scrubbing. *Physics Today*. 1998. 51(9). P. 22-27.
109. Ilin O.A., Mikosianchyk O.O., Yashchuk O. P., Mnatsakanov R.H., Berezivskyi N.M. Tribomonitoring of the quality of aviation hydraulic oils according to lubricity and rheological indicators. *Problems of Tribology*. 2023. T. 28, №. 1/107. P. 34-40.
<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-34-40>
110. Масло трансмісійне ТСгп. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://masprom.com.ua/p/59551720-maslo-tsgip/> (дата звернення: 16.05.2023).
111. Lansdown A.R. Aviation lubricants. In: Mortier, R.M., Orszulik, S.T. (eds) *Chemistry and Technology of Lubricants*. Springer, Boston, MA. 1992. P. 223-236.
https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3272-9_9
112. Obergruber M., Hönig V., Procházka P., Táborský J. Diagnostics of hydraulic fluids used in aviation. *Agronomy Research*. 2018. 16((S1). P. 1133-1141.
<https://doi.org/10.15159/AR.18.122>
113. Дерев'яно І.Г. Конструкція та експлуатація вертольота Мі-8МТВ: Конспект лекцій. Кременчук: КЛК НАУ, 2010. 95 с.
114. Резнік А.В. Методична розробка відкритого заняття з дисципліни Конструкція і технічне обслуговування повітряних суден. Відокремленого структурного підрозділу Національного авіаційного університету Слов'янського коледжу Національного авіаційного університету. Слов'янськ, 2015.
<https://naurok.com.ua/sistema-gidravlichno-potuzhnosti-vertolota-mi-8-398208.html>

115. Сталь 45. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://olteh.com.ua/articles/2632993-stal-45-harakteristiki-svoystva-primenenie-gost-himsostav/> (дата звернення: 16.05.2023).

116. Hoehn B.-R., Michaelis K., Mayer J., Weigl A. Influence of surface velocity directions on lubricant film formation in EHL point contacts. *Tribology International*. 2012. Vol. 47. P. 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.10.005>

117. K. Topolovec-Miklozic, F. Lockwood, Spikes H. Behaviour of boundary lubricating additives on DLC coatings. *Wear*. 2008. Vol. 265, Is. 11–12. P. 1893-1901 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.051>

118. Vengudusamy B., Grafl A., Novotny-Farkas F., Schöfmann W. Comparison of frictional properties of gear oils in boundary and mixed lubricated rolling–sliding and pure sliding contacts. *Tribology International*. 2013. Vol. 62. P. 100-109 <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.02.001>

119. Brandão J. A., Meheux M., Ville F., Seabra J. H.O, Castro J. Comparative overview of five gear oils in mixed and boundary film lubrication. *Tribology International*. 2012. Vol. 47. P. 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.10.007>

120. Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є. та ін. Розробка методики контролю та діагностики експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів за триботехнічними параметрами. *Problems of friction and wear*. 2021, 1 (90). С. 11-19. DOI: 10.18372/0370-2197.1(90).15234

121. Воронін С.В. Оцінка несучої здатності та коефіцієнту тертя нематичного граничного шару. *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*. 2013. № 4. С. 109-113

122. Braun O.M., Manini N., Tosatti E. Role of lubricant molecular shape in microscopic friction. *Physical Review B*. 2008. 78. 195402. <https://journals.aps.org/prb/cited-by/10.1103/PhysRevB.78.195402>

123. Сагин С.В., Заблоцкий Ю.В. Определение триботехнических характеристик поверхностей по степени упорядоченности пристенных слоев углеводородных жидкостей. *Проблеми техніки*. 2011. № 3. С. 78-88

124. Райко М.В. Смазка зубчатых передач. К.: Техника. 1970. 196 с.

125. Steblin V. N., Shchukin E. D., Yaminsky V. V., Yaminsky I. V. Hydrodynamic Interaction of Surfaces in Electrolyte Solution. A New Method of Investigation of Surface Forces using a Capacitor Ultradynamometer. *Mendeleev Communications*. 1992. Vol. 2, Is. 2. P. 42-44. <https://doi.org/10.1070/MC1992v002n02ABEH000120>

126. Fan X., Li W., Li H. and ect. Probing the effect of thickener on tribological properties of lubricating greases. *Tribology International*. 2018. Vol. 118. P. 128-139.

127. Муращенко А.М., Яхно О.М., Губарев О.П., Кіца А. Дослідження гідравлічних каналів при нестабільних температурних умовах. Матеріали XXII Міжнар. наук.-тех. конф. «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»: тези доп. Київ, 2017. С.79. 186 с.

