

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Якобчук Олександр Євгенійович

УДК 621.891


ДИСЕРТАЦІЯ
«ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПАР ТЕРТЯ ЛОКАЛЬНИХ
КОНТАКТІВ В НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ РОБОТИ ВИБОРОМ
МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З ЗАДАНИМИ ТРИБОТЕХНІЧНИМИ
ВЛАСТИВОСТЯМИ»

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 Олександр ЯКОБЧУК

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

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

Якобчук О.Є. Підвищення зносостійкості пар тертя локальних контактів в нестационарних умовах роботи вибором мастильних матеріалів з заданими триботехнічними властивостями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» (13 – Механічна інженерія). – Національний авіаційний університет, Київ, 2024.

В дисертаційній роботі вирішувалась науково-технічна проблема підвищення ефективності використання мастильних матеріалів, що відноситься до складних науково-технічних завдань трибології, матеріалознавства та хімотології. Як елемент складної трибосистеми, мастильні матеріали є індикатором режимів та умов експлуатації агрегатів, їх технічного стану, тому від якості мастильних матеріалів залежить надійність деталей тертя.

Теоретичні дослідження, які базуються на концепції трибології та методології фізичних досліджень, охоплюють широкий спектр наукових підходів з застосуванням основних положень теорії тертя, зношування та мащення, а також оптичних, електрометричних та триботехнічних методів дослідження. Експериментальні дослідження проводились з використанням як стандартних, так і спеціальних методик для вимірювання таких параметрів, як товщина мастильних шарів, антифрикційні та протизношувальні властивості мастильних матеріалів, питомої роботи тертя в період пуску. Теоретичні результати роботи отримані з використанням положень трибології, оптики та фізичних методів дослідження, висновки підтверджені великою кількістю проведених експериментальних досліджень, їх відтворюваністю, співставністю з результатами інших авторів, використанням обладнання з достатньою точністю вимірювань і результатами математичної обробки з використанням сертифікованих програм.

Взаємозамінність мастильних матеріалів з метою забезпечення надійної роботи парку авіаційної техніки України, зменшення витрат на технічне обслуговування повітряних суден, ґрунтується на впровадженні в експлуатацію багатоцільових

мастильних матеріалів, якість яких має відповідати міжнародним стандартам та допускам провідних авіабудівельних компаній. Впровадження високотехнологічних та високоефективних авіаційних, промислових мастильних матеріалів із заданими характеристиками є однією з першочергових задач для підвищення надійності пар тертя.

Важливим напрямком щодо зменшення інтенсивності зношування контактних поверхонь є вибір мастильного матеріалу як з урахуванням режимів роботи вузлів та агрегатів, практичного досвіду при експлуатації та обслуговуванні повітряних суден, так і комплексною оцінкою якості мастильних матеріалів за показниками стійкості до окислення, стабільності до деструкції при високих градієнтах швидкості зсуву, несучою здатністю граничного шару в критичних умовах роботи, деемульгуючими, антифрикційними та протизношувальними властивостями.

Встановлено, що стала товщина мастильного шару мастила AeroShell Grease 33 в режимі прискореного масляного голодування на сталі 9ХС на 30-40 % перевищує товщину шару, зафіксовану на сталі 30ХГСА. Незалежно від типу матеріалу контактних поверхонь, збільшення проковзування з 3 до 20 % обумовлює зростання товщини мастильного шару в контакті в 2 рази, що спричинено більш інтенсивною активацією поверхонь тертя внаслідок зростання дотичних напружень зсуву.

Зменшення твердості контактних поверхонь в 1,5 рази (HRC 55 – сталь 9ХС, HRC 35 – сталь 30ХГСА) в режимі масляного голодування без примусового видалення мастила AeroShell Grease 33 спричинює зростання лінійного зносу в 2 рази для випереджаючої і відстаючої поверхонь, прояву ознак заїдання внаслідок домінування пружно-пластичних деформацій в поверхневих шарах сталі 30ХГСА та інтенсифікації механодеструкції граничних шарів.

Встановлені загальні закономірності ознак заїдання пар тертя локальних контактів, незалежно від типу мастила та матеріалу контактних поверхонь, які проявляються в прагненні до мінімальних значень товщини граничних мастильних шарів, моменту тертя та питомої роботи тертя, що свідчить про неможливість відновлення метастабільних структур та досягнення трибосистемою граничних значень енергії активації руйнування.

В діапазоні контактного навантаження 250 – 700 МПа мастило AeroShell Grease 33 характеризується більш ефективними мастильними властивостями, в порівнянні з мастилом Ера ВНІНП-286М: при σ_{max} 250 МПа товщина граничних плівок, сформованих компонентами мастила AeroShell Grease 33, в 1,9 разів перевищує товщину граничних плівок мастила ВНІНП-286М, при σ_{max} 550 – 700 МПа цей показник збільшується в 8 - 10 разів.

Визначені критерії вибору цільового застосування авіаційних мастильних матеріалів, відповідно до міжнародних стандартів, специфікацій та допусків виробників авіаційної техніки, на основі комплексної оцінки їх якості за несучою здатністю граничних шарів в критичних умовах роботи, антифрикційними, протизношувальними та деемульгуючими властивостями, стійкістю до окислення та стабільністю до деструкції компонентів мастильного матеріалу в умовах динамічного навантаження.

Визначені механізми ступеневого руйнування граничних шарів мастильних матеріалів в умовах масляного голодування, які спричинюють перехід трибосистеми в граничний або з ознаками сухого режимів мащення внаслідок зростання градієнту швидкості зсуву до $8 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$, що призводить до механодеструкції анізотропних граничних шарів з тривалістю їх руйнування від 5 до 55 хвилин з подальшим проявом ознак заїдання пар тертя локальних контактів.

Встановлені високі деемульгуючі властивості мастила AeroShell Grease 33, емульсії якого при концентрації води до 20 % повністю розділяються при температурі від $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ і вище, що забезпечує стабільність антифрикційних та протизношувальних властивостей мастила за умов потрапляння води, на відміну від стійких емульсій мастила Ера ВНІНП-286М, які спричинюють підвищення коефіцієнту тертя при ковзанні на 11 % та зростання зносу сталі на 15 %.

Встановлена ефективна структурна пристосованість локальних контактів пар ковзання при змащуванні мастилом/емульсіями AeroShell Grease 33, на відміну від стійких емульсій мастила Ера ВНІНП-286М, що проявляється формуванні оптимального мікрорельєфу поверхневих шарів металу при терті – рівноважна

шорсткість менше в 2 рази, в порівнянні з вихідною; знижується в 1,6 рази найбільша висота профілю та на 26 % зростає відносна опорна довжина профілю.

Встановлено, що використання оливи «Бора Б» СМ-9, в порівнянні з маслосумішню авіаційною СМ-9, в умовах кочення з проковзуванням забезпечує стабільність антифрикційних властивостей та домінування еластогідродинамічного режиму мащення при пуску за рахунок ефективної адаптації та структуризації граничних шарів мастильного матеріалу з напруженнями зсуву 11-18 МПа та ефективною в'язкістю в контакті 5140 Па·с, що є передумовою до зниження енергетичних процесів в локальному контакті та зменшення інтенсивності зношування сталі 40ХН в 1,2 рази.

Інтенсивність зношування контактних поверхонь характеризується низькими значеннями, що свідчить про високу зносостійкість контактних поверхонь та ефективні протизношувальні характеристики оливи «Бора Б» СМ-9 і маслосуміші авіаційної СМ-9. При змащуванні пар тертя маслосумішню авіаційною СМ-9 інтенсивність зношування випереджаючої та відстаючої поверхонь зростає в 1,36 та в 1,09 разів відповідно, в порівнянні з оливою «Бора Б» СМ-9. При напрацюванні пар тертя встановлено знеміцнення поверхневих шарів металу, що позитивно впливає на триботехнічні процеси в контакті.

Обґрунтовано вибір оливи «Бора Б» ВО-12, на відміну від оливи всесезонної ВО-12, для пар тертя в динамічних умовах навантаження за стабільністю коефіцієнту тертя при пуску на рівні 0,007 та низькими напруженнями зсуву мастильного шару на рівні 6-8 МПа, реалізацією змішаного режиму мащення при температурі оливи 100 °С, зниженням питомої роботи тертя в контакті в 1,6 рази, що сприяє зменшенню інтенсивності зношування випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно в 2,2 та 1,4 рази.

Встановлено механізм підвищення зносостійкості сталі 40ХН при змащуванні оливою «Бора Б» ВО-12, що полягає в реалізації пластифікуючого ефекту Ребіндера, який проявляється в зниженні мікротвердості поверхневих шарів металу в 1,4 рази, зменшенні сили тертя при індентуванні в 1,72 рази, локалізації деформованих в

процесі тертя приповерхневих шарів металу до 10 мкм, формуванні однорідного поверхневого шару з дрібнофрагментною структурою.

Застосуванням багатофакторного аналізу вибрано впливові показники триботехнічних характеристик, множинним регресійним аналізом одержано рівняння множинної лінійної регресії для прогнозування зносу пар тертя з урахуванням питомої роботи тертя в контакті, мастильних та антифрикційних характеристик мастильних матеріалів. Якість одержаного рівняння підтверджує коефіцієнт детермінації на рівні 98 % при встановленому інтервалі довіри на рівні 95 %, значущість незалежних змінних оцінена за t -критерієм Стьюдента, P -Value, F -критерієм.

Наукова новизна роботи полягає в наступних основних положеннях.

Вперше отримана залежність лінійного зносу пар тертя при коченні з проковзуванням в діапазоні контактного навантаження 250-700 МПа від товщини мастильного шару та питомої роботи тертя, зміна яких корелює з порушенням процесів самоорганізації дисипативних структур за умови переходу трибосистеми до режиму тертя без мастильного матеріалу.

Набула подальшого розвитку теорія руйнування анізотропних граничних шарів мастил в умовах кочення з проковзуванням до 40 % на основі оцінки зміни градієнта швидкості зсуву, зростання якого понад $8 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ унеможлиблює відновлення тиксотропних властивостей структурними компонентами мастил, що призводить до прояву ознак заїдання контактних поверхонь.

Вперше визначено механізм структурної пристосованості за принципом оптимальної механічної схеми контактної взаємодії пар ковзання при змащуванні емульсіями літєвих мастил з водою в концентрації до 20 %, який полягає в формуванні мікрорельєфу контактних поверхонь зі збільшенням відносної опорної довжини профілю до 25 % за умов ефективних деемульгуючих властивостей мастил.

Визначені механізми підвищення зносостійкості сталі з урахуванням адсорбційно-пластифікуючих ефектів базових олив та функціональних присадок мастильних матеріалів, які полягають в зниженні в 1,7 разів опору тангенціальному деформуванню локальних мікроб'ємів поверхневих шарів металу, формуванні

однорідного поверхневого шару при терті з фрагментами структури довжиною до 45 мкм, збільшенні до 7 % фактичної площі контакту, що сприяє зменшенню впливу динамічного фактору при несталіх умовах роботи.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що розроблені методика випробування емульсій авіаційних мастил для редуктора підйомника закрилків в літаках АН 148, методика оцінки якості товарних партій олив для змащування осьових шарнірів втулок гвинтів вертольотів, спосіб та пристрій для підвищення зносостійкості локальних контактів способом введення поліфункціональних присадок до мастильного матеріалу, які прийняті до впровадження на підприємствах та установах України.

Ключові слова: товщина мастильного шару, ефективна в'язкість, структурна пристосованість, інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, питома робота тертя, пружно-пластична деформація, ступінь окислення оливи, рівноважна шорсткість, мікротвердість, несталі умови тертя, авіаційні мастильні матеріали, мікрорельєф поверхні.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані у 34 наукових працях.

У фахових виданнях:

1. Мнацаканов Р. Г., Довбуш В. О., Якобчук О. Є. Зміна структури і складу поверхневих шарів контактних поверхонь. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2002. № 4 (15). С. 63–66. DOI: 10.18372/2306-1472.15.15277 (категорія Б).

2. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Мікосянчик О. О. Дія олив на поверхні тертя при додаванні багатофункціональних присадок. *Автошляховик України: Окремий випуск. Вісник Північного наукового центру ТАУ*. 2003. № 6. С. 10–14 (категорія Б).

3. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є. Особливості мастильного процесу в умовах перемінних контактних напруг, підвищених кутових швидкостей і зміцнення контактних поверхонь. *Вісник Національного транспортного університету*. 2003. № 8. С. 20–24 (категорія Б).

4. Мнацаканов Р. Г., Довбуш В. О., Якобчук О. Є., Микосянчик О. О. Мастильна дія пластичних і напіврідких мастил. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2003. № 3-4 (18). С. 73–76. DOI: 10.18372/2306-1472.18.15390 (категорія Б).

5. Маленко В. І., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Микосянчик О. О. Порівняльні реологічні характеристики мінеральних і синтетичних олив. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2006. Вип. 45. С. 170–178 (категорія Б).

6. Якобчук О. Є., Хімко А. М., Бородій В. М., Краля В. О. Вплив режимів тертя на зносостійкість деталей в умовах тертя–ковзання. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2008. Вип. 50. С. 144-148. DOI: 10.18372/0370-2197.50.2998 (категорія Б).

7. Хімко А. М., Якобчук О. Є., Бородій В. М., Задніпровська С. М., Холод Н. В. Особливості зношування вузлів механізації крила літаків, що працюють в умовах динамічних навантажень. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2009. № 3 (40). С. 33–36. DOI: 10.18372/2306-1472.40.1741 (категорія Б).

8. Khimko A., Kralya V., Yakobchuk A., Kostuchik V., Sidorenko A. Units wearability of aircraft wing lift devices. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2011. Вип. 55. С. 112–117. DOI: 10.18372/0370-2197.55.3249 (категорія Б).

9. Хімко М. С., Якобчук О. Є., Хімко А. М., Науменко Н. О. Методика випробувань шарнірних підшипників на зносостійкість. *Проблеми тертя та зношування*. 2017. № 1 (74). С. 118-122 (категорія Б).

10. Микосянчик О. О., Кудрін А. П., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Токарук В. В. Оцінка теплових процесів у фрикційному контакті при коченні з проковзуванням. *Проблеми тертя та зношування*. 2017. № 4 (77). С. 4–15 (категорія Б).

11. Якобчук О. Є., Мнацаканов Р. Г., Микосянчик О. О., Хімко А. М., Токарук В. В. Протизадирні властивості мастила Aero Shell Grease 33 при використанні конструкційних сталей 9ХС і 30ХГСА. *Проблеми тертя та зношування*. 2018. № 1 (78). С. 27–36. DOI:10.18372/0370-2197.1(78).12756 (категорія Б).

12. Mikosianchyk O. A., Mnatsakanov R. G., Khimko A. N., Kichata N. N., Yakobchuk A. E. Theoretical Aspects of the Structural and Rheological State of Boundary

Lubricating Layers in Friction Pairs. *Problems of Tribology*. 2018. № 3(89). P. 47–52. DOI:10.31891/2079-1372-2018-89-3-47-52 (категорія Б).

13. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Токарук В. В. Прогнозування лінійного зносу контактних поверхонь в екстремальних умовах тертя. *Проблеми тертя та зношування*. 2018. № 4 (81). С. 4–12. DOI: 10.18372/0370-2197.4(81).13321 (категорія Б).

14. Якобчук О. Є. Аналіз можливості заміни мастила ВНІНП-286М на Aero Shell Grease 33 у вузлах механізації крила у літаках сімейства АН. *Проблеми тертя та зношування*. 2019. № 2 (83), С. 29-36. DOI: 10.18372/0370-2197.2(83).13689 (категорія Б).

15. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Хімко А. М. Оцінка параметрів мастильного матеріалу в умовах масляного голодування трибоконтракту. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 2 (87), С. 21–28. DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14721 (категорія Б).

16. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Хімко А. М., Харченко О. В. Огляд класифікацій за фізико-механічними та експлуатаційними властивостями мастил закордонного виробництва. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 3 (88). С. 52–70. DOI: 10.18372/0370-2197.3(88).14920 (категорія Б).

17. Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Хімко А. М., Токарук В. В. Розробка методики контролю та діагностики експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів за триботехнічними параметрами. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 1 (90). С. 11–19. DOI: 10.18372/0370-2197.1(90).15234 (категорія Б).

18. Mikosianchyk O., Yakobchuk O., Mnatsakanov R., Khimko A. Evaluation of Operational Properties of Aviation Oils by Tribological Parameters. *Problems of Tribology*. 2021. 26 (1/99). С. 43–50. DOI: 10.31891/2079-1372-2021-99-1-43-50 (категорія Б).

19. Іліна, Т., Mikosianchyk, O., Mnatsakanov, R. and Yakobchuk O. 2021. Development of methods for evaluation of lubrication properties of hydraulic aviation oils. *Problems of Tribology*. 2021. №3(101). P. 42–47. DOI: 10.31891/2079-1372-2021-101-3-42-47 (категорія Б).

20. Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Педан Є. В., Березівський Н. М. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 2 (99). С. 4–13. DOI: 10.18372/0370-2197.2(99).17611 (категорія Б).

21. Якобчук О. Є., Юцкевич С. С., Кисельова Т. В., Якобчук І. О., Сидоренко К. О. Статистичний аналіз результатів дослідження триботехнічних характеристик мастильних матеріалів при терті. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 4 (101). С. 84–96. DOI: 10.18372/0370-2197.4(101).18082 (категорія Б).

У іноземних спеціалізованих виданнях:

22. Svirid M. N., Wajs E., Primak L. B., Borodii V. N., Yakobchuk A. E. Improvement of the performance parameters of precision friction couples in the magnetic field. *Powder metallurgy and metal ceramics*. 2013. Vol. 52. No. 7. P. 417–423. DOI: 10.1007/s11106-013-9542-6 (**Scopus, Quartile Q3**).

23. Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. H., Lopata L. A., Marchuk V. E., Yakobchuk O. E. Wear resistance of 30KhGSA steel under the conditions of rolling with sliding. *Materials science*. 2019. Vol. 55. No. 3. P. 402–408. DOI: 10.1007/s11003-019-00317-9 (**Scopus, Quartile Q3**).

24. 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*. 2021. Vol. 50. No. 3. P. 229–235. DOI: 10.3103/S1052618821030110 (**Scopus, Quartile Q2**).

Матеріали та тези конференцій:

25. Мнацаканов Р. Г., Довбуш В. О., Якобчук О. Є. Первісне порівняння ресурсів роботи зубчастої передачі на маслі та пластичному мастилі. *ABIA-2001: матеріали III Міжнар. науково-техн. конф., м. Київ, 24–26 квіт. 2001 р. Київ, 2001*. С. 12.

26. Якобчук О. Є., Бородій В. М., Хімко А. М. Сучасні методики досліджень характеристик мастильних матеріалів для важко навантажених пар тертя. *Державна*

політика розвитку цивільної авіації XXI століття: Економічний патріотизм і стратегічні можливості України : матеріали науково-практ. конф., м. Київ, 7–8 лют. 2008 р. Київ, 2008. С. 32.

27. Якобчук О. Є., Хімко А. М., Бородій В. М., Краля В. О. Вплив режимів тертя на зносостійкість деталей в умовах тертя–ковзанням. *Сучасні проблеми машинознавства*: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 22–23 верес. 2008 р., Київ, 2008. С. 32.

28. Mnatsakanov R. G., Yakobchuk O. Y., Khimko A. M. Analysis of the changes in the load-bearing capacity of lubricating layers of lithium greases at contact load changing. *The Eighth World Congress “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY”: Safety in Aviation And Space Technologies* : proceedings, Kyiv, 10–12 October 2018. Kyiv, 2018. P. 1.4.9–1.4.12.

29. Yakobchuk O. Y., Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Khimko A. M. Analysis of the Use of Lubricants in the Nodes of High Lift Devices in Antonov Family Aircrafts. У *AVIA-2019*, proceedings of the Fourteenth International Conference of Science and Technology, Київ, Україна, 23 квітня 2019–25 квітня 2019; НАУ: Київ, 2019; С. 19.25–19.29.

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2019/schedConf/presentations>.

30. Dukhota O. I., Popov O. V., Yakobchuk O. Y. Technological aspects of reliability control of aviation tribomechanical systems. *The Ninth World Congress “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY - Safety in aviation and space technology”*: proceedings, Kyiv, 22–24 September 2020. Kyiv, 2020. P. 1.2.36–1.2.42. <https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2020/schedConf/presentations>.

31. Якобчук О. Є., Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко А.М. Методика оцінки триботехнічних властивостей авіаційної оливи ВО-12. *AVIA-2021* : матеріали XV науково-практ. конф., м. Київ, 20–22 квіт. 2021 р. Київ, 21. С. 1.1–1.5.

32. Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Мнацаканов Р. Г., Хімко А.М. Оцінка якості авіаційної оливи. *Theory, practice and science* : abstracts of XXIII International Scientific and Practical Conference, Tokyo, 27–30 April 2021. Tokyo, 2021. P. 438–442. URL: <https://doi.org/DOI:10.46299/ISG.2021.I.XXIII>.

33. Yakobchuk O. Y., Mikosianchyk O. O., Mnatsakanov R. G. Investigation of the Phenomenon of Lubrication Starvation in Conditions of Rolling With Sliding. *ABIA-2023* : матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, Київ, 18–21 квіт. 2023. Київ, 2023. С. 1.66–1.69. URL: <https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2023/schedConf/presentations>.

Патенти:

34. Спосіб відновлення поверхні тертя в імпульсному магнітному полі: Патент на корисну модель № 45918 Україна: G01N 3/56, F16C 33/14, М.М. Свирид, А.П. Кудрін, С.М. Задніпровська, А.М. Хімко, О.Є. Якобчук – u200907999; заявл. 29.07.2009; опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22. – 2 с.

ANNOTATION

Yakobchuk O.Ye. Enhancing the wear resistance of local contact friction pairs under non-stationary operating conditions by selecting lubricants with specified tribotechnical properties – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences (PhD) by specialty 05.02.04 «Friction and wear in machines» (13 – Mechanical engineering). – National Aviation University, Kyiv, 2024.

The thesis addresses the scientific and technical challenge of enhancing the effectiveness of lubricating materials, which refers to the complex scientific and technical objectives of tribology, materials science and chemotology. Lubricating materials, as integral components of complex tribosystems, serve as indicators of operational modes and conditions of units, their technical state, so the reliability of friction parts depends on the quality of lubricants.

Theoretical studies, grounded in the concept of tribology and employing the methodology of physical research, encompass a broad spectrum of scientific approaches. These approaches utilize fundamental principles from friction, wear, and lubrication theory, alongside optical, electrometric, and tribotechnical research methods. Experimental studies were conducted employing both standard and specialized techniques to measure parameters including lubricating layer thickness, antifriction and anti-wear properties of lubricating materials, and specific friction work during the start-up period. Theoretical results in this study were derived through the application of principles from tribology, optics, and various physical research methods, the conclusions are substantiated by extensive experimental investigations, which demonstrate reproducibility and comparability with findings from other researchers, the measurements were conducted using high-precision equipment, and the results were subjected to rigorous mathematical analysis using certified software programs.

The interchangeability of lubricating materials aimed at ensuring the reliable operation of the fleet of aircraft in Ukraine, reducing maintenance costs for aircraft, is based on the implementation of versatile lubricating materials, the quality of which must comply with international standards and approvals of leading aircraft manufacturing companies. The

implementation of high-tech and high-performance aviation and industrial lubricating materials with specified characteristics is one of the top priorities for increasing the reliability of friction pairs.

An important direction in reducing the intensity of wear on contact surfaces is the selection of lubricating material, taking into account the operating conditions of units and assemblies, practical experience in aircraft operation and maintenance, as well as a comprehensive assessment of the quality of lubricating materials based on indicators such as resistance to oxidation, stability under high shear rate gradients, load-carrying capacity of the boundary layer in critical operating conditions, demulsifying, anti-friction, and anti-wear properties.

It has been established that the initial thickness of the lubricating layer of AeroShell Grease 33 under accelerated oil starvation conditions on 9KhS steel exceeds that recorded on 30KhGSA steel by 30 - 40 %. Regardless of the type of material of the contact surfaces, an increase in slip from 3 to 20 % results in a doubling of the lubricating layer thickness in the contact, attributed to the more intense activation of friction surfaces due to increased tangential shear stresses.

A reduction in the hardness of the contact surfaces by 1.5 times (HRC 55 for 9KhS steel, HRC 35 for 30KhGSA steel) under oil starvation conditions without forced removal of AeroShell Grease 33 lubricant leads to a doubling of linear wear for both leading and trailing surfaces, accompanied by signs of seizure due to the predominance of elastic-plastic deformations in the surface layers of 30KhGSA steel and intensified mechano-destruction of boundary layers.

General patterns of signs of seizure of friction pairs in local contacts, regardless of the type of lubricant and material of the contact surfaces, have been identified. These patterns manifest in a tendency towards minimal values of boundary lubricant layer thickness, friction torque, and specific friction work, indicating the impossibility of restoring metastable structures and achieving boundary values of activation energy for destruction by the tribosystem.

In the range of contact loads between 250 and 700 MPa, AeroShell Grease 33 demonstrates superior lubricating properties compared to Era VNIINP-286M grease. At a

maximum stress (σ_{max}) of 250 MPa, the boundary film thickness formed by AeroShell Grease 33 components is 1.9 times greater than that of VNIINP-286M grease. This difference increases significantly to 8 - 10 times at σ_{max} between 550 and 700 MPa.

The selection criteria for aviation lubricants, adhering to international standards, specifications, and approvals of aircraft manufacturers, are based on a comprehensive evaluation encompassing boundary layer load-bearing capacity under critical conditions, antifriction, anti-wear, and demulsifying properties, oxidation resistance, and stability under dynamic loading conditions.

Criteria for selecting the target application of aviation lubricating materials have been determined based on international standards, specifications, and approvals from aircraft manufacturers. These criteria involve a comprehensive assessment of their quality, including their load-carrying capacity in critical operating conditions, anti-friction, anti-wear, and demulsifying properties, as well as resistance to oxidation and stability of lubricating materials components to destructions under dynamic loading conditions.

The mechanisms of gradual breakdown of boundary layers of lubricating materials under oil starvation conditions have been identified, leading to the transition of the tribosystem into boundary or semi-dry lubrication regimes due to the increase in shear rate gradient up to $8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$. This results in the mechano-destruction of anisotropic boundary layers with a duration of destruction ranging from 5 to 55 minutes, followed by signs of adhesion of friction pairs in local contacts.

The high demulsifying properties of AeroShell Grease 33 have been established, with its emulsions completely separating at water concentrations of up to 20 % at temperatures from $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ and above. This ensures the stability of the lubricant's anti-friction and anti-wear properties even in the presence of water, unlike the stable emulsions of Era VNIINP-286M grease, which lead to an 11 % increase in the coefficient of friction and a 15 % increase in steel wear during sliding.

Effective structural adaptability of local sliding contacts lubricated with AeroShell Grease 33 has been determined, unlike the stable emulsions of Era VNIINP-286M grease. This is manifested in the formation of an optimal microrelief on the metal surface during friction – the equilibrium roughness is reduced by less than 2 times compared to the initial

state; the maximum profile height decreases by 1,6 times, and the relative supporting length of the profile increases by 26 %.

It has been established that the use of «Bora B» SM-9 oil, compared to aviation oil SM-9, in rolling with sliding ensures the stability of anti-friction properties and the dominance of elastohydrodynamic lubrication regime during startup due to effective adaptation and structuring of boundary layers of lubricating material with shear stresses of 11 - 18 MPa and effective viscosity in contact of 5140 Pa·s. This is a prerequisite for reducing energy processes in the local contact and decreasing the wear intensity of 40KhN steel by 1,2 times.

The wear intensity of the contact surfaces is characterized by low values, indicating high wear resistance of the contact surfaces and effective anti-wear characteristics of «Bora B» SM-9 oil and aviation oil SM-9. When lubricating friction pairs with aviation oil SM-9, the wear intensity of the leading and trailing surfaces increases by 1,36 and 1,09 times, respectively, compared to «Bora B» SM-9 oil. During the operation of friction pairs, surface hardening of the metal layers has been observed, which positively affects the tribotechnical processes in the contact.

The choice of «Bora B» VO-12 oil, as opposed to all-season VO-12 oil, for friction pairs under dynamic loading conditions is justified by the stability of the friction coefficient during startup at the level of 0,007 and low shear stresses of the lubricating layer at 6 - 8 MPa, implementation of a mixed lubrication regime at an oil temperature of 100 °C, and a decrease in specific friction work in the contact by 1,6 times, which contributes to a reduction in the wear intensity of the leading and trailing surfaces by 2,2 and 1,4 times, respectively.

The mechanism of increasing the wear resistance of 40KhN steel when lubricated with «Bora B» VO-12 oil lies in the implementation of the Rebinder plasticization effect, which is manifested in 1,4 times decrease in the microhardness of the metal surface layers, a 1,72 times reduction in friction force during indentation, localization of deformed near-surface metal layers up to 10 microns in the friction process, and formation of a homogeneous surface layer with a finely fragmented structure.

By employing multifactorial analysis, influential indicators of tribotechnical characteristics were selected, and through multiple regression analysis, a multiple linear regression equation was obtained for predicting friction pair wear considering specific friction work in the contact, lubricating, and anti-friction characteristics of lubricants. The quality of the obtained equation is confirmed by the coefficient of determination at 98 % with a confidence interval of 95 %. The significance of independent variables was assessed using the Student's *t*-test, *P*-value, and *F*-test.

The scientific novelty of the work lies in the following main points.

For the first time, a dependence of linear wear of friction pairs during rolling with sliding in the range of contact loads of 250-700 MPa on the thickness of the lubricating layer and specific friction work has been obtained, the change of which correlates with the disruption of self-organization processes of dissipative structures when the tribosystem transitions to a friction regime without lubricant. The theory of failure of anisotropic boundary layers of lubricants in conditions of rolling with sliding up to 40 % has been further developed based on the assessment of the change in the shear rate gradient, the increase of which above $8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ precludes the restoration of thixotropic properties by structural components of lubricants, leading to the manifestation of signs of seizure of contact surfaces.

For the first time, the mechanism of structural adaptation based on the principle of optimal mechanical scheme of sliding contact interaction between sliding pairs when lubricated with emulsions of lithium greases with water concentrations up to 20 % has been determined. This mechanism involves the formation of micro-relief on the contact surfaces with an increase in the relative supporting length of the profile up to 25 % under the conditions of effective demulsifying properties of lubricants.

Mechanisms for increasing the wear resistance of steel taking into account the adsorption-plasticizing effects of base oils and functional additives of lubricating materials have been identified. These mechanisms include a 1,7-fold reduction in resistance to tangential deformation of local microvolumes of surface layers of metal, formation of a homogeneous surface layer during friction with structure fragments up to 45 μm in length,

and an increase in the actual contact area by up to 7 %, which contributes to reducing the influence of dynamic factors under non-steady operating conditions.

The practical significance of the obtained results lies in the development of testing methods for emulsions of aviation lubricants for the flap actuator gearbox in AN 148 aircraft, methods for assessing the quality of batches of oils for lubricating the axial hinge bushings of helicopter screws, and a method and device for improving the wear resistance of local contacts by introducing multifunctional additives into the lubricating material. These innovations have been accepted for implementation in enterprises and institutions in Ukraine.

Key words: thickness of the lubricating layer, effective viscosity, structural adaptability, wear rate, friction coefficient, specific friction work, elastic-plastic deformation, oil oxidation degree, equilibrium roughness, microhardness, unsteady friction conditions, aviation lubricating materials, surface microrelief.

The main results of the dissertation research have been published in 34 scientific papers.

In professional publications

1. Mnatsakanov R. G., Dovbush V.O., Yakobchik O. Ye. Change of structure and composition of surface layers of contact surfaces. *Proceedings of National Aviation University*. 2002. No. 4(15), P. 63–66. DOI: 10.18372/2306-1472.15.15277 (category B).

2. Dmitrichenko M.F., Mnatsakanov R. G., Yakobchik O. Ye., Mikosianchyk O. O. Effect of oils on friction surfaces with the addition of multifunctional additives. *Avtoshliakhovyk Ukrayiny: Special issue. Bulletin of the Northern Scientific Center of TAU*. 2003. No. 6. P. 10–14 (category B).

3. Dmitrichenko M.F., Mnatsakanov R. G., Mikosianchyk O. O., Yakobchik O. Ye. Peculiarities of the lubrication process under conditions of variable contact stresses, increased angular velocities and hardening of contact surfaces. *The National Transport University Bulletin*. 2003. No. 8. P. 20–24 (category B).

4. Mnatsakanov R. G., Dovbush V.O., Yakobchik O. Ye., Mikosianchyk O. O. Lubricant operation plastic and semifluid lubrication. *Proceedings of National Aviation University*. 2003. No. 3-4 (18). P. 73–76. DOI: 10.18372/2306-1472.18.15390 (category B).

5. Mnatsakanov R. G., Malenko V. I., Mikosianchyk O. O., Yakobchyk O. Ye. Comparative rheological characteristics of mineral and synthetic oils. *Problems of friction and wear: scientific and technical digest*. 2006. Issue 45. P. 170–178 (category B).

6. Yakobchyk O. Ye., Khimko A. M., Borodiy V. M., Kralya V. O. Influence of friction modes on the wear resistance of parts under friction-sliding conditions. *Problems of friction and wear: scientific and technical digest*. 2008. Issue 50. P. 144-148. DOI: 10.18372/0370-2197.50.2998 (category B).

7. Khimko A. M., Yakobchyk O. Ye., Borodiy V. M., Zadniprovsca S. M., Kholod N. V. Features wear nodes mechanization wing aircraft operating under dynamic loads. *Proceedings of National Aviation University*. 2009. No. 3 (40). P. 33–36. DOI: 10.18372/2306-1472.40.1741 (category B).

8. Khimko A., Kralya V., Yakobchuk A., Kostuchik V., Sidorenko A. Units wearability of aircraft wing lift devices. *Problems of friction and wear: scientific and technical digest*. 2011. Issue 55. P. 112–117. DOI: 10.18372/0370-2197.55.3249 (category B).

9. Khimko M. S., Yakobchyk O. Ye., Khimko A. M., Naumenko N. O. Methods of testing of spherical plain bearings for wear-resistance. *Problems of friction and wear*. 2017. No.1 (74). P. 118-122 (category B).

10. Mikosianchyk O. O., Kudrin A. P., Mnatsakanov R. G., Yakobchyk O. Ye., Tokaruk V. V. The evaluation of thermal processes in frictional contact during rolling with sliding. *Problems of friction and wear*. 2017. No. 4 (77). P. 4–15 (category B).

11. Yakobchyk O. Ye., Mnatsakanov R. G., Mikosianchyk O. O., XIMKO A.N., Tokaruk V. V. Anti-slip properties of Aero Shell Grease 33 lubricant at using of structural steels 9XC and 30XГCA. *Problems of friction and wear*. 2018. No. 1 (78). P. 27–36. DOI:10.18372/0370-2197.1(78).12756 (category B).

12. Mikosianchyk O. A., Mnatsakanov R. G., Khimko A. N., Kichata N. N., Yakobchuk A. E. Theoretical Aspects of the Structural and Rheological State of Boundary Lubricating Layers in Friction Pairs. *Problems of Tribology*. 2018. No. 3(89). P. 47–52. DOI:10.31891/2079-1372-2018-89-3-47-52 (category B).

13. Mnatsakanov R. G., Mikosianchyk O. O., Yakobchyk O. Ye., Tokaruk V. V. Forecasting of the maximum linear wear of contact surfaces in extreme friction conditions. *Problems of friction and wear*. 2018. No. 4 (81). P. 4–12. DOI: 10.18372/0370-2197.4(81).13321 (category B).

14. Yakobchyk O. Ye. Analysis of the possibility of replacing the BHHHP -286M lubricant on the Aero Shell Grease 33 in the high lift devices of the wing of the AN-family aircraft. *Problems of friction and wear*. 2019. No. 2 (83), P. 29-36. DOI: 10.18372/0370-2197.2(83).13689 (category B).

15. Mnatsakanov R. G., Mikosianchyk O. O., Yakobchyk O. Ye., Khimko A. M. Evaluation of the lubricant parameters in the conditions of oil starvation of tribocontact. *Problems of friction and wear*. 2020. No.2 (87), P. 21–28. DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14721 (category B).

16. Mnatsakanov R. G., Mikosianchyk O. O., Yakobchyk O. Ye., Khimko A. M., Kharchenko O. V. Review of oils classifications of foreign production by physical-mechanical and operational properties. *Problems of friction and wear*. 2020. No. 3 (88). P. 52–70. DOI: 10.18372/0370-2197.3(88).14920 (category B).

17. Mikosianchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Yakobchyk O. Ye., Khimko A. M., Tokaruk V. V. Development of methods of monitoring and diagnostics of operational properties of lubricants according to tribotechnical parameters. *Problems of friction and wear*. 2021. No. 1 (90). P. 11–19. DOI: 10.18372/0370-2197.1(90).15234 (category B).

18. Mikosianchyk O., Yakobchuk O., Mnatsakanov R., Khimko A. Evaluation of Operational Properties of Aviation Oils by Tribological Parameters. *Problems of Tribology*. 2021. No. 1(99). P. 43–50. DOI: 10.31891/2079-1372-2021-99-1-43-50 (category B).

19. Ilina, T., Mikosianchyk, O., Mnatsakanov, R. and Yakobchuk O. 2021. Development of methods for evaluation of lubrication properties of hydraulic aviation oils. *Problems of Tribology*. 2021. No.3(101). P. 42–47. DOI: 10.31891/2079-1372-2021-101-3-42-47 (category B).

20. Mikosianchyk O. O., Yakobchyk O. Ye., Pedan Ye. V., Berezivskyi N. M. Influence of oxidation degree on antiwear properties aviation oils. *Problems of friction and wear*. 2023. No. 2 (99). P. 4–13. DOI: 10.18372/0370-2197.2(99).17611 (category B).

21. Yakobchuk O. Ye., Yutskevych S.S., Kyselova T.V., Yakobchuk I.O., Sydorenko K.O. Statistical analysis of the results of studying the tribotechnical characteristics of lubricants under friction. *Problems of friction and wear*. 2023. No. 4 (101). P. 84–96. DOI: 10.18372/0370-2197.4(101).18082 (category B).

In foreign specialized publications

22. Svirid M. N., Wajs E., Primak L. B., Borodii V. N., Yakobchuk A. E. Improvement of the performance parameters of precision friction couples in the magnetic field. *Powder metallurgy and metal ceramics*. 2013. Vol. 52. No. 7. P. 417–423. DOI: 10.1007/s11106-013-9542-6 (**Scopus, Quartile Q3**).

23. Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. H., Lopata L. A., Marchuk V. E., Yakobchuk O. E. Wear resistance of 30KhGSA steel under the conditions of rolling with sliding. *Materials science*. 2019. Vol. 55. No. 3. P. 402–408. DOI: 10.1007/s11003-019-00317-9 (**Scopus, Quartile Q3**).

24. 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*. 2021. Vol. 50. No. 3. P. 229–235. DOI: 10.3103/S1052618821030110 (**Scopus, Quartile Q2**).

Materials and theses of conferences:

25. Mnatsakanov R. G., Dovbush V.O., Yakobchuk O. Ye. Initial comparison of gear life under oil and grease lubrication conditions. *AVIA-2001: proceedings of the III International Conference of Science and Technology, Kyiv, 24–26 April 2001 p. Kyiv, 2001. P. 12.*

26. Yakobchuk O. Ye., Borodiy V. M., Khimko A. M. Modern methods for studying the characteristics of lubricants for heavily loaded friction pairs. *State policy of civil aviation development in the XXI century: Economic patriotism and strategic opportunities of Ukraine: proceedings of the scientific and practical conference, Kyiv, February 7-8, 2008. P. 32.*

27. Yakobchuk O. Ye., Khimko A. M., Borodiy V. M., Kralya V. O. The impact of different friction modes on the wear resistance of components under frictional-sliding

conditions. *Modern problems of mechanical engineering*: abstracts of the International scientific and technical conference, Kyiv, September 22-23, 2008, Kyiv. 2008. P. 32.

28. Mnatsakanov R. G., Yakobchuk O. Y., Khimko A. M. Analysis of the changes in the load-bearing capacity of lubricating layers of lithium greases at contact load changing. *The Eighth World Congress "AVIATION IN THE XXI-st CENTURY": Safety in Aviation And Space Technologies*: proceedings, Kyiv, October, 10–12 2018. Kyiv, 2018. P. 1.4.9–1.4.12.

29. Yakobchuk O. Y., Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Khimko A. M. Analysis of the Use of Lubricants in the Nodes of High Lift Devices in Antonov Family Aircrafts. *У AVIA-2019*, proceedings of the Fourteenth International Conference of Science and Technology, Ukraine, April 23-25, 2019; NAU: Kyiv, 2019; P. 19.25–19.29. <https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2019/schedConf/presentations>.

30. Dukhota O. I., Popov O. V., Yakobchuk O. Y. Technological aspects of reliability control of aviation tribomechanical systems. *The Ninth World Congress "AVIATION IN THE XXI-st CENTURY - Safety in aviation and space technology"*: proceedings, Kyiv, September, 22–24 2020. Kyiv, 2020. P. 1.2.36–1.2.42. <https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2020/schedConf/presentations>.