128. Заскока А.Н., Ляшенко Я.А. Учет температурной зависимости вязкости неньютоновских смазок в модели граничного трения при фазовом переходе второго рода. *Физическая мезомеханика*. 2014. 17 (2). С. 93-100.

129. Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є. та ін. Розробка методики контролю та діагностики експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів за триботехнічними параметрами. *Problems of friction and wear*. 2021. 1 (90). С.11-18. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(90\).15234](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(90).15234)

130. Мікосянчик О. О., Ільїна О. А. Оцінка реологічних характеристик трансмісійних оли в нестаціонарних умовах тертя. *Problems of friction and wear*. 2024. 2 (103). С.43-55. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(103\).18671](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(103).18671)

131. Kudenatti R.B., Noor-E-Misbah, Bharathi M.C. Boundary-layer flow of the powerlaw fluid over a moving wedge: a linear stability analysis. *Engineering with Computers*. 2021. 37. P. 1807–1820. <https://doi.org/10.1007/s00366-019-00914-x>

132. Мікосянчик О.О., Мнацаканов Р.Г., Харченко О.В., Ільїна О.А. Триботехніка та основи надійності машин: практикум для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка». К.: НАУ, 2023. 96с.

133. Mordyuk B.N., Mikosyanchik O.O., Mnatsakanov R.G. Structure-phase state and wear of Ni–Cr–B–Si–c coating on steel 1045 under friction conditions with the shear load component. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2020. 42(2). P. 175–195. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.02.0175>

134. Ігнатович С. Р., Карускевич М. В., Юцкевич С. С. Деформаційний рельєф поверхні як характеристика втомного пошкодження плакованих алюмінієвих сплавів. Повідомлення 1. Розвиток деформаційного рельєфу за циклічного навантаження. *Проблеми міцності*. 2020. № 5. С. 23-31.

135. Vasylyev M. A., Mordyuk B. N., Voloshko S. M. and et. Modification of Surface Layers of Cu–39Zn–1Pb Brass at High-Frequency Impact Deformation in the Air and Argon Inert Environments. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2020. 42, No. 3. P. 381–400 (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.42.03.0381](https://doi.org/10.15407/mfint.42.03.0381)

136. Кубіч В., Іщенко Л. Трибоспектральний аналіз приповерхневих шарів покриття, що утримує мідь на чавунної підкладці. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012, випуск 25, ч.ІІ. С.318-322.

137. Malinovskiy Y., Ilina O. A., Vlasenkov D., Oliinyk S., Mikosianchyk O. O. Self-organization of the tribosystem under non-stationary conditions of friction from the standpoint of deformation-wave representations. *Problems of Tribology*. 2024. V. 29, № 3(113). P. 15-23. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-113-3-15-23>

138. Kadin Y., Sherif M. Y. Energy dissipation at rubbing crack faces in rolling contact fatigue as the mechanism of white etching area formation. *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 96. P. 114-126. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.11.006>

139. Mughrabi H. Cyclic Slip Irreversibilities and the Evolution of Fatigue Damage. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2009. Vol. 40. P. 1257–1279. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-9839-8>

140. Mikosyanchyk, O.O., Mnatsakanov, R.H., Lopata, L.A. et al. Wear Resistance of 30KhGSA Steel Under the Conditions of Rolling with Sliding. *Materials Science*. 2019. Vol. 55, P. 402–408. <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00317-9>
141. Wang X-S. Fatigue Cracking Behaviors and Influence Factors of Cast Magnesium Alloys. *Special Issues on Magnesium Alloys*. InTech. 2011. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/19075>.
142. Mi Ch. Surface mechanics induced stress disturbances in an elastic half-space subjected to tangential surface loads. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2017. Vol. 65. P. 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2017.03.006>
143. Luongo A., Ferretti M., Simona Di N. Stability and Bifurcation of Structures: Statical and Dynamical Systems. Springer Cham, 2023, 706 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-27572-2>
144. Якубов Ф.Я. Синергетика и процессы самоорганизации при трении и изнашивании. *Printed scientific works: Modern technologies of engineering*. 2010. 5. P.122-133. http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/sutech5_2010.pdf
145. Wang X. Z., Yi J. T., Sun M. J. et al. Determination of elastic stiffness coefficients for spudcan foundations in a spatially varying clayey seabed. *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 128. P. 103336. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103336> [Get rights and content](#)
146. Barnes A.M., Bartle K.D., Thibon V.R.A. A review of zinc dialkyldithiophosphates (ZDDPs): characterisation and role in the lubricating oil. *Tribology International*. 2001. 34. P. 389-395.
147. Panda S. Pressure-Viscosity Coefficient and Characteristics of Lubricants. *Tribonet*. 2019. URL: <https://www.tribonet.org/wiki/pressure-viscosity-coefficient-and-characteristics-of-lubricants/> (дата звернення: 10.05.2024).
148. Sargent L. B. Pressure-Viscosity Coefficients of Liquid Lubricants. *A S L E Transactions*. 1983. 26 (1). P. 1–10. <https://doi.org/10.1080/05698198308981471>

149. Gecim B.A. Non-Newtonian Effect of Multigrade Oils on Journal Bearing Performance. *Tribology Transaction*. 1990. V. 33. P. 384—394. <https://doi.org/10.1080/10402009008981968>
150. Goryacheva I., Meshcheryakova A. Modelling of delamination in rolling and sliding contacts. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 41. P. 220-231 <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.025>
151. Zhao X.J., Chen Q., Liu Y.S., Qiu X.Y., Meli E., Rindi A. Effects of slip ratio and contact stress on rolling contact fatigue of defected rail materials / Engineering Failure Analysis. 2022. Vol. 131. P.105817. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105817>
152. Khoma M., Vynar V., Vasylyv C., et al. Influence of Heat Treatment of 30MnB5 Steel on its Micromechanical Properties and Resistance to Abrasion Wear. *Tribology in Industry*. 2022. T. 44. №. 2. P. 310. DOI: 10.24874/ti.1146.06.21.02
153. Babak V. P., Shchepetov V. V., Kharchenko S. D. Wear resistance of self-lubricating coatings due to the formation of carbide graphite. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2020. №. 2 (89). P. 99-105. DOI: 10.20535/2521-1943.2020.89.211170
154. Beresnev V. M., Maksakova O. V., Lytovchenko S. V., et al. Correlating Deposition Parameters with Structure and Properties of Nanoscale Multilayer (TiSi)N/CrN Coatings. *East European Journal of Physics*. 2022. №. 2. P. 112-117. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2022-2-14>
155. Ustinov A.I., Skorodzievskii V.S., Kosenko N.S. A study of the dissipative properties of homogeneous materials deposited as coatings. Part 2. Copper condensates with different microstructural characteristics. *Strength of Materials* 2008. T. 40. C. 275-281. <https://doi.org/10.1007/s11223-008-9004-4>
156. Berkani S., Dassenoy F., Minfray C., et al. Model formation of ZDDP tribofilm from a mixture of zinc metaphosphate and goethite. *Tribology International*. 2014. T.79. P. 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.06.013>
157. Ding H., Yang X., Xu L., et al. Analysis and comparison of tribological performance of fatty acid-based lubricant additives with phosphorus and sulfur. *Journal of*

Bioresources and Bioproducts. 2020. T. 5. №. 2. P. 134-142.
<https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.04.007>,

158. Mukhortov I.V., Zadorozhnaya E.A., Levanov I.G., Pochkaylo K.A. The influence of poly-molecular adsorption on the rheological behaviour of lubricating oil in a thin layer. *FME Transactions*. 2015. T. 43 (3). P. 218–222. doi:10.5937/fmet1503218M

159. Massoud T., De Matos R. P., Mogne T. L., et al. Effect of ZDDP on lubrication mechanisms of linear fatty amines under boundary lubrication conditions. *Tribology International*. 2020. T. 141. P. 105954. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105954>

160. Mordyuk B.N., Mikosyanchik O.O., Mnatsakanov R.G. Structure-phase state and wear of Ni–Cr–B–Si–c coating on steel 1045 under friction conditions with the shear load component. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii* . 2020. 42(2). P.175–195.
<https://doi.org/10.15407/mfint.42.02.0175>,

161. Florian C., Wonneberger R., Undisz A. et al. Chemical effects during the formation of various types of femtosecond laser-generated surface structures on titanium alloy. *Applied Physics A*. 2020. T. 126. C. 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-3434-7>

162. Ilina O.A., Mikosianchyk O.O., Mnatsakanov R.H., et al. Mechanisms of formation of wear-resistant dissipative structures in non-stationary lubrication conditions. *Problems of Tribology*. 2023. V. 28, No 3/109. P. 49-55. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-109-3-49-55>

163. Al-Quraan T. M.A., Ilina O., Kulyk M. et. al. Dynamic processes of self-organization in non-stationary conditions of friction. *Advances in Tribology*. 2023. Vol. 2023. P. 13. Article ID 6676706. <https://doi.org/10.1155/2023/6676706>

164. Berkani F., Dassenoy C., Minfray M. et. al. Reynard Model formation of ZDDP tribofilm from a mixture of zinc metaphosphate and goethite. *Tribology International*. 2014. Vol. 79. P. 197-203

165. Васильев А.Ю., Грабовский А.В., Мартыненко А.В. и др. Сопоставление расчетов контактных напряжений в зубчатом зацеплении по формуле Герца и методом конечных элементов. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"* : сб. науч. тр. Темат. вып. :

Проблемы механического привода. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2012. – № 36. – С. 20-24.