31. Yakobchuk O. Ye., Mikosianchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Khimko A. M. Methods for evaluating the tribotechnical properties of aviation oil BO-12. *AVIA-2021: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*, Kyiv, April 20-22. 2021 Kyiv, 21. C. 1.1-1.5.

32. Mikosianchyk O. O., Yakobchuk O. Ye., Mnatsakanov R. G., Khimko A. M. Evaluation of aviation oil quality. *Theory, practice and science*: abstracts of XXIII International Scientific and Practical Conference, Tokyo, 27–30 April 2021. Tokyo, 2021. P. 438–442. URL: <https://doi.org/DOI:10.46299/ISG.2021.I.XXIII>.

33. Yakobchuk O. Ye., Mikosianchyk O. O., Mnatsakanov R. G. Investigation of the Phenomenon of Lubrication Starvation in Conditions of Rolling with Sliding. *AVIA-2023: proceedings of the XVI International Conference of Science and Technology*. At Kyiv, April, 18–21, 2023. Kyiv, 2023. P. 1.66–1.69. URL: <https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2023/schedConf/presentations>.

Patents:

34. Method for restoring a friction surface in a pulsed magnetic field: Utility model patent No. 45918 Ukraine: G01N 3/56, F16C 33/14, M.M. Svirid, A.P. Kudrin, S.M. Zadniprovska, A.M. Khimko, O.Ye. Yakobchuk – u200907999; Appl. 29.07.2009; pub. 25.11.2009, Bul. No. 22. - 2 p.

ЗМІСТ

ВСТУП	27
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОЯКІСНИХ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ	35
1.1. Оцінка якості мастильних матеріалів за фізико-хімічними та триботехнічними показниками.	36
1.2. Експлуатаційні властивості пластичних мастил авіаційного призначення.	41
1.3. Аналіз використання мастильних матеріалів у вузлах авіаційної техніки.	56
1.3.1. Конструктивні елементи механізації крила літаків сімейства АН.	56
1.3.2. Аналіз використання мастильних матеріалів у вузлах вертольотів.	63
1.4. Вплив води на експлуатаційні властивості мастильних матеріалів.	69
Висновки до розділу 1.	74
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ТА ПРОГРАМА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	76
2.1. Стандарти оцінки якості мастильних матеріалів у відповідності до ГОСТ, ДСТУ, DIN, SAE, NLGI.....	76
2.2. Показники якості та фізичні характеристики досліджуваних мастильних матеріалів.	83
2.3. Експериментальні установки для дослідження триботехнічних характеристик пар тертя в умовах кочення та кочення з проковзуванням.	89
2.4. Методи оцінки триботехнічних характеристик вузла тертя, реологічних властивостей мастильного матеріалу.....	97
2.5. Методика оцінки триботехнічних властивостей емульсій мастило-вода.	101

2.6. Статистичний аналіз та інтерпретація результатів експериментальних досліджень.....	103
2.7. Емпіричні залежності при моделюванні трибологічних процесів.....	112
Висновки до розділу 2.	116
РОЗДІЛ 3. ПРОТИЗАДИРНІ ВЛАСТИВОСТІ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ МАСЛЯНОГО ГОЛОДУВАННЯ.....	118
3.1. Експериментальне дослідження режиму масляного голодування в умовах кочення в локальному контакті.	118
3.2. Експериментальне дослідження розвитку процесу масляного голодування при коченні з проковзуванням в умовах локального контакту.	130
3.3. Мاستильні, антифрикційні та протизношувальні властивості граничних плівок в критичних умовах роботи трибосистеми.....	139
Висновки до розділу 3.	146
РОЗДІЛ 4. КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТИКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ТРИБОТЕХНІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	150
4.1. Контроль якості маслосуміші СМ-9 за триботехнічними показниками. .	151
4.2. Оцінка триботехнічних показників авіаційної оливи ВО-12.	160
4.3. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив.....	176
Висновки до розділу 4.	181
РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ВОДИ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АВІАЦІЙНИХ МАСТИЛ.....	186
5.1. Оцінка антифрикційних та протизношувальних властивостей емульсій мастило-вода.	186
5.2. Багатофакторний аналіз узагальнення числових даних дослідження.....	195
5.3. Регресійний аналіз та побудова рівняння множинної лінійної регресії числових даних дослідження.	202
Висновки до розділу 5.	209

	26
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....	211
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	213
ДОДАТКИ.....	235

ВСТУП

Надійність механічних систем закладається на стадії проектування, забезпечується при виготовленні і підтверджується в період експлуатації машин та механізмів. Мастильний матеріал в значній мірі впливає на показники надійності. Сучасні вимоги до надійності трибомеханічних систем пов'язані з якісним поліпшенням мастильних матеріалів, їх складових і, в цілому, обумовлені поглибленим аналізом стану мастильного середовища і контактної поверхні металу в процесі тертя [1].

У сучасних умовах технологія виробництва мастильних матеріалів і їх компонентів інтенсивно розвивається і удосконалюється. Створюються нові мастильні матеріали на мінеральній і синтетичній основах, ведуться серйозні розробки з оптимізації компонентного складу олив і мастил, вдосконалюються їх фізичні, хімічні та експлуатаційні властивості [2].

Ефективність мастильних матеріалів визначається як базовою основою і наявністю функціональних присадок або добавок, так і конструктивними особливостями вузла тертя, матеріалом контактних поверхонь, системою змащування, умовами експлуатації вузла тертя, термінами заміни мастильних матеріалів та ін. Авіаційні оливи характеризуються широким спектром дії, спрямованої на захист вузлів та деталей при терті та зменшення зносу в процесі роботи, перешкоджання утворенню корозії на деталях, подовження терміну служби механізмів. Також важливими характеристиками олив авіаційного типу є очищення механізмів від забруднень, стабільність проти окислювання, в'язкісно-температурні показники. Використання якісних мастильних матеріалів дозволяє збільшити ефективність продуктивності та період експлуатації обладнання. Будь-яка несправність силової установки, трансмісії або гідравлічної системи повітряного судна неприпустима.

Актуальність теми.

Найважливішим завданням розвитку технічної експлуатації повітряних суден (ПС) на сучасному етапі є розробка заходів, направлених на підвищення

експлуатаційної надійності та ефективності роботи їх агрегатів. При цьому, основним напрямом досліджень є підвищення довговічності і безвідмовності вузлів тертя шляхом спрямованого поліпшення властивостей конструкційних, функціональних і композиційних матеріалів, вдосконалення їх конструкцій. Разом з цим, як показує практика експлуатації ПС, недостатня увага приділялася ефективному вибору мастильних матеріалів у забезпеченні надійності трибосистем ПС.

Проблема підвищення ефективності використання мастильних матеріалів відноситься до складних науково-технічних завдань трибології, матеріалознавства та хімотології. Як елемент складної трибосистеми, мастильні матеріали є індикатором режимів та умов експлуатації агрегатів ПС, їх технічного стану. Саме тому, в значній мірі, від якості мастильних матеріалів залежить довговічність роботи вузлів тертя в цілому. Це набуває першочергового значення для пар тертя локальних контактів, які працюють в нестационарних умовах роботи, а саме: режим пуск-зупинка, робота в умовах динамічного навантаження, при підвищених температурах, в умовах відсутності мастильного матеріалу та ін. Тому, при оцінці якості авіаційних мастильних матеріалів, особливу увагу необхідно приділяти контролю їх триботехнічних властивостей, що дозволяє в умовах експлуатації ПС підвищити зносостійкість і термін служби вузлів тертя, знизити їх кількість відмов, збільшити терміни заміни мастильних матеріалів.

Значний внесок у розвиток наукового напрямку дослідження триботехнічних властивостей мастильних матеріалів та процесів самоорганізації трибосистем внесли вчені: Бершадський Л.І., Войтов В.А., Д'ячков А.К., Диха О.В., Костецький Б.І., Матвеєвський Р.М., Мнацаканов Р.Г., Петрусевич А.І., Порохов В.С., Райко М.В., Ребіндер П.О., Barus C., Dawson D., Ding H., Higginson G.R., Kodnir D. S., Olofsson U., Ratner I. R., Tosatti E., Zhu Y. та ін.

При цьому доцільним представляється проведення теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення процесів тертя та зношування, структурної пристосованості пар тертя локальних контактів залежно від складу та властивостей авіаційних мастильних матеріалів. Це так само потребує обґрунтованого вибору головних показників оцінки якості авіаційних мастильних

матеріалів, розробки методик комплексного оцінювання їх триботехнічних властивостей, управління процесами поверхневої активації контактних поверхонь тертя шляхом застосування мастильного матеріалу з поверхнево-активними речовинами, протизношувальними та антизадирними присадками, антифрикційними добавками.

Отже розробка методик та засобів оцінки триботехнічних властивостей сучасних авіаційних мастильних матеріалів є актуальним науково-прикладним завданням, вирішення якого дозволить підвищити зносостійкість вузлів тертя, які працюють в нестаціонарних умовах роботи.

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

Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Національного авіаційного університету. Автор був співвиконавцем держбюджетних тем. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №70 / 07.02.07 «Розробка технологій формування поверхневих шарів деталей авіаційної техніки та дослідження їх триботехнічних властивостей». Автором проведено дослідження зносостійкості сталі при змащуванні мастилами.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи № 718-ДБ-11 «Науково-методичні основи підвищення зносостійкості і ресурсу деталей, що працюють в умовах контактної взаємодії». Автором проведено дослідження протизадирних властивостей мастильних матеріалів при розвитку процесів масляного голодування.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідних робіт 88/07.02.02 «Підвищення працездатності конструкцій з авіаційних матеріалів шляхом поверхневого зміцнення та відновлення деталей трибосистем» та 110/07.02.02. «Технологічні методи підвищення працездатності елементів авіаційних трибомеханічних систем». Автором розроблено методику оцінки трибосистем за кінетикою зміни мастильних, антифрикційних та протизношувальних властивостей авіаційних мастильних матеріалів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення зносостійкості пар тертя локальних контактів шляхом застосування авіаційних мастильних матеріалів з

заданими триботехнічними властивостями, встановленими на основі комплексної оцінки показників їх якості.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні завдання:

– провести аналіз та обґрунтувати вибір основних показників оцінки якості авіаційних мастильних матеріалів відповідно до міжнародних стандартів, специфікацій та допусків виробників авіаційної техніки;

– дослідити процеси ступеневого руйнування граничних шарів мастильних матеріалів при переході трибосистеми до умов тертя без мастильного матеріалу;

– визначити закономірності зношування пар тертя в нестационарних умовах роботи залежно від реологічних, антифрикційних та мастильних властивостей мастил та олив авіаційного призначення;

– розробити методику оцінки триботехнічних властивостей емульсій мастиловода;

– визначити механізм структурної пристосованості поверхневих шарів локальних контактів пар тертя при утворенні рівноважної шорсткості поверхонь та формуванні оптимального мікрорельєфу поверхневих шарів металу;

– дослідити вплив адсорбційно-пластифікуючих ефектів базових олив та функціональних присадок мастильних матеріалів на зносостійкість матеріалів контактних поверхонь;

– провести оцінку антиокислювальних властивостей авіаційних олив за параметрами зміни кислотного числа, кінематичної в'язкості та швидкості окислення.

Об'єкт дослідження – процеси тертя та зношування, які відбуваються в парах тертя локальних контактів при змащуванні авіаційними мастильними матеріалами.

Предмет дослідження – закономірності впливу триботехнічних властивостей авіаційних мастильних матеріалів з різними базовими основами та функціональними присадками на процеси структурної пристосованості та самоорганізації зносостійких структур пар тертя локальних контактів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження, які базуються на концепції трибології та методології фізичних досліджень, аргументовані, охоплюють широкий

спектр наукових підходів з коректним застосуванням основних положень теорії тертя, зношування та мащення, а також оптичних, електрометричних та триботехнічних методів дослідження. Експериментальні дослідження проводились з використанням як стандартних, так і спеціальних методик для оцінювання та вимірювання таких параметрів, як товщина мастильних шарів, антифрикційні та протизношувальні властивості мастильних матеріалів, питомої роботи тертя в період пуску. Використання сучасних експериментальних методів дослідження та обладнання забезпечило задовільну точність отриманих результатів і їх узгодженість з теоретичними прогнозами. Достовірність отриманих в роботі наукових положень, висновків і рекомендацій, підтверджуються великою кількістю проведених експериментальних досліджень, їх відтворюваністю, співставністю з результатами інших авторів, використанням обладнання з достатньою точністю вимірювань і результатами математичної обробки з використанням сертифікованих програм.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше отримана залежність лінійного зносу пар тертя при коченні з проковзуванням в діапазоні контактного навантаження 250-700 МПа від товщини мастильного шару та питомої роботи тертя, зміна яких корелює з порушенням процесів самоорганізації дисипативних структур за умови переходу трибосистеми до режиму тертя без мастильного матеріалу.

2. Набула подальшого розвитку теорія руйнування анізотропних граничних шарів мастил в умовах кочення з проковзуванням до 40 % на основі оцінки зміни градієнта швидкості зсуву, зростання якого понад $8 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$ унеможлиблює відновлення тиксотропних властивостей структурними компонентами мастил, що призводить до прояву ознак заїдання контактних поверхонь.

3. Вперше визначено механізм структурної пристосованості за принципом оптимальної механічної схеми контактної взаємодії пар ковзання при змащуванні емульсіями літієвих мастил з водою в концентрації до 20 %, який полягає в формуванні мікрорельєфу контактних поверхонь зі збільшенням відносної опорної довжини профілю до 25 % за умов ефективних деемульгуючих властивостей мастил.

4. Визначені механізми підвищення зносостійкості сталі з урахуванням адсорбційно-пластифікуючих ефектів базових олив та функціональних присадок мастильних матеріалів, які полягають в зниженні в 1,7 разів опору тангенціальному деформуванню локальних мікроб'ємів поверхневих шарів металу, формуванні однорідного поверхневого шару при терті з фрагментами структури довжиною до 45 мкм, збільшенні до 7 % фактичної площі контакту, що сприяє зменшенню впливу динамічного фактору при несталих умовах роботи.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено методику випробування мастильних матеріалів, для редуктора підйомника закрилків типу 148.00.5737.000.000 в літаках АН 148, по визначенню триботехнічних властивостей мастильних матеріалів з різним вмістом (відсотковим) води (акт впровадження результатів науково-дослідної роботи на ДП «АНТОНОВ» від 24.09.2015 року).

2. Впроваджено в навчальний процес в дисциплінах «Триботехніка та основи надійності машин» та «Новітні технологічні процеси у виробництві повітряних суден та їх обладнанні» методики вибору мастильних матеріалів за експлуатаційним призначенням та визначення протизношувальних характеристик мастильних матеріалів в нестационарних умовах при коченні з проковзуванням (акт про впровадження у навчальний процес Національного авіаційного університету від 23.02.2024 року).

3. Розроблено методику оцінки якості товарних партій мастильних матеріалів для змащування осьових шарнірів втулок гвинтів вертольотів в умовах всесезонної експлуатації за ступенем окислення олив та їх триботехнічними показниками (акт реалізації результатів наукових досліджень в Кременчуцькому льотному коледжі Харківського національного університету внутрішніх справ з безпеки польотів від 18.01.2024 року).

4. Розроблено методику контролю та діагностики експлуатаційних властивостей оливи ВО-12 на основі оцінки їх мастильних, антифрикційних, протизношувальних та реологічних характеристик (акт реалізації результатів наукових досліджень в ТОВ «Бора Б» від 19.12.2023 року)

5. Розроблено та впроваджено в практику експериментальних випробувань спосіб та пристрій для підвищення зносостійкості локальних контактів способом введення поліфункціональних присадок до мастильного матеріалу під дією магнітного поля. (пат. № 45918, опубл. 25.11.2009, бюл. № 22).

Розроблені методики і способи використовуються при проведенні наукових досліджень спільно з ДП «АНТОНОВ» та ТОВ «Бора Б» (м. Київ), Кременчуцьким льотним коледжем Харківського національного університету внутрішніх справ з безпеки польотів під час оцінки якості мастильних матеріалів (Полтавська обл.) та в навчальному процесі в Національному авіаційному університеті (м. Київ).

Особистий внесок здобувача.

Наукові положення та практичні результати, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Без співавторів опубліковано наукову працю [14]. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: проведено аналіз структурного стану тонких поверхневих шарів металу під час граничного мащення модифікованими мастильними матеріалами – [1]; визначено вплив багатфункціональних присадок на властивості мастильних матеріалів і поверхні тертя при додаванні їх до базових олів – [2]; проведено оцінку триботехнічних параметрів мастильних матеріалів в залежності від швидкості кочення, параметрів і кількості циклів навантаження пари тертя – [3, 4, 5]; встановлені чинники, що впливають на ефективність мащення напіврідкого мастила в умовах тертя-ковзання – [6]; проведення досліджень з визначення триботехнічних характеристик авіаційних сплавів та газотермічних покриттів – [7, 8, 22]; розроблена кінематична схема установки для випробування підшипників в умовах реверсивного тертя-ковзання – [9]; проаналізовано умови зміни тепловиділення в локальних контактах при різних значеннях проковзування в умовах кочення – [10]; встановлені закономірності зміни протизадірних властивостей і зміни товщини мастильного шару мастил на основі літієвих мил в локальному контакті – [11, 13, 24]; встановлено зв'язок між реологічними характеристиками мастильного матеріалу і механізмом формування граничного шару мастильного матеріалу в локальному контакті – [12, 15]; виконано аналіз фізико-механічних та

експлуатаційних властивостей мастил закордонного виробництва – [16]; проведено оцінку характеристик авіаційних олив на основі методики контролю та діагностики експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів – [17, 18, 20]; проаналізовано результати дослідження реологічних характеристик авіаційних гідравлічних олив різних виробників – [19]; запропоновано рівняння множинної лінійної регресії для визначення зносу пари тертя та проведено регресійний аналіз параметрів рівняння – [21]; встановлено залежність трибологічних характеристик пари тертя від часу напрацювання контактних поверхонь до появи перших ознак заїдання в умовах мащення мастилами на літєвій основі – [23].

Апробація результатів дисертації. Основні положення, висновки та рекомендації, отримані в дисертації, були представлені та обговорені на міжнародних та національних наукових, науково-практичних та науково-технічних конференціях та конгресах, а саме: III, XIV, XV, XVI Міжнародних науково-технічних конференціях «Авіа-2001», «Авіа-2019», «Авіа-2021», «Авіа-2023» (Київ, 2001, 2019, 2021, 2023), науково-практичній конференції «Державна політика розвитку цивільної авіації XXI століття: Економічний патріотизм і стратегічні можливості України», (Київ, 2008), Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми машинознавства» (Київ, 2008), VIII, IX, Всесвітньому конгресі «Авіація в XXI столітті» (Київ, 2018, 2020), The XXIII International Science Conference «Theory, practice and science» (Токуо, 2021).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 34 наукові праці, у тому числі: 21 стаття у фахових виданнях переліку МОН України; 3 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 9 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях; 1 патент.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків та додатків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 248 сторінок із них 175 сторінок основного тексту. Дисертація містить 34 таблиці (із них тих, що займають повну сторінку – 3), 83 рисунки (із них тих, що займають повну сторінку – 4), 4 додатки. Список використаних джерел налічує 207 найменувань.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОЯКІСНИХ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Сучасні вимоги до надійності і довговічності трибомеханічних систем пов'язані з якісним поліпшенням мастильних матеріалів, їх складових і обумовлено поглибленим аналізом стану мастильного середовища та контактних поверхонь металу і процесі тертя [3].

Експлуатація сучасних машин і механізмів, а відповідно і вузлів тертя пов'язана з несприятливими явищами зношування робочих поверхонь деталей, що труться. Режиму граничного тертя, що виникає при пуску-зупинки в екстремальних режимах роботи агрегату, властиві високі значення коефіцієнту тертя і пошкодження поверхонь в зонах дотику пар тертя. При цьому відбувається накопичення пошкоджень, зношування та зміни геометрії поверхонь тертя, що веде до погіршення експлуатаційних властивостей виробів і виникнення функціональної відмови [4, 5].

Роботоздатність авіаційної техніки і ефективність функціонування машин та механізмів в машинобудівній галузі залежать від їх забезпеченості високоефективними мастильними матеріалами (оливами, мастилами, мастильно-охолоджувальними рідинами). Виготовлення високотехнологічних та високоефективних авіаційних, промислових та автомобільних мастильних матеріалів є однією з першочергових задач для підвищення надійності машин і механізмів [3].

Задача підвищення довговічності вузлів тертя вкрай ускладнюється тому, що тенденція розвитку науки, техніки і технології виробництва невблаганно приведе до жорсткості й ускладнення режиму роботи машин, а значить, і вузлів тертя по навантаженнях, швидкостям, температурам, процесам дисипації енергії, вібрації, умовам впливу різних газових і рідких середовищ, впливу радіоактивних випромінювань і т.д. Крім того, конструктори прагнуть до зменшення габаритів і питомих масових характеристик вузлів тертя, що ще більше ускладнить задачу.

1.1. Оцінка якості мастильних матеріалів за фізико-хімічними та триботехнічними показниками.

Основним призначенням сучасних мастильних матеріалів є зниження тертя і зношування в трибоспряженнях машин, механізмів, приладів, застосовуваних у різних областях техніки [6]. Надійність пар тертя в багатьох випадках визначається якістю мастильного матеріалу, тому його властивості повинні враховуватися нарівні з властивостями матеріалів, що використовуються для виготовлення деталей при розробці вузла тертя. На практиці широко застосовуються рідкі, пластичні і тверді мастильні матеріали.

Ефективність мастильного матеріалу визначається. По-перше, конструктивними особливостями вузла тертя (типом, розміром, характером руху поверхонь тертя, тощо) по-друге, системою змащування і видом матеріалу контактних поверхонь, з яким він контактує в процесі роботи, а також умовами експлуатації вузла тертя і термінами заміни мастильного матеріалу.

Мастильний матеріал призначено для запобігання прямого контакту поверхонь у відносному взаємному русі і, таким чином, зменшення сили тертя між цими поверхнями і зносу. Мастильний матеріал також необхідний для видалення забруднень з поверхонь тертя і захисту металевих поверхонь від корозії. В особливих випадках мастильний матеріал повинен діяти як електричний ізолятор, діяти як середовище для передачі сили і діяти як амортизатор [7]. Сучасні мастильні матеріали – найчастіше продукти нафтохімічної промисловості – класифікуються за певними критеріями: за фізичним станом вони можуть бути поділені на рідкі, пластичні, газоподібні і тверді мастильні матеріали; за хімічним складом використовуються кілька істотно різних хімічних типів рідких мастил. Вони можуть бути в цілому класифіковані на вуглеводні, включаючи ті, які отримані з сирової нафти (поширений тип) і синтетичних вуглеводнів (поліолефіни або алкілароматичні з'єднання) і неуглеводні мастильні матеріали.

За походженням або вихідною сировиною розрізняють наступні мастильні матеріали:

- мінеральні, або нафтові, є основною групою мастильних матеріалів, що випускаються (більше 90 %). Їх отримують при відповідній переробці нафти. За способом одержання такі мастильні матеріали поділяють на дистилятні, залишкові, компаундовані або змішані;

- рослинні або тваринні, мають органічне походження. Такі мастильні матеріали одержують шляхом переробки зерен окремих рослин. Тваринні мастильні матеріали виробляють із тваринних жирів. Такі матеріали порівняно з нафтовими мають більш високі мастильні властивості, але більш низьку термічну стійкість. Такі властивості передбачають утворення сумішей органічних і нафтових мастильних матеріалів.

- синтетичні мастильні матеріали одержують із різної вихідної сировини багатьма методами (каталітична полімеризація рідких або газоподібних вуглеводнів нафтової або не нафтової сировини; синтез кремнійорганічних з'єднань – полісиліконів). Дані мастильні матеріали мають всі необхідні властивості, але висока вартість при виробництві веде до використання таких мастильних матеріалів у відповідальних вузлах тертя.

За призначенням мастильні матеріали поділяються на моторні, трансмісійні, індустріальні, турбінні, електроізоляційні, консерваційні, компресорні та ін. [8].

Напіврідкі і пластичні мастильні матеріали складаються з мила та оливи (може бути нафтова олива або навіть синтетична олива, і воно може містити будь-яку з добавок для особливих вимог) [9]. Для підвищення термостійкості мастила в них додаються неорганічні тверді загусники (такі як подрібнені глина, бентоніт, колоїдний кремнезем, сажа і т. д.). За призначенням пластичні мастила поділяють на: антифрикційні, ущільнюючі, консерваційні і мастильні матеріали спеціального призначення (канатні, фрикційні та ін.) [10]. Мастила на нафтової основі проявляють ефективніші низькотемпературні властивості, ніж мастила на парафіновій основі, що стає очевидним при прокачуванні мастил, особливо при температурах від - 10 до - 30 °С [11, 12].

Мастильні матеріали виконують безліч функцій в авіаційній техніці та машинобудуванні [13]. По-перше, вони зменшують тертя та знос між контактними поверхнями, не тільки знижуючи споживання енергії, але й продовжуючи термін

служби вузлів та агрегатів. По-друге, мастильні матеріали сприяють охолодженню та видаленню частинок зносу, підтримуючи роботу пар тертя в оптимальних умовах, знижуючи ризик їх збоїв.

Вибір відповідного мастильного матеріалу повинен ґрунтуватися на кількох важливих факторах: умови експлуатації (вибір температури, тиску, вологості та інших умов експлуатації та параметрів робочого середовища), тип обладнання (наприклад, для підшипників, шестерень, ланцюгів і т.д. потрібні мастильні матеріали з різними властивостями), робоче навантаження (залежно від максимального контактного тиску необхідна певна в'язкість і несуча здатність мастильного матеріалу), інтервали заміни мастильного матеріалу (окислення, спрацьовування присадок, умови експлуатації техніки вимагають вибір мастильного матеріалу з відповідним терміном служби) [14].

Традиційно використовувані вуглеводневі мастильні матеріали на нафтовій основі окислюються і втрачають свої мастильні та захисні властивості при екстремальних температурах, тиску та хімічному впливі, що потребує більш частого обслуговування машини та призводить до скорочення терміну служби деталей. Традиційні синтетичні мастильні матеріали можуть забезпечити лише трохи кращі результати. Синтетичні мастильні матеріали характеризуються високими показниками щодо зниження зносу шестерень, терміну служби ущільнень, окислення компонентів матеріалу та терміну служби, а також забезпечують переваги в галузі сталого розвитку, наприклад, допомагаючи підвищити енергоефективність, що знижує витрату палива та викиди CO₂ [15]. Присадки до мастильних матеріалів, такі як антиоксиданти, протизношувальні присадки та протизадирні присадки (EP), миючо-диспергуючі присадки та ін., допомагають знизити витрати на технічне обслуговування авіаційної техніки, машин та механізмів, виробничого обладнання, зменшити проблеми коксування та забезпечити ефективну роботу високопродуктивних технічних систем [16, 17].

Високе тертя та серйозне пошкодження поверхні, що спричинено високим контактним тиском та температурою спалаху, можна зменшити шляхом застосування присадок, що знижують тертя (FR) та протизношувальних (AW). Ці традиційні

присадки є сполуками, що містять сірку, хлор і фосфор, хімічно реагують з металевими поверхнями, утворюючи шари сульфідів, хлоридів або фосфідів з низьким опором зсуву і тим самим запобігаючи сильному зносу та заїданню [18].

Протизношувальні присадки є одним із важливих класів, який використовується для захисту металевих поверхонь ковзання та кочення. Однією з найпоширеніших протизношувальних присадок є діалкілдітіофосфат цинку (ZDDP). Він виконує функцію захисту від зношування, вступаючи в хімічну реакцію зі сталевими поверхнями, утворюючи покриття, які зменшують зношування металу. Під час оцінки моторних оливо з вмістом 0,05 і 0,1 мас.% фосфору в ZDDP встановлено зниження тертя та зношування в експериментах за рахунок утворення на поверхнях протизношувальних плівок, які містили велику кількість карбонату кальцію, фосфату кальцію та сульфідів (експерименти проводились з товарною оливою) [19]. При випробуваннях на оливах, які були в експлуатації певний час, виявили плівки без сульфідів, з меншою кількістю карбонату, а склад фосфату змінився на фосфат цинку/заліза.

Робота [20] містить результати того, як полярність базової оливи впливає на швидкість росту та товщину протизношувальних шарів ZDDP. Полярність молекул визначає спосіб їх наближення та приєднання до поверхні, впливаючи на остаточну товщину захисного шару, а також на його структуру. Більш товстий захисний шар утворюється, коли присадка змішується з неполярною оливою, коли ж присадка розчинена в полярній базовій оливі, спорідненість полярних компонентів оливи до поверхні сталі перешкоджає адсорбції присадки.

Дослідження трибологічних властивостей присадок на основі складних ефірів для різних типів мідних сплавів встановили взаємозв'язок трибологічних показників контакту з хімічним складом мастильного матеріалу і з типом сплаву [21].

Встановлено ефективне використання дітіокарбаматів (тіурамів) та їх метал-хелатів в якості присадок, що підвищують протизношувальні та антифрикційні властивості, до різних оливо: ефективні трибологічні характеристики мастильних композицій (на основі оливи I-40) на установці тертя при навантаженні в 12 і 16 МПа залежать від природи металу та міцності метал-хелатного з'єднання MS4 [22, 23].

В роботі [24] проведена оцінка протизношувальних властивостей присадок по 0,8 мас. % в синтетичній базовій оливі поліальфа-олефін PAO-4 (в'язкість 4 мм²/с при 100 °С) (рис. 1.1):

– діалкілдитіофосфат цинку (ZDDP, торгова назва RF2203), чистота > 98,0 %, виробництва Xinxiang Richful Lube Additive Co., Ltd., Xinxiang, Китай;

– діалкілдитіофосфатний ефір (Irgalube 353), чистота > 93,0 %, виробництва BASF Corporation (Людвігсхафен, Німеччина);

– тритолілфосфат (TCP), чистота > 98,0 %, виробництва Zibo Huihua Petroleum Additive Co., Ltd. (Zibo, Китай);

– амінофосфат (протонна іонна рідина, торгова назва AW316), чистота > 98,0 %, виробництва Qingdao Lubemater Lubrication Materials Technology Co., Ltd. (Циндао, Китай).

– апротонна іонна рідина тригексилтетрадецилфосфонію біс (2,4,4-триметилпентил) фосфінат ([P8888][DENP]), синтезована в лабораторії [25].

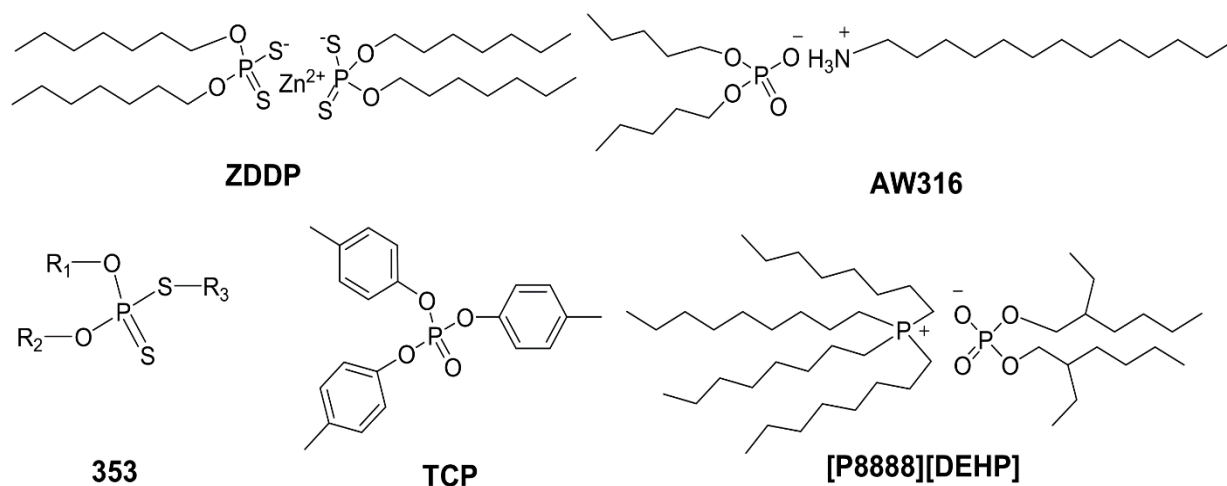


Рис. 1.1. Схематичні хімічні структури протизношувальних присадок [24].

Встановлено [24, 26], що протонна іонна рідина (амінофосфат, AW316) має найкращу протизношувальну добавку для пари ковзання сталь–мідь, яка забезпечує найнижчий середній коефіцієнт тертя (0,083) і найменший об'єм зношування (6,15 × 10⁻³ мм³). Ефективні трибологічні характеристики AW316 можна пояснити швидким утворенням рівномірної граничної мастильної плівки товщиною 10 – 15 нм, яка складається з оксидів, фосфатів і оксиду міді.

Загалом, ретельний відбір присадок є важливим для пар тертя, оскільки на трибологічні властивості сильно впливає тип і хімічний склад присадок [27]. Дослідження трибологічних характеристик базової основи, присадок або готових товарних мастильних матеріалів може надати рекомендації щодо вибору відповідних протизношувальних присадок при розробці мастильних матеріалів для пар тертя певного експлуатаційного призначення.

1.2. Експлуатаційні властивості пластичних мастил авіаційного призначення.

Основними призначеннями авіаційних мастил, крім зменшення тертя та зношування, є захист деталей та агрегатів авіаційної техніки від корозії за несприятливих погодних умов і забезпечення роботоздатності техніки за екстремальних температур. До основних переваг авіаційних мастил можна віднести: мастила менш ймовірно, ніж оливи, витікають із агрегату та рідше стікають з поверхні, яку вони змащують, під дією сили тяжіння або відцентрових сил; на корпусі літака, мастила можуть забезпечувати ефективну герметичність від вологи та твердих забруднень; мастила часто можуть діяти як ефективні та економічні мастильні матеріали, особливо в механізмах, до яких важко дістатися або які потребують нечастого змащування; збереження роботоздатності в широкому діапазоні робочих температур.

Проаналізуємо склад та експлуатаційні властивості сучасних авіаційних пластичних мастил [28].

Мастило NYCO GREASE GN 06 виготовляється на основі мінеральної оливи (кінематична в'язкість 5 сСт при 100 °C), яка загущена літієвим милом, містить графіт. Діапазон робочих температур -40...+121 °C. До основних експлуатаційних характеристик мастила слід віднести ефективні мастильні, протизношувальні, антикорозійні та антиокислювальні властивості [29]. Мастило рекомендовано для стартерів двигунів внутрішнього згорання, а також підшипників ковзання.

Мастило NYCO GREASE GN 17 виготовляється на основі синтетичної діестерної оливи, яка загущена літієвим милом. Твердим наповнювачем в мастил є

5 % дисульфиду молібдену, до розчинних присадок мастила слід віднести антикорозійні, антиокислювальні та протизношувальні. Діапазон робочих температур $-73\dots+121$ °C. Дане мастило застосовують в якості багатоцільового для планера (приводи, двері, закрилки, шасі,...), також мастило використовується для пазів, шпонок, амортизуючих підшипників, антифрикційних підшипників і роликів, для пар ковзання [30].

Мастило NYCO GREASE GN 10 – це загущена літієвим милом синтетична діестерна олива, яка містить присадки: антикорозійні, антиокислювальні та протизношувальні. Діапазон робочих температур $-73\dots+121$ °C. Мастило застосовується як багатоцільове для планера (приводи, двері, закрилки, рейки, шасі) цивільних та військових повітряних суден, рекомендовано для дугоподібних, голчастих і роликівих підшипників, редукторів і поверхонь тертя малопотужного обладнання, також для антикорозійного захисту [30]. Можлива заміна даного мастила на NycO Grease GN 148.

Мастило NYCO GREASE GN 25013 відноситься до синтетичних мастил, виготовляється згущенням політетрафторетиленом високоякісної силіконової оливи з додаванням антикорозійної і антиокислювальної присадок. Діапазон робочих температур $-73\dots+232$ °C. До переваг в експлуатації слід віднести повну сумісність мастила з усіма типами еластомерів, крім силіконових гум [30]. Мастило рекомендовано в якості багатоцільового мастила для планера повітряних суден (закрилки, шасі, двері та ін.), використовується для гвинтових приводів літальних апаратів, для кулькових і роликівих підшипників з особливо низьким крутним моментом при низькій температурі. Мастило також проявляє високі антизадирні властивості, часто використовується при збиранні/демонтажу болтів і гайок коліс, в якості засобу тривалого захисту в умовах впливу високих температур.

Компаундуванням синтетичної бази на основі силікону з літієвим милом одержують мастило NYCO GREASE GN 4343, діапазон робочих температур якого $-65\dots+175$ °C [30]. Мастило призначене для використання на гумових втулках шпангоутів і металевих частинах пневматичних систем [29].

Технологією загущування бентонітовими глинами синтетичної вуглеводневої оливи (кінематична в'язкість 7 сСт при 100 °С) з додаванням антикорозійної, антиокислювальної та протизношувальної/протизадирної присадок одержують мастило NYCO GREASE GN 22. Мастило роботоздатне в діапазоні температур -65...+177 °С [30]. Мастило застосовується як багатоцільовий мастильний матеріал для планера (двері, закрилки, шасі) більшості цивільних та військових повітряних суден, рекомендовано для коробок передач і редукторів, підшипників ковзання та антифрикційних підшипників [29].

Мастило NYCO GREASE GN 144, яке виготовляється загущенням літєвим милом суміші синтетичного поліальфаолефіну та естерової оливи з додаванням антикорозійної, антиокислювальної та протизношувальної присадок [29], роботоздатне в діапазоні температур -60...+120 °С. На повітряних судах серії Airbus дане мастило використовується для змащування механізму складання закрилків і передкрилків, на літаку Bombardier Q400 – для приводу тримера руля висоти.

Компанія NYCO розробила уніфіковане мастило NYCO GREASE GN 148, яке може використовуватися в максимальній кількості вузлів і агрегатів. Дане мастило одержують компаундуванням суміші синтетичних діефірних олив, синтетичної вуглеводневої базової основи, складного літєвого мила, антикорозійної, антиокислювальної, протизношувальної присадок та спеціальної протизношувальної добавки в умовах дії надвисокого тиску. Мастило рекомендовано для робочих температур в діапазоні -73...+135 °С [29]. Високоякісний склад дисперсної фази та дисперсійного середовища мастила, наявність присадок та добавки надають переваги NYCO GREASE GN 148, в порівнянні з мастилами попередніх поколінь (за специфікацією MIL-PRF-23827 Тип I та II, код НАТО G-382, AIMS-09-06-001, MIL-G-25537 та ін.). Переваги даного типу мастила проявляються в його експлуатаційних властивостях: висока несуча здатність при екстремальних навантаженнях; ефективне змащування підшипників в умовах вібрації; ефективний захист від зносу, іржі та корозії, навіть в солоній воді; підвищена стійкість до вимивання водою, рідинами запобігання обмерзанню і іншими рідинами; тривалий термін служби [30]. Мастило NYCO GREASE GN 148 рекомендовано в якості багатоцільового авіаційного

мастила: для змащування елементів конструкції планера (двері, закрилки, рейки, шасі, підшипники та ін.) для цивільних і військових повітряних суден; для підшипників, що працюють в режимі коливального руху; для підшипників високої і надвисокої швидкості обертання; для важконавантажених систем.

Всі зазначені мастила компанії NYCO за класифікацією по консистенції NLGI відносяться до 2 категорії, окрім мастила NYCO GREASE GN 144, яке відноситься до категорії 1,5.

До авіаційних мастил транснаціональної корпорації Royal Dutch Shell (торгова марка «AeroShell», Нідерланди–Великобританія) можна віднести наступні марки.

Технологією загущення мікрогелем синтетичної базової естерної оливи одержують мастило AeroShell Grease 7 [30, 31, 32]. Діапазон робочих температур $-73...+149$ °C. До ефективних експлуатаційних характеристик мастила слід віднести високу несучу здатність в широкому діапазоні температур, антикорозійні властивості та водостійкість. AeroShell Grease 7 використовується як багатоцільове мастило, виробники пасажирських і транспортних повітряних суден рекомендують його для загального призначення: мастило відповідає практично всім вимогам щодо мастил для повітряних суден з газотурбінними і поршневіми двигунами (наявність синтетичних естерів в мастилі спричинює його несумісність з деякими ущільнювальними матеріалами). AeroShell Grease 7 рекомендовано для приводів гвинтових механізмів, високонавантажених зубчастих передач, для інструменту та авіаційних конструкцій. Дане мастило відповідає специфікації MIL-PRF-23827C тип II, його не рекомендовано змішувати з мастилами за специфікацією MIL-PRF-23827C тип I (мастилами на мильній основі).

Змішуванням мікрогелем синтетичної вуглеводневої базової оливи з додаванням поліфункціонального пакету присадок (антиокислювальна, антикорозійна, протизношувальна присадки, присадка для підвищення несучої здатності) одержують мастило AeroShell Grease 22, діапазон робочих температур якого $-65...+204$ °C. Дане мастило рекомендовано як багатоцільове мастило для важких умов експлуатації: для високошвидкісних підшипників, що працюють у важконавантажених умовах та в широкому інтервалі температур і потребують

мастила з високою несучою здатністю і водостійкістю (підшипники систем управління, шасі, приводів, агрегатів двигуна, гвинтових домкратів, сервомеханізмів і електромоторів, підшипники роторів вертольотів, шарнірних болтів, інструментів та ін.) [33, 34].

В лінійці мастил AeroShell в якості універсального мастила для планера, вузлів та агрегатів повітряних суден рекомендовано мастило AeroShell Grease 33, що дозволяє експлуатантам уникнути ризику неправильного застосування декількох мастил, залежно від експлуатаційного призначення. AeroShell Grease 33 виготовляється на основі суміші синтетичної вуглеводневої оливи і естерів, яка загущується літієвим комплексом. Мастило містить інгібітори корозії та окислення, присадки, які підвищують його несучу здатність [30, 31]. Діапазон робочих температур $-73\dots+121$ °C. До ефективних експлуатаційних властивостей мастила можна віднести високі протизношувальні та антикорозійні властивості, підвищену стійкість до вимивання водою, рідинами запобігання обмерзанню і іншими рідинами, низька спрацьовуваність присадок, що забезпечує тривалий термін служби [35, 36, 37, 38]. AeroShell Grease 33 можна використовувати в якості багатоцільового мастила за умов, коли вказується специфікація MIL-PRF-23827C для повітряних суден, що випускаються McDonnell Douglas, Airbus, BAe Regional Aircraft, Canadair, Lockheed, Embraer, Fokker, Gulfstream і Антонов [39, 40] (за виключенням підшипників коліс з температурою експлуатації вище 121 °C та пар тертя ковзання, де необхідно застосовувати дисульфід молібдену).

Проаналізовані мастила AeroShell за класифікацією по консистенції NLGI відносяться до 2 категорії.

Розглянемо типи загусників для виготовлення мастил, які використовуються компанією «Shell». Обмеження мильних загусників, такі як низька температура плавлення і розчинність у воді, призвели до розробки альтернативних загусників. Ці альтернативи включають загущені мастила з мильним комплексом і немильні мастила зі значно вищою температурою плавлення. У пошуках загусників, не пов'язаних з обмеженнями простих мильних варіантів, компанія «Shell» розпочала пошуки,

результатом яких стала низка запатентованих технологій, зокрема, «Microgel®» і літій-комплексні системи.

У мастилах на основі Microgel® використовується неорганічний загущувач на основі гекторитової глини, який має низку переваг над традиційними загущувачами мильного типу. Мастила AeroShell, розроблені на основі Microgel®, характеризуються наступними фізичними властивостями [41]:

1. Висока температура плавлення, що забезпечує роботоздатність мастил в широкому діапазоні температур.
2. Дуже незначна зміна консистенції в широкому діапазоні температур.
3. Надзвичайно хороша несуча здатність без необхідності використання протизадирних присадок.
4. Відмінна водонепроникність завдяки використанню міцних гідроізоляційних добавок, розроблених компанією Shell.
5. Низьке олиновідділення завдяки високій ефективності гелеутворення.

Використання різних типів загущувачів в лінійці AeroShell наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Типи Загущувачів в мастилах AeroShell за специфікацією BMS 3-33

AeroShell Grade	Загущувач		
	Microgel® Гіалуронова кислота.	Літійовий комплекс	Кальцієве мило
AeroShell Grease 5	✓		
AeroShell Grease 6	✓		
AeroShell Grease 7	✓		
AeroShell Grease 14			✓
AeroShell Grease 22	✓		
AeroShell Grease 33		✓	
AeroShell Grease 58		✓	
AeroShell Grease 64		✓	

Загусник відіграє вирішальну роль у визначенні консистенції мастила, впливаючи на його м'якість або жорсткість. Хоча загусник безпосередньо не забезпечує мащення (це властивість оливи), він функціонує як структура, що утримує оливу в решітчастій матриці, схожій на губку. Коли на мастило чиниться тиск або

напруження, ця решітчаста структура вивільняє оливу, забезпечуючи мащення механізму. Як тільки напруження зникає, загусник і олива повертаються до напівтвердого стану, зберігаючи консистенцію мастила. Така поведінка дозволяє мастилу забезпечувати мащення під час роботи і повертатися до своєї стабільної форми, коли воно не перебуває під навантаженням.

З розглянутої лінійки мастил компанії Shell, лише мастила AeroShell Grease 33/58/64, що виготовляються на літєвих загусниках, мають маслянисту текстуру, високу температуру експлуатації та хорошу водостійкість.

AeroShell Grease 33 містить синтетичну оливу і не повинно використовуватися з несумісними матеріалами ущільнень. В авіації компанія «Shell» зазвичай утримуються від надання конкретних рекомендацій щодо сумісності з різними матеріалами. Ступінь сумісності залежить від різних факторів, включаючи умови експлуатації, вимоги до експлуатаційних характеристик і точний склад матеріалів, що використовуються. У багатьох випадках виробники обладнання беруть на себе відповідальність за проведення власних випробувань на сумісність або делегують це завдання своїм постачальникам гумових виробів. Постачальники гумових виробів часто надають таблиці сумісності своїх продуктів з низкою інших матеріалів.

Ще одне питання, на яке слід звернути увагу, це те, що при експлуатації авіаційної техніки можуть виникати випадки, коли необхідно виконати додавання іншого мастила до вже використовуваного. NLGI визначає несумісність між двома мастилами як ситуацію, коли суміш продуктів проявляє фізичні властивості або експлуатаційні характеристики, значно гірші, ніж у будь-якого з мастил до змішування. Важливо зазначити, що гірші експлуатаційні характеристики одного продукту і кращі іншого можуть бути результатом простого змішування, що називається «розведенням», а не справжньою несумісністю.

Як правило, рекомендується уникати змішування мастил з різними типами загусників. Наприклад, мастила Microgel® або глинисті мастила не слід змішувати з мастилами, загущеними милом, такими як літєві комплексні мастила, оскільки це може призвести до руйнування структури загусника. Проблеми несумісності можуть також виникати через взаємодію між присадками [31]. У деяких випадках навіть різні

мастила, схвалені за однією і тією ж специфікацією, можуть виявитися несумісними один з одним. Для вирішення цієї проблеми в специфікацію MIL-PRF-23827C були внесені зміни, які розділили схвалені мастила на тип I (на мильній основі) і тип II (на глиняній основі), щоб запобігти потенційним проблемам несумісності.

З метою забезпечення довговічності та надійності пар тертя виробники і експлуатанти авіаційної техніки можуть використовувати широкий спектр мастильних матеріалів, які будуть забезпечувати необхідні експлуатаційні умови роботи всіх точок мащення. На ряду з AeroShell Grease 33 експлуатанти можуть використовувати альтернативні мастильні матеріали, які відповідають затвердженій специфікації і схвалені виробником авіаційної техніки.

Mobilgrease 33 – розроблене як високоефективне мастило на основі літієвого комплексу, воно задовольняє різноманітні потреби авіаційної техніки загального призначення. Ретельно відкалібрована консистенція, що знаходиться між класами NLGI 1 і 2, підкреслює його адаптивність і універсальність у вирішенні різних вимог до мастила. Як і AeroShell Grease 33, дане мастило відповідає вимогам міжнародних специфікацій AIRBUS AIMS 09-06-002, BOEING BMS 3-33C Type 1, MIL-PRF-23827C, NATO G-354 [42].

Особливістю мастила Mobilgrease 33 є його формула, що включає 100 % поліальфаолефінову базову оливу, доповнену високоякісними присадками [43]. Цілеспрямований вибір поліальфаолефінової базової оливи свідчить про намагання виробника забезпечити стабільність і стійкість до окислення мастила, низьку випаровуваність і ефективні низькотемпературні властивості, що сприяє загальній надійності і довговічності мастила. Використання синтетичної поліальфаолефінової базової оливи ще більше покращує низькотемпературну рухливість і прокачуваність мастила, одночасно мінімізуючи значення пускового і робочого крутного моменту, сприяючи ефективній і безперебійній роботі механізмів.

Система літієвих комплексних загусників в Mobilgrease 33 сприяє його структурній стабільності та стійкості до вимивання водою. Це означає, що мастило зберігає свою цілісність навіть у складних умовах, забезпечуючи надійне мащення в

різних середовищах. Система присадок в Mobilgrease 33 забезпечує надійний захист від корозії та зносу, а також несучу здатність.

Mobilgrease 33 застосовується у високонавантажених підшипниках кочення, зубчастих передачах, приводах, інструментах і високошвидкісних підшипниках (за винятком підшипників коліс). Мастило демонструє свою адаптивність, розширюючи сферу застосування до загального мащення конструктивних елементів літака. Робочий діапазон даного мастила від $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $121\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Основні фізико-хімічні та протизношувальні характеристики Mobilgrease 33 представлені в табл. 1.2 [44].

Таблиця 1.2

Нормування показників якості мастила Mobilgrease 33

Властивості	Метод дослідження	Специфікація BMS 3-33C	Специфікація AIMS 09-06-002 SAE AMS3052A	Mobilgrease 33 (1)
Індекс NLGI				1,5
Тип оливи		Синтетичне Вуглеводні/ Естер		Синтетичне Вуглеводні/ Естер
Колір		Синьо-зелений	Синьо-зелений	Синьо-зелений
Тип загусника		Літієвий комплекс	Літієвий комплекс	Літієвий комплекс
В'язкість базової оливи при, $\text{мм}^2/\text{с}$	ASTM D445			
40 $^{\circ}\text{C}$		-		12,5
100 $^{\circ}\text{C}$		-		3,2
Робоча температура, $^{\circ}\text{C}$		-73 до +121		-73 до +121
Температура краплепадіння, $^{\circ}\text{C}$	ASTM D2265	205 min	200 min	240
Робоча пенетрація при 25 $^{\circ}\text{C}$	ASTM D217	265 до 315		285
Виділення оливи при 100 $^{\circ}\text{C}$ через 30 год., %м	ASTM D6184	8 max	6 max	4,5
Вимивання водою при 79 $^{\circ}\text{C}$, %м	ASTM D1264	7,5 max	10 max	5,5
Втрати від випаровування через 500 год. При 121 $^{\circ}\text{C}$, %м	ASTM D2595	10 max	10 max	8,5
Протизношувальна здатність при 121 $^{\circ}\text{C}$, год	ASTM D3336	1000 min	1000 min	2200+
Вантажопідйомність LWI при 27 $^{\circ}\text{C}$, кг	ASTM D2596	60 min	60 min	100+
Корозійний вплив на мідь через 24 год. при 100 $^{\circ}\text{C}$	ASTM D4048	1B max	1B max	1B

Підтверджена сумісність Mobilgrease 33 з AeroShell 33, схвалена компаніями ExxonMobil, Boeing і Airbus, підкреслює її надійність і придатність для конкретних авіаційних застосувань [45], не виявлено негативних наслідків при спільному використанні даних мастил. Щодо сумісності Mobilgrease 33 з іншими мастилами MIL-PRF-23827 Тип I і Тип II, а також MIL-PRF-81322, необхідно звернутися до даних тестів на сумісність, перш ніж змішувати мастила.

Випробування на сумісність підкреслює важливість ретельної оцінки і дотримання рекомендацій при виборі і комбінуванні мастильних матеріалів. Експлуатанти повинні ознайомитися з даними про сумісність, щоб приймати обґрунтовані рішення, гарантуючи, що мастила, які використовуються разом, зберігають свою цілісність і ефективність, не погіршуючи експлуатаційні характеристики і не викликаючи небажаних наслідків в системі змащення літака.

Розглянемо лінійку авіаційних мастил торгової марки «Royco» (Сполучені Штати Америки).

Композиція з мінеральною базовою основою, загусником (неорганічний гель), антикорозійною та антиокислювальною присадками та добавкою дисульфиду молібдену – це мастило Royco 11MS [46], діапазон робочих температур якого становить $-40\dots+150$ °C. Для даного мастила притаманні ефективні експлуатаційні показники, до яких слід віднести високу несучу здатність, водостійкість, ефективні антикорозійні та антиокислювальні властивості, надійні характеристики при низьких температурах. Royco 11MS рекомендовано для пар тертя ковзання при важких умовах експлуатації (висока температура, велике навантаження, наявність агресивного середовища), використовується дане мастило в вузлах шасі повітряних суден. За класифікацією NLGI мастило відповідає категорії 1 [47].

Технологією змішування поліальфаолефінів (синтетичної оливи з високим індексом в'язкості) з загусником (неорганічний гель), антиокислювальною, антикорозійною, протизадірною присадками та добавкою для захисту від іржі одержують мастило ROYCO 22CF [46], діапазон робочих температур якого $-54\dots+177$ °C. Експлуатаційні характеристики: Мастило характеризується високою несучою здатністю, проявляє ефективні мастильні властивості при високих і низьких

температурах, має ефективні пускові властивості при екстремально-низьких температурах, забезпечує високі антиокислювальні та антикорозійні показники в жорстких умовах експлуатації в широкому температурно-навантажувальному діапазоні, проявляє підвищену водостійкість, що забезпечує тривалий термін його служби. ROYCO 22CF призначено для використання в підшипниках коліс повітряних суден, приладах, коробках передач, підшипниках ротора, приводах, для високошвидкісних пар тертя, рекомендовано в якості багатоцільового мастила в багатьох галузях промисловості. За класифікацією NLGI мастило відповідає категорії 2 [47].

Компаундуванням термічно стійких естерів, загусника 12-гідроксистеарату літію, антиокислювальної, антикорозійної, протизношувальної та протизадирної присадок, дисульфиду молібдену «Moly» у вигляді дрібнодисперсних частинок одержують мастило ROYCO 64 [46], яке роботоздатне в діапазоні температур $-73\dots+135$ °C. Наявність пакету присадок забезпечує високу несучу здатність мастила при великих навантаженнях, ефективні протизношувальні та протизадирні властивості, надійні антиокислювальні та антикорозійні властивості. Мастило характеризується стійкістю до градієнту швидкості зсуву; за рахунок високої адгезії дрібнодисперсних частинок дисульфиду молібдену до металевих поверхонь забезпечується захист контактних поверхонь при граничному та сухому режимах мащення. Стійкість дисульфиду молібдену «Moly» та високі проникаючі властивості термічно стійких естерів ускладнюють видалення сформованих граничних плівок з контактних поверхонь. ROYCO 64 рекомендовано використовувати для антифрикційних високонавантажених підшипників низької та середньої швидкості (для високошвидкісних антифрикційних підшипників необхідна попередня оцінка), що працюють в умовах дії екстремально низьких та високих температур, для пар ковзання (матеріал контактних поверхонь – сталь). Слід зазначити, що в процесі експлуатації мастила ROYCO 64 його активні компоненти можуть спричинити пом'якшення неопрену, натурального каучуку, деяких видів фарб. За класифікацією NLGI мастило відповідає категорії 2 [47].

Оскільки розглянуті мастила виготовляються різними виробниками, необхідна розробка стандартів на мастила та методів оцінки їх якості. Стандарти мають визначати вимоги до фізичних і хімічних властивостей мастил, включаючи клас NLGI, консистенцію, температуру краплепадіння і водостійкість. У них також мають бути описані експлуатаційні випробування, які повинні бути виконані з мастилом, включаючи випробування на несучу здатність, стійкість до окислення, корозійну стійкість та ін. Відповідно до вимог, викладених у стандартах, виробники можуть гарантувати, що їх мастило відповідає стандартам якості для використання в літаках, вертольотах, авіаційній наземній техніці або в промисловому обладнанні.

Наприклад, більшість продуктів AeroShell виробляється відповідно до стандартів (специфікацій) Великобританії або США (табл. 1.3), оскільки вони прийнятні для більшості виробників літаків і авіакомпаній [48]. Багато стандартів Великобританії, США, країн НАТО є взаємозамінними, хоча стандарти не ідентичні. Виробники використовують «схвалено», «відповідає», «еквівалент» і «відповідність» для визначення зв'язку між товарними партіями мастил та відповідними стандартами:

Таблиця 1.3

Відповідність мастил стандартам та аналіз взаємозамінності

Тип мастила	NATO CODE (стандарт країн НАТО)	F.S. (Франція, специфікації)	U.K.S. (Великобританія, стандарт Британських служб)	U.S.S. (США, специфікації Військового відомства)	Допуски
1	2	3	4	5	6
NYCO GREASE GN 06	G-355	DCSEA355/A (ex-AIR 4206)	DEF STAN 91-54 Iss. 2 Amd. 1	-	AIRBUS CML 03FBC1
NYCO GREASE GN 17	G-353	DCSEA 354/B (ex-AIR 4217, ex-DCSEA 354/A)	DEF STAN 91-57 Iss.2	MIL-G-21164 D	AIRBUS CML 03HEB1, ATR CML 04-002, BOEING CML D00014
NYCO GREASE GN 10	G-354	DCSEA 354/B (EX-AIR 4210)	DEF STAN 91-53 Iss.3 Amd.1	MIL-PRF 23827 C AMDT 2 TYPE I	Airbus CML 03HBC1, Airbus CML 03HBD9, PWC CML PMC 79671
NYCO GREASE GN 25013	G-372	-	-	MIL-G-25013 E	AIRBUS CML 03JDA1, ATR CML 04-010

Продовження табл. 1.3

1	2	3	4	5	6
NYCO GREASE GN 4343	G-392	-	-	SAE-AMS-G- 4343	AIRBUS CML 03JCA9, ATR CML 04-011, BOEING CML D00062
NYCO GREASE GN 22	G-395	DCSEA 395/C (ex AIR 4222)	DEF-STAN 91- 52 ISS.1 AMD.2	MIL-PRF- 81322 G	AIRBUS CML 03GBB1, ATR CML 04-004B, BOEING CML D00016, D00233, D00378
NYCO GREASE GN 144	-	-	-	-	AIRBUS CML 03GBD1
NYCO GREASE GN 148	G-354	DCSEA 354/A, DCSEA 382	DEF STAN 91- 53, DEF STAN 91-12	MIL-PRF- 23827 C Amdt 2 Type I	Airbus – AIMS 09-06-002; BOEING – BMS 3-33C; AIRBUS CML 03GBC1, 03HBC1, 03HBD9 та 03GBD1; ATR CML 04-004A та 04-024
AeroShell Grease 7	G-354	DCSEA 354/A	-	MIL-PRF- 23827 C Type II	-
AeroShell Grease 22	G-395	DCSEA 395/A	DEF STAN 91-52	MIL-PRF- 81322G	аналог Циатим 201 та 203, ВНІ НІ 207, Ера (ВНІ НІ 286М), НК50
AeroShell Grease 33	G-354	DCSEA 354/A	DEF STAN 91-53	MIL-PRF- 23827C (Type I)	Airbus – AIMS 09-06-002; BOEING – BMS 3-33C, аналог Ера, ОКБ-122-7
Mobilgrease 33	-	-	-	MIL-PRF- 23827 (Type I)	Boeing BMS 3- 33C, Airbus AIMS09-06- 002/SAE AMS3052
Royco 11MS	O-155	-	-	MIL-G-7711A	Boeing, McDonnell Douglas
ROYCO 22CF	G-395	-	-	MIL-PRF- 81322G	-
ROYCO 64	G-353	DCSEA 353/A (ex AIR 4217/A)	DEF STAN 91-57	MIL-G-21164D	-

– «схвалено» вказує на те, що мастило було виготовлено за вимогами стандарту (специфікації) та відповідно до яких вимог даний тип мастила був схвалений;

– «відповідає» вказує на те, що мастило відповідає вимогам стандарту та/або схвалення вже отримано, або через те, що специфікація вже застаріла, неможливо отримати схвалення типу;

– «еквівалент» означає, що мастило відповідає основним вимогам стандарту (специфікації), але не обов'язково було виготовлено відповідно до специфікації;

– «відповідність» означає, що мастило не було виготовлено відповідно до стандарту і що це найближчий доступний продукт.

Проаналізуємо авіаційні мастила компанії WEGO (Чеська Республіка).

Мастило Циатим-201 WEGO виготовлено загушенням літєвим загусником малов'язкої мінеральної базової оливи з додаванням поліфункціонального пакета присадок. Діапазон робочих температур $-60...+90$ °С. До ефективних експлуатаційних характеристик Циатим-201 WEGO відносять високу стійкість до вимивання водою, антифрикційні та протизношувальні властивості, антикорозійну стійкість, відміні низькотемпературні властивості, морозостійкість, що в сукупності забезпечує подовження терміну служби пар тертя [49]. Дане мастило рекомендовано для пар тертя авіаційної техніки, які працюють з малим зусиллям зсуву при невисоких контактних навантаженнях, електромеханічних приладів та точних механізмів, радіотехнічного обладнання, для вузлів тертя авіаційної наземної техніки та автомобільного транспорту, який працює в умовах низьких температур. За класифікацією DIN 51502 мастило відноситься до групи K1E-60, за NLGI мастило відповідає 1-й категорії, маркування за ГОСТ 23258 – Н-Либ/9-1; TU-1007 (Угорщина), STAS 8961-83 (Румунія) [47, 50].

В Україні, окрім перелічених мастил закордонного виробництва, для повітряних суден та авіаційної наземної техніки використовують мастила, які виготовляють за ТУ або ГОСТ.

Шляхом загущування натрієвим милом стеаринової і олеїнової кислот залишкових нафтових авіаційних олив (МС-20 або МК-22), додаючи колоїдний графіт, одержують мастило НК-50 (ТУ 38.1011219-95), яке роботоздатне в діапазоні

температур $-15...+120$ °С. Короткотривало мастило можна використовувати до 180 °С, незважаючи на температуру краплепадіння $+200$ °С. НК-50 призначене для підшипників, ступиць шасі повітряних суден та для шліцьових з'єднань повітряних гвинтів. Слід зазначити, що дане мастило характеризується неефективними низькотемпературними властивостями; проявляє погану водостійкість (при поглинанні води з повітря під час порушення умов зберігання, властивості мастила змінюються – знижується температура краплепадіння, межа міцності та ін.) [51]. За класифікацією DIN 51502 мастило відноситься до групи KF4K-15; за ГОСТ 23258-78 маркування мастила – УНа 2/15-г4 [50].

Шляхом загущення комплексним милом стеарату та ацетату кальцію складних ефірів (естерів) з додаванням протизношувальної та антиокислювальної присадок одержують мастило СЕДА (ТУ 38.1011242-89 змін. 1-4) [52]. Діапазон робочих температур $-60...+120$ °С. Дане мастило рекомендовано для змащення слабонавантажених швидкісних підшипників кочення електричних машин (електрогенераторів, стартер-генераторів) повітряних суден. Мастило проявляє ефективні мастильні і низькотемпературні властивості, низьку випаровуваність, задовільну водостійкість при експлуатації. Слід зазначити, що дане мастило спричинює набухання гуми на основі нітрільних і силоксанових каучуків.

Мастило ВНІНП-261 Сапфір (ТУ 38.1011051-87) являє собою суміш термостійких олив та загусників [53]. Діапазон робочих температур $-40...+150$ °С, короткочасно до $+200$ °С. До експлуатаційних показників мастила можна віднести високу термостійкість, механічну та антиокислювальну стабільності. Мастило рекомендоване для конічних роликів підшипників ступиць коліс шасі, які тривалий час працюють в широкому температурному діапазоні в умовах різкозмінних навантажень і частот обертання. Також рекомендовано застосування в шліцьових з'єднаннях повітряних гвинтів літаків і вертольотів, в різьбових з'єднаннях. За класифікацією DIN 51502 мастило відноситься до групи K3N-55 [50].

Мастило Ера (ВНІНП-286М) (ТУ 38.101950-83) виготовляється шляхом загущення суміші олив гідроізомеризації і гідрокрекінгу кислотами гідрованої касторової олії і літієвим милом стеаринової кислоти, додатково додають

протизадирну і антиокислювальну присадки [54, 55]. Діапазон робочих температур $-60...+120$ °С. Мастило проявляє високі антиокислювальні та антикорозійні властивості; характеризується високою механічною стабільністю; при експлуатації встановлені ефективні протизадирні і протизношувальні характеристики [35, 37, 39, 56]; мастилу притаманні інертність при контакті з гумою, висока морозостійкість, водостійкість, низька колоїдна стабільність. Мастило рекомендовано для застосування в підшипниках ковзання і кочення різних систем управління повітряних суден, в підшипниках ротора гіроскопа, в зубчастих передачах. За класифікацією DIN 51502 мастило відноситься до групи KP2-3K-60 [50].

Таким чином, основними експлуатаційними характеристиками авіаційних мастил є захист від зносу, іржі, корозії та високотемпературної деградації; забезпечення стійкості до окислення, стабільність за несприятливих погодних умов та інших умов впливу води. Перспективними в авіації є багатоцільові мастила, однак виробники не надають повну інформацію їх трибологічних властивостей, що є важливим при розробці рекомендацій стосовно температурного, швидкісного та навантажувального діапазону їх експлуатації для певних вузлів та агрегатів.

1.3. Аналіз використання мастильних матеріалів у вузлах авіаційної техніки.

1.3.1. Конструктивні елементи механізації крила літаків сімейства АН.

Крило є одним із основних елементів літака. Завдяки наявності крила, літак піднімається у повітря та здійснює різні маневри [39, 57]. Воно також використовується для підвішування або встановлення авіаційних двигунів або інших конструкцій в залежності від призначення літального апарату. Конструкція крила досить складна. Механізація крила забезпечує високі технічні характеристики літака на етапах зльоту та приземлення [58, 59, 60]. Механізація крила вміщує велику кількість рухомих елементів. Ці елементи дозволяють змінювати геометрію крила, що дозволяє використовувати крило для здійснення зльоту та приземлення літака та інших маневрів. До основних елементів механізації крила відносять передкрилки, закрилки, інтерцептори, елерони [61].

Керування положенням всіх елементів крила здійснюється за допомогою різних механічних пристроїв. Зокрема, система управління закрилками літаків сімейства АН, а саме АН-148, АН-158, є електродистанційною і вона призначена для випуску-прибирання закрилків в двох режимах – в основному і в резервному. Монтажна схема трансмісії закрилків приведена на рис. 1.2. Компоненти кінематики системи управління закрилками (СУЗ-148) розташовані уздовж заднього лонжерона крила і включають комбінований привід механізації (1) (КПМ-148н), кутові редуктори [6] з муфтою обмеження моменту (МОМ), підйомники закрилків (3, 4, 5, 6 (№ 1, 2, 3, 4)), редуктор (7) з протиприбиральним гальмом (ППГ). Обертання валу електродвигуна (робота в резервному режимі) або валу гідромотора (в основному режимі) комбінованого приводу механізації передається за допомогою його диференціального редуктора на трансмісію, що складається з карданних валів 9 [62].

Карданні шарніри і шліцьові з'єднання, що ковзають, забезпечують нормальну роботу трансмісії без заїдань при пружних деформаціях крила. Кулькогвинтові підйомники складаються з редуктора і ходової пари "гвинт-гайка" з кульками в різьбовій канавці для зменшення опору переміщенню гвинта.

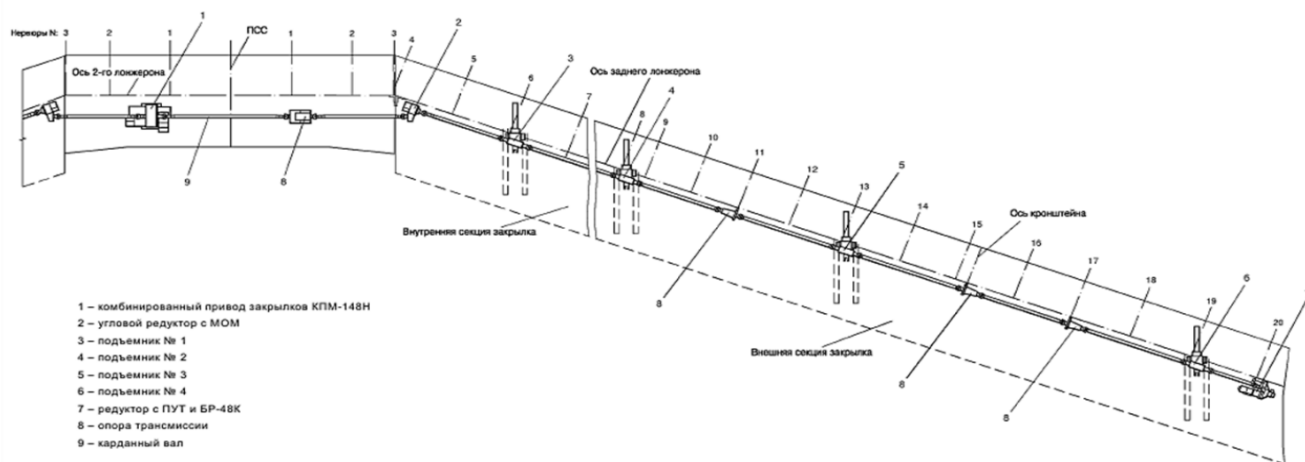


Рис. 1.2. Монтажна схема трансмісії закрилків правого півкрила.

Кулькогвинтові підйомники закрилків призначені для перетворення обертального руху трансмісійного валу закрилків в поступальне переміщення закрилків [61].

Конструкція підйомника закрилків показана на рис. 1.3.

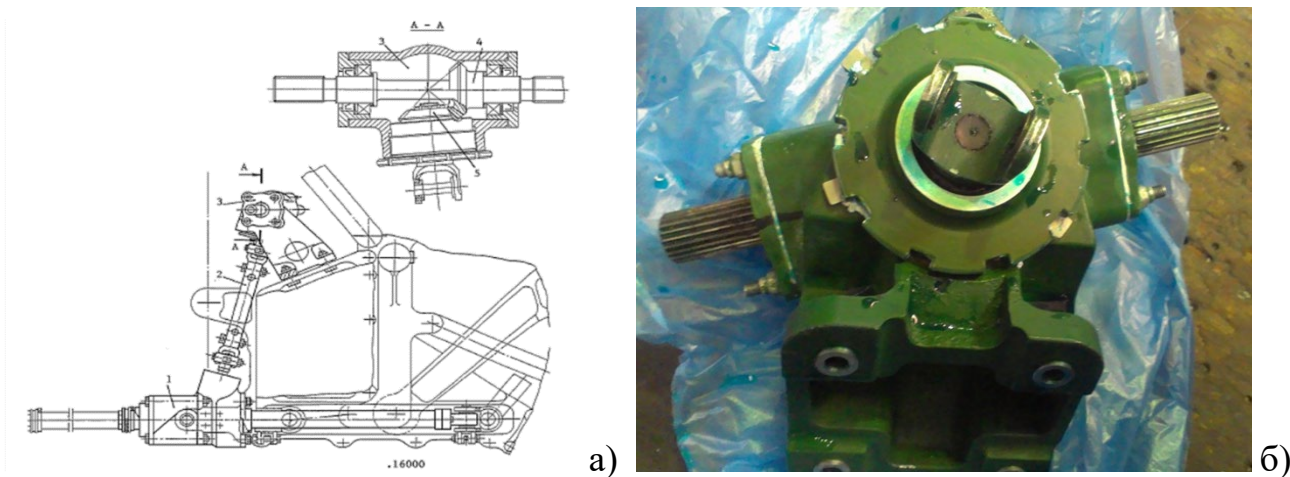


Рис. 1.3. Установка підйомника № 1 на нервюрі крила №6: а) – конструктивна схема та розташування конічного редуктора, б) – фото конічного редуктора.

Підйомник закрилків включає в себе конічний редуктор, що складається з ведучої (5) і веденої (6) шестерень, і кулькогвинтову ходову пару, що утворена гайкою (4), ходовим гвинтом (8) і кульками (13). Кульки перекочуються в профільованій різьбовій канавці, що утворена поверхнями гайки (4) і ходового гвинта (8), дана конструкція забезпечує заміну тертя ковзання тертям кочення.

Кутовий редуктор (3) (див. рис. 1.4) передає рух валу приводу закрилків до підйомників. Редуктор – конічного типу. Вал-шестерня (4) редуктора з'єднаний з вихідним валом приводу закрилків. Вузол шестерні (5) з'єднаний валом з карданами (2) з ведучою шестернею підйомника.

Загальний вид конструкції та складових елементів кутового редуктора представлено на рис. 1.4.

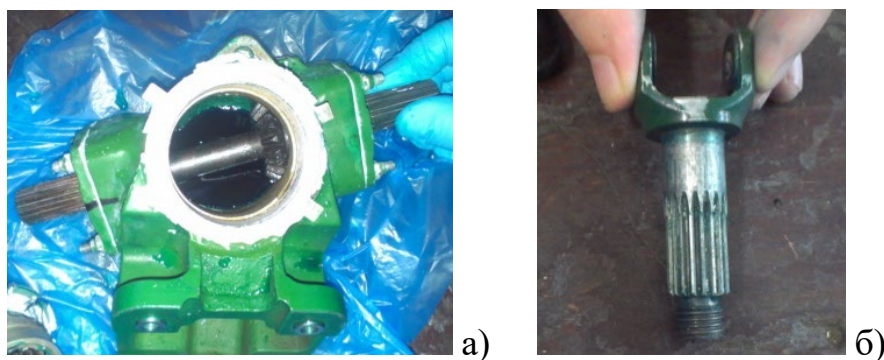


Рис. 1.4. Кутовий редуктор: а) – корпус редуктора з валом-шестернею, б) – карданний вал шестерні 5.

Корпус редуктора виготовлено зі сплаву АК-6; зубчаста пара, що використовується для передачі руху від валу приводу закрилків до підйомників, виготовляється зі сталі 30ХГСА, шестерні прямозубі. Номінальний режим роботи редуктора відповідає 500 об/хв, робочий режим редуктора в процесі випуску та прибирання закрилків забезпечується при 200 об/хв. Тривалість роботи редуктора в процесі випуску або прибирання закрилків відбувається впродовж 5-6 хв. Відповідно протягом цього періоду необхідно забезпечити надійну і безперервну його роботу.

Особливістю використання літаків є те, що протягом польоту вони можуть піддаватися різкій зміні температур. Це пов'язано з підняттям літака на різні висоти протягом польоту. В цей момент температура ззовні літака, а відповідно і негерметичних частин конструкції, може скласти мінус 50 °С, можливо й нижче, в залежності від зони польотів. Тому забезпечення якісного мащення вузлів, що перебувають в русі за таких умов, є досить важливим для підвищення надійності роботи агрегатів.

Розглянемо домінуючі види зносу в зубчастих передачах. В авіації зубчасті передачі є важливими компонентами, що впливають на надійність гелікоптерів, авіадвигунів, літальних апаратів та іншого авіаційного обладнання [63]. Авіаційна промисловість вимагає покращених експлуатаційних характеристик, зменшеної ваги та підвищеної термостійкості зубчастих передач. Хоча інноваційні технології виробництва, такі як суперфінішна обробка поверхні та дробострумінне зміцнення, збільшили термін служби та надійність зубчастих коліс [64], втомні руйнування все ще можуть виникати, що призводить до потенційно катастрофічних аварій [65].

Редуктори використовуються в різних вузлах авіаційної техніки та сферах застосування, які суттєво відрізняються за вартістю, потужністю та наслідками потенційних відмов. Ці та інші фактори відіграють вирішальну роль у визначенні підходу до технічного обслуговування, прийнятого для конкретного набору редукторів. Рис. 1.5 ілюструє термін служби деталі агрегату і показує, коли реалізуються різні стратегії технічного обслуговування протягом усього терміну служби деталі.

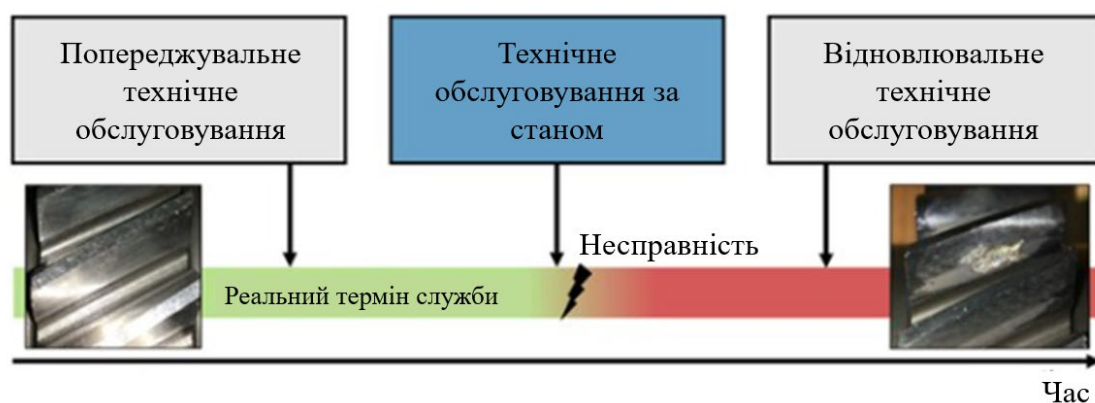


Рис. 1.5. Різні підходи до технічного обслуговування [66].

Втомне зношування зубчастих передач суттєво впливає на міжремонтний період авіаційних трансмісій. Вирішення проблеми втоми контактів в авіаційних передачах має вирішальне значення для розвитку техніки. Прогнозування експлуатаційних характеристик за параметрами втоми та зносу, є важливим при проектуванні зубчастих передач для мінімізації частоти відмов і підвищення їх надійності. Різні процеси руйнування поверхні контактів, такі як пітинг, мікропітинг і глибоке відшарування (табл. 1.4), підкреслюють складність механізмів руйнування контакту зубчастих коліс. Розуміння цих механізмів має вирішальне значення для розробки ефективних стратегій щодо зменшення негативних наслідків.

Таблиця 1.4

Типові пошкодження зубчастих коліс та їхні ознаки

Механізм пошкодження.	Приклад	Типове розташування (на колесі)	Типове розташування (на шестерні)	Механізм / процес
Пітинг		нижче кола кроку	окремі зубці	контактна втома
Мікропітинг		нижче кола кроку	окремі, потім всі зубці	контактна втома
Задири		у напрямку до вершини	окремі зубці	невтомний
Злам у кореня зуба		під кутом 30° до дотичної до кореня	окремі зубці	втома від згинання
Бічний злам		Нижче контактної зони	окремі зубці	походження включення
Адгезійний знос		ділянки ковзання	всі зуби	мащення змішане, еластогідродинамічне

Зі збільшенням потужності та високих швидкостей, знос та втомні пошкодження зубчастих коліс, включаючи пітинг, задири, відколи та поломку зубців, створюють значні проблеми. Зокрема, зростання дефектів на поверхні зуба змінює жорсткість зубчастого колеса, призводить до деформацій в зоні герцівського контакту.

Мікропітинг виникає, коли невеликі порожнини, відомі як відшарування, на поверхні двох зубців шестерні виходять за межі глибини мастильної плівки. Ці виступи створюють ямки, зазвичай глибиною від 10 мкм до 20 мкм, на поверхні зубців шестерні (рис. 1.6). Якщо не усунути такі мікропошкодження, вони можуть перерости в макропошкодження. Зменшення шорсткості поверхні забезпечує зменшення кількості мікронерівностей, які є потенційним джерелом руйнування мастильного шару, що забезпечує зниження ризику виникнення мікропітингу на зубі шестерні.



Рис. 1.6. Мікропітинг шестерні (сіре забарвлення) від контактної втоми [67].

Пітинг, також відомий як макропітинг, виникає, коли контактне напруження на поверхні зубчастого колеса перевищує критичне значення. BS ISO 6336-2:2006 описує розрахунки для прогнозування ризику виникнення макропітингу і включає максимальну висоту шорсткості Rz як фактор, що впливає на допустиме контактне напруження для зубчастого колеса [68]. Зі зменшенням значення Rz поверхні допустиме контактне напруження зростає, тим самим зменшуючи ймовірність виникнення пітингу на зубчастій передачі.

Пошкодження від задирів відбувається, коли руйнується гранична плівка мастильного матеріалу, що призводить до зварювання та подальшого роз'єднання зубців шестерні (рис. 1.7).

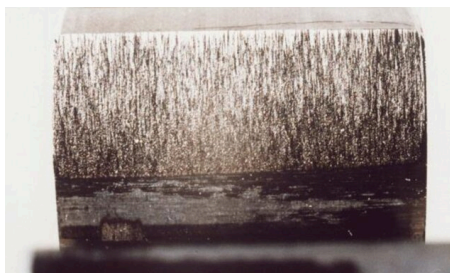


Рис. 1.7. Задири, спричинені нестачею мастильного матеріалу, що призводить до зварювання та ковзання бокових поверхонь зубців спряжених шестерень [67].

Середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості (R_a) використовується в стандартах BS ISO/TR 13989-1 [69] і BS ISO/TR 13989-2 [70] для встановлення зв'язку між мікрогеометрією поверхні і пошкодженням від задирів. Вища шорсткість поверхні корелює з підвищеним коефіцієнтом тертя, тим самим збільшуючи ймовірність пошкодження зубчастих коліс.