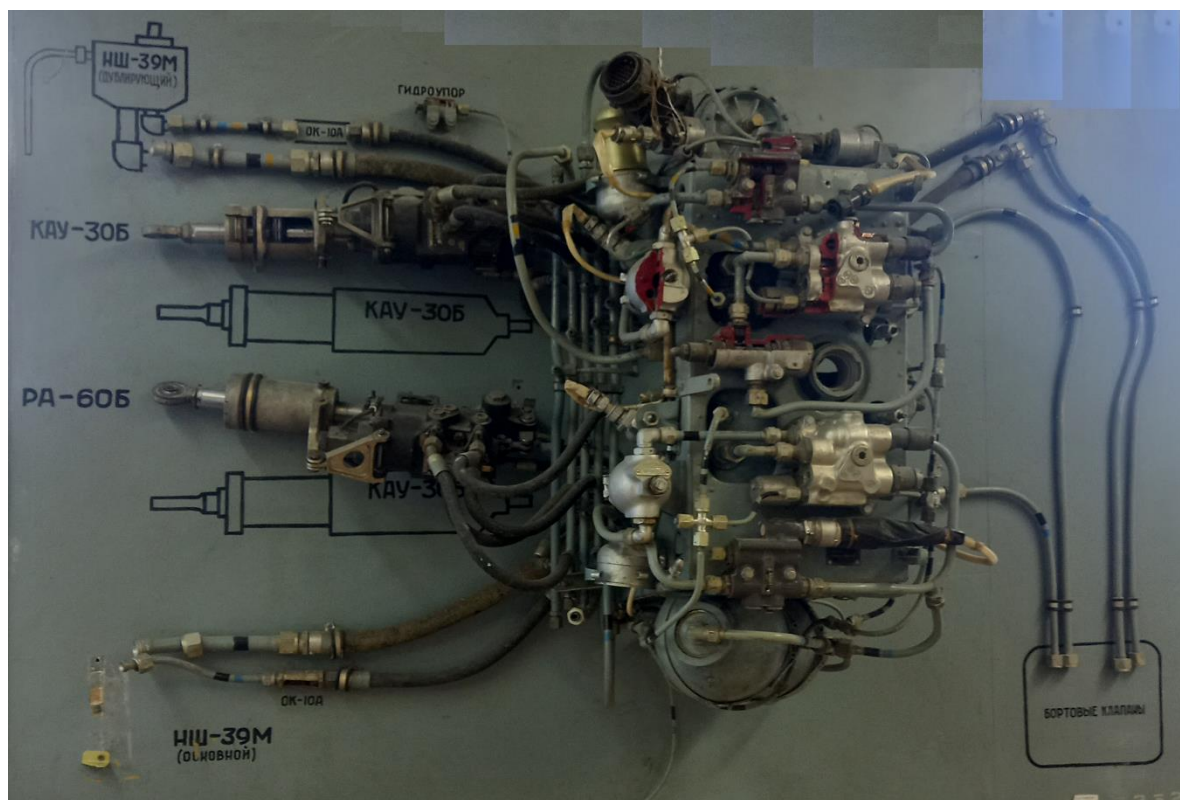
<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/10579>

166. Ільїна О.А., Мікосянчик О.О., Бородій В.М., Березівський Н.М. Методика визначення гідро- та негідродинамічної складових товщини мастильного шару. The Eleventh World Congress "AVIATION IN THE XXI-st CENTURY" Safety in Aviation And Space Technologies September 25-27, 2024 Kyiv. P.1.3.51-1.3.54.
<https://congress.nau.edu.ua/2024/info/Congress-2024.pdf>

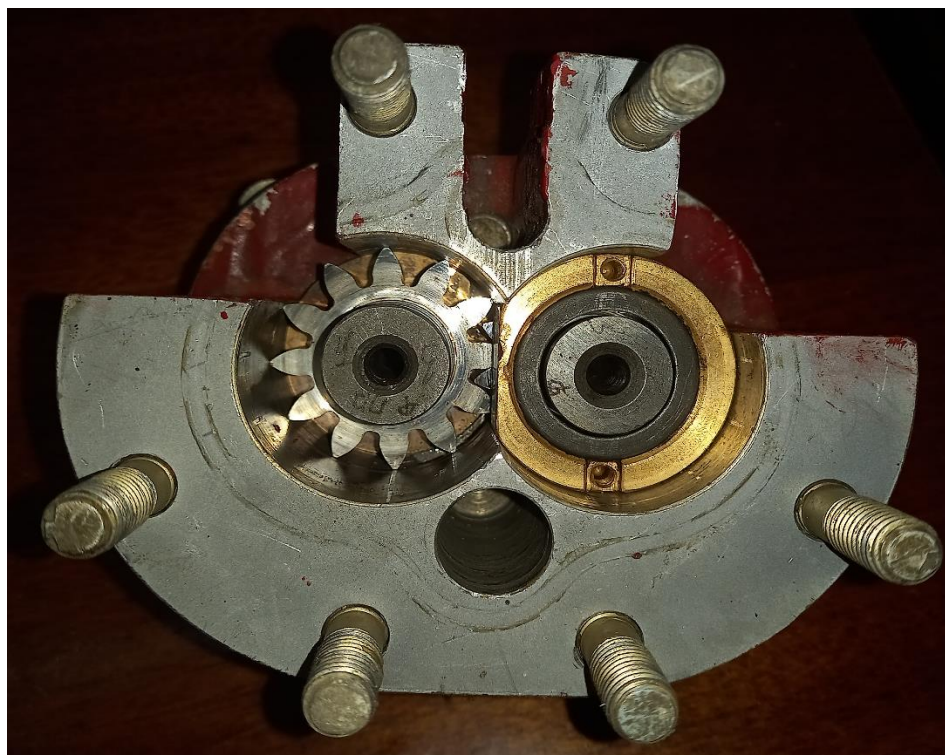
ДОДАТКИ

- А. Гідравлічна система вертольота Мі-8
- Б. Список публікацій за темою дисертації.
- В. Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

Гідравлічна система вертольота МІ-8



Шестерни насоса НШ-39М



Список публікацій за темою дисертації.

Розділ монографії

1. Mikosianchyk O., **Ilna O.** Research of Tribological Characteristics of Modern Aviation Oils. *Research Developments in Sustainable Aviation. Proceedings of International Symposium on Sustainable Aviation 2021* / In: Karakoc T.H., Atipan S., Dalkiran A., Ercan A.H., Kongsamutr N., Sripawadkul V. (eds). Springer, Cham, 2023. P. 371-377 https://doi.org/10.1007/978-3-031-37943-7_49

У фахових виданнях:

2. **Ilna O.A.**, Mikosianchyk O.O., Mnatsakanov R.H., Yakobchuk O.Ye. Development of methods for evaluation of lubrication properties of hydraulic aviation oils. *Problems of Tribology*. 2021. V. 26, No 3/101. P.42-47. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-101-3-42-47>

3. **Ільїна О. А.**, Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Мельник В.Б., Печеришний О.В. Оцінка якості гідравлічних авіаційних олив за енергетичними та протизношувальними показниками. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. No. 4(93). С. 39-47. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(93\).16255](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(93).16255)

4. Токарук В. В., Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко А. М, **Ільїна О. А.** Оцінка напружено-деформованого стану трибоконтакту за зміною усередненої потужності акустичної емісії. *Проблеми тертя та зношування*. 2022. №. 3(96). С. 30-40. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(96\).16833](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(96).16833)

5. **Ilna O.A.**, Mikosianchyk O.O., Yashchuk O. P., Mnatsakanov R.H., Berezhivskyi N.M. Tribomonitoring of the quality of aviation hydraulic oils according to lubricity and rheological indicators. *Problems of Tribology*. 2023. V. 28, No 1/107. P.34-40. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-34-40>

6. **Ilna O.A.**, Mikosianchyk O.O., Mnatsakanov R.H., Kostyunik R.E., Yashchuk O. P., Shteinyk M. A. Mechanisms of formation of wear-resistant dissipative structures in non-

stationary lubrication conditions. *Problems of Tribology*. 2023. V. 28, No 3/109. P. 49-55.
<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-109-3-49-55>

7. Мікосянчик О. О., Ільїна О. А. Оцінка реологічних характеристик трансмісійних олиव в нестационарних умовах тертя. *Problems of friction and wear*. 2024. 2 (103). С.43-55. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(103\).18671](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(103).18671)