За традицією, при проектуванні, а потім і при використанні і обслуговуванні вітчизняної авіаційної техніки, закладаються матеріали, зокрема мастило ВНІНП-286М, які відповідають нормативно-технічній документації. В сучасному літаку АН-148 для роботи кутового редуктора, який використовується в системі випуску-прибирання закрилків, передбачено використання мастила ВНІНП-286М. Дане мастило широко використовується у вузлах тертя (підшипниках кочення та ковзання, зубчастих передачах) системи керування літаком. Мастило ВНІНП-286М, згідно технічним експлуатаційним характеристикам, характеризується широким температурним діапазоном застосування – від -60 °С до $+120$ °С, може використовуватись при різкій зміні температур та забезпечує надійний захист вузлів авіаційної техніки від інтенсивного зносу [54]. Однак, аналіз практичного досвіду при експлуатації та обслуговуванні редукторів з даним типом мастильного матеріалу показав, що наявність води в мастилі за рахунок різкої зміни температур при експлуатації літака призводить до підвищеного зносу вузла тертя. На жаль, застосування даного мастильного матеріалу не відповідає сучасним вимогам, які висуваються до експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів за умови потрапляння води в мастило.

Таким чином, виникає необхідність вибору аналогічних мастильних матеріалів, які будуть забезпечувати необхідні експлуатаційні властивості і надійну роботу механізмів впродовж всього польоту літака, особливо при різких змінах режимів роботи.

1.3.2. Аналіз використання мастильних матеріалів у вузлах вертольотів.

Ефективне використання вертольотів за призначенням можливо за рахунок забезпечення необхідного рівня їх потенціалу. Першочерговими напрямками для реалізації даної задачі є як модернізація вертольотів, що перебувають в експлуатації, так і проведення робіт з технічного обслуговування із продовженням граничних ресурсів і строків їх служби [2, 71].

Відповідно до регламентів технічного обслуговування вертольотів серії «Мі» для безвідмовної роботи агрегатів та механізмів вертольоту впродовж усього технічного ресурсу поряд з іншими роботами необхідно періодично контролювати якість мастильного матеріалу та своєчасно проводити його заміну [72]. Через велику кількість агрегатів і механізмів, що працюють у різних умовах, на вертольоті застосовується велика номенклатура мастильних матеріалів. Своєчасне та правильне застосування мастильних матеріалів є дуже важливою умовою забезпечення працездатності агрегату або механізму впродовж терміну їх служби. Змащуванню піддаються різні вузли і механізми вертольотів: двигуни, редуктори трансмісії, шарніри втулок, гвинтів.

В авіації підшипники відіграють важливу роль як невід'ємні компоненти обладнання, що витримують високі навантаження. Ефективно зменшуючи тертя, підшипники забезпечують плавний рух, тим самим захищаючи інші компоненти від потенційних пошкоджень під час експлуатації. Так, наприклад радіальний шарикопідшипник і упорний роликовий підшипник є конструктивними елементами осевого шарніра втулки несучого гвинта вертольоту Мі-24А, який є одним з найбільш відповідальних агрегатів конструкції вертольоту [2].

Втулка несучого гвинта (НГ) вертольоту – один з найважливіших і найбільш відповідальних агрегатів конструкції вертольоту. До втулок несучих гвинтів

висуваються наступні вимоги: забезпечення кінематичної рухливості лопаті на всіх робочих режимах, обмеження ступенів свободи лопаті, забезпечення найбільш сприятливих умов роботи гвинта з точки зору аеродинаміки, забезпечення міцності конструкції, висока несуча здатність, гарантія надійності та безпеки експлуатації заданого ресурсу, мінімальний час обслуговування та зручний доступ до технічного обслуговування агрегату [73]. Кожна з кінематичних схем втулок НГ має свої особливості, переваги та недоліки. На різних типах вертольотів застосовуються різні схеми втулок НГ. Конструкція втулки НГ впливає на махові рухи лопатей НГ, його аеродинаміку, а також маневреність та керованість вертольоту. На втулку діє крутий момент від закручування лопаті, він через осьовий шарнір (ОШ) компенсується зусиллями в проводці управління (рис. 1.8) [74].

При технічному обслуговуванні втулки НГ особлива увага приділяється наявності та своєчасності заправки оливи та мастил в шарніри втулки та компенсаційний бачок. Рівень оливи повинен бути: у горизонтальному шарнірі 30...40 мм (за наявності компенсатора тиску 30...35 мм), у вертикальному 25...35 мм (з компенсатором тиску 30...35 мм) та в осьовому шарнірі – 15...20 мм (з компенсатором тиску до внутрішнього торця отвору) [75].

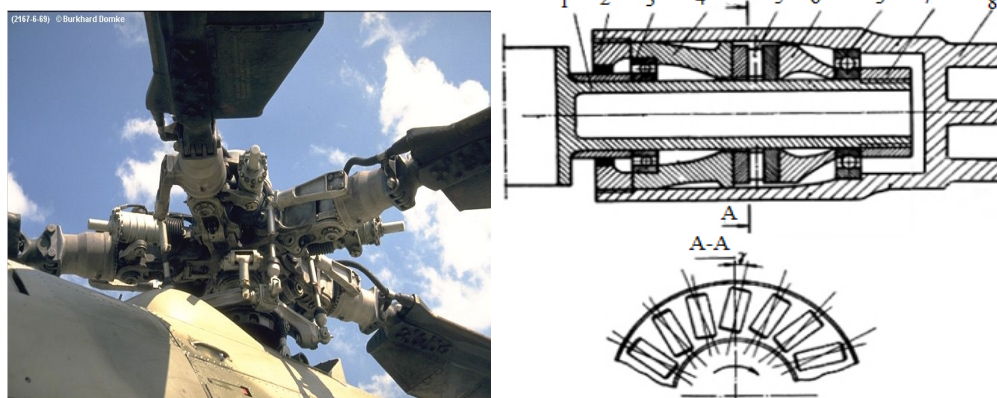


Рис. 1.8. Конструкція осьового шарніра втулки НГ вертольоту Мі-24А: 1 – цапфа, 2 – гайка корпусу осьового шарніра, 3 – радіальний шарикопідшипник, 4 – розпірна втулка, 5 – упорний роликовий підшипник, 6 – упорне кільце, 7 – гайка, 8 – корпус.

Різні умови експлуатації можуть призвести до пошкодження підшипників. Дотримання належних правил обслуговування та поводження з підшипниками має важливе значення для забезпечення оптимального рівня надійності підшипникових вузлів. Пошкодження підшипників і подальша відмова можуть бути спричинені різними факторами, зокрема, неправильним монтажем, недостатнім мащенням і надмірним навантаженням. Тип пошкодження, що проявляється через видимі ознаки, такі як зміна кольору, сліди зносу або вибоїни на тілі кочення та поверхні доріжки кочення, може бути різним. Варто зазначити, що різні види пошкоджень можуть мати схожі візуальні ознаки, незважаючи на те, що мають різні причини та наслідки. Таким чином, розуміння умов експлуатації має вирішальне значення під час аналізу пошкоджень підшипників, оскільки вони можуть дати цінну інформацію для виявлення основних причин [76, 77]. Стандарт ISO 15243:2017 «Підшипники кочення - пошкодження та відмови - терміни, характеристики та причини (Rolling bearings – damage and failures – terms, characteristics, and causes)» класифікує режими відмов підшипників кочення, виготовлених зі стандартних підшипникових сталей.

Так, сильний знос (рис. 1.9), спричинений стружкою або металевими частинками, може призвести до утворення канавок у підшипниках. Ці забруднення впресовуються в м'якший матеріал сепаратора, прорізаючи канавки в тілах кочення. Це порушує належну геометрію контакту кочення, що зменшує термін служби підшипника [78].



Рис. 1.9. Кругова канавка по колу.

Відшарування або пітинг, виникає в результаті поверхневої або підповерхневої втоми підшипників. Ця втома призводить до утворення тріщин на робочій поверхні,

в результаті чого частки матеріалу відколюються, коли елементи кочення проходять над цими тріщинами. В номенклатурі пошкоджень/відмов ISO, відколювання підпадає під категорію «втома», що охоплює як «втому, ініційовану під поверхнею», так і «втому, ініційовану поверхнею». Пошкодження відколами є прогресуючим (рис. 1.10), і вказує на те, що підшипник вичерпав ресурс втоми.

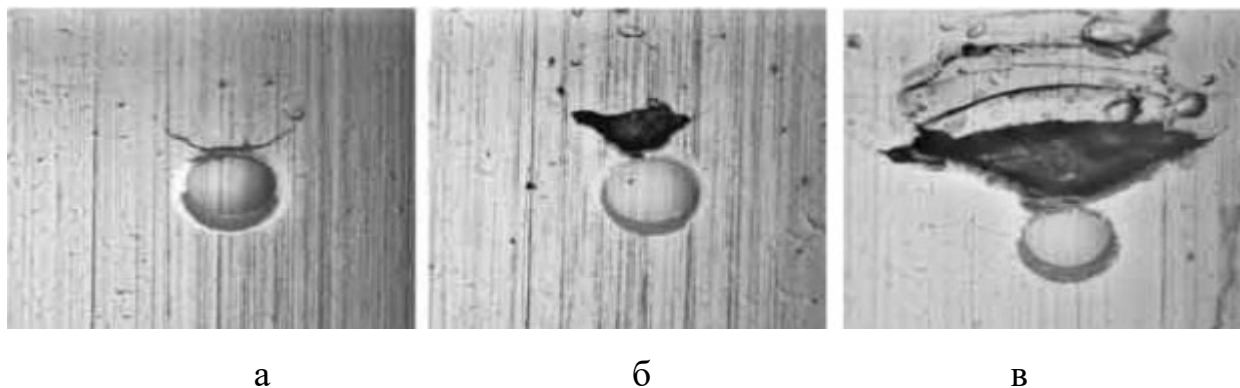


Рис. 1.10. Поверхнева втома (вистришування) в кулькових підшипниках: початкова стадія починається з тріщини, яка має V-подібну форму (а), надалі тріщина зростає (б) до тих пір, поки матеріал не відшаровується від поверхні (в) [76].

Корозія, також відома як хімічна корозія, є серйозною проблемою для підшипників кочення (рис. 1.11). Гладка поверхня доріжок кочення та тіл кочення робить їх вразливими до корозійних пошкоджень під впливом вологи та води без належного захисту.



Рис. 1.11. Внутрішнє кільце циліндричного підшипника з ознаками хімічної корозії [78].

Накопичення конденсату в корпусі підшипника через коливання температури є поширеною причиною корозійно-механічного зношування. Волога або вода може

проникати в підшипник через пошкоджені, зношені або недостатні ущільнення. Неправильні процедури миття та сушіння при знятті підшипників для огляду також можуть призвести до значних пошкоджень. Щоб запобігти корозійним процесам важливо належним чином очистити та висушити підшипники перед зберіганням або повторним встановленням.

Недостатнє мащення може призвести до широкого спектру пошкоджень, як з точки зору зовнішнього вигляду, так і з точки зору довговічності підшипникового вузла. Ступінь пошкодження може бути різним: від незначного знебарвлення від нагрівання до повного заклинювання підшипника зі значною деформацією металу (рис. 1.12).

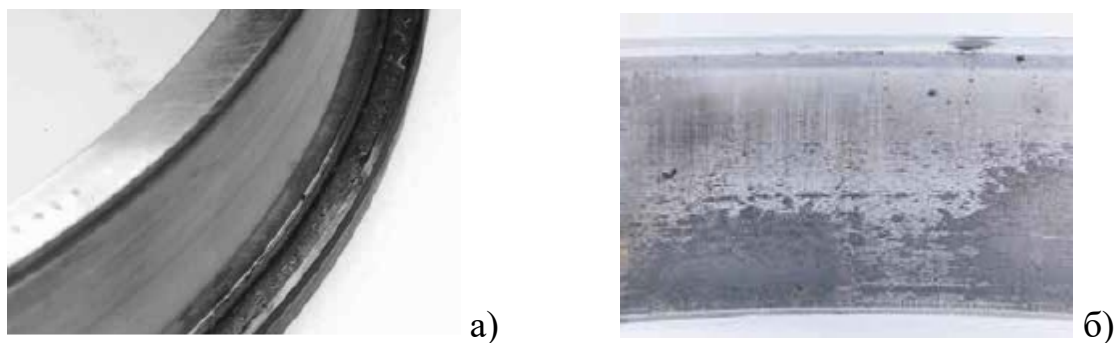


Рис. 1.12. Види пошкоджень внаслідок порушення мастильної здатності: а – прогресуючі задири на ребрах [78], б – мікророзшарування (відшарування) виникає при наявності тонкої плівки мастила, як правило, через високі навантаження, низькі оберти або підвищену температуру [78].

Розглянемо значення мастильних матеріалів для забезпечення нормальної роботи відповідальних вузлів тертя вертольотів.

Маслосуміш СМ-9 застосовується в редукторах трансмісії вертольотів у зимовий період. Редуктор вертольоту призначається для зміни напрямку крутного моменту. Під час цієї зміни частота обертання вихідного валу не змінюватиметься, оскільки використовуються однакові зубчасті колеса. Потужність на цьому валу змінюється за рахунок втрат на тертя, і вся енергія обертання йде в теплову енергію. Мастильні суміші використовують для змащування шарнірів гвинтів, осьових шарнірів, втулок гвинта вертольоту під час експлуатації як взимку, так і влітку.

Існують також позасезонні маслосуміші з робочим діапазоном температур від -50 до +60 °С. Їх використовують як синтетичне мастило для редуктора вертольотів модифікації МІ-2 і МІ-8, і в головному редукторі важкого вертольоту МІ-26.

Олива ВО-12 – всесезонна авіаційна олива для осьових шарнірів втулок гвинтів вертольотів [2]. Допустимий діапазон робочих температур – від мінус 50 до +60 °С. Базова основа оливи – суміш синтетичної вуглеводневої та диефірної олив, до якої додано комплекс високоефективних присадок. Олива ВО-12, яка була розроблена на заміну оливи ВНІНП-25, має підвищену стійкість до різких перепадів температур, тиску, рівня вологості. Важливою перевагою даної авіаційної оливи є її стійкість до окислення і спінювання. При нанесенні на поверхню оброблюваної деталі, ВО-12 утворює на ній захисну антикорозійну плівку, що багаторазово підвищує експлуатаційні характеристики агрегату.

Синтетичні вуглеводневі оливи часто використовуються у військовій та аерокосмічній промисловості через їх термічну стабільність при високих температурах [79]. Однак термічне окислення мастильного матеріалу створює значний вплив на мастильну здатність через утворення різних сполук (наприклад, перекис, спирти, альдегіди, кислоти, складні ефіри та оксикислоти) [26, 80]. Крім того, ці низькомолекулярні сполуки надалі полімеризуються в високомолекулярні сполуки, які утворюють нагар або шлам. Також збільшуються в'язкість і кислотне число мастильного матеріалу, що в результаті впливає на безпеку льотно-технічних показників. Тому дуже важливо аналізувати стійкість мастильного матеріалу до окислення.

Продукти полімеризації альфаолефінів містять значну кількість залишкових подвійних зв'язків і тому легко окиснюються [81]. Кінцеві молекулярні продукти реакції представлені оксидами, ненасиченими спиртами, карбонільними сполуками, і лише на глибоких стадіях окиснення утворюються кислоти. Для усунення залишкової ненасиченості поліальфаолефінів використовують різні методи: гідрування, ароматизацію, реакцію з ізопарафінами. Ефективнішим шляхом зменшення концентрації подвійних зв'язків є ароматизація, коли у системі утворюються і залишаються лише домішки-інгібітори. Окислення, наприклад, ненасичених ефірів

відбувається при контакті з повітрям та іншими проокислювальними умовами в період експлуатації мастильного матеріалу. Тому для більшості мастильних матеріалів потрібні антиоксиданти, щоб відповідати мінімальним вимогам стійкості до окислення, які вказані у стандартах EN-14214 (6 або 8 годин) та ASTM D-6751 (3 години) [82]. Додавання антиоксидантів до авіаційних олив може допомогти уповільнити процес окислення, обумовлений вільними радикалами.

Розрахунки роботи вузлів тертя при еластогідродинамічних процесах перебувають у центрі уваги під час проектування підшипників, зубчастих передач тощо. Наприклад, можна розрахувати перехід із ненавантаженої зони в навантажену зону в радіально навантажених підшипниках або змоделювати зачеплення зубів у зубчастій передачі. Поточний розрахунок терміну служби вузлів тертя заснований на напівемпіричних формулах [83, 84, 85]. Розуміння реального процесу тертя, діючого контактного напруження, тобто розглянутої контактної поведінки пар тертя з нерівностями в режимі змішаного/граничного мащення для лінійних та еліптичних контактів, сприятиме створенню реальніших моделей прогнозування терміну служби підшипників і зубчастих передач.

Оцінка якості мастильних матеріалів за фізико-хімічними та триботехнічними показниками надає можливість прогнозувати інтенсивність спрацьовування присадок, стійкість до окислювання, протизношувальні характеристики та ін. Розробка методики комплексної оцінки експлуатаційних властивостей авіаційних мастильних матеріалів на етапі лабораторних досліджень дозволить виділити основні критерії їх якості для підвищення надійності, економічності та енергоефективності деталей, вузлів і агрегатів повітряних суден.

1.4. Вплив води на експлуатаційні властивості мастильних матеріалів.

Вода є одним з основних факторів, що впливає на ефективність мастильних властивостей мастильних матеріалів. Вода спричинює гідроліз та деструкцію присадок в оливах, погіршує всі їхні властивості: мастильну, миючу та нейтралізуючу, підвищує корозійну дію олив, посилює здатність до катастрофічного руйнування антифрикційних покриттів пар тертя. Наявність води в мастильному

матеріалі не тільки інтенсифікує процес його старіння, а й може призвести до підвищеного зносу трибоелементів вузла, де воно застосовується. Крім цього, вода викликає інтенсивну коагуляцію домішок та присадок в оливі з утворенням шламів [86]. Відомо, що звичайна вода проникнути через масляну плівку не може, а її пари дуже інтенсивно дифундують через неї. Молекули води через асиметричне розміщення позитивних та негативних зарядів є полярно-активними. Тому за наявності експлуатаційних умов, які призводять до обводнених мастил, необхідно використовувати мастильні матеріали з поліпшеними фізико-хімічними властивостями. Це досягається за рахунок введення в базову основу поліфункціональних присадок та добавок [87]. Наприклад, мастило ВНІНП-286М – це ізопарафінова олива, загущена стеаратом літію та 12-оксістеаратом літію, з додаванням антиокислювача та пластифікатора.

Встановлено [88], що вода чинить негативний вплив на властивості мастила. При обводнюванні мастила знижується його лужність, погіршується диспергуюча здатність, підвищується його корозійна агресивність. Все це призводить до підвищення зносу деталей агрегатів, а також до дострокової заміни мастила при його обводнюванні, що істотно збільшує експлуатаційні витрати.

Вода в працюючих оливах може бути в декількох станах: розчинена або хімічно пов'язана, не видалена звичайними способами, але і практично нешкідлива, з концентрацією до 0,05 % [89]; емульсійна з різною силою зв'язку, її концентрація досягає 2 - 3 %; «підтоварна» вода.

За методикою фірми «PALL» приладом WS-04 (рис. 1.13) більш правильно контролювати не абсолютний вміст води (ppm), а показник її насичення в оливі, при перевищенні якого відбувається поділ фаз і вільна вода починає виділятися у вигляді крапель [90].

Обводнення мастил може статися при транспортуванні, зберіганні, перевантаженні і заправці мастильних матеріалів. Вода може потрапити в мастильний матеріал в процесі експлуатації. Обводнення погіршує якість мастильного матеріалу і порушує нормальну роботу вузла, підсилює окислювання мастильного матеріалу, погіршує його мастильну здатність, сприяє утворенню осаду і корозії агрегату.

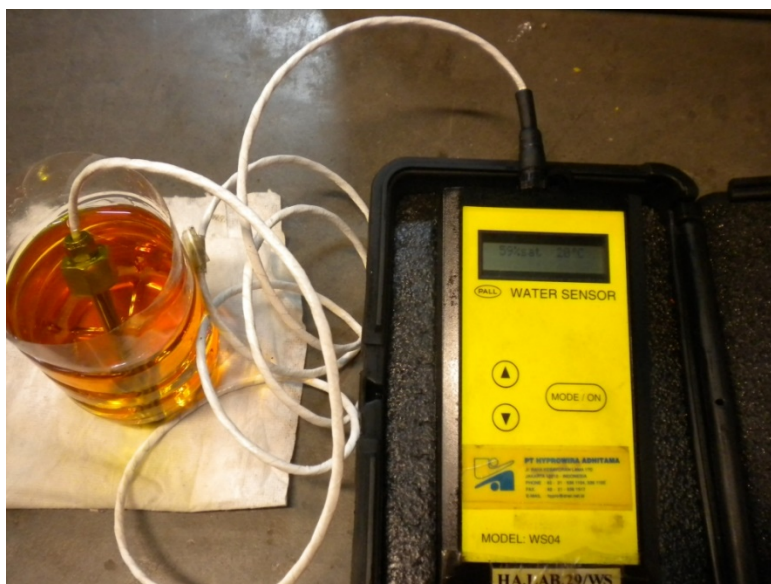


Рис. 1.13. Прилад WS-04 для визначення вмісту води в оліві.

Наприклад, наявність у трансмісійній оліві води значно змінює (переважно погіршує) протизношувальні та протизадирні властивості. Вода істотно впливає на хімічні процеси, що протікають на межі розділу фаз. Найбільші зміни спостерігаються за вмісту води в оліві 0,5...2 %. Наявність води в об'ємі оліви сприяє гідролізу присадок певного хімічного складу, внаслідок чого їхня хімічна активність зростає. Вода бере участь у формуванні граничного шару на поверхні металу і може призвести до інтенсивного корозійно-механічного зношування і задиру пар тертя [91].

При низьких температурах вода замерзає і перешкоджає нормальній роботі деталей, що труться [87]. Особливо процеси зміни фізико-хімічних властивостей мастил за рахунок їх обводнення характерні для мастил, які використовуються для змащування вузлів тертя повітряних суден. Зокрема, як було зазначено вище, літаки можуть різко змінювати своє перебування в різних температурних зонах. Так, злітати повітряне судно може в теплих регіонах, де температура повітря може складати плюс 50 °С, надалі воно перебуває в тривалому польоті на висоті до 9000 м, де температура повітря може змінюватися від мінус 40 °С до мінус 57 °С. Зазначена зміна навколишніх умов призводить до того, що мастильний матеріал швидко застигає, а вода що може в ньому міститися, кристалізується. Під час приземлення, мастильний матеріал не встигає розмерзнутись, тому залишаються кристали льоду. В даних

умовах лід виступає в якості абразиву, який потрапляє в зону контакту пар тертя. Відповідно це може спричинити катастрофічні наслідки.

Лід – мінерал з хімічною формулою H_2O , являє собою воду в кристалічному стані. Іноді містить газоподібні та тверді механічні домішки. У природі лід представлений однією з декількох кристалічних модифікацій, стійкою в інтервалі температур $-80\dots 0\text{ }^\circ\text{C}$, точка плавлення $0\text{ }^\circ\text{C}$. Сингонія гексагональна, вид симетрії дигексагонально-пірамідальний – C_{6v} – 6 мм (L_6P). Структурний осередок містить $12H_2O$. Просторова група – C^4_{6v} – $C6mc$; $a_0 = 7,82$, $c_0 = 7,36$; $a_0 : c_0 = 1:0,942$.

Кристалічна структура льоду (рис. 1.14) схожа на структуру алмазу: кожна молекула H_2O оточена чотирма найближчими до неї молекулами, що знаходяться на однакових відстанях від неї, рівних $2,76\text{ \AA}$ і розміщених у вершинах правильного тетраедра.

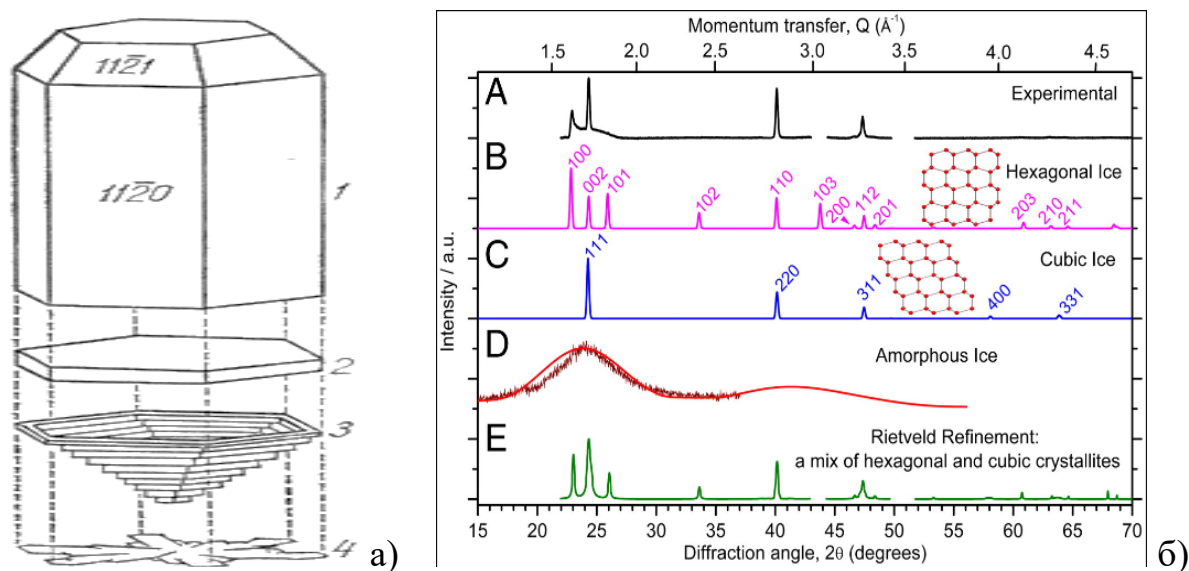


Рис. 1.14. Кристалічна структура льоду: а) структури льоду: 1 – призматичний кристал льоду (утворення відбувається на великій висоті при сильних морозах), 2 – таблитчастий лід (утворюється при сильних морозах), 3 – чашеподібний лід (утворюється у вологих печерах), 4 – звичайна сніжинка [92]; б) експериментальні та розрахункові рентгенівські дифрактограми [93].

Згідно [94] існує форма льоду II (тригональний кристалічний лід із високоупорядкованою структурою), що утворюється з льоду I_h при стисканні та температурах $-83\dots -63\text{ }^\circ\text{C}$, при нагріванні перетворюється на лід III. Лід III

(тетрагональний кристалічний), виникає при охолодженні води до $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску 300 МПа. Його щільність більша, ніж у води, але він найменш щільний з усіх різновидів льоду в зоні високих тисків.

Дослідження щодо впливу льоду на процеси тертя доводять залежність антифрикційних властивостей контакту від швидкості та температури. Зокрема, при швидкості більше $\sim 0,01\text{ м/с}$ і температурі більше $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ фрикційне нагрівання досить велике, щоб розтопити поверхню льоду і утворити мастильну плівку з рідкої води [95]. В діапазоні досліджуваного навантаження фрикційне нагрівання і товщина плівки рідини збільшуються зі збільшенням швидкості, що призводить до зменшення тертя зі збільшенням швидкості. При швидкості менше $\sim 0,01\text{ м/с}$ фрикційне нагрівання недостатньо велике для змащування поверхні розділу лід-повзун, і фрикційне ковзання протікає за рахунок деформації нерівностей і зламів поверхні [96].

У роботі [97] досліджено процеси тертя льоду на смолистому бутадієновому каучуку, заповненому вуглецем. При малих швидкостях і низьких температурах спостерігалися морфологічні ознаки, що свідчать про сухий контакт. При більш високих температурах та низькій швидкості є свідчення наявності рідких плівок через вміст солі в льоду. Високе тертя (коефіцієнт тертя $\mu \sim 1$) при малій швидкості і при температурах близько $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ було обумовлене внутрішнім тертям.

Процеси тертя зразків льоду, що ковзають по сталі, були визначені шляхом дослідження морфології частинок зносу за допомогою низькотемпературної електронної скануючої мікроскопії [98]. Низьке тертя ($\mu < 0,1$) при високій температурі ($-3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) та низькій швидкості ($0,02\text{ м/с}$), а при низькій температурі ($-25,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) і високій швидкості ($0,30\text{ м/с}$) обумовлено наявністю рідкої води, яка змащує поверхню ковзання. Діагностичні морфологічні ознаки поверхонь ковзання з мастилом включають наявність залишкової рідини в канавках зносу. Високе тертя ($\mu > 0,15$) при низькій температурі ($-24,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) і низькій швидкості ($0,03\text{ м/с}$) виникає через недостатнє мащення на межі ковзання, що призводить до пластичної деформації. Діагностика морфології контакту при пластичній деформації включає ознаки

стирання на поверхні зношування і скупчення частинок зносу на задній кромці поверхні зношування.

На жаль, обмаль експериментальних досліджень щодо оцінки триботехнічних властивостей мастильних матеріалів за наявності в них води при низьких температурах, коли утворюються кристали льоду. Дослідження в даному напрямку дозволять оцінити експлуатаційні характеристики обводненого мастильного матеріалу при температурах, нижче 0 °С. Важливість таких досліджень обумовлена тим, що більшість сучасних мастильних матеріалів, в тому числі і авіаційні мастильні матеріали, є всесезонними, з тривалим терміном експлуатації. В разі потрапляння води в мастильний матеріал особливу увагу необхідно приділяти деемульгуючим властивостям, стабільності до окислення та триботехнічним показникам такого мастильного матеріалу.

Висновки до розділу 1.

1. Взаємозамінність мастильних матеріалів з метою забезпечення надійної роботи парку авіаційної техніки України, зменшення витрат на технічне обслуговування повітряних суден, ґрунтується на впровадженні в експлуатацію багатоцільових мастильних матеріалів, якість яких має відповідати міжнародним стандартам та допускам провідних авіабудівельних компаній. Впровадження високотехнологічних та високоефективних авіаційних, промислових мастильних матеріалів з заданими характеристиками є однією з першочергових задач для підвищення надійності пар тертя.

2. Наведений асортимент авіаційних пластичних мастил провідних закордонних виробників. Зазначено тип основи, загущувача, наявність наповнювачів в мастилі, його експлуатаційні характеристики та рекомендації виробників щодо цільового застосування мастила в конкретних вузлах тертя. Для розглянутих авіаційних мастил зазначені специфікації та допуски, встановлені провідними виробниками авіаційної техніки, зокрема Airbus, Boeing, McDonnell Douglas, Embraer.

3. Проаналізовані системи класифікації мастил у відповідності до міжнародних стандартів NLGI та DIN, які встановлюють систему позначення, ідентифікації і

вимоги щодо фізико-механічних властивостей мастильних матеріалів. Вибір авіаційних мастильних матеріалів за певною системою класифікації відповідно до фізико-хімічних, механічних та експлуатаційних властивостей забезпечить цільове їх використання в вузлах тертя авіаційної техніки.

4. Аналіз дефектів відповідальних вузлів тертя повітряних суден встановив, що важливим напрямком щодо зменшення інтенсивності зношування контактних поверхонь є вибір мастильного матеріалу як з урахуванням режимів роботи вузлів та агрегатів, практичного досвіду при експлуатації та обслуговуванні повітряних суден, так і комплексною оцінкою якості мастильних матеріалів за показниками стійкості до окислення, стабільності до деструкції при високих градієнтах швидкості зсуву, несучою здатністю граничного шару в критичних умовах роботи, деемульгуючими, антифрикційними та протизношувальними властивостями.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ТА ПРОГРАМА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Стандарти оцінки якості мастильних матеріалів у відповідності до ГОСТ, ДСТУ, DIN, SAE, NLGI.

Існуючі системи класифікації [9, 99] мастильних матеріалів за фізико-механічними та експлуатаційними властивостями дозволяють більш ефективно використовувати мастильні матеріали в вузлах тертя машин і механізмів. В даному розділі розглянуто системи класифікації та стандартизації мастил, що розроблені провідними науковими закордонними установами.

Класифікація мастил NLGI (National Lubricating Grease Institute) розроблена Американським національним інститутом пластичних мастил [30, 100, 101] у співпраці з ASTM International (англ. American Society for Testing and Materials) та SAE International (Society of Automotive Engineers). NLGI розробила категорію якості автомобільних мастил, визначених у стандарті ASTM D4950 «Стандартна класифікація та специфікація автомобільних сервісних мастил» [102]. Класифікація за NLGI включає розподіл мастил за категоріями ступеня консистенції (ступінь в'язкості або густини) та категоріями якості.

За категоріями ступеня консистенції мастила ділять на класи в залежності від рівня пенетрації – чим більше чисельний показник пенетрації, тим м'якше мастило. Відповідно до загальноприйнятої методики, визначення показника пенетрації проводиться за допомогою пенетрометра з конусом, який опускають на п'ять секунд в мастило при температурі 25 °C [30, 103]. Глибина занурення конуса вимірюється і виражається в десятих частках міліметра (рис. 2.1). Зазвичай пенетрацію визначають як у перемішаного, так і не перемішаного мастила. Різниця цих показників характеризує стабільність мастила і здатність витримувати зовнішній механічний вплив.



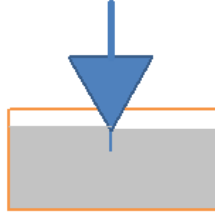
Категорія NLGI	000	2	6
Показник penetрації (0,1 мм)	445 - 475	265 - 295	85 - 115
			

Рис. 2.1. Схема відповідності чисельних значень penetрації та категорії ступеня консистенції мастила за NLGI.

Класифікація NLGI пластичних мастил за консистенцією включає дев'ять категорій – від 000 до 6 (табл. 2.1) [30, 103].

Таблиця 2.1

Класифікація NLGI пластичних мастил за консистенцією

Категорія NLGI	Показник penetрації (0,1 мм)	Консистенція	Призначення
000	445-475	дуже рідка	зубчасті передачі закритого типу
00	400-430	рідка	
0	355-385	напіврідка	центральні системи змащування
1	310-340	дуже м'яка	
2	265-295	м'яка	Шарикові / роликові підшипники
3	220-250	напівтверда	Високошвидкісні підшипники
4	175-205	тверда	
5	130-160	дуже тверда	зубчасті передачі відкритого типу
6	85-115	особливо тверда	

За категоріями якості згідно класифікації NLGI існує 5 класів консистентних мастил: LA, LB, GA, GB, GC [47]. Для визначення відповідності мастила певному класу визначається ряд його властивостей: penetрація, температура краплепадіння, стійкість до окислення і випаровування, зміни консистенції, антикорозійних властивостей, сумісність з еластомерами, низькотемпературний момент обертання і т.д. (табл. 2.2).

Розглянемо представлені NLGI категорії якості докладніше.

Мастила категорії NLGI LA [30, 47]: використовуються для змащування елементів ходової частини та шарнірних з'єднань легкових автомобілів та інших транспортних засобів з легким режимом роботи. Мастила повинні задовільно змащувати

**Обов'язкові випробування консистентних мастил при визначенні
категорії якості NLGI**

Стандарт ASTM	Випробування	Категорія якості NLGI				
		LA	LB	GA	GB	GC
D 217	Пенетрація	+	+	+	+	+
D 566	Температура краплепадіння	+	+	+	+	+
D 1264	Вимивання водою	-	-	-	+	+
D 1742	Температура виділення оливи	-	+	-	+	+
D 1743	Антикорозійні властивості	-	+	-	+	+
D 2266	Знос на чотирьохкульовій машині тертя (ЧМТ)	+	+	-	+	+
D 2596	Граничний тиск на ЧМТ	-	+	-	-	+
D 3527	Стійкість до високої температури	-	-	-	+	+
D 4170	Пітинговий знос	-	+	-	+	+
D 4289	Сумісність з еластомерами	+	+	-	+	+
D 4290	Текучість	-	-	-	+	+
D 4693	Низькотемпературний момент обертання	-	+	+	+	+

елементи ходової частини і шарнірні з'єднання при частій заміні мастила (в легкових автомобілях через кожні 3200 км або частіше). Мастила повинні бути стійкими до окислення і зміни консистенції, а також забезпечувати ефективні антикорозійні та протизношувальні властивості триботехнічних елементів шарнірів та ходової частини в умовах малого навантаження. Зазвичай рекомендуються для даної категорії мастила консистенції NLGI 2, але аналогічно можуть бути використані мастила інших ступенів консистенції NLGI.

Мастила категорії NLGI LB [30, 104]: використовуються для змащування елементів ходової частини та шарнірних з'єднань легкових автомобілів, вантажівок та інших транспортних засобів, що працюють в умовах як легкого, так і важкого режиму. До важкого режиму слід віднести режим, для якого характерні великий інтервал заміни мастила, великі навантаження, вібрації, поява в мастилi під час експлуатації води або інших забруднень. Це мастила вищої якості для ходової частини. Мастила повинні задовільно змащувати елементи ходової частини і шарнірні з'єднання при температурі від -40 до +120 °C при подовженому інтервалі заміни мастила (в легкових автомобілях більше 3200 км). Мастила повинні бути

стійкими до окислення і зміни консистенції, а також забезпечувати ефективні антикорозійні та протизношувальні властивості триботехнічних елементів шарнірів та ходової частини в умовах забрудненості і великих навантажень. Зазвичай рекомендуються мастила консистенції NLGI 2, але аналогічно можуть бути використані мастила інших ступенів консистенції NLGI.

Мастила категорії NLGI GA: використовуються для змащування підшипників коліс легкових автомобілів, вантажівок та інших транспортних засобів, що працюють в звичайних умовах експлуатації в легкому режимі при частій заміні мастила. Мастила повинні задовільно змащувати підшипники в температурному діапазоні від -20 до +70 °C. Додаткових вимог немає.

Мастила категорії NLGI GB: використовуються для змащування підшипників коліс легкових автомобілів, вантажівок та інших транспортних засобів, що працюють як в легкому, так і в помірному режимі. Помірний режим – це звичайні умови експлуатації, які бувають у більшості транспортних засобів. Мастила повинні забезпечувати ефективне змащування контактних поверхонь в широкому інтервалі температур – від -40 до +120 °C і навіть до +160 °C. Мастила повинні бути стійкими до окислення, випаровування, зміни консистенції, ефективно захищати підшипники від корозії і зносу. Зазвичай рекомендуються мастила консистенції NLGI 2, але аналогічно можуть бути використані мастила інших ступенів консистенції NLGI – NLGI 1 і NLGI 3.

Мастила категорії NLGI GC: використовуються для змащування підшипників коліс легкових автомобілів, вантажівок та інших транспортних засобів, що працюють як в легкому, так і у важкому режимах. Важкий режим характерний для умов експлуатації транспортних засобів, підшипники яких нагріваються до високої температури. Це транспортні засоби з дисковими гальмами, які працюють в нестационарному «запуск-зупинка» режимі (автобуси, таксі, міські поліцейські автомобілі і т.д.) або в режимі важкого гальмування (буксирування, важка їзда в горах і т.д.). В даний час це мастила вищої якості для підшипників коліс транспортних засобів. Мастила повинні забезпечувати ефективне мащення контактних поверхонь в широкому інтервалі температур – від -40, до +160 °C і навіть до +200 °C. Мастила

повинні бути стійкими до окислення, випаровування, зміни консистенції, забезпечувати ефективний захист підшипників від корозії і зносу. Зазвичай рекомендуються мастила консистенції NLGI 2, але аналогічно можуть бути використані мастила інших ступенів консистенції NLGI – NLGI 1 і NLGI 3.

Німецький інститут по стандартизації (нім. Deutsches Institut für Normung (DIN) [30, 105] розробив стандарт DIN 51502-1990 [50] і закріпив єдину систему позначення та ідентифікації мастильних матеріалів. Уніфікована класифікація мастил за типом, застосуванням, консистенцією, водостійкістю, максимальною і мінімальною експлуатаційною температурою, типом присадок, що входять в консистентне мастило, дозволяє швидко і легко підібрати мастило для конкретних умов використання відповідного механізму, розшифрувавши всі характеристики за позначенням згідно маркуванню. Стандарт встановлює класифікацію мастил в залежності від галузей застосування, типу дисперсійного середовища, наявності в них протизношувальних і антифрикційних присадок, наповнювачів, а також враховує їх водостійкість і температурний діапазон застосування.

Стандарт DIN 51825: 2004 «Мастила. Мастила густі типу К. Класифікація та вимоги (Lubricants - Lubricating Greases K - Classification And Requirements) [106] застосовується до пластичних мастил, які відповідають від 0 до 4 категорії консистенції за класифікацією NLGI (табл. 2.1) та призначені для змащування роликових підшипників кочення, підшипників ковзання, поверхонь ковзання.

Позначення мастил за стандартами DIN 51502, DIN 51825 [50, 106] включає п'ять груп символів з літер та цифр: перша – позначається однією або двома літерами і вказує на галузь застосування мастила (табл. 2.3); друга – позначається однією або декількома літерами і вказує на наявність в мастилі присадок і наповнювачів (табл. 2.4) та тип синтетичної основи (мастило на основі мінеральної оливи не має символу) (табл. 2.5); третя – цифровий код (від 000 до 6), що несе інформацію про відповідність мастила певній категорії за класифікацією NLGI (табл. 2.1) [47]; четверта – символ з літери, що позначає верхню температурну межу роботоздатності мастила і його водостійкість при контрольній температурі (табл. 2.6); п'ята – цифровий символ, що позначає нижню температурну межу роботоздатності (табл. 2.7).

Таблиця 2.3

Позначення пластичних мастил відповідно до їх застосування

Тип пластичного мастила відповідно до типу вузла тертя	Позначення
Пластичні мастила для роликів підшипників кочення, підшипників ковзання, поверхонь ковзання за стандартом DIN 51825 [106]	K
Пластичні мастила для закритих приводів за стандартом DIN 51826 [107]	G
Пластичні мастила для відкритих приводів, зубчастих приводів (адгезивні мастила без бітуму)	OG
Пластичні мастила для підшипників ковзання і ущільнювачів	M

Таблиця 2.4

Додаткове позначення для пластичних мастил за стандартами DIN

Позначення	Тип мастил
F	Для мастил з твердими добавками (графіт, дисульфід молібдену та ін.)
L	Для мастил з активними речовинами, призначеними для підвищення антикорозійних властивостей та / або стабільності проти окислення
P	Для мастил з антифрикційними та протизношувальними присадками для зниження тертя і зношування в умовах змішаного режиму мащення при експлуатації та / або для підвищення гранично допустимого навантаження

Таблиця 2.5

Маркування мастил на синтетичній або напівсинтетичній основі

Тип синтетичної або напівсинтетичної основи пластичного мастила	Позначення
Поліефірна базова олива	E
Фторвуглеводна базова олива	FK
Синтетична вуглеводнева базова олива	HC
Базова олива на основі ефірів фосфорної кислоти	PH
Полігліколева базова олива	PG
Силіконова базова олива	SI
Інші типи базових олив	X

Таблиця 2.6

Додаткові позначення літерою за стандартом DIN 51825/51826

Додаткова літера	Верхня робоча температура	Водостійкість за DIN 51807 [108], Ступінь оцінки за DIN 51807
1	2	3
C	+60 °C	0 - 40 або 1 - 40
D		2 - 40 або 3 - 40
E	+80 °C	0 - 40 або 1 - 40
F		2 - 40 або 3 - 40
G	+100 °C	0 - 90 або 1 - 90
H		2 - 90 або 3 - 90

1	2	3
K	+120 °C	0 - 90 або 1 - 90
M		2 - 90 або 3 - 90
N	+140 °C	За домовленістю
P	+160 °C	
R	+180 °C	
S	+200 °C	
T	+220 °C	
U	Понад +220 °C	

Таблиця 2.7

Додаткові числа при маркуванні мастил за стандартами DIN

Додатковий індекс	Мінімальна експлуатаційна температура
-10	-10 °C
-20	-20 °C
-30	-30 °C
-40	-40 °C
-50	-50 °C
-60	-60 °C

Пластичні мастила за класифікацією Міжнародної організації по стандартизації ISO (International Organization for Standardization) відносяться до класу L, групи X. На сьогодні чинна класифікація мастил за стандартом ISO 12924: 2010: Lubricants, industrial oils and related products (class L). Classification. Family X (Greases). Стандарт встановлює класифікацію групи X (пластичні мастила), яка входить в клас L (мастильні матеріали, індустріальні оливи та споріднені продукти). Цьому стандарту повністю відповідає міждержавний стандарт ГОСТ ISO 12924-2013 (Матеріали мастильні, індустріальні оливи та споріднені продукти (клас L). Група X (пластичні мастила)) [28]. Зазначені стандарти застосовуються до пластичних мастил різного експлуатаційного призначення: для вузлів та агрегатів літаків і вертольотів, для змащування обладнання, авіаційної наземної техніки та транспортної техніки, вузлів машин та механізмів в машинобудівній та ін. галузях.

Розглянуті стандарти важливі з огляду на вибір мастильного матеріалу певного експлуатаційного призначення, на їх взаємозамінність для вузлів та агрегатів.

2.2. Показники якості та фізичні характеристики досліджуваних мастильних матеріалів.

Державне підприємство «АНТОНОВ», яке входить, згідно постанови Кабінету Міністрів України від 21 березня 2023 р. № 441 до акціонерного товариства «Українська оборонна промисловість», виконує розробку, виготовлення, випробування, сертифікацію літаків типу «Ан», забезпечує найвищу якість повітряних суден при їх виробництві та приймає безпосередню участь у підтриманні льотної придатності літаків «Ан» протягом всього їх життєвого циклу [109]. Перелік літаків «Ан», допущених до відпрацювання чергового етапу ресурсу та строку служби станом на 27.11.2023 наведено в Додатку А.

Згідно «Інструкції з контролю якості пально-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у державній авіації України» [110] про періодичність лабораторної перевірки якості пально-мастильних матеріалів під час зберігання та експлуатації, в переліку мастильних матеріалів зазначені лише палива, мастила, оливи, рідини та ін., які виготовлені за ГОСТ або ТУ. Зокрема, серед групи мастил зазначені мастила графітне, ЦИАТИМ-201, ЦИАТИМ-221, ОКБ-122-7, ВНИИ НП 274Н, ВНИИ НП-279, ВНИИ НП-205, Ера, Сапфір, НК-50 та ін.

Розглянемо галузь застосування авіаційного мастила «ЕРА» (ВНІНП-286М), яке належить до категорії вузькоспеціалізованих мастил та призначено для використання в вузлах авіатехніки: для підшипників кочення і ковзання, зубчастих передач електромеханізмів та систем керування літаків. Мастило проявляє високу механічну стабільність, високу антиокислювальну стабільність, характеризується хорошими антикорозійними, протизношувальними та протизадирними характеристиками, не викликає набухання гумових виробів. Дане мастило розробили за радянських часів на заміну мастила ОКБ-122-7, ЦИАТИМ-221 і ЦИАТИМ-201. Мастило проявляє низьку випаровуваність, його можна застосовувати в широкому інтервалі температур від -60 до +120 °С. Під час використання на поверхні гумових виробів мастило не викликає їхнього набухання. Термін зберігання авіаційного мастила ЕРА становить 5 років. Протягом цього часу воно зберігає всі експлуатаційні

якості та характеристики, на вигляд – однорідна мазь від сірого до світло-коричневого кольору.

Основні фізичні характеристики ВНІНП-286М представлені в табл. 2.8 [111].

Таблиця 2.8

**Нормування показників якості мастила ЕРА (ВНІНП-286М)
за ТУ 38. 101950-00**

Найменування показника	Норма	Метод випробувань
Температура краплепадіння, °С, не менше	180	За ГОСТ 6793
Пенетрація при 25 °С, $\times 10^{-1}$ мм	210-250	
В'язкість при 0 °С і 10c^{-1} , Па·с, не більше	110	
В'язкість ефективна, Па·с, що визначається капілярним віскозиметром при температурі мінус 50 °С і середньому градієнті швидкості деформації 10c^{-1} , не більше	900	За ГОСТ 7163
Колоїдна стабільність при навантаженні 3Н, %, не більше	22	За ГОСТ 7142
Межа міцності на зсув при 20 °С, Па, у межах	500-600	
Межа міцності на зсув при 50 °С, Па, у межах	200-350	За ГОСТ 7143, Метод Б
Масова частка води	Відсутність	За ГОСТ 2477
Вміст механічних домішок	Відсутність	За ГОСТ 6479
Корозійний вплив на метали	Витримує	За ГОСТ 9.080 з доповненням по п.4,3
Колоїдна стабільність, %, не більше	35	
Масова частка вільного луку в перерахунку на NaOH, %, не більше	0,1	За ГОСТ 6707
Випаровуваність при 150°С за 1 год., % мас., не більше	5,0	За ГОСТ 9565

У 2023 році ДП «АНТОНОВ» повідомило про отримання індивідуального членства в Асоціації аерокосмічної та оборонної промисловості Європи (ASD), що дозволить на пряму співпрацювати та обговорювати питання щодо авіакосмічної галузі. Віктор Авдєєв, заступник генерального директора з операційної та адміністративної діяльності ДП «АНТОНОВ» зазначив, що одним з пріоритетних питань, яке стоїть на порядку денному для ДП «Антонов», є імпортозаміщення окремих компонентів та вузлів для літаків. Включення ДП «Антонов» у робочі та секторальні групи Асоціації дозволяє на пряму комунікувати з компаніями-

партнерами, напрацьовувати спільні рішення, обмінюватися досвідом та мати спільні проекти в авіаційній галузі.

Україна активно забезпечує трансфер технологій, який вже став базою для створення високотехнологічної безпекової галузі, де наука, інженерія, металургія, матеріалознавство та інші сектори в прямому контакті з реальним використанням створюють гнучкий та стійкий синтез нової мілітарної економіки [112].

В останні роки попит на різні мастила, що використовуються в технічному обслуговуванні літаків, знизився через більш широке використання багатоцільових мастил. Незважаючи на цю тенденцію, специфічні мастила все ще необхідні як через комерційні, так і через технологічні обмеження. Асортимент продукції AeroShell в значній мірі задовольняє більшість вимог до мастил для літаків закордонного виробництва. Наприклад, з більш ніж 359 точок нанесення мастила на Boeing 737, всі, крім 9, можна змащувати AeroShell Grease 33. Це означає, що цілий ряд мастил можна замінити лише одним, щоб зменшити складські запаси [113].

Авіаційна промисловість більшості країн виробників авіаційної техніки зараз переважно віддає перевагу мастилам загального призначення, що відповідають специфікації MIL-PRF-23827C «Grease, Aircraft and Instrument, Gear and Actuator Screw», прагнучі скоротити асортимент мастил, необхідних для кожного літака [41]. Наприклад, за даною специфікацією в загальному випадку встановлено вимоги до одного класу мастила, яке ефективно в діапазоні температур від -73 градусів до 121 градусів С та відноситься до типів I і II [114].

На початку 2000-х років компанія Boeing запровадила специфікацію багатоцільового мастила (BMS 3-33), щоб замінити кілька мастил, необхідних для їхніх літаків, що згодом призвело до розробки специфікації SAE AMS 3052. Серед доступних мастил AeroShell Grease 33 залишається єдиним продуктом, що відповідає суворим вимогам, викладеним у початковій специфікації BMS 3-33A.

BMS 3-33 – це специфікація Boeing для антикорозійного мастила загального призначення. Мастило на неглинистій основі, яке забезпечує довший термін служби компонентів і механізмів та має покращену зносостійкість і стійкість до корозії [115]. Вона була розроблена для заміни різних мастил, які раніше вимагалися для їхніх

літаків, з метою спрощення процедур технічного обслуговування та зменшення кількості різних мастил, що використовуються в авіації. Специфікація була спробою створити універсальне або багатоцільове мастило, яке могло б задовольнити численні потреби в змащуванні різних компонентів літака. Мета полягала в тому, щоб спростити логістику технічного обслуговування за допомогою одного мастила, яке могло б задовольнити цілий ряд вимог.

Оскільки питання імпортозаміщення стосується і мастильних матеріалів, для дослідження обрано мастило AeroShell Grease 33.

Мастила серії AeroShell спеціально розроблені, щоб досягти ефективності в широкому діапазоні застосувань: захист відкритих колісних підшипників; мащення високонавантажених передач; в підшипниках ковзання, шарикових і роликів; для поверхонь ковзання та ін. Авіаційні мастила можна використовувати для таких цілей, як інгібування корозії, для мащення компонентів, що несуть навантаження, і для мащення компонентів, що працюють при екстремальних температурах. Асортимент AeroShell містить різноманітні багатофункціональні авіаційні мастила.

AeroShell Grease 33 – інноваційне мастило, розроблене на основі літєвої комплексної системи загусників, має виняткові можливості для включення різноманітних патентованих присадок для покращення експлуатаційних характеристик. Ця вдосконалена система загусників слугує основою для майбутніх удосконалень мастил в лінійці мастил AeroShell. Мастило AeroShell Grease 33 містить літєвий комплекс, що загущує синтетичну основу з пакетом антикорозійних та антиоксидантних присадок. Діапазон робочих температур складає $-73 \dots +121$ °C, що на 13 градусів більше в низькотемпературній області, порівняно з мастилом ВНІПІ-286М [41, 116].

Мастило AeroShell Grease 33 зарекомендувало себе як універсальне мастило загального призначення, яке отримало схвалення від Boeing, Airbus, а також від багатьох інших виробників літаків і відповідає вимогам міжнародних стандартів BMS 3-33C, MIL-PRF-23827C (Type I), AIMS 09-06-002, COMAC QPL-CMS-OL-302, SAE AMS 3052, ·NATO Code G-354 [115].

Враховуючи вищезазначене, використання мастила AeroShell Grease 33 може надати експлуатантам авіаційної техніки наступні переваги: зменшення запасів різних типів мастил; легше обслуговування (одне основне мастило для більшості точок застосування); зниження трудовитрат на технічне обслуговування; менша ймовірність неправильного застосування продукту.

Основні фізичні характеристики AeroShell Grease 33 представлені в табл. 2.9 [117].

Таблиця 2.9

Типові фізико-хімічні характеристики AeroShell Grease 33

Властивості	Метод дослідження	Вимоги за специфікаціями BMS 3-33C AIMS 09-06-002 SAE AMS3052A	AeroShell Grease 33
Тип оливи		Синтетична Вуглеводні/ Естер	Синтетична Вуглеводні/ Естер
Колір		Зелено-синій	Зелений
Тип загусника		Літієвий комплекс	Літієвий комплекс
В'язкість базової оливи при, мм ² /с	ASTM D445		
-40°C		-	1840
40°C		-	14.2
100°C		-	3.4
Робоча температура, °C		від -73 до +121	-73 до +121
Температура краплепадіння, °C	ASTM D556	205 min	227
Робоча пенетрація при 25°C	ASTM D217	від 265 до 315	297
Виділення оливи при 100°C через 30 год., %м ¹	ASTM D6184	8 max	2
Вимивання водою при 79°C, %м	ASTM D1264	7,5 max	<6
Втрати від випаровування через 500 год. при 121°C, %м	ASTM D2595	10 max	<10
Протизношувальна здатність при 121°C, год	ASTM D3336	1000 min	>1200
Вантажопідйомність LWI ² при 27°C, кг	ASTM D2596	60 min	>60
Корозійний вплив на мідь через 24 год. при 100 °C	ASTM D4048	1B max	-

¹ – відсоток втрати ваги відповідно до прийнятого стандарту [117, 118];

² – індекс зносу під навантаженням (Load Wear Index) відповідно до ASTM D2596 [119, 120].

В авіації застосовується багато груп мастильних матеріалів, зокрема оливи, мастила, тверді, газоподібні мастильні матеріали та ін. Зокрема, авіаційна олива відіграє важливу роль як основна рідина в експлуатації повітряних суден. Її

застосування варіюється залежно від типу обладнання, де вона служить для змащування як поршневих, так і газотурбінних двигунів в літаках, а також різних компонентів у вертольотах. Основні функції авіаційних олів включують запобігання тертю між деталями, зменшення зносу, захист металевих елементів від корозії, відведення надлишкового тепла та ефективного видалення частинок, що утворюються при терті.

Для трибологічних досліджень обрана маслосуміш СМ-9, яка призначена для застосування в редукторах трансмісії вертольотів у зимовий період. Маслосуміш СМ-9 (ТУ 19.20.29-001-49878493-2022) – суміш авіаційних олів АМГ-10 і ТСГип у співвідношенні 1/3 до 2/3 [121].

Паспорт якості на маслосуміш СМ-9 представлено в табл. 2.10 [121].

Таблиця 2.10

Технічні характеристики маслосуміші СМ-9

Показники	Норма за ГОСТ (ТУ)
Кінематична в'язкість, мм ² /с, при 100 °С, не менше	9-11
Кислотне число, мг КОН/г, не більше	3,5
Температура, °С:	
спалаху в відкритому тиглі, не нижче	140
застигання, не вище	-45
Вміст водорозчинних кислот та лугів, механічних домішок	Відсутність
Індекс в'язкості, не менше	120
Масова частка золи, %, не більше	0,005
Трибологічні характеристики на ЧКМТ при (20±5)°С:	
критичне навантаження, Н, не менше	765
показник зносу при осьовому навантаженні 196 Н, не більше	0,68

Для дослідження обрано два зразки маслосуміші СМ-9: зразок № 1 – олива «Бора Б» СМ-9 (ТУ У 19.2-38474081-017:2018 зі зм. 1 «Оливи трансмісійні «Бора Б»») та зразок № 2 – маслосуміш авіаційна СМ-9 (ТУ 0253-001-49878493-2005 зі зм. 1-13).

В роботі також проведено оцінку триботехнічних показників оливи ВО-12. Досліджувались оливи двох виробників: зразок № 1 – олива «Бора Б» ВО-12 (виробництво: ТОВ «Бора Б», Україна, продукція випускається за ТУ У 19.2-38474081-017:2018 зі зм. 1 «Оливи трансмісійні «Бора Б» Технічні умови») та зразок

№ 2 – олива всесезонна ВО-12 (виробництво: ООО «Квалитет Авиа», продукція випускається за ТУ 38.401-58-359-2005 зі зм. 1).

Паспорт якості на оливу ВО-12 представлено в табл. 2.11 [2].

Таблиця 2.11

Технічні характеристики оливи авіаційної ВО-12

Показники	Норма за ГОСТ (ТУ)
Кінематична в'язкість, мм ² /с:	
при 100 °С, не менше	12
при -30 °С, не більше	15000
Кислотне число, мг КОН/г, не більше	0,08
Температура, °С:	
спалаху в відкритому тиглі, не нижче	240
застигання, не вище	-54
Вміст водорозчинних кислот та лугів, механічних домішок	Відсутність
Індекс в'язкості, не менше	120
Масова частка золи, %, не більше	0,005
Трибологічні характеристики на ЧКМТ при (20±5)°С:	
критичне навантаження, Н, не менше	686
показник зносу при осьовому навантаженні 196 Н, не більше	0,7

2.3. Експериментальні установки для дослідження триботехнічних характеристик пар тертя в умовах кочення та кочення з проковзуванням.

Оптимізація і вибір пар тертя відіграють ключову роль у підвищенні довговічності трибологічних систем, а розробка раціональних циклів випробувань є вирішальним аспектом цього процесу. Ефективність підвищення довговічності трибологічних систем тісно пов'язана з ретельним плануванням і проведенням циклів випробувань, які впливають на точність прогнозування продуктивності системи. У сфері розробки триботехнічних матеріалів прогрес нерозривно пов'язаний з удосконаленням методів випробувань, вимірюванням вихідних характеристик і методологій, що використовуються для оцінки ефективності роботи пар тертя.

Значна увага приділяється вивченню нестационарних режимів роботи, де переважають режими змішаного та граничного мащення. Саме за таких динамічних умов особливо активуються процеси зношування, плівкоутворення та інші зміни на металевих поверхнях [122, 123, 124]. Розуміння та врахування цих умов є важливим

для всебічного триботехнічного аналізу та розробки матеріалів, здатних протистояти випадкам, що виникають при змішаному та граничному режимах мащення.

Дослідження триботехнічних параметрів пар тертя передбачає використання лабораторної одноконтактної установки СМЦ-2 з цифровим керуванням потужністю, живлення замкнутого силового контуру здійснюється від ГСК-1500Ж (генератор постійного струму). (рис. 2.2). Ця установка дозволяє проводити випробування в нестационарних умовах мащення, зокрема імітація циклів пуску і зупинки [125]. Однією з ключових переваг даної СМЦ-2 є безінерційна робота, що забезпечує швидке і точне регулювання, а іншою – висока точність підтримки параметрів при різних умовах навантаження і повторюваності циклів.

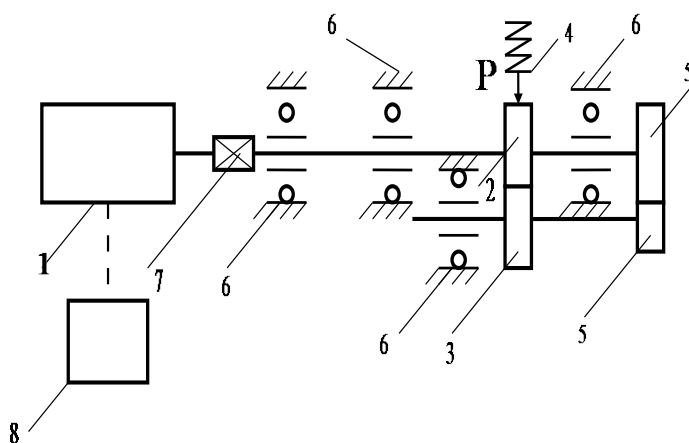


Рис. 2.2. Установка СМЦ-2 для дослідження мастильної властивості оливо у стаціонарних і нестационарних режимах тертя: кінематична схема: 1 – генератор; 2, 3 – дослідні зразки; 4 – навантажувальний механізм; 5 – змінні шестерні; 6 – опори кочення; 7 – муфта; 8 – цифровий блок керування потужністю генератора.

Оцінка працездатності пар тертя проводилася із використанням циліндричних роликів діаметром 50 мм в умовах кочення з проковзуванням (рис. 2.3).

Функціональні можливості комплексу СМЦ-2 різноманітні, що дозволяє

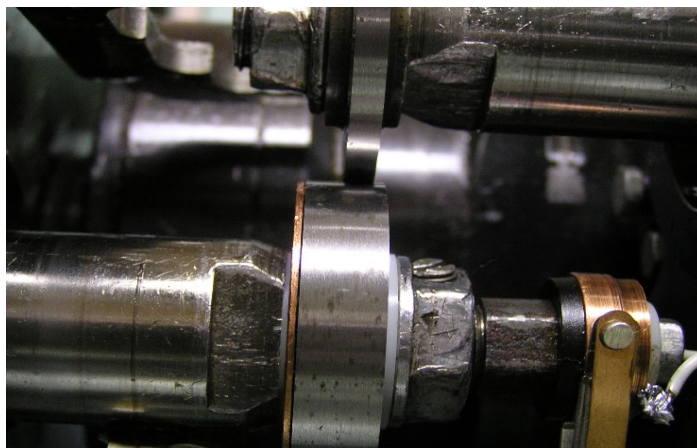


Рис. 2.3. Загальний вид вузла тертя.

задовольнити широкий спектр вимог до випробувань [126]:

1. Регулювання різних режимів пуску: СМЦ-2 дозволяє регулювати режими пусків тривалістю від 1 до 10 секунд, з можливістю варіації різних кінцевих умов для стаціонарного режиму. Це дозволяє моделювати і аналізувати різні робочі режими.

2. Регулювання швидкості обертання зразка: установка дозволяє регулювати швидкість обертання зразка в стаціонарному режимі в діапазоні від 1,67 до 16,67 метрів в секунду. Тривалість випробувань – в діапазоні від 1 хвилини до 10 годин.

3. Налаштування режимів зупинки: СМЦ-2 дозволяє регулювати різні режими зупинки тривалістю від 1 до 10 секунд, що забезпечує контроль над умовами в кінці циклу тестування.

4. Повторюваність циклу: можливість багаторазового повторення циклів пуск-зупинка або пуск-стаціонарний стан-зупинка за однакових умов підвищує надійність і відтворюваність експериментальних результатів.

Використання тензометричного методу під час швидкої зміни початкового моменту тертя підвищує надійність оцінки даного параметру при випробуваннях. Закріплюючи фланець приводного генератора на вільній опорі з підшипниками і використовуючи тензометричні датчики, СМЦ-2 досягає більш чутливого і точного вимірювання моментів тертя під час динамічних переходів. В якості тензодатчиків використовувалися дротяні тензорезистори загального призначення з одноелементною петельною решіткою на плівковій основі ПКП-20-200 з номінальним опором 200 Ом і робочим струмом 30 мА; коефіцієнт тензочутливості –

$2,0 \pm 2$, поперечна чутливість – 2 % від граничного значення, межа вимірювання відносних деформацій – 3×10^{-3} . Чутливість тензорезисторів та інтеграція спеціального перетворювача сприяють точному збору даних, які в подальшому записуються та аналізуються за допомогою програмно-апаратного комплексу (ПАК), що підвищує загальну надійність триботехнічних випробувань, які проводяться за допомогою комплексу СМЦ-2.

Для експериментальних досліджень використовувався в роботі програмно-апаратний комплекс (ПАК), який являє собою комплексну систему, що складається з ключових компонентів: установки тертя (УТ), електронного блоку (ЕБ), спеціалізованого програмного забезпечення (ПЗ) «Тертя» (рис. 2.4) [127, 128].

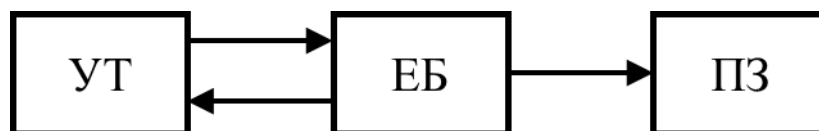


Рис. 2.4. Блок-схема програмно-апаратного комплексу.

ПАК розроблений з метою досягнення більш надійних результатів досліджень, відтворюваності умов експерименту, проведення випробувань в режимах кочення, перевагою кінематичної схеми установки є розширення діапазону проковзування між контактуючими поверхнями, в порівнянні з можливостями установки СМЦ-2.

На рис. 2.5 показано схему ПАК. Для реалізації цих цілей ПАК має два кінематично незалежні приводи (1, 2). Нижній ролик (3) приводиться в обертальний рух кроковим двигуном (4), статор якого встановлений на мотор-вагах (5). Мотор-ваги мають рухому підвіску зовнішнього валу на двох опорах з конічними підшипниками, з'єднаних з внутрішнім валом, з'єднаним з ротором. Це з'єднання включає в себе втулку зі шпонкою і з'єднане з валом, на якому розміщений зразок для випробування. До мотор-вагів прикріплено тензорезистор для реєстрації моменту тертя [127]. Верхній ролик (6) приводиться в рух другим кроковим двигуном (7), закріпленим на зовнішньому валу (2). Точки кріплення випробувальних роликів ізолювані від маси пристрою, що забезпечує реєстрацію падіння напруги в мастильному шарі в режимі нормального тліючого розряду для визначення товщини мастильного шару в контакті [129].

Кроковими двигунами керують за допомогою програмування електронного блоку. Навантаження на пристрій регулюється за допомогою важільно-маятникового принципу балансування, прикладеного до осі валу навантаження (8, 9).

Внизу масляної ванни є два термотени (10), які використовуються для підігріву мастильного матеріалу, вимірювання температури мастильного середовища виконується за допомогою термопари (11). Для візуального спостереження за зразками на торцевій і верхній сторонах встановлені оглядові вікна.

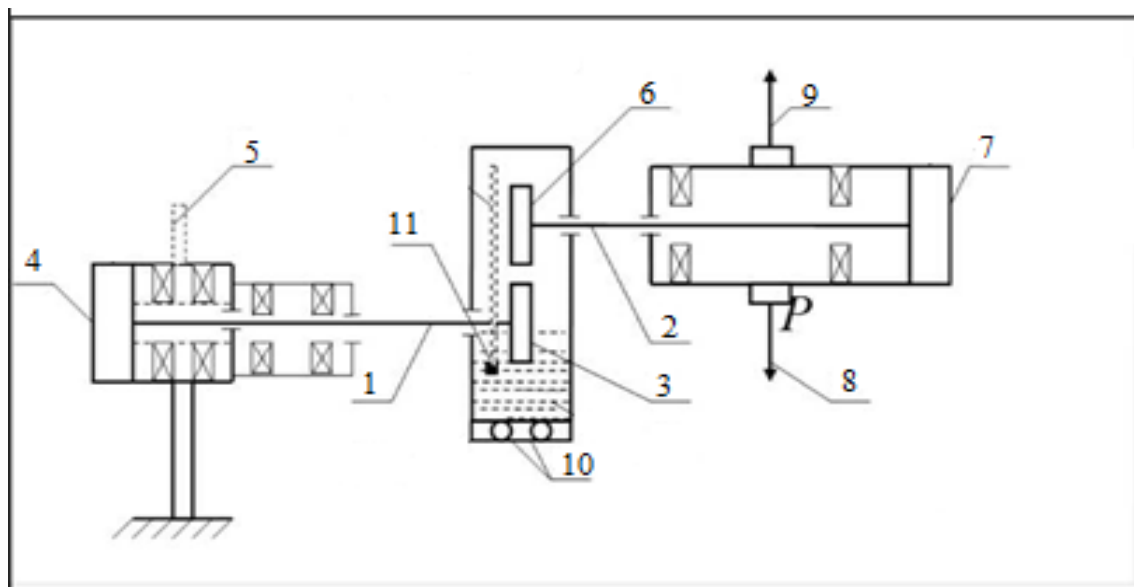


Рис. 2.5. Схема ПАК для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів.

Електронний блок програмує режими обертання та виконує кілька ключових функцій [127]:

- формування та передача сигналів керування на дослідну установку;
- прийом та первинна обробка результатів з датчиків дослідної установки (момент тертя, швидкість обертання роликів, температура та падіння напруги в мастильному матеріалі по товщині шару в точці контакту);
- передача отриманих результатів на ПК для подальшого опрацювання за допомогою спеціального програмного забезпечення.

Програмне забезпечення спеціально розроблено для взаємодії з електронним блоком установки тертя, автоматичного моніторингу та обробки триботехнічних характеристик дослідних зразків. Воно складається з двох підпрограм:

- підпрограма збору даних «ACCEPT»;
- підпрограма обробки даних «PROCESSING».

Підпрограма збору даних працює як у складі ПАК, так і в автономному режимі [38, 130]. Вона отримує дані від електронного блоку по каналу RS-232, отримуючи інформацію про контактну напругу при 2 і 4 А (U_k), крутний момент (M), частоту обертання зразка (n_1, n_2) і об'ємну температуру мастильного матеріалу (T_o) (рис. 2.6). Такий системний підхід забезпечує ефективний збір та обробку даних, що сприяє всебічному аналізу триботехнічних характеристик дослідних зразків.

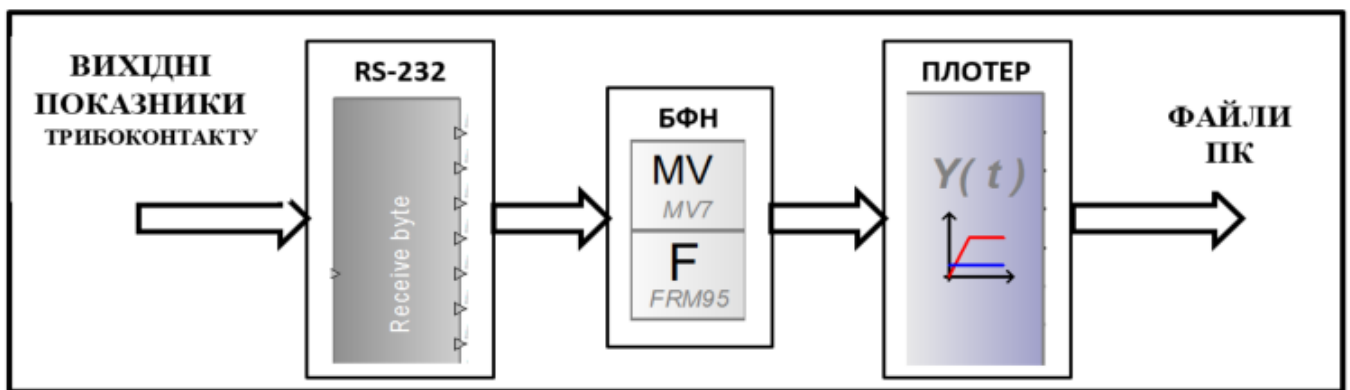


Рис. 2.6. Функціональна схема підпрограми «ACCEPT»: RS-232 – послідовний канал прийому даних; БФН – програмний блок фільтрації і нормування вхідних сигналів; плотер – графічне представлення фізичних величин вхідних сигналів.

Вхідні коди проходять обробку через програмний блок фільтрації та нормалізації (БФН), спеціально розроблений для усунення помилкових сигналів, забезпечення плавного переходу та перетворення кодів у реальні фізичні величини. Ця підпрограма відіграє вирішальну роль в уточненні даних, блокуючи неточності і забезпечуючи більш точне представлення реальних параметрів. БФН використовує програмний модуль плотера для візуального представлення фізичних значень вхідних сигналів. Після завершення експерименту згенеровані графіки зберігаються для подальших розрахунків триботехнічних параметрів за допомогою підпрограми обробки даних.

Досліджувані нестационарні умови тертя мають циклічний характер, що включає послідовність режимів пуску, стаціонарної роботи, гальмування та зупинки, як показано на рис. 2.7 [1].

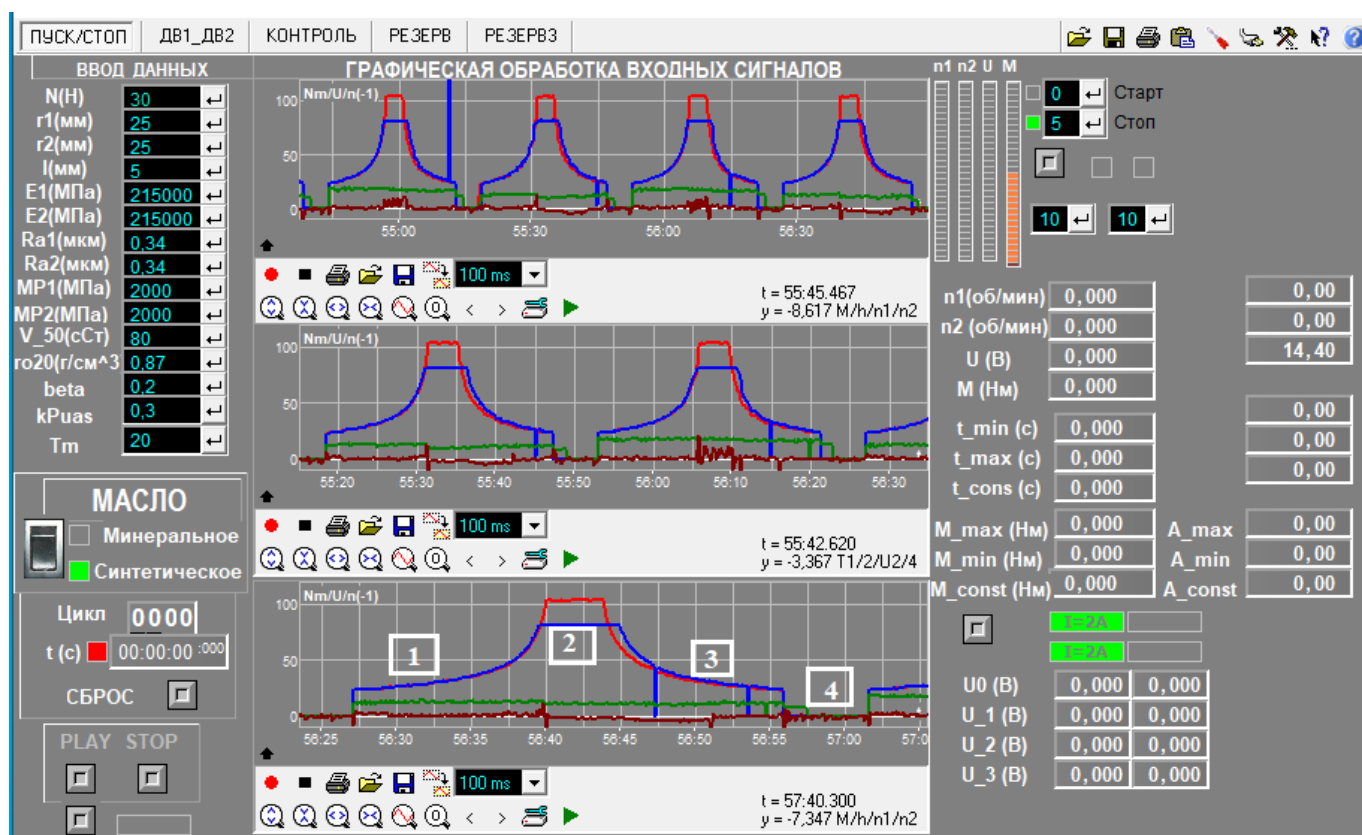


Рис. 2.7. Схема роботи трибосистеми в нестационарних умовах тертя: 1 – запуск; 2 – стаціонарна робота; 3 – гальмування; 4 – зупинка.

Максимальна швидкість обертання дослідних зразків – 1000 об/хв, в експериментах використані різні режими проковзування (від 3 до 40 %).

Інтерфейс підпрограми обробки даних представлено на рис. 2.8. Початкові дані (зона 1) необхідно ввести перед початком запуску підпрограми, зона 2 – вибір типу мастильного матеріалу, зона 3 – за необхідності обнулити лічильник таймера, зони 11 – очистка таблиці входних даних і зона 12 – очистка результатів роботи підпрограми, а також відкрити файл із збереженими графіками з підпрограми «RECEIVE» (зона 5). Дані з графічного модуля відображення результатів, після активації кнопки «PLAY» (зона 4), спрямовуються до програмного модуля для нормування та фільтрації заданих сигналів.

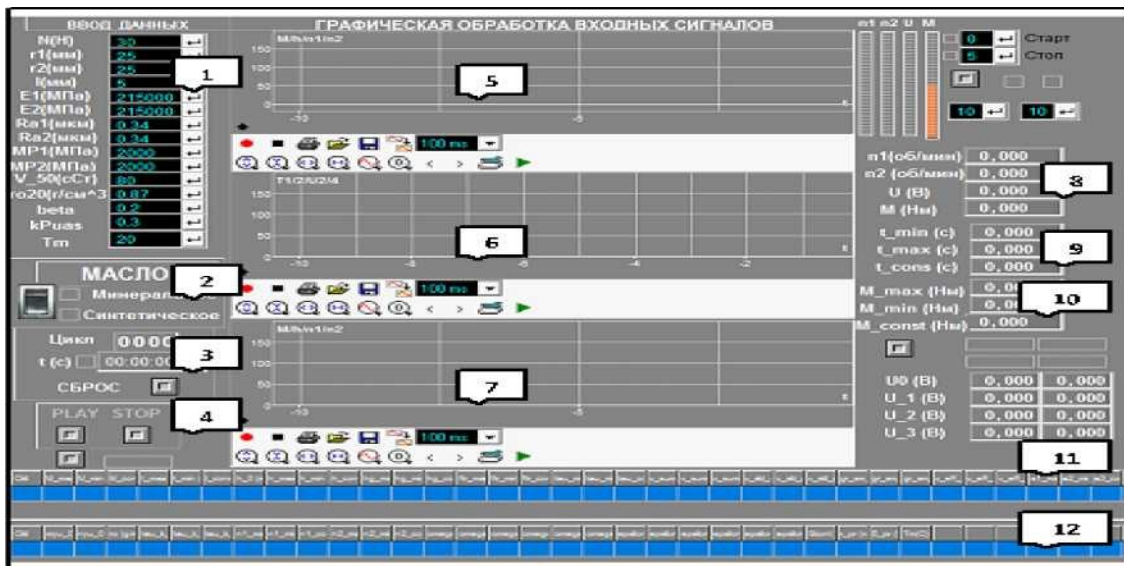


Рис. 2.8. Інтерфейс підпрограми обробки даних.

Програмний блок математичної обробки даних працює шляхом виконання розрахунків за заданим алгоритмом [127]. Додатковою функцією є окремий канал програми, спеціально розроблений для візуалізації в режимі реального часу, що дозволяє динамічно оцінювати зміни ключових триботехнічних параметрів трибоконтакту (рис. 2.9).

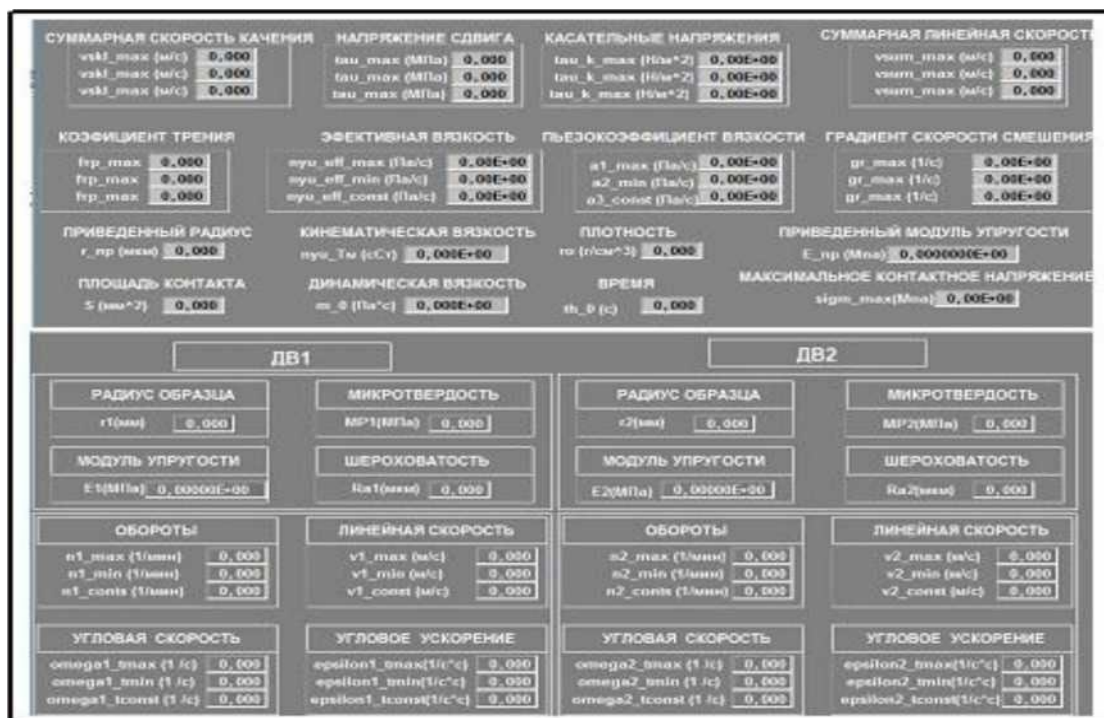


Рис. 2.9. Зовнішній вигляд каналу контролю роботи підпрограми «PROCESSING».