8. Malinovskiy Y., **Ilina O. A.**, Vlasenkov D., Oliinyk S., Mikosianchik O. O. Self-organization of the tribosystem under non-stationary conditions of friction from the standpoint of deformation-wave representations. *Problems of Tribology*. 2024. V. 29, № 3(113). P. 15-23. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-113-3-15-23>

У іноземних спеціалізованих виданнях:

9. T. M.A. Al-Quraan, **Ilina O.**, Kulyk M., Mnatsakanov R., Mikosianchik O., Melnyk V. Dynamic processes of self-organization in non-stationary conditions of friction. *Advances in Tribology*. 2023. Vol. 2023. Article ID 6676706. P. 13.
<https://doi.org/10.1155/2023/6676706> (Scopus, Quartile Q3).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

10. **Ільїна О.А.**, Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Харченко О.В., Токарук В.В. Моделювання процесів зношування зубчастого зачеплення. *Science and practice, actual problems, innovations: proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Conference, Milan, 19 – 22 July 2022. Milan, Italy, 2022*. P. 280-284. DOI: 10.46299/ISG.2022.1.28

11. **Ilina O.**, Borodiy V., Mikosyanchik O. The influence of slip rate on the nature of distribution of microhardness of the surface layers of metal. *Polish Conference on Crystal Growth: proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Gdańsk, 19 -24 June, 2022. Gdańsk, Poland, University of Technology*. P.95

12. Бородій В.М., Скворцов О.О., **Ільїна О.А.** Оцінка елестогідродинамічних показників зубчастої передачі героторного масляного насосу. *Безпека в авіації та космічні технології*: матеріали X Всесвітнього конгресу “Авіація в XXI столітті”, м. Київ, 28-30 вересня 2022 р., Київ, 2022. Р.1.3.27-1.3.30.
<https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2022/paper/viewFile/8867/7018>

13. **Ільїна О.А.**, Мікосянчик О.О., Бородій В.М., Голембієвський Г.Г. Процеси самоорганізації трибосистеми при структурній пристосованості. *ABIA-2023*: матеріали XVI міжнародної науково-технічної конференції, Київ, 18–21 квіт. 2023 р. К.: НАУ, 2023. С.1.15-1.19.
<https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2023/paper/view/9247/7530>

14. **Ilna O.**, Mikosianchyk O. The influence of self-organization processes during friction and wear on the reliability of the tribosystem. *Theory and Practice of Rational Use of Traditional and Alternative Fuels and Lubricants*. Book of Abstracts IX International Scientific-Technical Conference, Kyiv, 03–07 July, 2023: K.: Center for Education Literature, 2023. P.116-118.

Навчально-методичні праці

15. Мікосянчик О.О., Мнацаканов Р.Г., Харченко О.В., Ільїна О.А. Триботехніка та основи надійності машин: практикум для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» – К.: НАУ, 2023. 96с.

Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.



АКТ

ПРО РЕАЛІЗАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ільїної Ольги Андріївни

Результати наукових досліджень, які отримані особисто Ільїною О.А., реалізовані в методиці оцінки якості товарних партій оливи «Бора Б» АМГ-10, що призначена для гідросистем авіаційної та наземної техніки, що працює в інтервалі температур навколишнього середовища від -60 до +55 °С, що дозволить розробити рекомендації для визначення оптимального інтервалу заміни мастильного матеріалу для забезпечення підвищення зносостійкості елементів трибосприяжень.

Запропонована методика діагностичного контролю оцінки якості товарних партій гідравлічних олиव за кінетикою зміни товщини мастильних шарів, напружень зсуву мастильного матеріалу та ефективною в'язкістю в триботехнічному контакті. В розробленій методиці за допомогою роликів аналогії моделюється робота зубчастих передач в умовах кочення з проковзуванням 30%. Проаналізовано зразки оливи АМГ-10 двох виробників.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЗРАЗКА ПРОДУКЦІЇ, ЩО ВИПРОБОВУВАВСЯ

- 1.1. Найменування та марка зразка продукції: зразок №1 – олива «Бора Б» АМГ-10.
- 1.2. Виробництво: ТОВ «Бора Б», 02141, м. Київ, вул. Лариси Руденко, буд. 6-А. Продукція випускається за ТУ У 19.2-38474081-010:2016 зі зм. 1.
- 1.3. Найменування та марка зразка продукції: зразок №2 – масло АМГ-10.
- 1.4. Виробництво: ООО «НПП Квалитет». Продукція випускається за ГОСТ 6794-75 изм. 1 – 5.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

2.1. Олива «Бора Б» АМГ-10 (зразок 1) характеризується низькими напруженнями зсуву, в середньому, 9,4 МПа незалежно від температури оливи, для оливи АМГ-10 (зразок 2) напруження зсуву мастильних шарів встановлено на рівні 9,4 МПа при температурі оливи 20 °С, що аналогічно показнику для оливи «Бора Б» АМГ-10, при зростанні температури оливи до 100 °С даний параметр збільшується в 1,15 рази.