Після завершення кожного циклу випробування отримані результати систематично записуються і зберігаються в таблиці. Після обробки всіх циклів накопичені результати експортуються в програму EXCEL для подальшого поглибленого аналізу. Такий підхід дозволяє зручно представити та проаналізувати дані в зручному для користувача середовищі. Використання EXCEL як платформи для подальшого аналізу підвищує доступність та інтерпретованість даних, сприяючи більш детальному та всебічному вивченню триботехнічних характеристик досліджуваних зразків. Табличний формат EXCEL забезпечує структуроване представлення даних.

2.4. Методи оцінки триботехнічних характеристик вузла тертя, реологічних властивостей мастильного матеріалу.

Оцінку товщини мастильного шару проводили за допомогою методу падіння напруги в режимі нормального тліючого розряду (вимірювання падіння напруги в мастильному шарі проводили при струмах 2 (U_{2A}) і 4 (U_{4A}) А). Після цього розраховується товщина мастильного шару (h) за допомогою каліброваних таблиць [125, 126, 131]:

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

де k – коефіцієнт, який варіюється залежно від типу мастильного матеріалу.

Коефіцієнт тертя визначається за наступною формулою:

$$f = \frac{2M}{dN}, \quad (2.2)$$

де M – крутний момент, d – діаметр зразка, N – навантаження.

Для визначення реологічних характеристик мастильного матеріалу розраховували градієнт швидкості зсуву (γ), напруження зсуву (τ) за допомогою наступних співвідношень:

$$\gamma = \frac{V_{\text{ковз}}}{h}, \quad (2.3)$$

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

де $V_{ковз}$ – швидкість ковзання, S – площа контакту.

В умовах, що передбачають часті пуски-зупинки, на контактних поверхнях відбувається формування граничних адсорбційних шарів, товщина яких визначається в момент зупинки. Під час пуску товщина шару мастильного матеріалу збільшується, в кінцевому підсумку стабілізується при досягненні заданого режиму обертання. Ця товщина являє собою загальну товщину мастильного шару в контакті, що включає як гідродинамічні, так і негідродинамічні компоненти.

Ефективна в'язкість розраховується під час початкового вимірювання при пуску (після 0,01 секунди), що відповідає ефективній в'язкості структурованих граничних шарів мастильного матеріалу на активованій тертям металевій поверхні.

В нестационарних умовах роботи, в період зупинки, за відсутності гідродинамічної складової товщини мастильного шару, ефективна в'язкість в контакті визначалась за формулою Баруса:

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha \sigma_{max}), \quad (2.5)$$

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

Г. Німанн і К. Штоссель запропонували формулу для визначення ефективної в'язкості мастильних матеріалів, яка після перетворень має вигляд:

$$\eta_{1,2} = \frac{1}{1,31 \cdot 10^8} \frac{f^2 p_{max}^2 \rho}{v_{ск} \alpha}, \quad (2.6)$$

f – коефіцієнт тертя, p_{max} – контактний тиск, МПа, ρ – приведений радіус кривизни контактуючих поверхонь, м; $v_{ск}$ – швидкість ковзання, α – п'єзокоефіцієнт в'язкості.

В роботі ефективна в'язкість обчислюється в період, коли момент тертя, швидкість ролика і падіння напруги в шарі мастильного матеріалу стабілізуються.

$$\eta_{ef} = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (2.7)$$

Це дає уявлення про комплексні в'язкісні характеристики мастильного шару під час структуризації граничних шарів та прояв неньютонівських властивостей мастильного середовища.

Метод визначення питомої роботи тертя в контактї спрямований на розуміння кінетики зміни енергетичних характеристик контакту. Для досягнення цієї мети в реальному часі реєструються дані про момент тертя та визначається швидкість обертання контактних поверхонь через заздалегідь задані інтервали часу (рис. 2.10, а). Потім розраховується питома робота тертя шляхом інтегрування площі під кривою моменту тертя (рис. 2.10, б). Діапазон інтегрування вибирається довільно (рис. 2.10, в), виходячи з часової координати часу роботи елементів трибоспряження, з урахуванням кута повороту контактних поверхонь при фіксованій частоті обертання в обраний момент часу:

$$A = \left[\left| \int_0^{t_i} M_i(t) \cdot 2\pi n_i(t) dt - \frac{1}{2} \sum_0^{i=n_{ti}} J_{\Pi_i} \cdot \omega_i^2 \right| \right] / F, \quad (2.8)$$

де M – момент тертя; n , ω – відповідно частота обертання та кутова швидкість обертання (при проковзуванні обчислюється середнє арифметичне значення даних параметрів для двох елементів трибоспряження); t – час тривалості циклу; J_{Π} – полярний момент інерції обертальних деталей ПАК; F – номінальна площа контакту по Герцу.



Рис. 2.10. Реєстрація моменту тертя в реальному часі.

Для вимірювання моменту тертя використовуються чотири тензодатчики (інтегровані в електричний ланцюг за допомогою мостової схеми), що підвищує чутливість і усуває похибки вимірювання.

Для оцінки зносу дослідних зразків використовувався метод штучних баз, коли на сталеву поверхню дослідного ролика наносився відбиток за допомогою приладу ПМТ-3 (рис. 2.11), що дозволило досягти більш точних і об'єктивних результатів в оцінці зносу контактних поверхонь [132].

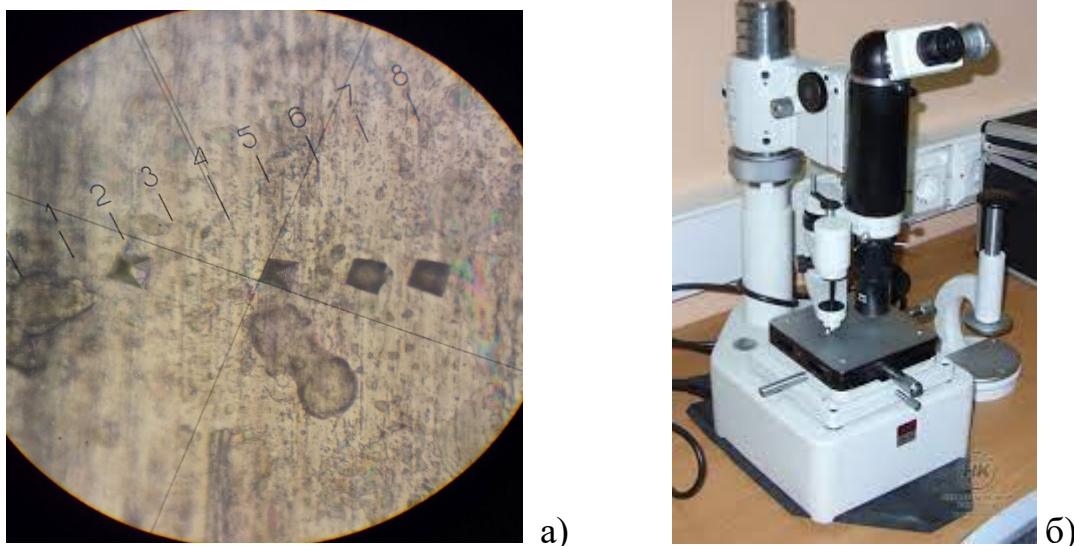


Рис. 2.11. Відбитки індентора (а) приладу ПМТ-3 (б) при визначенні лінійного зносу контактних поверхонь.

Глибина відбитку піраміди при куті $\alpha = 136^\circ$ розраховується за формулою:

$$h = \frac{d}{7} \quad (2.9)$$

Порівняння глибини цих відбитків до та після експерименту дозволяє визначити величину лінійного зносу (Δh):

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \frac{(d_1 - d_2)}{7}, \quad (2.10)$$

де h_1, h_2 – глибина відбитка до та після експерименту; d_1, d_2 – довжина діагоналі відбитка до та після експерименту (рис. 2.12).

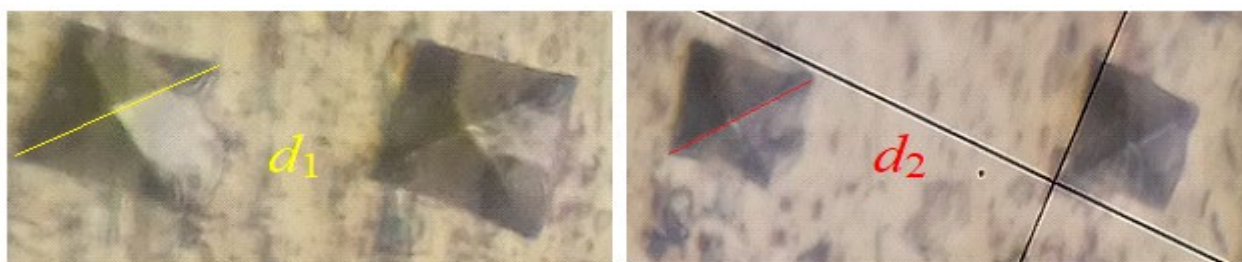


Рис. 2.12. Вимірювання довжини діагоналі відбитка індентору на ПМТ-3.

В роботі прилад ПМТ-3 також використовувався для аналізу мікротвердості матеріалу контактних поверхонь до та після експерименту.

2.5. Методика оцінки триботехнічних властивостей емульсій мастило-вода.

У даній роботі розроблена методика оцінки впливу води на триботехнічні властивості мастил (рис. 2.13).

Вода може бути присутня в мастильних матеріалах у вигляді вільної, розчиненої або емульгованої води. Через різні хімічні властивості мастильний матеріал і вода не змішуються, а розділяються на два різних шари. Оскільки вода має вищу щільність, ніж мастильний матеріал, вільна вода накопичується в нижній частині. Однак, залежно від складу базової основи та типу присадок, різні мастильні матеріали можуть утримувати дуже різну кількість води в розчиненій фазі (температура та тиск також впливають на те, скільки води може утримувати рідина) [133].

За межами рівня насичення мастильного матеріалу вода присутня у вигляді вільної води або емульсії. Емульсія – це стан, у якому вода знаходиться у вигляді дрібних крапель під час перемішування. Наявність в мастильному матеріалі емульгуючої присадки також може призвести до утворення емульсії.

Емульсії мастило – вода готували в прозорій ємності. Спочатку в ємність заливають мастильний матеріал, після зважування на прецизійних вагах з точністю до 0,1 г додається відповідна маса води до необхідного масового відсотка. Потім шпателем протягом 10-15 хвилин перемішуються складові в ємності. Надалі за допомогою оптичного мікроскопа проводиться візуальна оцінка якості змішування компонентів та утворення емульсії. Після приготування емульсії відбирають пробу для досліджень.

Для дослідження емульсій в умовах ковзання випробування проводяться на натурній установці, що імітує контакт циліндр-площина [134]. Відповідно до методики дослідження, 2 зразки розташовувалися у діаметрально протилежних точках контртіла (контрзразка) (рис. 2.14).

Визначення максимального тиску (p_{max}) в контакті проводять відповідно до теорії контактних деформацій пружного тіла, яка передбачає лінійний початковий контакт досліджуваних зразків [135]:

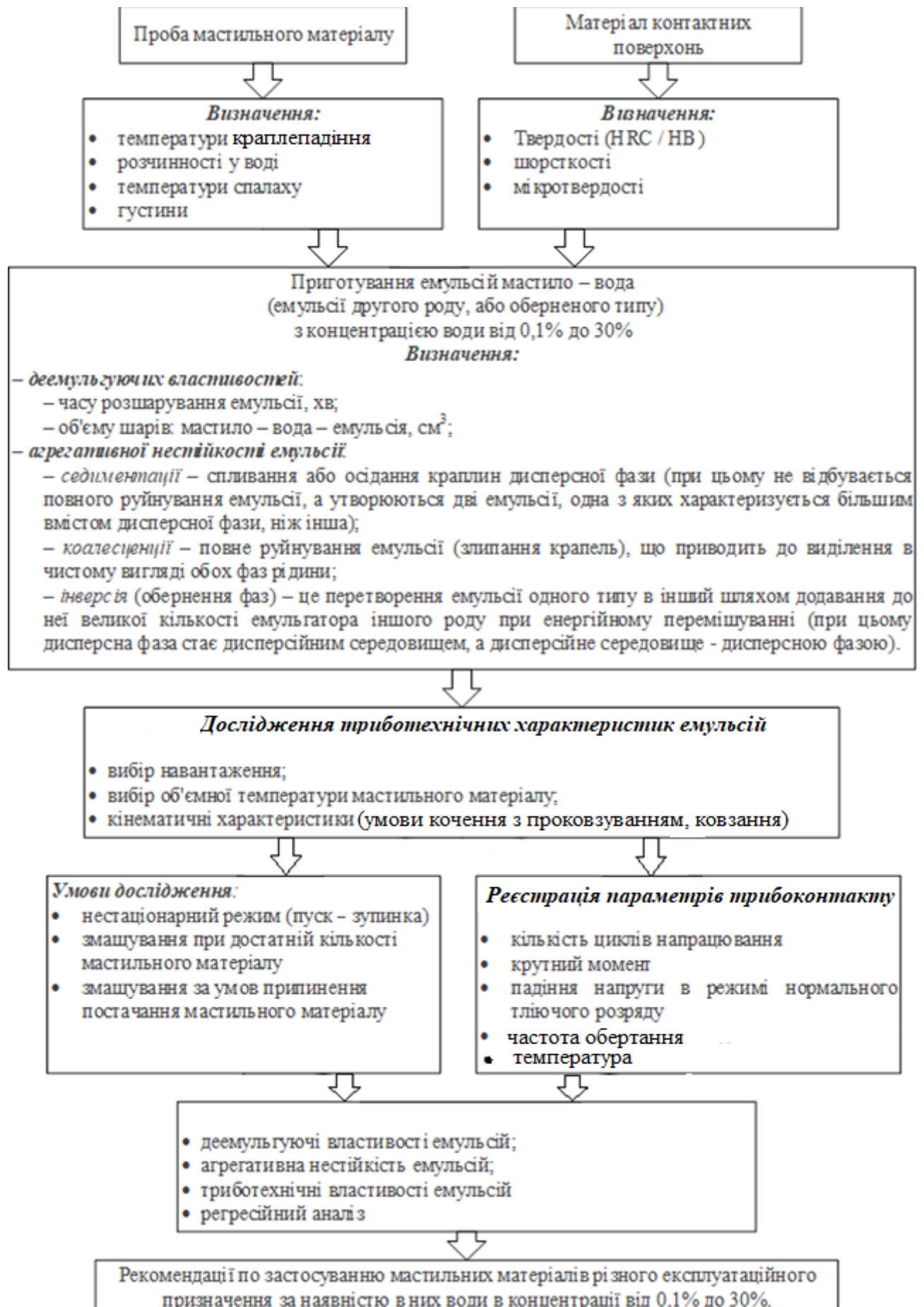


Рис. 2.13. Алгоритм оцінки впливу води на триботехнічні властивості мастил.

$$p_{max} = 0,564 \sqrt{\frac{N_l}{\Theta_\Sigma r}} \text{ [МПа]}, \quad (2.11)$$

де N_l – нормальне навантаження на одиницю довжини, r – радіус циліндричного тіла, $\Theta_\Sigma = \Theta_1 + \Theta_2$ – пружна стала для випадку двох тіл, що деформуються.

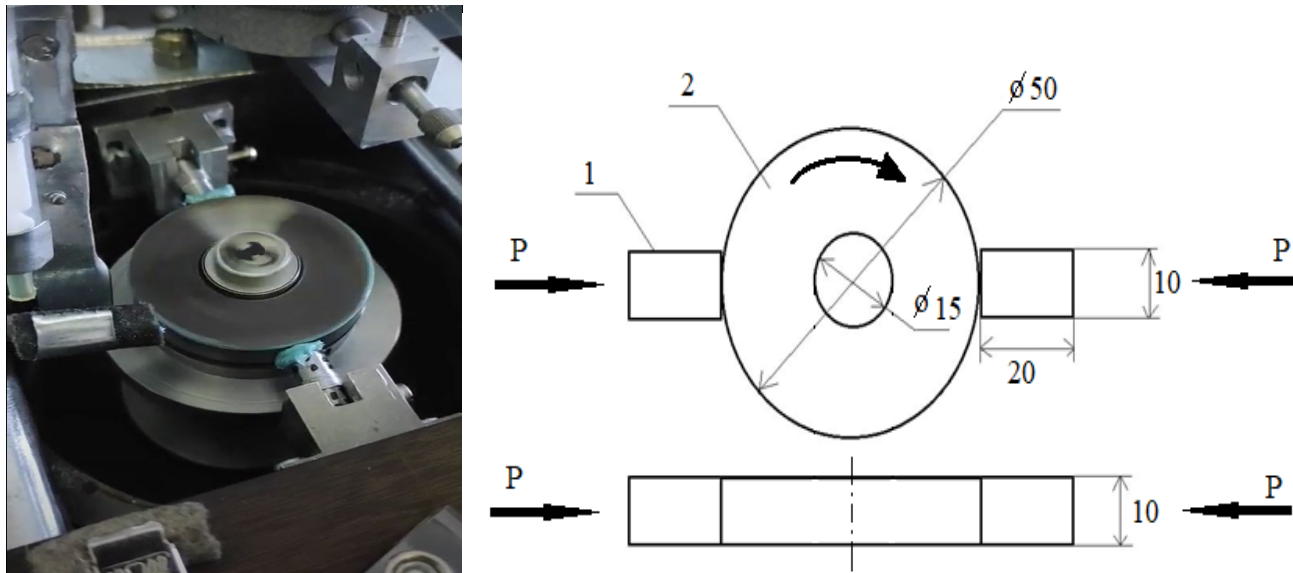


Рис. 2.14. Схема контакту ролик – циліндр на натурній установці: 1 – дослідні зразки; 2 – констртіло.

Швидкість ковзання встановлюють в діапазоні 0,2 – 3,0 м/с. Дослідження тривають до стабілізації моменту тертя.

Дослідження триботехнічних характеристик емульсій в умовах кочення та кочення з проковзуванням проводять на експериментальних установках, представлених в розділі 2.3.

2.6. Статистичний аналіз та інтерпретація результатів експериментальних досліджень.

Статистична обробка результатів експерименту необхідна для аналізу і інтерпретації отриманих даних з метою забезпечення достовірності та надійності висновків. Це допомагає виявити взаємозв'язки та залежності між змінними, визначити статистичну значущість результатів та оцінити рівень невпевненості вимірювань. Статистичний аналіз допомагає уникнути випадкових помилок,

підтвердити або спростувати гіпотези, а також покращити якість експерименту та забезпечити об'єктивність його результатів [136].

Для статистичної обробки результатів дослідження було використано комплексне програмне забезпечення Windows для статистичного аналізу, візуалізації даних і прогнозувальної аналітики Statgraphics Centurion (рис. 2.15) Даний програмний продукт має широкий набір функцій і інструментів, які дозволяють виконувати статистичний аналіз і обробку даних з високою точністю і надійністю.

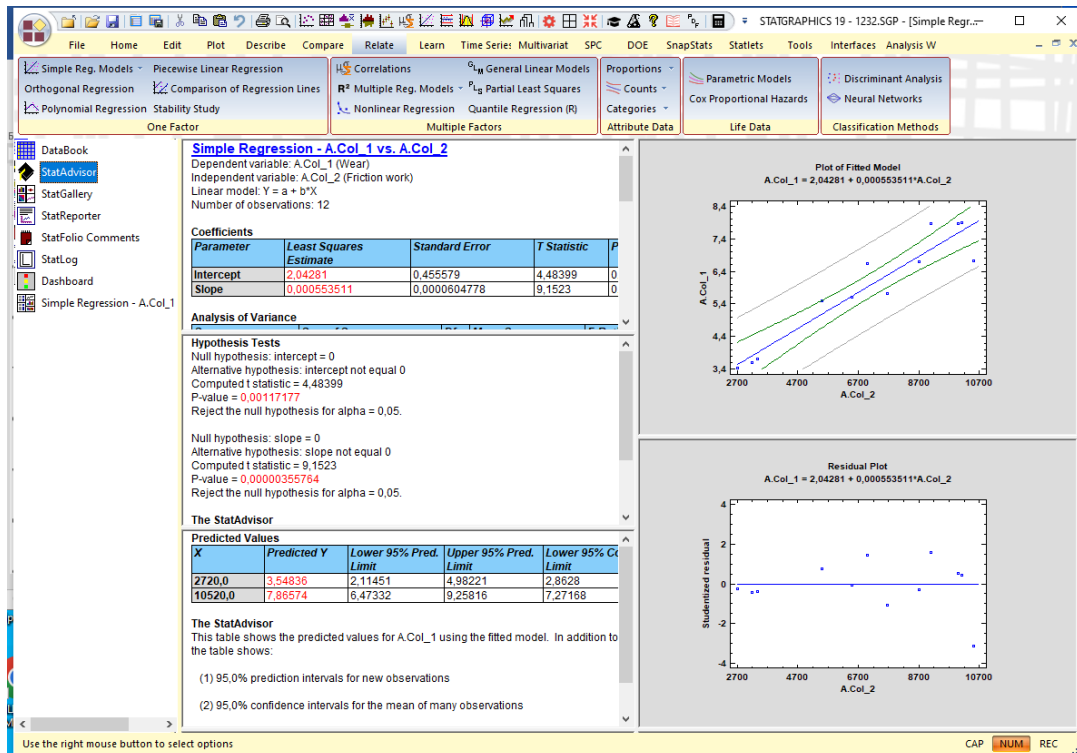


Рис. 2.15. Інтерфейс програмного продукту для статистичної обробки результатів дослідження.

Цей пакет має низку спеціальних властивостей, які істотно полегшують аналіз і прогнозування даних та змістовну інтерпретацію отриманих результатів. До них насамперед слід віднести StatFolio (статистичний портфель), StatWizard (статистичний помічник), StatGallery (статистична галерея), StatReporter (статистичний звіт), Snapstats (швидкий статистичний аналіз). Особливо корисним для практиків є StatAdvisor (статистичний консультант), який пояснює результати статистичного аналізу у зручній формі для представлення.

Подібно до багатьох статистичних програм, STATGRAPHICS Centurion містить типові використовувані статистичні процедури, включно з регресією і дисперсійним аналізом (ANOVA). STATGRAPHICS Centurion також включає такі найбільш важливі додаткові процедури:

- 1) розширений регресійний аналіз;
- 2) багатофакторні методи аналізу;
- 3) контроль якості;
- 4) планування експериментів;
- 5) аналіз часових рядів;
- 6) прогнозування.

Багатофакторний аналіз [137], який використовувався в роботі, передбачає побудову підсумкової таблиці і визначення основних статистичних даних для залежної (y) і кожної незалежної (x) змінної дослідження. Даний багатофакторний аналіз створюється шляхом організації результатів різних обчислень і визначення наступних параметрів:

– середнього математичного очікування для кожної змінної (Average):

$$\hat{M}[X] = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.13)$$

де x_i , \bar{x} – значення одиничного результату та середнє арифметичне однієї незалежної змінної;

– оцінка дисперсії (*Variance*) (міра розсіювання значень випадкової величини щодо її середнього значення):

$$D[X] = \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; \quad (2.14)$$

– оцінка середнього квадратичного відхилення (*Standard deviation*):

$$\sigma[X] = \sigma = \sqrt{D[X]}; \quad (2.15)$$

– коефіцієнт варіації (*Coeff. of variation*), що характеризує однорідність вибірки (вибірка вважається однорідною, якщо коефіцієнт варіації не перевищує 33 % (для розподілів, близьких до нормального)):

$$V_\sigma = \frac{\sigma}{\bar{x}}; \quad (2.16)$$

– мінімальне (*Minimum*) та максимальне (*Maximum*) значення відповідної вибірки;

– розмах вибірки (*Range*):

$$Range = x_{max} - x_{min}; \quad (2.17)$$

– стандартизований коефіцієнт асиметрії β_1 (*Std. Skewness*), що являє собою ступінь «скошеності» розподілу випадкової величини щодо середнього значення (для симетричних функцій щільності розподілів оцінка β_1 має бути близькою до нуля (нормальний закон розподілу), тоді як для розподілу, гістограма якого має «довгу частину», розташовану праворуч від її вершини, $\beta_1 > 0$, а якщо ліворуч – $\beta_1 < 0$):

$$\beta_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)\sigma^3}, \quad (2.18)$$

– стандартизований коефіцієнт ексцесу (*Std. Kurtosis*), що характеризує рівень загострення вершини розподілу (крива розподілу в районі її модального значення):

$$\beta_2 = \frac{n(n+1) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 - 3(n-1) \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^2}{(n-1)(n-2)(n-3)\sigma^4}, \quad (2.19)$$

Одним з основних коефіцієнтів, що вимірюють зв'язок між варійованими ознаками x і y , є коефіцієнт кореляції r – коефіцієнт кореляції Пірсона (the Pearson correlation coefficient or the Pearson Product-Moment Correlation Coefficient) [138], який знаходяться в межах від 0 до ± 1 .

Даний кореляційний аналіз дозволить визначити ступінь детермінованості залежної змінної у порівнянні із незалежними змінними, визначити внесок окремих незалежних змінних у зміну залежної змінної. З іншої сторони вказує на силу лінійного зв'язку між змінними за шкалою від -1 до +1. Чим більше абсолютне значення коефіцієнта кореляції, тим сильніший лінійний зв'язок між двома змінними.

Коефіцієнт кореляції визначається за виразом:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.20)$$

де x_i , \bar{x} – значення одиничного результату та середнє арифметичне однієї незалежної змінної; y_i , \bar{y} – значення одиничного результату та середнє арифметичне залежної змінної.

При проведенні багатофакторного і регресійного аналізів P -Value і коефіцієнти, значущість яких розглядається, оцінюються разом і вказують на взаємозв'язки між змінними в обраній моделі, чи є аналіз статистично значущим, а також дають уявлення про характер цих взаємозв'язків [139]. P -Value є скороченою формою для ймовірності і обчислюються за допомогою таблиць на основі z -показника, t -показника або значень χ^2 -квадрат [140]. В табл. 2.12 наведено оцінку значень P -Value [141].

Загалом слід відзначити, що багатофакторний аналіз допомагає уникнути

Таблиця 2.12

Інтерпретація показника P -Value

$P \geq 0,1$	Відсутність доказів проти нульової гіпотези: дані узгоджуються з нульовою гіпотезою
$0,05 \leq P < 0,1$	Низький рівень доказів проти нульової гіпотези на користь альтернативи
$0,01 \leq P < 0,05$	Помірні докази проти нульової гіпотези на користь альтернативи
$0,001 \leq P < 0,01$	Переконливі докази проти нульової гіпотези на користь альтернативної
$P < 0,001$	Дуже сильні докази проти нульової гіпотези на користь альтернативної

питання порівняння середніх значень між групами даних, переносючи увагу на більш широкий аспект – чи існують суттєві різниці між групами. Фундаментальна стратегія багатофакторного аналізу полягає в систематичному дослідженні розбіжностей в групах, що порівнюються, а також у дослідженні різноманітності чинників між порівнюваними групами [142].

Використання регресійного аналізу обробки експериментальних даних дозволяє здійснити прогнозування щодо вираження взаємозв'язку між змінними, які впливають на явище, і факторами [143]. В даному випадку, регресійний аналіз припускає, що чим більше вибірок даних, тим більше число збігається з середньою відповіддю значення $E(y)$. Безперервний і лінійний зв'язок характеризує залежну

змінну. Регресійний аналіз, як правило, спрямований на аналіз глибини зв'язку між конкретною залежною змінною та незалежними змінними. Регресійний аналіз не обмежується вивченням лише однієї незалежної змінної [144], одночасно розглядається кілька незалежних змінних, щоб перевірити, як вони впливають на залежну змінну. Такий підхід відомий як множинна регресія (або багатовимірна регресія). Рівняння множинної регресії має загальний вигляд:

$$y_i = a + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + \dots + e_i, \quad (2.21)$$

У рівнянні (2.17) кожне значення b_j (частковий коефіцієнт регресії) показує зміну значення y при одиничній зміні значення відповідної пояснювальної змінної x_j , за умови, що значення інших пояснювальних змінних не змінюються [145].

У множинній регресії передбачається, що кореляція між незалежними змінними (x) не є високою. Якщо між незалежними змінними існує кореляція, то цей ефект називається мультиколінеарністю. Якщо мультиколінеарність висока, то стандартні похибки коефіцієнтів регресії стають завищеними, і коефіцієнти стають дуже чутливими до додавання або вилучення невеликої кількості змінних та/або спостережень. Незалежні змінні, які не є значущими, можуть виявитися статистично значущими, і навпаки, і тоді важко відокремити справжній вплив незалежних змінних на залежну змінну. Загальним рішенням проблеми мультиколінеарності є виключення однієї з двох корельованих змінних з моделі або використання методу, подібного до факторного аналізу, для створення узагальнюючого показника на основі корельованих незалежних змінних.

Регресійний аналіз, який використано в роботі, передбачає побудову таблиці ANOVA, обробку і аналіз чи є регресійна модель значно кращою, ніж просто передбачення середнього значення залежної змінної в простому лінійному регресійному дослідженні. Даний дисперсійний аналіз створюється шляхом організації результатів різних обчислень а допомогою процедури Multiple Regression програмного продукту STATGRAPHICS Centurion і визначення наступних параметрів: сума квадратів (*Sum of Squares*), ступені свободи (*Degrees of Freedom*) та середнє квадратичне відхилення (*Mean Squares*), дисперсія (*Source of variation*). У

простому лінійному регресійному дослідженні є два джерела дисперсії: модель (позначена як «*Regressio*») і помилка (позначена як «*Error*»).

Сума квадратів регресії (*SSR*) [142, 146] являє собою суму квадратів різниць між прогнозованими значеннями та середнім значенням залежної змінної або представляє величину дисперсії залежної змінної, яка пояснюється незалежною змінною:

$$SSR = \sum_{i=1}^{n_k} n_k (\hat{x}_i - \bar{x})^2 \quad (2.22)$$

де $\hat{x}_i = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} x_i$ – середнє значення вибірки в k -й змінній, також це значення може бути оцінене за лінією регресії, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ – середнє значення вибірки, k – кількість незалежних змінних (груп), n_k – кількість спостережень у k -й вибірці незалежних змінних, n – загальна кількість спостережень або загальний розмір вибірки.

Вищий показник *SSR* свідчить про кращу відповідність моделі, оскільки він вказує на те, що незалежна змінна має сильний вплив на залежну змінну.

Сума квадратів похибок (*SSE*) являє собою суму квадратів різниць між спостережуваними значеннями та прогнозованими значеннями залежної змінної:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2, \quad (2.23)$$

де x_i – спостережуване значення.

Загальна сума квадратів (*SST*) являє собою суму квадратів різниць між спостережуваними значеннями та середнім значенням залежної змінної:

$$SST = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = SSR + SSE. \quad (2.24)$$

У простому лінійному регресійному дослідженні ступінь свободи моделі дорівнює кількості незалежних змінних мінус 1. Ступені свободи для похибки дорівнюють загальній кількості спостережень мінус кількість незалежних змінних.

Середнє квадратичне відхилення (*MS*) представляє середнє квадратичне відхилення для кожного джерела дисперсії [147]. Середня сума квадратів регресії (*MSR*) розраховується шляхом ділення *SSR* на ступені свободи для моделі. Середньоквадратична похибка (*MSE*) обчислюється шляхом ділення *SSE* на ступені свободи для похибки:

$$MSR = \frac{SSR}{k}, \quad (2.25)$$

$$MSE = \frac{SSE}{n-k-1}. \quad (2.26)$$

Аналіз за кількома змінними призначений для узагальнення кількох стовпчиків кількісних даних. Він обчислює різні статистичні дані, включаючи кореляції, коваріації та часткові кореляції.

Точність апроксимації рівняння регресії оцінювали за допомогою середньої помилки апроксимації – середнього відносного відхилення розрахункових значень (y_0) від фактичних (y_i). Її визначали за виразом:

$$\varepsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y_0}{y_i} \right| \cdot 100\% \quad (2.27)$$

Побудоване рівняння регресії вважається задовільним, якщо середня помилка апроксимації не перевищує 10 %.

Перевірка значущості оцінки коефіцієнта кореляції/детермінації полягає в статистичній перевірці параметричної гіпотези про те, що дійсне значення коефіцієнта дорівнює нулю ($R^2 = 0$). За виконання процедури перевірки значимості оцінки коефіцієнта детермінації висувається нульова гіпотеза у тому, що запропоноване рівняння регресії не відбиває реальну залежність між змінними величинами, тобто $H_0: R^2=0$. Альтернативна гіпотеза у тому, що обране рівняння залежності (рівняння регресії) достатньо пояснює дійсну залежність між випадковими величинами, тобто $H_a: R^2 > 0$. Коефіцієнт кореляції R^2 визначаємо за формулою:

$$R^2 = 100 \times \left(\frac{SSR}{SSR+SSE} \right) \%, \quad (2.28)$$

Тобто, коефіцієнт кореляції дає уявлення про те, скільки точок даних потрапляє в результати лінії, утвореної рівнянням регресії [138]. Чим вищий коефіцієнт, тим більший відсоток точок проходить через лінію, коли будуються точки даних. Значення $R^2 = 1$ або 0 означають, що лінія регресії відображає всі дані або не відображає жодних даних відповідно.

Скоригований R -квадрат – R^2_{adj} , скоригований на кількість коефіцієнтів у моделі, використовується для порівняння моделей з різною кількістю коефіцієнтів:

$$R^2_{adj} = 100 \times \left[1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \frac{SSR}{SSR+SSE} \right] \%, \quad (2.29)$$

де p – кількість прийнятих коефіцієнтів регресійного рівняння.

Для оцінки значущості рівняння регресії загалом використовуємо F -критерій Фішера. Він полягає в перевірці гіпотези про статистичну незначущість рівняння регресії. Для цього виконується порівняння фактичного F та критичного (табличного) $F_{\text{табл}}$ значень F -критерію Фішера. F -критерій являє собою відношення MSR до MSE [147]:

$$F_{\text{факт}} = \frac{MSR}{MSE}. \quad (2.30)$$

Високий F -критерій вказує на те, що регресійна модель є значно кращою, ніж просто прогнозування середнього значення залежної змінної. Якщо $F_{\text{табл}} < F$, то H_0 – гіпотеза про випадкову природу існування лінійної кореляційної залежності між незалежними та залежними змінними відхиляється і визнається їхня статистична значимість і надійність.

При статистичній обробці результатів рівень значущості (α) прийнято на рівні 0,05. Даний показник являється «допуском» рівня помилок і знаходиться в оберненій залежності від надійності очікуваного або прогнозованого результату.

Для оцінки якості регресійної моделі використовували параметр P -Value, з допомогою якого можна визначити чи існують взаємозв'язки у вибірці спостережень, також і в генеральній сукупності. P -Value лінійної регресії для кожної незалежної змінної перевіряє нульову гіпотезу про те, що змінна не має кореляції із залежною змінною. Якщо P -Value для змінної менше встановленого рівня значущості, вибіркові дані дають достатньо доказів, щоб відхилити нульову гіпотезу для всієї генеральної сукупності. В такому випадку дані свідчать на користь гіпотези про наявність ненульової кореляції.

Узагальнюючи, зазначимо, що умови проведення багатофакторного та регресійного аналізів передбачають ряд допущень та вимог, які слід враховувати, щоб гарантувати правильність та адекватність статистичної обробки результатів експерименту для забезпечення коректності та правдоподібності одержаних результатів.

2.7. Емпіричні залежності при моделюванні трибологічних процесів.

Емпіричні формули, які використовуються в трибології, являють собою підібрані математичні вирази, що характеризують зв'язок між величинами, які найсильніше впливають на обрану величину, і є справедливими для дуже обмежених умов, а також часто позбавлені певної розмірності та фізичного сенсу.

Критеріальні ж залежності, що дають зв'язок між критеріями подібності, виводять з аналізу фізичних умов процесу, і оскільки вони безрозмірні, у цьому разі не порушують розмірності фізичних величин; ці залежності можна поширити на досить широкий клас подібних явищ.

Емпіричні формули, за якими ведеться розрахунок, отримано після статистичного опрацювання експериментальних даних. Під час публікації емпіричних формул завжди чітко зазначається, в яких одиницях мають бути вихідні величини і в яких одиницях буде дано відповідь [148].

Розглянемо ряд емпіричних формул, які одержані при експериментальних дослідженнях трибопроцесів.

Найбільш широко застосовують формули для визначення товщини мастильного шару в контакті, отримані різними авторами. Формули наведені у вихідному вигляді, рекомендовані авторами (навантаження приведені до контактних тисків, товщина масляної плівки – в мкм) [149]:

А.І. Петрусевич

$$h = \frac{(\mu_0 v_\Sigma)^{0,625} \rho^{0,375} p_{max}^{0,125}}{13a^{0,5}} \quad (2.31)$$

$$h = \frac{0,432 \left(\frac{v_0}{100} v_\Sigma\right)^{2/3} \rho^{1/4}}{\left(\frac{p_{max}}{10^4}\right)^{1/3} \sqrt{\frac{a_{вх}}{250}}} \quad (2.32)$$

А.Н. Грубін

$$h = 14 \frac{(\mu_0 v_\Sigma)^{0,727} \rho^{0,273}}{a^{0,727} p_{max}^{0,182}} \quad (2.33)$$

Д.С. Коднір, І.Р. Ратнер

$$h = 20,7 \frac{(\mu_0 v_\Sigma)^{0,75} \rho^{0,25}}{a^{0,6} p_{max}^{0,3}} \quad (2.34)$$

Д. Даусон

$$\frac{h}{\rho} = 1,6 \frac{\left(\frac{E}{a}v_{\Sigma}\right)^{0,6} \left(\frac{\mu_0 v_{\Sigma}}{2E\rho}\right)^{0,7}}{\left(\frac{p}{E\rho}\right)^{0,13}} \quad (2.35)$$

І.Ф. Архард, Є.В. Ковкінг

$$\frac{h}{\rho} = 1,4 \frac{\left(\frac{E}{a}v_{\Sigma}\right)^{0,74} \left(\frac{\mu_0 v_{\Sigma}}{2E\rho}\right)^{0,74}}{\left(\frac{p}{E\rho^2}\right)^{0,074}} \quad (2.36)$$

Загальноприйняті вирази для п'єзокоефіцієнта в'язкості оливи:

$$a = 0,369p_{max} \left\{ \lg \left[6,81 \cdot 10^3 \frac{f}{\alpha} \left(\frac{p_{max}}{v_0 v_{\Sigma}}\right)^{0,375} \rho_{max}^{1,125} \right] - 0,5 \lg \alpha \right\}^{-1} \quad (2.37)$$

$$a = 0,369p_{max} \left\{ \lg \left[4,14 \cdot 10^2 \frac{f}{\alpha} \frac{p_{max}^{0,6} \rho^{0,25}}{(v_0 v_{\Sigma})^{0,333}} \right] \right\}^{-1} \quad (2.38)$$

У формулах (2.37), (2.38) f – експериментально вимірний коефіцієнт тертя; α – %; h – товщина масляної плівки в контакті, м; μ_0, v_0 – динамічна і кінематична в'язкість оливи, віднесені до температури поверхні тертя, відповідно Па·с та мм²/с; v_{Σ} – сумарна швидкість кочення в контакті, м/с; ρ – приведений радіус кривизни контактуючих поверхонь, см; p_{max} – контактний тиск, МПа; a – п'єзокоефіцієнт в'язкості випробовуваного мастила, МПа; $a_{вх}$ – п'єзокоефіцієнт в'язкості оливи на вході в зону контакту за малого контактного тиску, МПа.

За формулами розрахунку товщини мастильного шару, отриманими з урахуванням виразів для п'єзокоефіцієнта в'язкості мастильних матеріалів, були розраховані значення товщини мастильного шару в контакті, які адекватно порівнюються з значеннями експериментально вимірних товщин масляних плівок у контакті, представлені в роботах А. Камерона; О. В. Крука; І. П. О'Донг'ю і А. Камерона; Т. Сасакі, К. Окамура та Т. Коніші.

У роботі [150] під інтенсивністю зношування ω приймають величину зносу деталі або зразка металу, що припадає на одиницю роботи тертя:

$$\omega = \frac{V}{f \cdot P \cdot L} \quad (2.39)$$

де V – знос матеріалу твердого тіла за дослід; f – коефіцієнт тертя; P – нормальне навантаження; L – шлях тертя.

За умови, що в процесі зношування розподіл поверхневих сил не змінюється в часі, а час роботи перевищує початковий період розпушення матеріалу, вираз для розрахунку швидкості зношування подано в роботі [151] у вигляді степеневі функції:

$$I = k \cdot v_{\text{ковз}}^m P^n, \quad (2.40)$$

де $v_{\text{ковз}}$ – швидкість ковзання; P – навантаження; m, n – показники ступеня.

Опрацювання результатів численних лабораторних та експлуатаційних випробувань ротаційних компресорів дало змогу рекомендувати таку формулу для визначення зносу пластин ротаційних компресорів в експлуатації [149]

$$I = \frac{k}{1,67 \cdot 10^4} \cdot \frac{(v_{\text{ковз}} p \tau)^{0,35}}{v_0^{0,25}}, \quad (2.41)$$

де I – знос пластини, мм; k – коефіцієнт, що враховує властивості матеріалу пластини $k=1$ для склотекстоліту; $v_{\text{ковз}}$ – швидкість ковзання в контакті пластини з циліндром, м/с; p – питома навантаження, Н/см²; τ – час роботи, год; v_0 – кінематична в'язкість оливи, віднесена до температури поверхні тертя пластини, мм²/с.

Емпіричну формулу коефіцієнта тертя отримано для матеріалів за сухого тертя в результаті безрозмірного аналізу для кореляції коефіцієнта тертя (μ_f) зі швидкістю ковзання (V), частотою (f) та амплітудою вібрації (A), і вона виражається як [152]:

$$\mu_f = k \left[\frac{Af}{V} \right]^a, \quad (2.42)$$

де, a і k - довільні константи.

Емпіричну формулу швидкості зношування (Wr) виведено на основі кореляційного аналізу цього параметра з власною частотою (f_n), шорсткістю (R) і швидкістю ковзання (V) і виражається як [153]:

$$Wr = \frac{kN}{f_n R} \left[\frac{f_n}{V} \right]^{-b}, \quad (2.43)$$

де N – нормальне навантаження, b і k – довільні константи.

Вплив нормального навантаження N на інтенсивність втомного зношування I_h може бути виражений степеневі функцією $I_h = kN^n$. Тут k – коефіцієнт, що залежить від швидкості ковзання, механічних властивостей зношуваного матеріалу, параметрів мікрогеометрії поверхні контртіла та інших чинників. Показник ступеня

n характеризує опір матеріалу втомному руйнуванню під час циклічного деформування [154].

Опір матеріалів втомному зношуванню залежить від їхніх механічних властивостей. Збільшення модуля пружності матеріалів, що зношуються, за однакової міцності на розрив спричиняє зростання їхньої зносостійкості, оскільки водночас зменшується площа фактичного контакту, глибина входження виступів і контактні деформації матеріалу, що зношується. Причому ця залежність є степеневою. Для матеріалів з однаковим подовженням $I_h \sim E^{-(1+\beta_0 t_y)}$. Показник ступеня в цій формулі може змінюватися в інтервалі $0,6 \div 9,6$ залежно від шорсткості та хвилястості поверхонь тертя [154].

Незважаючи на те, що енергетичні методи оцінки параметрів зношування застосовують у трибології достатньо тривало, експериментальні дослідження зміни запасеної енергії поверхневих шарів у процесі зношування практично не проводилися – не було відповідних методик та технічних засобів.

Для умов структурної пристосованості кількісно рівень структурно-термічної активації під час тертя можна характеризувати величиною питомої роботи тертя $A_{\text{пит}}$, що є добутком коефіцієнта тертя μ на питома навантаження p і швидкість ковзання v [155]:

$$A_{\text{пит}} = \mu p v. \quad (2.44)$$

Традиційні термодинамічні методи оцінки енергії активації руйнування матеріалів є тривалими, трудомісткими та не придатними для дослідження тонких, модифікованих тертям поверхневих шарів, що стало серйозною перешкодою для широкого застосування в трибології енергетичних критеріїв міцності та розрахункових моделей зношування кінетичного типу. З тієї ж причини відсутні систематизовані дані про активаційні параметри руйнування матеріалів при різних механізмах ушкодження. Тим часом при оцінці зносостійкості контактних поверхонь в полі діючих навантажень та температур енергетичні показники можуть бути більш інформативними, порівняно з силовими та деформаційними критеріями.

Висновки до розділу 2.

1. Удосконалення контрольно-вимірювальних приладів та стрімкий розвиток обчислювальної техніки забезпечують реальну можливість досліджувати трибологічні процеси утворення дисипативних структур під час тертя. Модернізовані триботехнічні установки дозволяють використовувати їх як основний інструмент при дослідженні реологічних, мастильних та антифрикційних властивостей трибоконтакту на мікрорівні в реальному часі.

2. Удосконалення методик оцінки триботехнічних показників авіаційних мастильних матеріалів на етапі лабораторних досліджень дозволить аналізувати спектр необхідних експлуатаційних параметрів трибоконтакту, які є домінуючими чинниками щодо прогнозування термінів заміни мастильних матеріалів, ресурсу та надійності трибосистем повітряних суден.

3. Проведення оцінки якості мастильних матеріалів за антифрикційними, мастильними, протизношувальними та антиокислювальними показниками з урахуванням типу базової основи, наявності функціональних присадок та/або добавок дозволить встановити взаємозв'язок між трибологічними показниками контакту, складом мастильного матеріалу та активованими поверхневими шарами контактних поверхонь та визначити механізми структурної пристосованості трибосистеми.

4. Проведення комплексних досліджень в умовах динамічного навантаження, в режимах кочення з проковзуванням, ковзання, при реалізації режимів мащення від граничного до гідродинамічного дозволить оцінити експлуатаційні властивості мастильних матеріалів та обрати високоякісні багатоцільові мастильні матеріали, застосування яких забезпечить подовження терміну служби як мастильних матеріалів, так і агрегатів в цілому.

5. Розроблено методику оцінки триботехнічних властивостей емульсій мастило-вода за наявності води в мастилі у стані вільної, розчиненої або емульгованої, що дозволяє оцінити вплив складу базової основи та типу присадок мастил на утворення емульсій з водою та дослідити триботехнічні характеристики емульсій мастило – вода.

6. Застосування статистичної обробки результатів дослідження Statgraphics Centurion для аналізу триботехнічних параметрів спрямовано на виявлення впливових змінних і отримання уявлення про їхні індивідуальні та спільні зв'язки з результатом. Вибір змінних і функціональних форм при багатофакторному аналізі з наступною ідентифікацією зв'язків між багатьма факторами при регресійному аналізі дозволить виділити основні аспекти причинно-наслідкового моделювання та з високою імовірністю встановити прогностичну або пояснювальну роль найбільш значимих факторів.

7. Проаналізовані емпіричні формули розрахунку товщини мастильного шару, коефіцієнту тертя, інтенсивності зношування, питомої роботи тертя, які використовуються для оцінки трибологічних процесів. Необхідність розробки емпіричних формул для конкретних експериментальних умов обумовлена пошуком кількісних закономірностей впливу триботехнічних параметрів на знос контактних поверхонь з метою виявлення найбільш впливових чинників.

РОЗДІЛ 3

ПРОТИЗАДИРНІ ВЛАСТИВОСТІ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ МАСЛЯНОГО ГОЛОДУВАННЯ

Явище заїдання відбувається через руйнування шару мастила на контактуючих поверхнях. Трибологічні аспекти цього питання на сьогоднішній день не до кінця вивчені.

На процес заїдання впливають різні параметри, включаючи навантаження, швидкість ковзання і кочення, шорсткість поверхні, склад і структуру металу, температуру, властивості мастильного матеріалу, умови навколишнього середовища, присадки в мастилі, спосіб змащування та інші фактори [156, 157].

Сучасні методи вимірювання товщини мастильного шару дозволяють спостерігати кінетику мащення, що передуює заклинюванню, лише за умов, коли шар, що розділяє контактні поверхні, має достатню товщину. Однак поведінка тонких шарів мастила, які зазвичай мають товщину 1 мікрон або менше, безпосередньо перед їх руйнуванням на контактуючих поверхнях, залишається предметом постійних дискусій.

3.1. Експериментальне дослідження режиму масляного голодування в умовах кочення в локальному контакті.

Заїдання проявляється як раптова і критична форма пошкодження поверхні тертя, яка відрізняється від інших типів, оскільки її поява може швидко зробити механізм повністю непридатним для подальшої експлуатації протягом короткого проміжку часу [158].

Руйнування мастильного шару є умовою, що призводить до виникнення заїдання. Однак розуміння природи руйнування мастильного шару та основних причин цього процесу є обмеженим. Отже, представити і передбачити цей процес всебічно, використовуючи сучасні експериментальні та теоретичні дані, є складним завданням [159].

Руйнування мастильного шару настає внаслідок двох основних причин, які, у свою чергу, поділяються на безліч підпричин. Це – метал поверхонь тертя і мастильний матеріал, взаємодія яких характеризується спектром механічних, фізико-хімічних і термічних процесів, що відбуваються на межі розділу фаз. Проте, загально відомо, що заїдання відбувається при температурах, які несуттєво впливають на властивості матеріалу [160]. Насамперед, це об'ємні властивості матеріалу.

Для мастильних матеріалів характерні інші закономірності зміни властивостей. Протягом терміну служби вони зазнають значних фізичних і хімічних перетворень, особливо на межі розділу фаз. Ці процеси призводять до зміни мастильної здатності оливи і мастил, іноді призводячи до припинення мащення. Отже, зміна властивостей мастильного матеріалу або його виснаження в зоні контакту може призвести до заїдання.

Явище масляного голодування, що охоплює обидва випадки, є важливою сферою досліджень. Існуючі методи вимірювання товщини мастильного шару ефективні для виявлення змін при значних значеннях. Однак їм не вистачає чутливості при роботі з тонкими мастильними шарами. На руйнування мастильного шару часто вказує збільшення коефіцієнтів тертя [161]. Але саме тонкі шари мастила в першу чергу диктують кінетику подальших процесів, що призводять до катастрофічного зносу.

На першому етапі дослідження метою було виявити закономірність зміни товщини мастильного шару протягом періоду масляного голодування, приділяючи особливу увагу фазі, що безпосередньо передуює заїданню контактних поверхонь [36, 162, 163].

В якості зразків використовувалися циліндричні ролики діаметром 50 мм з однойменних матеріалів сталь 9ХС з твердістю HRC 55 і сталь 30ХГСА з твердістю HRC 35. Початкова шорсткість робочих поверхонь R_a становила 0,32 мкм. Контактне напруження по Герцу складало 400 МПа. Мащення поверхонь тертя відбувалося зануренням в масляну ванну. В якості мастильного середовища використовувалося мастило AeroShell Grease 33.

Дослідження проводили за попередньо визначеною схемою з використанням ПАК. Припрацювання роликів відбувалося в умовах кочення з проковзуванням 3 %, 10 % і 20 %, відповідно, при загальній сумарній швидкості кочення 5,5, 5,1 і 4,8 м/с. Після завершення припрацювання, про що свідчила стабілізація товщини мастильного шару, мастильну ванну видаляли для імітації масляного голодування. Випробування проводили за двома режимами: прискорене масляне голодування (повне видалення мастила з доріжок тертя після обкатки) і нормальне масляне голодування (мастило залишається на доріжках тертя).

На рис. 3.1 представлено зміну товщини мастильного шару під час припрацювання для вибраних матеріалів за різних умов.

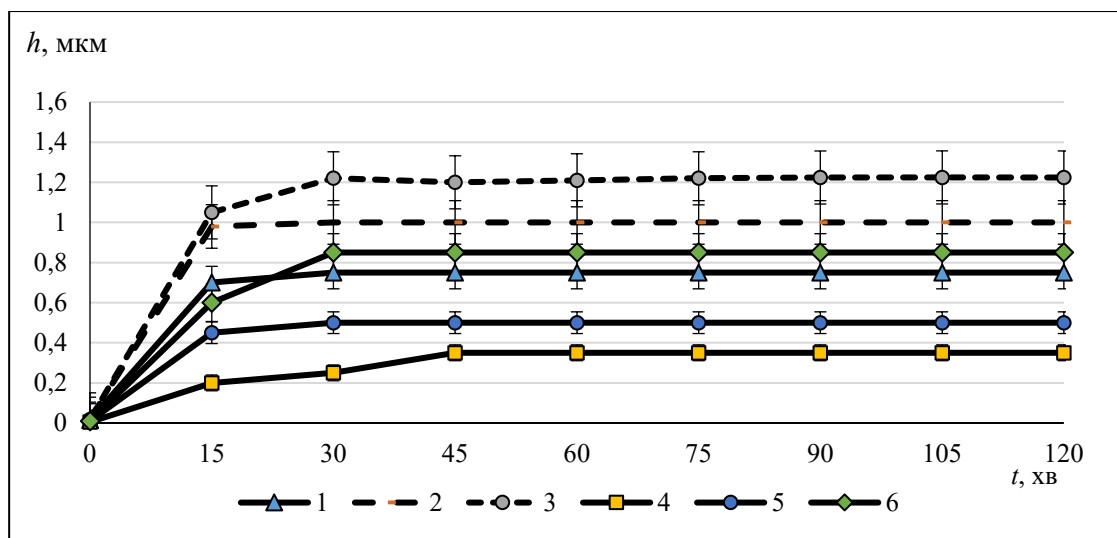


Рис. 3.1. Зміна товщини мастильного шару в період припрацювання: 1, 2, 3 – сталь 9ХС; 4, 5, 6 – сталь 30ХГСА, 1, 4 – проковзування 3 %; 2, 5 – проковзування 10 %; 3,6 – проковзування 20 %.

Аналіз кінетики формування мастильного шару на контактних поверхнях показує, що, незалежно від ступеня ковзання, стала товщина сформованого мастильного шару після припрацювання на сталі 9ХС приблизно на 30 - 40 % перевищує товщину мастильного матеріалу, яка була зафіксована на сталі 30ХГСА.

Крім того, експериментально встановлено кореляцію між ступенем проковзування і товщиною мастильного шару в триботехнічному контакті. Незалежно від матеріалу поверхні контакту, збільшення проковзування з 3 % до 20 %

призводить до збільшення товщини мастильного шару в контактї в середньому вдвічі. Це явище пояснюється позитивним впливом тангенціальних напружень зсуву внаслідок проковзування, що призводить до посиленої активації поверхонь тертя і подальшого зростання товщини мастильного шару.

Наступний етап, після початкового етапу випробування, включав в себе випробування системи в режимі масляного голодування. На рис. 3.2 показано зміну товщини мастильного шару під час роботи в режимі кочення з 20 % проковзуванням по сталі 9ХС. У цьому експерименті додаткове мастило в зону контакту не вводилося, що виключає наявність гідродинамічного мастильного шару. Замість цього початкова товщина плівки складалася з граничних шарів мастила, що утворилися на контактних поверхнях, активованих тертям, під час попереднього періоду припрацювання, в середньому товщиною приблизно 0,3 мкм.

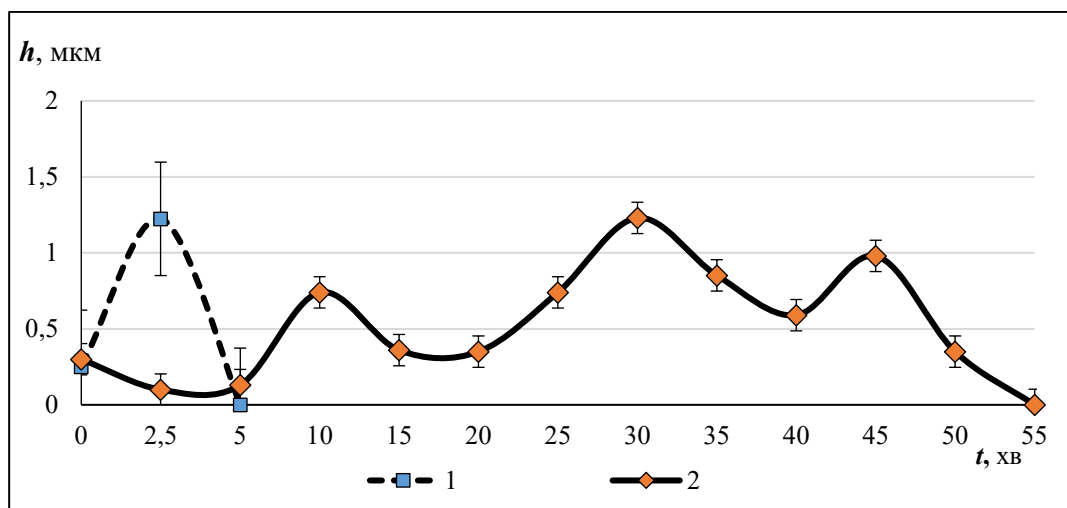


Рис. 3.2. Зміна товщини мастильного шару при коченні з проковзуванням 20 % (сталь 9ХС): 1 – мастило витиралось з доріжки тертя; 2 – мастило не витиралось з доріжки тертя.

У випадках, коли мастило не витиралося з поверхні роликів (крива 2), відразу було помічено раптове зменшення товщини мастильного шару до 0,1 мкм. Однак через 8 хвилин після випробування товщина шару почала збільшуватися, після чого спостерігалися коливання, які мали чітко виражену закономірність у міру збільшення тривалості експлуатації. Ці перепади становили приблизно від 0,25 до 1 мкм. Наприкінці випробування було помітно, що товщина мастильного шару помітно

збільшилася, досягнувши свого початкового сталого значення, встановленого під час припрацювання. В подальшому товщина мастильного шару почала зменшуватися, поки не відбулося повне руйнування.

У зоні контакту було виявлено наявність димлення від мастила, незважаючи на відсутність різких змін швидкості обертання зразків. Варто зазначити, що процес руйнування мастильного шару протікає не лавиноподібно, він наче розтягнутий в часі. В даному досліді тривалість цього процесу дорівнює 55 хв.

На рис. 3.2 (крива 1) представлено зміну товщини мастильного шару під час роботи в режимі кочення з 20 % проковзуванням по сталі 9ХС. Цей режим передбачає повне видалення мастила з поверхонь тертя. На відміну від попереднього експерименту, при переході до критичних умов мащення спостерігається помітне збільшення товщини мастильного шару. Цей стрибок характеризується збільшенням товщини граничних шарів з 0,3 до 1,21 мкм, що відповідає сталій товщині, яка спостерігалася в період припрацювання. Згодом відбувається різке зменшення товщини шару, що призводить до його руйнування і подальшого заїдання робочих поверхонь. Примітно, що цей процес значно прискорюється і триває всього 5 хв, що свідчить про десятикратне збільшення швидкості руйнування мастильного шару в порівнянні з умовами, коли мастило не витиралося з доріжки тертя.

Тому, коли видалення мастила із зони контакту відбувається примусово, швидкість руйнування мастильного шару зростає. Це явище можна пояснити наступним механізмом: Граничний шар мастила, що утворюється під час тертя по активованій поверхні металу, має неоднорідну структуру. Спочатку мономолекулярний шар, що безпосередньо контактує з поверхнею, утворює міцні хімічні зв'язки з металом, чому сприяє взаємодія між поверхнею металу і літієвим милом, основним компонентом досліджуваного мастила. Однак цей шар може також проявляти неоднорідність через наявність у складі мастила синтетичної суміші вуглеводнів та ефіру, а також інгібіторів корозії та окислення. Крім того, в міру віддалення від поверхні металу граничний шар демонструє анізотропні властивості, що призводить до зменшення впливу твердої фази металу на компоненти мастильного матеріалу.

Коли примусово видаляється мастило із зони контакту, граничні шари зазнають швидкої дезорієнтації через градієнт швидкості зсуву, що призводить до порушення безперервності граничного шару і подальшого заїдання контактуючих поверхонь. І навпаки, коли мастильний матеріал не видаляється примусово із зони контакту, існує додатковий «резерв» мастила за рахунок шарів, розташованих далі від поверхні металу. Ці шари пов'язані з навколишніми молекулами слабкими силами взаємодії Ван-дер-Ваальса і можуть вільно мігрувати по поверхні, тим самим запобігаючи прямому металевому контакту.

Після проведення випробувань зі сталлю 9ХС за умов дослідження кочення з проковзуванням 20 %, коли трибосистема переходить в режим масляного голодування, в наступних експериментах використовували сталь 30ХГСА, матеріал із твердістю вдвічі меншою, порівняно зі сталлю 9ХС. На рис. 3.3 (крива 2) представлено зміну товщини мастильного шару за умов масляного голодування, за якого мастило не витиралося з доріжок тертя.

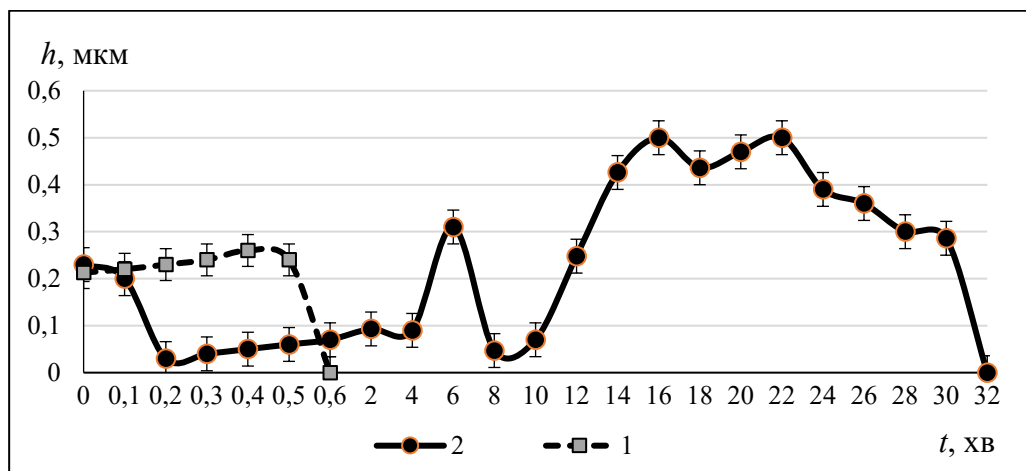


Рис. 3.3. Зміна товщини мастильного шару в умовах масляного голодування для сталі 30ХГСА (1 – мастило витиралося з доріжки тертя; 2 – мастило не витиралося з доріжок тертя).

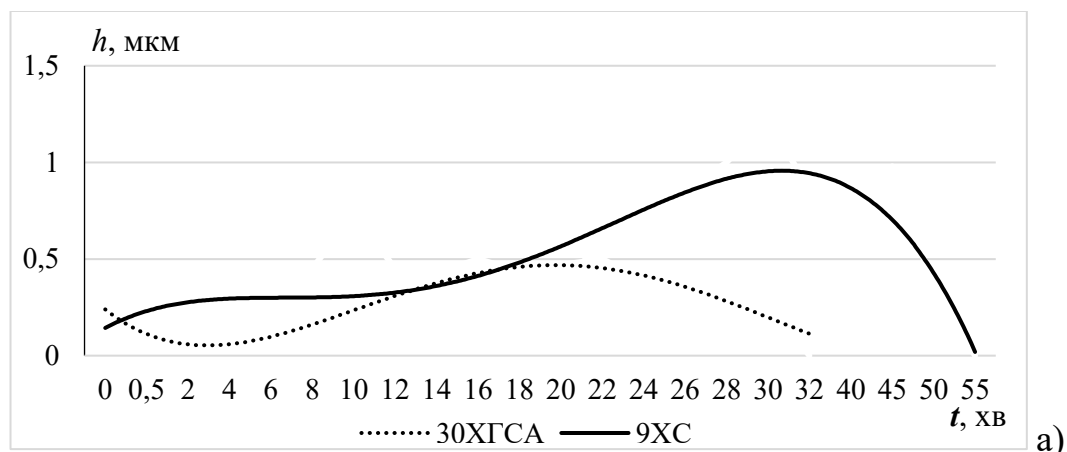
Під час експериментів спостерігалось різке зменшення товщини мастильного шару при переході до умов масляного голодування. Однак мінімальна товщина мастильного шару зменшилася вдвічі і становила 0,05 мкм порівняно з аналогічними експериментами, проведеними на сталі 9ХС. Згодом ефективність мащення зросла, а

товщина мастильного шару збільшилася до 0,3 мкм, що супроводжувалося аналогічними коливаннями. При цьому амплітуда коливань товщини зменшилася до 0,1 – 0,5 мкм, що вдвічі менше, ніж у випадку зі сталлю 9ХС. Ця розбіжність є першою відмінністю між двома матеріалами.

Друга суттєва відмінність полягає в тривалості існування мастильного шару до повного руйнування, яка скоротилася майже вдвічі порівняно зі сталлю 9ХС і становила приблизно 32 хвилини. Зокрема, третя відмінність спостерігається в способі руйнування мастильного шару, який відбувається майже миттєво, коли шар мастила зривається з поверхні металу. Це контрастує з процесом, який спостерігався зі сталлю 9ХС, де за ідентичних умов процес руйнування відбувався до 2-12 хвилин, залежно від умов випробування.

Рис. 3.3 (крива 1) демонструє зміну товщини мастильного шару при 20 % проковзування в контактi, коли мастило було досконало видалено з поверхонь роликів. Заїдання відбувалося через 30 секунд. Порівняльні випробування, проведені на сталі 9ХС, показали, що термін служби мастильного шару приблизно в 10 разів довший за аналогічних експериментальних умов.

Якщо порівняти кінетику зміни товщини мастильного шару для досліджуваних типів сталей, то стає очевидним, що основним фактором, який впливає на різницю в мастильній дії, є твердість зразків зі сталі, оскільки всі інші параметри залишаються незмінними. При спробі накласти загальну криву зміни товщини мастильного шару в період масляного голодування для сталей 9ХС і 30ХГСА отримаємо схему, представлену на рис. 3.4.



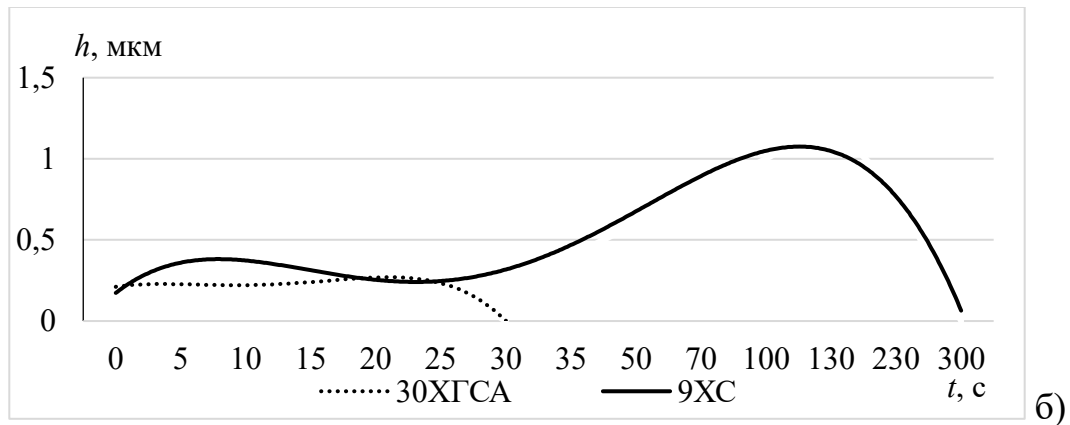


Рис. 3.4. Узагальнені криві кінетики зміни товщини мастильного шару для сталей 9ХС і 30ХГСА в умовах масляного голодування: а) – мастило не видалялось з доріжки тертя; б) – мастило витиралось з доріжки тертя.

Загальні закономірності, що визначають кінетику зміни товщини мастильного шару в контакті (h) відносно тривалості роботи пар тертя (t), можуть бути ефективно виражені за допомогою поліноміальних рівнянь регресії четвертого ступеня, що забезпечують високий ступінь надійності апроксимації. (R^2):

$h = -9E-05t^4 + 0,0035t^3 - 0,0397t^2 + 0,1842t - 0,005$; ($R^2 = 0,7146$, t , хв) – для сталі 9ХС (мастило не видалялось з доріжки тертя);

$h = 8E-05t^4 - 0,0038t^3 + 0,0575t^2 - 0,2734t + 0,4589$; ($R^2 = 0,8237$, t , хв) – для сталі 30ХГСА (мастило не видалялось з доріжки тертя);

$h = -0,001t^4 + 0,0268t^3 - 0,2216t^2 + 0,6793t - 0,3101$; ($R^2 = 0,9332$, t , с) – для сталі 9ХС (мастило видалялось з доріжки тертя);

$h = -0,0025t^4 + 0,0321t^3 - 0,1417t^2 + 0,2526t + 0,0707$; ($R^2 = 0,995$, t , с) – для сталі 30ХГСА (мастило видалялось з доріжки тертя).

Якісні загальні закономірності зміни кінетики товщини мастильного шару під час критичних умов мащення можна окреслити наступним чином. Спочатку на більш м'якій сталі спостерігається помітне видалення мастильного шару при переході системи до жорстких умов тертя, що призводить до значного зменшення товщини мастильного шару. І навпаки, на більш твердій сталі при переході до жорстких умов тертя спостерігаються коливання товщини шару, хоча і без помітного стирання мастильного шару. Наступна стадія є відносно однаковою для обох сталей і

характеризується різким збільшенням частоти коливань товщини шару, хоча і з мінімальними змінами амплітуди. Однак третя стадія відрізняється за інтенсивністю деградації мастильного шару. Ці експериментальні спостереження допомагають з'ясувати вплив твердості на мастильну ефективність мастильних матеріалів в критичних умовах. Зниження твердості сприяє пластичній деформації і підвищеному зносу контактуючих поверхонь, прискорюючи механічне руйнування масляної плівки, тим самим сприяючи виникненню ювенільних поверхонь та заїдання пар тертя (рис. 3.5).

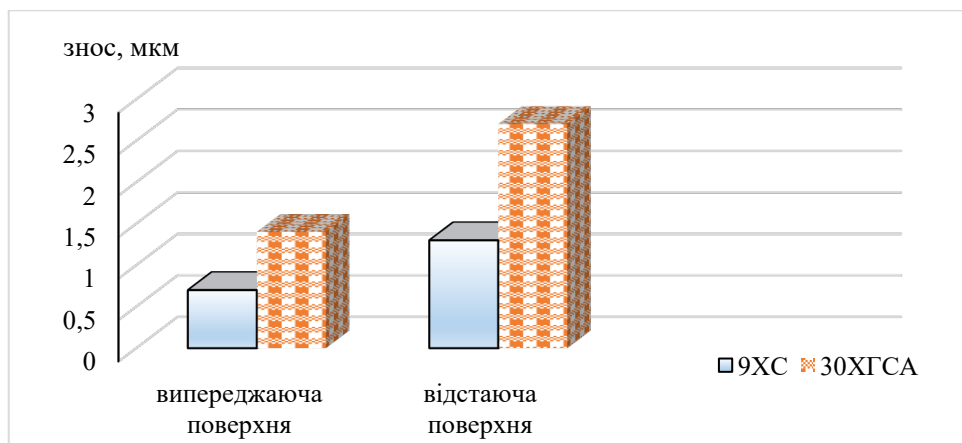


Рис. 3.5. Лінійний знос випереджаючої та відстаючої поверхонь в умовах масляного голодування.

Швидкість лінійного зносу, що спостерігається як на передній, так і на задній поверхнях сталі 30ХГСА, вдвічі вища, ніж у сталі 9ХС. Крім того, на доріжці тертя зі сталі 30ХГСА помітні локальні ділянки заїдання між контактними поверхнями, тоді як поверхня тертя зі сталі 9ХС візуально виглядає однорідною (рис. 3.6).

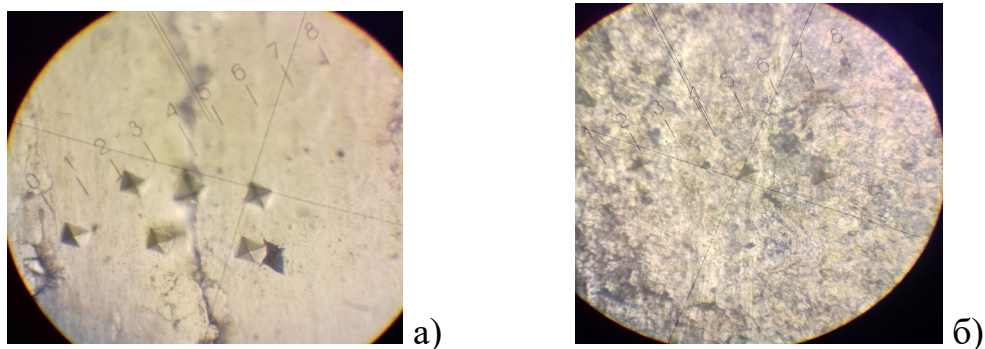


Рис. 3.6. Поверхня тертя сталі 30ХГСА (а) та 9ХС (б) після розриву мастильної плівки ($\times 200$).

Ці дані узгоджуються з попередніми спостереженнями, де мастильний шар суттєво зменшується в товщині, досягаючи критичного рівня при переході до критичного режиму роботи на сталі 30ХГСА. Тим не менш, зменшення твердості також полегшує процес припрацювання, збільшує ефективну площу контакту і знижує локальні температури в окремих точках контакту. По суті, керуючи твердістю дослідного зразка, стає можливим ініціювати конкуруючі процеси, тим самим надаючи дуже специфічний напрямок мастильній ефективності мастила.

Наступний експеримент складався з двох етапів. На першому етапі мащення пар тертя відбувалося в режимі кочення з проковзуванням 3 %, нижній ролик занурювався в ванну, тобто був забезпечений нормальний мастильний режим. Другий етап включав перехід до проковзування 40 %. В якості зразків використовувались ролики зі сталі 30ХГСА.

Як і у випадку з масляним голодуванням, товщина мастильного шару різко зменшувалася при зміні умов проковзування з 3 до 40 % (рис. 3.7).

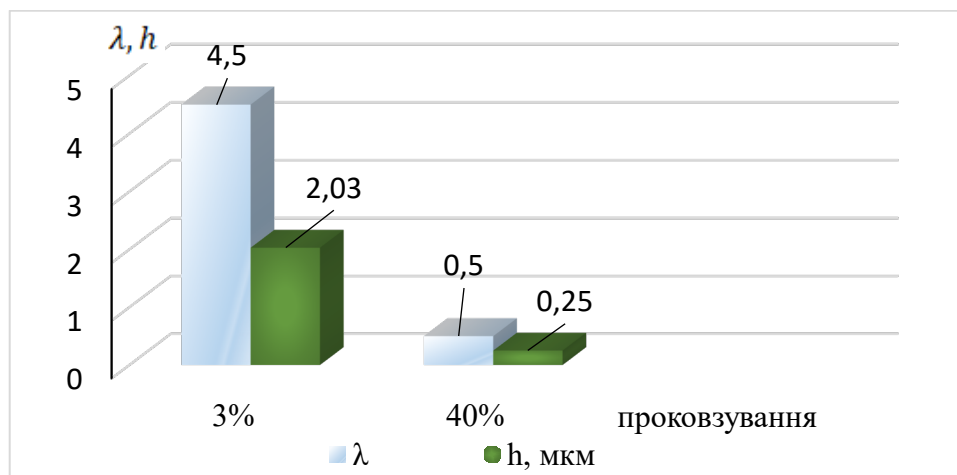


Рис. 3.7. Вплив ступеня проковзування на ефективність мащення в контакті.

Якщо при проковзуванні 3 % в контакті забезпечується реалізація гідродинамічного режиму мащення ($\lambda = 4,5$), то збільшення ступеня проковзування призводить до реалізації граничного режиму мащення ($\lambda = 0,5$), тобто причиною різкого зменшення товщини мастильного шару є, в даному випадку, не відсутність подачі мастила в зону контакту, а різка зміна умов мащення.

Головною причиною зниження ефективності мащення є різке зростання градієнту швидкості зсуву при збільшенні ступеня проковзування, що призводить до дезорієнтації граничної плівки, зниження в'язкості мастила. Дані зміни фізико-механічних властивостей мастильного матеріалу, які відбуваються під впливом високих градієнтів швидкості зсуву, що досягають порядку $8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ при проковзуванні 40 %, унеможливають відновлення тиксотропних властивостей мастила, що призводить до зниження його несучої здатності.

При роботі пар тертя з проковзуванням 40 %, після стабілізації всіх триботехнічних параметрів контакту, припинялася подача мастила в зону контакту на 50 хв експерименту (ванна прибрана в точці А) (рис. 3.8).

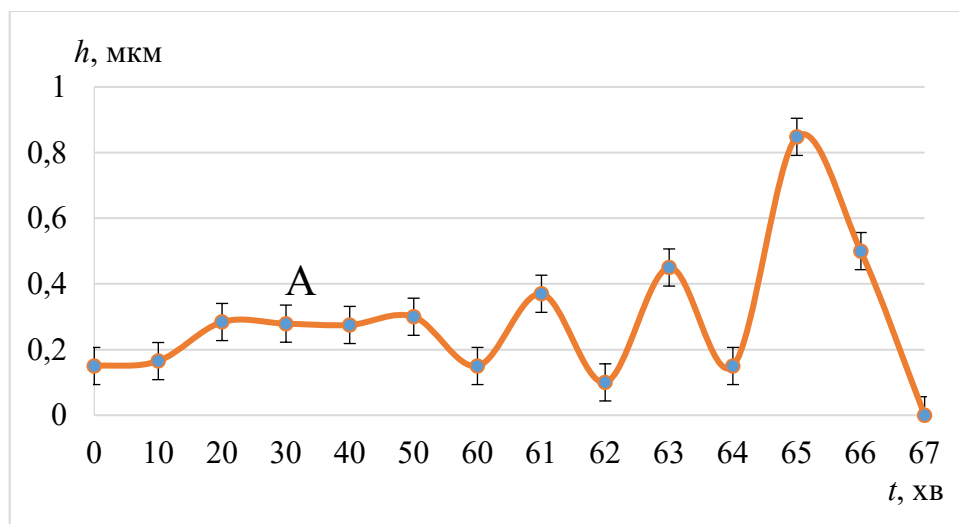


Рис. 3.8. Зміна товщини мастильного шару в період розвитку масляного голодування на контактних поверхнях сталі 30ХГСА; точка А – припинення подачі мастила.

Відразу після цього зафіксовано зменшення товщини, причому реалізовувався граничний з ознаками сухого режим мащення ($\lambda = 0,1 - 0,35$). Тут вже почав домінувати вплив мастильного матеріалу, оскільки режим роботи не мінявся. Після 60-ї хвилини роботи пар тертя в зазначених умовах спостерігалися амплітудні коливання товщини мастильного шару. Передвісником руйнування мастильного шару стало зростання товщини в 1,5 – 3 рази від початкового значення цього параметру в період нормальної роботи при проковзуванні 40 %. Процес руйнування,

як вже вказувалося, розтягнутий в часі. В даному випадку його тривалість складає 7 хв.

На рис. 3.9 показана зміна товщини мастильного шару в експерименті, який також складається з двох етапів. Була поставлена задача з'ясувати здатність мастильного матеріалу в сукупності з поверхнею тертя, на прикладі мастила AeroShell Grease 33, відновити мастильний шар. Перший етап протікав за описаною схемою в попередньому експерименті: різке зменшення товщини шару при переході до масляного голодування в режимі кочення з проковзуванням 40 %, коливання товщини шару. На 62 хв, в момент, коли товщина шару стала зменшуватися, була відновлена подача мастила в зону контакту.

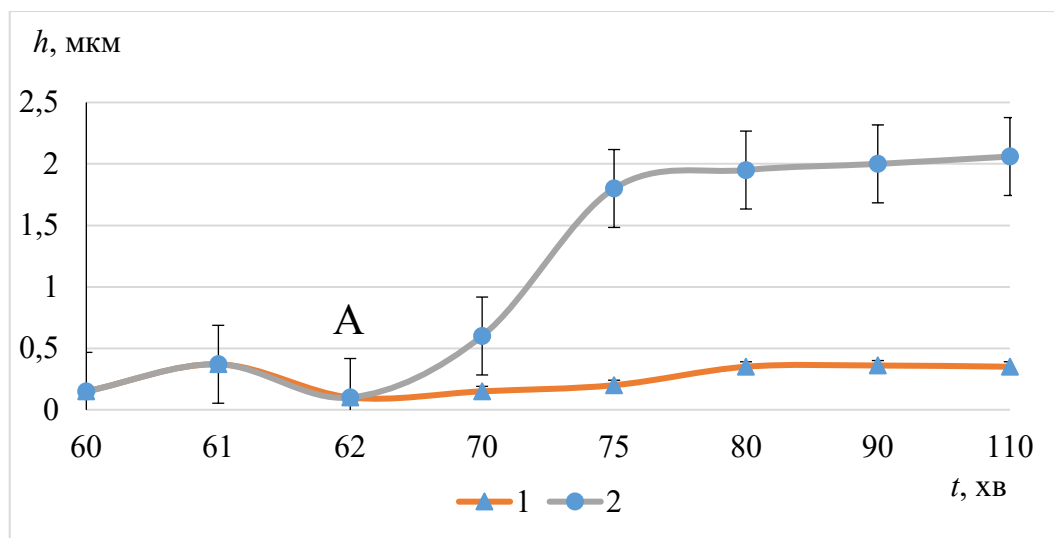


Рис. 3.9. Зміна товщини мастильного шару після переходу від режиму масляного голодування (точка А) до режиму кочення з проковзуванням 3 % (2) та 40 % (1) для сталі 30ХГСА.

За умов, якщо проковзування в контакті складало і надалі 40 %, товщина мастильного шару стала збільшуватися, в середньому, в 2-3 рази і через 20 хв досягла величини 0,35 мкм, яка була встановлена на кінцевому етапі припрацювання в цих умовах. Подальша тридцятихвилинна витримка в даному режимі показала незмінність товщини мастильного шару, що є характерною ознакою стабілізації процесів, які відбуваються в контакті.