2.2. Для оливи «Бора Б» АМГ-10 (зразок 1) встановлено ефективне формування товщини мастильного шару в контакт, стійкість до градієнту швидкості зсуву, ефективна в'язкість становить 4249 та 5039 Па·с при об'ємній температурі оливи 20 та 100 °С відповідно. Для оливи АМГ-10 (зразок 2) ефективна в'язкість в контакт знизується в 1,53 раз як при температурі оливи 20 °С, так і при 100 °С та становить 2764 Па·с (при 20 °С) та 3309 Па·с (при 100 °С), що свідчить про деструкцію компонентів мастильного матеріалу.

2.3. Для оливи «Бора Б» АМГ-10 встановлені ефективні змащувальні властивості як в період пуску, так і при максимальних обертах в умовах кочення з проковзуванням. Встановлено, що при пуску, незалежно від температури мастильного матеріалу, домінує змішаний режим мащення, при максимальних обертах досліджуваних зразків домінує гідродинамічний режим мащення, що свідчить про ефективні змащувальні властивості оливи «Бора Б» АМГ-10.

2.4. За кінетикою зміни реологічних показників оливи «Бора Б» АМГ-10 встановлено, що стійкість компонентів мастильного матеріалу до механо-термічної деструкції при нестационарних умовах мащення сприяє ефективному формуванню мастильного шару в контакт з високою несучою здатністю.

Рекомендовано розглянути можливість стендових випробувань оцінки якості оливи «Бора Б» АМГ-10 для гідравлічної системи вертольотів типу Мі з встановленням оптимального інтервалу заміни мастильного матеріалу в умовах всесезонної експлуатації.

Даний акт не є основою для фінансових претензій до організації.

Голова комісії

Члени комісії

Володимир СИЧ (начальник служби паливно-мастильних матеріалів)

Павло КАРЕЛІН (начальник відділу управління підтримання льотної придатності)

Віктор ВОРОНІН (начальник авіаційно-технічної бази)



АКТ
про реалізацію результатів наукових досліджень
Ільїної Ольги Андріївни

Результати наукових досліджень, які отримані особисто Ільїною О.А., реалізовані в розробленому комплексі технологічно-експериментальних методів дослідження триботехнічних характеристик вузла тертя при використанні оливи «Бора Б» АМГ-10 (виробництво: ТОВ «Бора Б», ТУ У 19.2-38474081-010:2016 зі зм. 1) на зразках зі сталі 30ХГСА (HRC 48 - 52, Ra 0,34 мкм), що призначена для гідравлічних машин та пристроїв різноманітної техніки.

За результатами триботехнічних випробувань оливи «Бора Б» АМГ-10 на сталених поверхнях встановлено (максимальна частота обертів: для випереджаючої поверхні - 700 об/хв, для відстаючої поверхні - 679 об/хв; проковзування – 30%; максимальне контактне навантаження по Герцу – 300 МПа; температура оливи від 20 °С, до 100 °С; нестационарні умови тертя, тривалість циклу – 80 с):

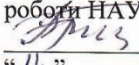
1. Олива характеризується ефективними антифрикційними властивостями – середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,012 та 0,013 при температурі оливи 20 та 100 °С відповідно, коефіцієнт тертя стабільний.
2. Енергетичні характеристики трибоконтакту – питома робота тертя в фрикційному контакті при використанні оливи «Бора Б» АМГ-10 знаходиться в діапазоні 1055 – 7419 Дж/мм², що характеризує умови роботи трибосистеми з середнім проявом енергетичних процесів в триботехнічному контакті.
3. Олива характеризується ефективними протизношувальними характеристиками – присадки, наявні в оливі «Бора Б» АМГ-10, обумовлюють підвищення зносостійкості контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням за рахунок зміцнення поверхневих шарів металу при напрацювання.

Вважаємо, що запропонована методика контролю та діагностики експлуатаційних властивостей оливи «Бора Б» АМГ-10 дозволяє оцінити її антифрикційні та протизношувальні характеристики. На підставі оцінки триботехнічних властивостей оливи, з урахуванням сертифіката якості виробника оливи «Бора Б» АМГ-10, можуть бути надані рекомендації застосування даної оливи в якості оливи для гідравлічних машин та пристроїв різноманітної техніки, що експлуатуються в інтервалі температур від мінус 60 °С до 55 °С.

Даний акт не є основою для фінансових претензій до підприємства.

Головний технолог Канавський Д.М. 

“ПОГОДЖЕНО”

Проректор з навчальної
роботи НАУ Анатолій ПОЛУХІН
“14” 12 2022 р.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Ректор НАУ

 Максим ЛУЦЬКИЙ
“14” 12 2022 р.

АКТ

про впровадження теми у навчальний процес
Національного авіаційного університетурезультатів НДР за темою № 368-ДБ21 «Розроблення апаратно-методологічного
нанотриботехнологічного комплексу для підвищення триботехнічних характеристик та
ресурсу високонавантажених вузлів тертя авіакосмічної техніки»,
номер державної реєстрації 0121U109488

Комісія у складі :

голова комісії	Свирид М.М.	к.т.н., заступник декана АКФ,
та членів комісії	Захарченко В.П.	к.т.н., завідувач кафедри АЕМ;
	Семак І.В.	старший викладач кафедри ПМіМ;
	Терещенко Ю.М.	д.т.н., завідувач кафедри АД;
	Бадах В.М.	к.т.н., завідувач кафедри ГТС;
	Семитківська Т.О.	к.т.н., доцент кафедри АДіБП,

яка діє на підставі розпорядження декана АКФ Національного авіаційного університету від 20.09.2022 року за № 37, засвідчує, що результати НДР за темою № 368-ДБ 21 «Розроблення апаратно-методологічного нанотриботехнологічного комплексу для підвищення триботехнічних характеристик та ресурсу високонавантажених вузлів тертя авіакосмічної техніки» впроваджені у навчальний процес кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів:

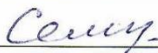
- шляхом видання практикуму «Триботехніка та основи надійності машин» здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» з дисципліни «Триботехніка та основи надійності машин», авторів д-р техн. наук, професора Мікосянчик О.О., д-р техн. наук, професора Мнацаканова Р.Г., канд. техн. наук, доцента Харченко О.В., аспірантки кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Ільїної О.А.;
- шляхом використання в курсах лекцій з дисциплін «Авіаматеріалознавство» для спеціальності 173 та «Матеріалознавство» для спеціальності 272;
- при виконанні двох кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка».

Голова комісії

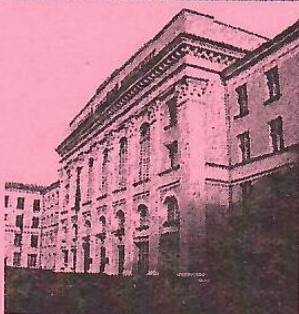
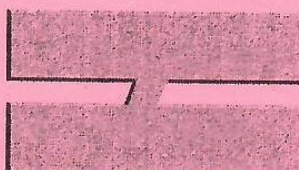
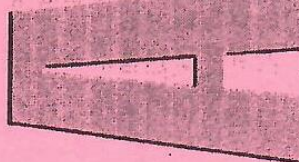


Михайло СВИРИД

Секретар комісії



Інна СЕМАК



**VIVERE!
VINCERE!
CREARE!**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет**

ТРИБОТЕХНІКА ТА ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ МАШИН

**ПРАКТИКУМ
для здобувачів вищої освіти
освітнього ступеня доктора філософії
спеціальності 131 «Прикладна механіка»**

Київ 2023

УДК 531.8(076.5)
Т 67

Укладачі: *О. О. Мікосянчик* – д-р техн. наук, проф.;
Р. Г. Мнацаканов – д-р техн. наук, проф.;
О. В. Харченко – канд. техн. наук, доц.;
О. А. Ільїна – аспірант

Рецензент *О. І. Духота* – д-р техн. наук, доц.,
професор кафедри підтримання льотної придатності
повітряних суден
(Національний авіаційний університет)

*Затверджено Науково-методично-редакційною радою
Національного авіаційного університету
(протокол № 5/22 від 18.11.2022 р.)*

Триботехніка та основи надійності машин: практикум /
Т 67 уклад.: *О. О. Мікосянчик., Р. Г. Мнацаканов, О. В. Харченко,
О. А. Ільїна.* – К. : НАУ, 2023. – 96 с.

Містить основні теоретичні відомості, завдання для самостійної роботи та рекомендації щодо виконання практичних робіт. Укладено відповідно до програми навчальної дисципліни «Триботехніка та основи надійності машин».

Для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії спеціальності 131 «Прикладна механіка».