За умов, якщо проковзування в контакті в момент подачі мастила (точка А) зменшити до 3 %, відбувається інтенсивне відновлення несучої здатності мастильного шару – товщина мастильної плівки зростає, в середньому, в 17 разів і через 15 хвилин досягає 1,9 мкм. Подальша робота пар тертя в цих умовах свідчить про стабілізацію триботехнічних параметрів, які опосередковано підтверджують ефективну структурну пристосованість елементів трибоспряження до змінних градієнтів зсуву в контакті, які обумовлені різним ступенем проковзування пар тертя та мастильними властивостями досліджуваного мастила.

Таким чином, можливе відновлення мастильного шару після роботи в таких важких умовах, до яких, безумовно, відноситься масляне голодування, хоча це питання потребує подальшого розвитку.

3.2. Експериментальне дослідження розвитку процесу масляного голодування при коченні з проковзуванням в умовах локального контакту.

У системах мащення трибомеханічних вузлів виникнення заїдання призводить до руйнування мастильної плівки, що може бути спричинене такими факторами, як пластична деформація, підвищений знос або втрата ефективності мащення [164]. Поширеною причиною виходу з ладу в критичних парах тертя з локальним контактом є припинення постачання мастильного матеріалу в зону тертя, стан, відомий як масляне голодування.

Прорив поверхневих плівок може відбуватися як поетапний процес, спочатку впливаючи на зовнішні шари (фізично або хімічно адсорбовані), а потім на внутрішні поверхневі шари (що складаються з оксидних і загартованих шарів), що призводить до їх руйнування або термічного розкладання [165]. Механізми, що лежать в основі погіршення роботи мастильних шарів у локальних контактах, залежать від фізико-хімічного складу цих шарів, режиму мащення та динамічних змін, що відбуваються на межі поділу метал – мастильний матеріал і за кінетикою змін робочих триботехнічних параметрів [166].

У проведених дослідженнях встановлено, що перехід до режиму масляного голодування відбувався після достатнього припрацювання поверхонь контакту, про що свідчить стабілізація параметрів тертя. До таких параметрів відносяться товщина мастильного шару, момент тертя, температура мастильного матеріалу та робота тертя [167]. Режим масляного голодування встановлювався шляхом повного видалення мастильного матеріалу як з доріжки тертя, так і із зон, безпосередньо дотичних з нею. Експерименти проводились в нестационарних умовах мащення в режимі пуск (4 с) – стаціонарна робота (7 с) – гальмування (3 с) – зупинка (3 с) на установці СМЦ-2. Імітувався режим кочення з проковзуванням 20 %. Контактне навантаження по Герцу становило 400 МПа. Дослідні зразки виготовлені зі сталі 30ХГСА (HRC 35).

На рисунках 3.10 і 3.11 показана кінетика зміни параметрів пускового моменту тертя $[M(t)_п]$ та початкової товщини мастильного шару $[h(t)_п]$ в період розвитку масляного голодування для літєвих синтетичних мастил AeroShell Grease 33 і Ера ВНІНП-286М до виникнення заїдання. Як видно, зміна параметрів $M(t)_п$ і $h(t)_п$ супроводжується несталим процесом, що проявляється в їх періодичному коливанні. Така картина є типовою, розрізнятися можуть лише параметри цього коливального процесу – амплітуда і період.

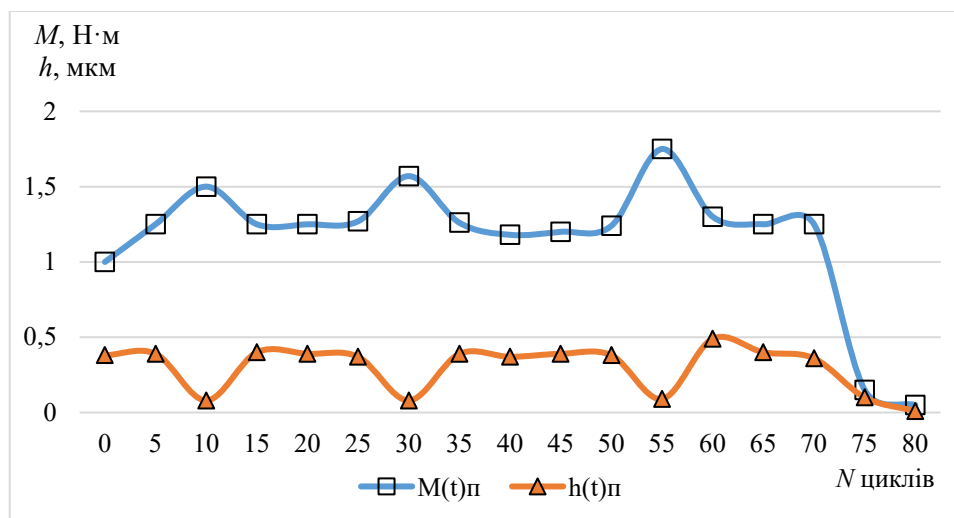


Рис. 3.10. Кінетика зміни динамічних характеристик $M(t)_п$ і $h(t)_п$ в період розвитку масляного голодування (ВНІНП-286М).

Для мастила ВНІНП-286М кількість циклів наробітки до проявів перших ознак заїдання контактних поверхонь вдвічі менша, ніж для синтетичного мастила

AeroShell Grease 33. Встановлена суттєва відмінність коливальних змін моменту тертя та товщини мастильного шару в контакті для досліджуваних мастил. Якщо для ВНІНП-286М стрімке зменшення товщини мастильного шару до 0,1 – 0,05 мкм призводить до зростання моменту тертя, в середньому, в 1,2 – 1,4 рази, то для AeroShell Grease 33 в моменти зниження товщини мастильного шару спостерігається синхронне зменшення моменту тертя в 2,5 – 5 разів.

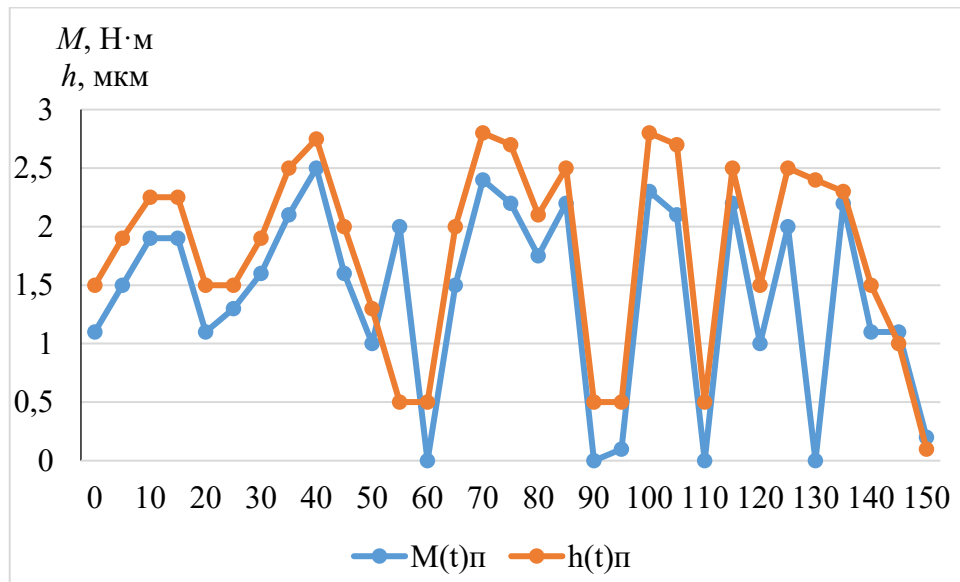


Рис. 3.11. Кінетика зміни динамічних характеристик $M(t)_{п}$ і $h(t)_{п}$ в період розвитку масляного голодування (AeroShell Grease 33).

Припускаємо, що зазначені відмінності зміни моменту тертя та товщини мастильного шару обумовлені різною природою сформованих в процесі тертя граничних адсорбційних шарів на активованих контактних поверхнях. Синтетичні компоненти мастила AeroShell Grease 33 проявляють більшу схильність до полімеризаційних явищ, які відбуваються внаслідок механо-хімічних процесів в зоні тертя. Це призводить до формування в контакті товщини мастильної плівки, яка в 2,3 – 4,8 разів перевищує аналогічний показник, визначений для мастила ВНІНП-286М. В процесі руйнування товщини мастильного шару при використанні AeroShell Grease 33, наприклад в 60, 90, 110 циклах (рис. 3.11), відбувається стрімка зміна режиму мащення з гідродинамічного ($\lambda = 5$) до граничного ($\lambda = 0,7$). При руйнуванні мастильного шару, сформованого мастилом ВНІНП-286М, в 10, 30, 55 циклах

наробітки (рис. 3.10) відбувається зміна режиму мащення з граничного ($\lambda = 0,8$) до граничного з ознаками сухого ($\lambda = 0,15$).

Таким чином, руйнування мастильного шару при використанні ВНІНП-286М обумовлює перехід трибосистеми в більш жорсткі умови тертя, які проявляються в дефіциті мастильного матеріалу, домінуючому впливі твердої фази контактних поверхонь, що призводить до підвищення сили тертя і, відповідно, зростання пускового моменту тертя. При руйнуванні мастильного шару, сформованого AeroShell Grease 33, відбувається деструкція та дезорієнтація полімеризованих компонентів, що призводить до зменшення товщини, але залишається мінімальна товщина мастильного шару до 0,35 мкм, яка надійно захищає поверхні тертя. Саме наявність мастильного матеріалу забезпечує стабільні умови мащення. Стрімке кореляційне зниження моменту тертя в періоди, коли відбувається зменшення товщини мастильного шару, обумовлено зниженням в'язкості мастильного матеріалу в результаті механічної та теплової дії в зоні контакту та короткочасним домінуванням гідродинамічних ефектів внаслідок плавлення граничних шарів. Аналогічні ефекти були встановлені в роботах [168, 169].

На завершальній стадії випробувань, коли процес заїдання набуває лавинного характеру, обидва параметри $[M(t)_п$ і $h(t)_п$] різко зменшуються і прагнуть до нуля, причому це зменшення відбувається синхронно. Слід відзначити, що на цьому етапі кореляційно зменшується і параметр питомої роботи тертя ($A_{\text{терт}}$). Згідно [170, 171] при нормальному функціонуванні мастильного матеріалу в зоні контакту, при накопиченні пошкоджень, всяка аномальна зміна в мастильному процесі призводила до обов'язкового стрибкоподібного збільшення параметра $A_{\text{терт}}$. Однак, в умовах масляного голодування в проведених експериментах на етапі, передуючому схоплюванню контактних поверхонь, встановлено стрибкоподібне зменшення параметра $A_{\text{терт}}$ (рис. 3.12).

Досліджувані мастила суттєво відрізняються щодо кількісних та якісних змін питомої роботи тертя в екстремальних умовах. По-перше, якщо для мастила ВНІНП-286М в періоди стрімкого підвищення пускового моменту тертя кореляційно зростає і питома робота тертя (при напрацюванні 10, 30, 55 циклів $A_{\text{терт}}$ збільшується, в

середньому, в 2 – 2,3 рази), то для мастила AeroShell Grease 33 показники питомої роботи тертя стабільні протягом всього періоду напрацювання.

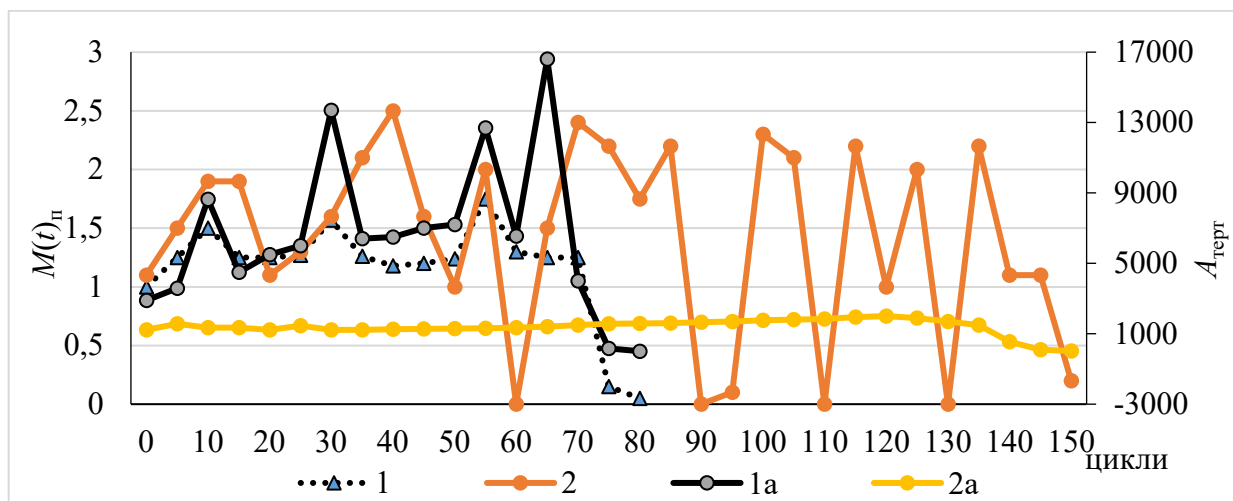


Рис. 3.12. Кінетика зміни моменту тертя при пуску $M(t)_п$ (1, 2) і питомої роботи тертя $A_{терт}$ (1а, 2а) в процесі масляного голодування: 1, 1а – мастило ВНІНП-286М, 2, 2а – мастило AeroShell Grease 33.

По-друге, якщо для мастила ВНІНП-286М показники питомої роботи тертя в контактї без урахування циклів, в яких спостерігається стрімке зростання даного параметру, зафіксовані в межах 5500 – 7200 кДж/мм², то для мастила AeroShell Grease 33 показники питомої роботи тертя в контактї в 3,6 – 5 разів нижче.

Загальновідомо, що робота сил тертя перетворюється в теплоту та енергію структурних перетворень. Проаналізуємо кінетику зміни інтенсивності тепловиділення в контактї при використанні досліджуваних мастил. Даний параметр характеризує потужність тертя і визначається за формулою [172, 173]:

$$Q_{вид} = f N_l V_{ковз} , \quad (3.1)$$

де f – коефіцієнт тертя, N_l – погонне навантаження, $V_{ковз}$ – швидкість ковзання.

Оскільки погонне навантаження та швидкість ковзання, яка обумовлена проковзуванням контактних поверхонь, ідентичні для досліджуваних мастил, то, згідно формули (3.1), інтенсивність тепловиділення в контактї залежить виключно від кінетики зміни коефіцієнту тертя. Так як коефіцієнт тертя в контактї при змащуванні мастилом AeroShell Grease 33 більше в 1,2 рази, в порівнянні з мастилом ВНІНП-

286М, то і інтенсивність тепловиділення для мастила AeroShell Grease 33 в 1,2 рази перевищує аналогічний параметр для мастила ВНІНП-286М (рис. 3.13).

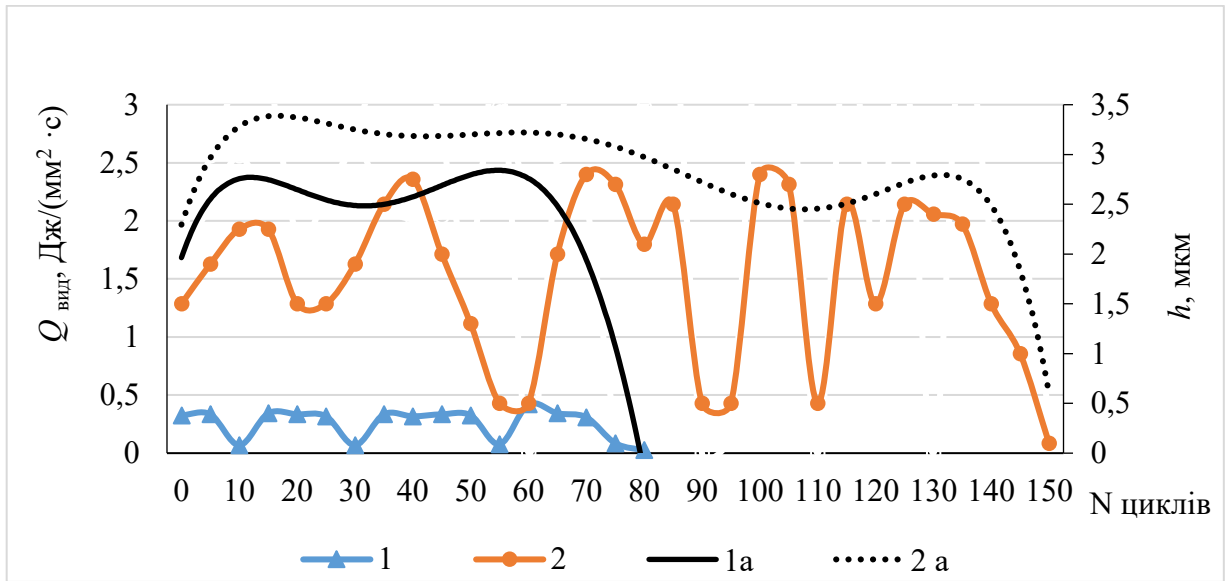


Рис. 3.13. Товщина мастильного шару (1, 2) та інтенсивність тепловиділення в контакті (1а, 2а) в процесі масляного голодування: 1, 1а – мастило ВНІНП-286М, 2, 2а – мастило AeroShell Grease 33.

Однак, розглянутий параметр інтенсивності тепловиділення не в повній мірі відображує суть термічних процесів, які протікають в контакті. Якщо ґрунтуватися на кінетиці зміни інтенсивності тепловиділення для обох досліджуваних мастил, то структурно-термічна активація контактних поверхонь і мастильного матеріалу має характеризуватися ідентичними змінами. Одержані ж експериментальні дані свідчать про суттєві відмінності структурної пристосованості обох мастил та матеріалу контактних поверхонь. Відмінності характеризуються як в полімеризаційних властивостях мастильного матеріалу, сформованій товщині мастильного шару, так і в періоді напрацювання до перших ознак заїдання. За всіма зазначеними параметрами при застосуванні мастила AeroShell Grease 33 встановлені значно більші показники, в порівнянні з мастилом ВНІНП-286М. Оскільки основну частину енергії структурної та термічної активації складає теплота, то і відмінність цього параметру має бути суттєва. Інтенсивність тепловиділення ($Q_{\text{вид}}$) не корелює з експериментально встановленою питомою роботою тертя в контакті ($A_{\text{терт}}$) – $Q_{\text{вид}}$ в 1,2 рази більше, а

$A_{\text{терт}}$ в 3,6 – 5 разів нижче при використанні мастила AeroShell Grease 33.

Згідно [172], одним з головних регуляторів поверхневої міцності матеріалів при терті є теплота. До граничних критичних значень температури зони тертя теплота активує корисні процеси, що забезпечують структурну пристосованість та нормалізують тертя. Вище цих граничних значень теплота призводить до деструкційних процесів в зоні (десорбцію мастильного матеріалу, руйнування метастабільних вторинних структур і т.п.) та обумовлює переходи до недопустимих явищ руйнування.

Згідно [174], умовою виникнення заїдання є критична температура в зоні контакту:

$$t_{\Sigma \text{кр}} \geq t_0 + \vartheta = t_0 + 0,83 \frac{Q_{\text{вид}}}{(\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1 V_{\text{к1}}} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2 V_{\text{к2}}}) \sqrt{b}}, \quad (3.2)$$

де $t_{\Sigma \text{кр}}$ – критична температура в зоні контакту, t_0 – температура поверхонь до входу в зону контакту, ϑ – температура спалаху, яка представляє миттєве підвищення температури, при якій відбувається заїдання, $Q_{\text{вид}}$ – потужність тертя, $\lambda_{1,2}$ – коефіцієнт теплопровідності, $\rho_{1,2}$ – питома вага, $c_{1,2}$ – питома теплоємність випереджаючої (1) і відстаючої (2) поверхонь відповідно; b – напівширина площадки контакту по Герцу.

Розрахунки за формулою (3.2) показали, що найбільший вплив на миттєве підвищення температури в зоні контакту в критичних умовах мащення створює параметр потужності тертя $Q_{\text{вид}}$. Однак миттєвий приріст температури, незалежно від типу досліджуваного мастила, незначний і становить 5 – 10 °С. Отже, $t_{\Sigma \text{кр}} \ll t_0 + \vartheta$, що не є передумовою до заїдання контактних поверхонь. Експериментально ж встановлено, що перші ознаки заїдання в умовах переходу трибосистеми до масляного голодування спостерігаються на 80 та 150 циклах напрацювань при змащуванні поверхонь тертя мастилами ВНІП-286М та AeroShell Grease 33 відповідно.

Зазначимо, що розглянуті формули (3.1) та (3.2) не враховують наявність мастильного матеріалу в контакті, сумарну швидкість кочення контактних поверхонь

– параметрів, які також суттєво впливають на динаміку теплових процесів в трибологічному контакті.

Якщо за основу взяти кінетику зміни питомої роботи тертя $A_{\text{терт}}$, то логічним є пояснення трибологічних процесів в контакті, які призводять до заїдання пар тертя. При використанні мастила ВНІНП-286М питома робота тертя в умовах масляного голодування характеризується високими показниками ($5500 - 7200$ кДж/мм²), що обумовлено домінуванням в контакті переважно граничного режиму мащення. Підвищення енергонавантаженості контакту порушує структурну пристосованість, що проявляється в деструкції граничного мастильного шару, переходу трибосистеми в граничний з ознаками сухого режим мащення. Саме в періоди руйнування мастильної плівки питома робота тертя в контакті зростає до $12000 - 16000$ Дж/мм². Після 75 циклу напрацювання унеможлиблюється відновлення метастабільних структур, товщина мастильного шару, момент тертя та питома робота тертя прагнуть до мінімальних значень, що призводить до заїдання контактних поверхонь.

При використанні мастила AeroShell Grease 33 питома робота тертя в умовах масляного голодування знаходиться в межах $1200 - 2000$ Дж/мм². Значне зниження енергонавантаженості контакту досягається за рахунок ефективної мастильної здатності досліджуваного мастила, що обумовлює переважання гідродинамічного режиму мащення. Незважаючи на періодичне стрімке зниження товщини мастильного шару до $0,4$ мкм і перехід трибосистеми в граничний режим мащення, зростання питомої роботи тертя не встановлено, оскільки повної деструкції граничної плівки не зафіксовано. Однак, після 140 циклу напрацювання в умовах масляного голодування товщина мастильного шару, момент тертя та питома робота тертя прагнуть до мінімальних значень, що призводить до заїдання контактних поверхонь. Це пов'язано з явищами, які обумовлюють кумулятивне накопичення пошкоджень при циклічному навантаженні та призводять до досягнення енергії активації руйнування граничних значень.

Встановлено кореляційний зв'язок між питомою роботою тертя та інтенсивністю зношування контактних поверхонь. Вищі значення питомої роботи тертя, характерні при змащуванні пар тертя мастилом ВНІНП-286М, безпосередньо

відображають інтенсифікацію деструктивних процесів в контактi, що призводять до збільшення зношування контактних поверхонь, в порівнянні з аналогічним параметром при застосуванні мастила AeroShell Grease 33 (рис. 3.14). На рисунку представлена інтенсивність зношування, яка визначалася при прояві перших ознак заїдання елементів трибоспряження. Оскільки зазначені явища спостерігалися при різних циклах напрацювання (для ВНІНП-286М і AeroShell Grease 33 відповідно 80 та 150 циклів), то шлях тертя контактних поверхонь суттєво відрізняється (для випереджаючої поверхні – 1176 м та 2205 м, для відстаючої поверхні – 937 м та 1758 м при змащуванні ВНІНП-286М і AeroShell Grease 33 відповідно), тому наведені показники характеризують лише якісну оцінку процесу.

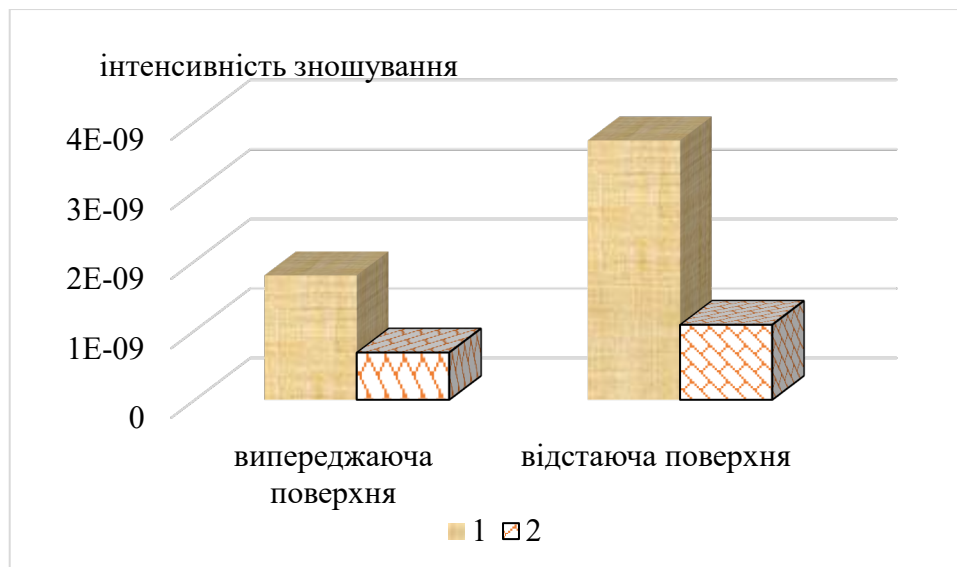


Рис. 3.14. Інтенсивність зношування контактних поверхонь при змащуванні пар тертя мастилами ВНІНП-286М (1) та AeroShell Grease 33 (2).

Як зазначено в [151], зміна питомої роботи поверхневого руйнування ($A_{и}$) має дві області: при нормальному зношуванні даний показник може значно зростати та знаходиться в межах $A_{и} = 5000 - 75000$ кДж/мм³; руйнування ж за рахунок заїдання протікає при стрімкому зниженні $A_{и}$ до 10 кДж/мм³. В проведених експериментах також встановлена аналогічна закономірність, незалежно від типу мастила, – спроможність трибосистеми відновлювати метастабільні структури в умовах критичного режиму тертя свідчить збільшення питомої роботи тертя в контактi.

Однак цей показник досягає мінімальних значень в інтервалах, що характеризуються заїданням контактних поверхонь.

Таким чином, за результатами енергетичного аналізу можна припустити, що при схопленні контактних поверхонь відбувається поглинання певної частини енергії в граничному об'ємі поверхні металу, тим самим посилюючи процеси руйнування матеріалу в межах контактуючих поверхонь.

3.3. Мастильні, антифрикційні та протизношувальні властивості граничних плівок в критичних умовах роботи трибосистеми.

Експерименти проводилися на установці СМЦ-2 з реєстрацією показників трибоконтракту в режимі *online* в нестационарних умовах тертя в режимі пуск (4 с) – стаціонарна робота (7 с) – гальмування (3 с) – зупинка (3 с) [175]. Відтворювався режим кочення з проковзуванням 20 %. Контактне навантаження по Герцу становило 250, 400, 550 і 700 МПа. Перші 300 циклів напрацювання здійснювалося шляхом занурення нижнього ролика у ванночку з мастилом і періодичного намазування мастила на ролик. Це сприяло достатній подачі мастила в зону контакту і запобігало переходу трибосистеми в граничний режим мастильної дії. Подальші дослідження проходили в умовах, при яких подача мастильного матеріалу припинялася. З 300 циклу напрацювання ванночка забиралася, мастило віддалялося з контактних поверхонь (витиралось ганчіркою). Відповідно, триботехнічні властивості, які демонструє мастило в досліджуваних умовах масляного голодування, пояснюються його мастильними, антифрикційними та протизношувальними властивостями граничних плівок, сформованих в процесі тертя на активованих поверхнях металу.

Досліджувані зразки виготовлені зі сталі 30ХГСА (HRC 35). Змащування поверхонь здійснювалося літєвими мастилами на синтетичній основі AeroShell Grease 33 і Ера ВНІНП - 286М.

Наведено та систематизовано результати досліджень після 300 циклів експлуатації. Встановлено, що зі збільшенням σ_{max} від 250 до 700 МПа несуча здатність мастильного граничного шару помітно зменшується. Зокрема, товщина

мастильного граничного шару зменшується в 15 разів при змащуванні робочих поверхонь мастилом ВНІІНП - 286М і в 3,5 рази при змащуванні мастилом AeroShell Grease 33, як показано на рис. 3.15.

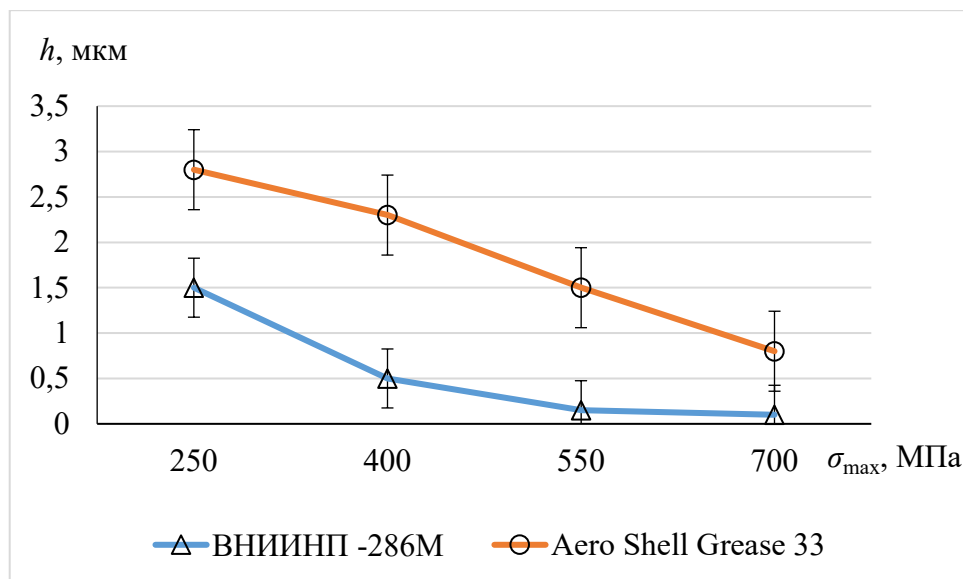


Рис. 3.15. Вплив контактної навантаження на товщину граничних мастильних шарів.

AeroShell Grease 33 демонструє кращі мастильні властивості порівняно з мастилом Ера ВНІІНП-286М, особливо помітні при навантаженнях понад 400 МПа. При σ_{max} 250 МПа товщина граничної плівки, утвореної компонентами синтетичного мастила AeroShell Grease 33, в 1,9 рази більша, ніж у мастила ВНІІНП-286М. Однак при більш високих значеннях навантаження при σ_{max} 550 до 700 МПа ця різниця суттєво зростає до 8-10 разів.

Із зменшенням товщини мастильного шару відбувається відповідне зниження антифрикційних властивостей досліджуваних мастильних матеріалів. Водночас, характер зміни коефіцієнта тертя зі збільшенням навантаження не є таким вираженим. У досліджуваному інтервалі навантажень коефіцієнт тертя зменшується в 3,4 і 2,5 рази для мастил Ера ВНІІНП-286М і AeroShell Grease 33 відповідно (рис. 3.16). Таке зменшення можна пояснити насамперед локальним руйнуванням структурованих граничних шарів мастила, зменшенням ефективної в'язкості мастила та виникненням гідродинамічних процесів під час механічного та термічного плавлення плівки у фрикційному контакті [176].

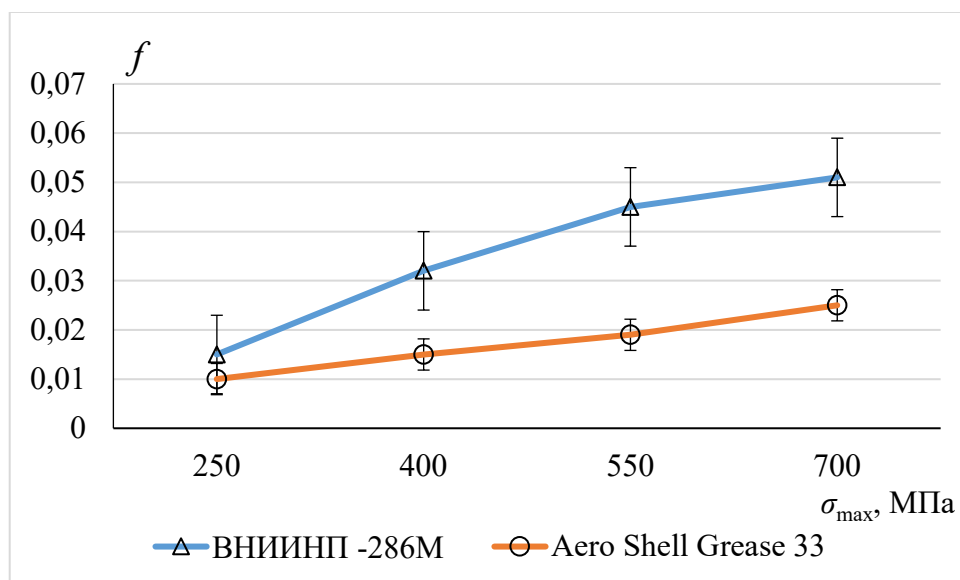


Рис. 3.16. Вплив контактної навантаження на зміну коефіцієнта тертя в умовах масляного голодування.

Механічна деструкція граничних шарів пояснюється різким зростанням градієнта швидкості зсуву мастильної плівки (γ), який, як зазначено в [177], характеризує відношення швидкості ковзання в контакті до товщини мастильної плівки. У випадку мастила ВНИИПП-286М при збільшенні навантаження з 250 до 700 МПа градієнт швидкості зсуву мастильних шарів зростає в 20 разів, тоді як для мастила AeroShell Grease 33 цей параметр збільшується в 3,5 рази (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Зміна градієнта швидкості зсуву мастильних шарів і кількість циклів напрацювання пар тертя до прояву ознак заїдання

Мастильний матеріал	Контактне навантаження, МПа			
	250	400	550	700
	Градієнт швидкості зсуву мастильних шарів, с^{-1}			
Ера ВНИИПП-286М	$1,4 \cdot 10^5$	$4,2 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$	$2,9 \cdot 10^6$
AeroShell Grease 33	$7,5 \cdot 10^5$	$9,1 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$
	Кількість циклів напрацювання до заїдання пар тертя			
Ера ВНИИПП-286М	300	80	50	20
AeroShell Grease 33	900	150	130	100

Як результат, AeroShell Grease 33 демонструє більш ефективні мастильні властивості, а його синтетичні компоненти демонструють більшу стійкість до підвищення градієнта швидкості зсуву щодо реологічних властивостей порівняно з компонентами мастила ВНІНП-286М. Стійкість мастильної плівки до механічної деструкції при підвищенні градієнта швидкості зсуву є ключовим фактором, що забезпечує безперебійну роботу пар трибоспряжень в критичних умовах. У таблиці 3.1 наведено кількість циклів роботи трибоелементів в умовах масляного голодування до початку виникнення початкових ознак заїдання, які візуально проявляються на доріжці тертя, а також підвищеним шумом і зупинкою машини тертя. Результати досліджень показують, що зі збільшенням навантаження тривалість роботи трибосистеми помітно зменшується – в досліджуваному діапазоні контактних навантажень ефективність роботи пар тертя знижується в 15 і 9 разів відповідно при мащенні контактних поверхонь мастилом ВНІНП-286М і AeroShell Grease 33.

Руйнування мастильної плівки при терті є одним з провідних факторів, що обумовлює інтенсифікацію енергетичних процесів, що протікають в зоні контакту. В першу чергу вони призводять до порушення структурної пристосованості контактних поверхонь і мастильного матеріалу в критичних умовах тертя, внаслідок чого відбувається руйнування раніше сформованих метастабільних структур. При цьому перехід трибосистеми в термодинамічно нестабільний стан характеризується насамперед швидкою активацією металу, зумовленою концентрацією напружень в локальних ділянках фрикційного контакту, де порушується захист екрануючої мастильної плівки, що призводить до зростання питомої роботи тертя.

При σ_{max} 250 МПа, згідно з розрахунковою залежністю оцінки режиму мащення $\lambda = h/\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}$ [3], в контакті реалізується еластогідродинамічний ($\lambda = 3,13$) і гідродинамічний ($\lambda = 5,83$) режими мащення при використанні мастил ВНІНП - 286М і AeroShell Grease 33 відповідно. В результаті контактні поверхні залишаються розділеними достатнім шаром мастильного матеріалу, тим самим обмежуючи тангенціальні напруження зсуву в межах тонкого граничного шару мастила, що сприяє зменшенню як зовнішніх силових впливів, так і поверхневої деформації тонких шарів металу. Показники питомої роботи тертя ($A_{терт}$) складають, в

середньому, 3200 і 1000 Дж/мм² при змащуванні пар тертя ВНІІП - 286М і AeroShell Grease 33 відповідно.

При досягненні максимального контактного навантаження σ_{max} 700 МПа умови мащення трибосистеми зміщуються в бік граничного з ознаками сухого ($\lambda = 0,21$) та граничного ($\lambda = 1,67$) режимів мащення для мастил ВНІІП-286М та AeroShell Grease 33, відповідно. За таких умов інтенсифікуються механохімічні процеси в тонких поверхневих шарах металу, що призводить до посилення деформаційних змін. Ці процеси пов'язані з нерівноважними кінетичними переходами трибосистеми і порушенням самоорганізації дисипативних структур, що призводить до зростання питомої роботи тертя. При змащуванні ВНІІП-286М питома робота тертя ($A_{тр}$) зростає втричі при збільшенні σ_{max} з 250 до 700 МПа, досягаючи 10 000 Дж/мм² (рис. 3.17). Однак використання мастила AeroShell Grease 33 сприяє зменшенню питомої роботи тертя, загалом знижуючи її в середньому в 2 - 3 рази.

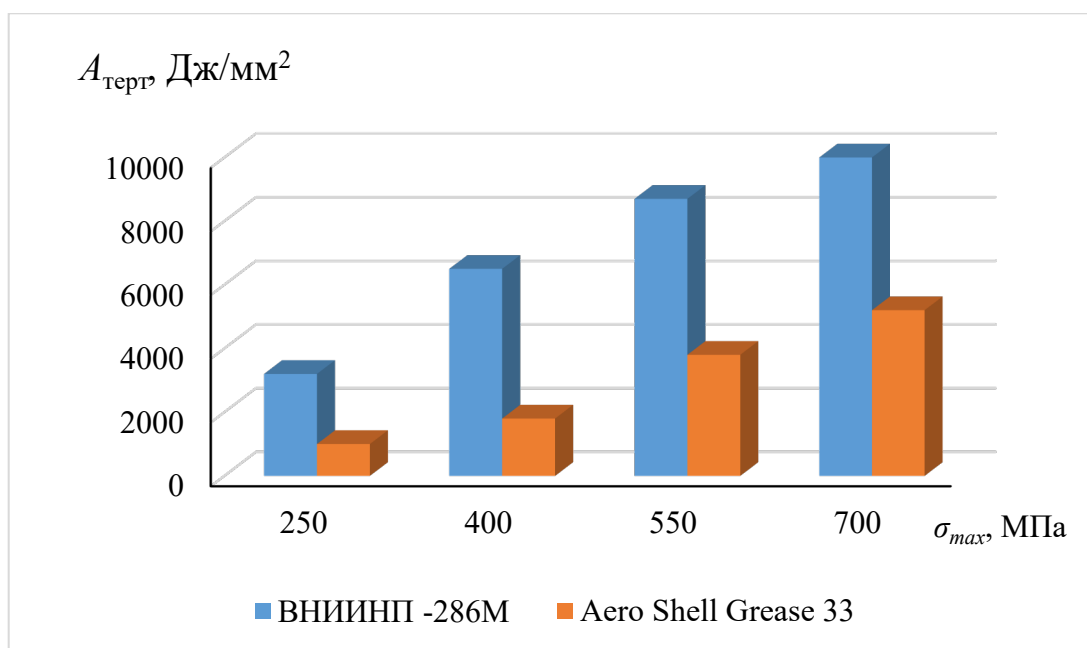


Рис. 3.17. Зміна питомої роботи тертя в контакті в умовах підвищення контактного навантаження.

Стабільність дисипативних структур під час самоорганізації в умовах динамічного навантаження відіграє вирішальну роль у роботі трибосистеми. Товщина мастильної плівки в межах 1,5 - 3 мкм має вирішальне значення для підтримання цієї сталості, що сприяє реалізації еласто- і гідродинамічного режимів мащення, прояву

високих антифрикційних властивостей (f в межах 0,01 - 0,015) і забезпечує низьку питому роботу тертя ($A_{\text{терт}}$ становить 1000 – 3200 Дж/мм²) при σ_{max} 250 МПа, в умовах масляного голодування трибосистема може працювати від 300 до 900 циклів, залежно від типу мастила (табл. 3.1). Однак, коли максимальне контактне навантаження σ_{max} зростає до 700 МПа, товщина мастильної плівки зменшується до 0,1 – 0,8 мкм, коефіцієнт тертя збільшується до 0,03 – 0,05, а питома робота тертя зростає до діапазону 5000 - 10000 Дж/мм². В результаті відбувається значне скорочення робочих циклів трибосистеми, причому початкові ознаки зносу з'являються вже через 20 - 100 робочих циклів, що залежить від типу мастила.

Тому за рахунок вибору мастила AeroShell Grease 33 замість мастила ВНІНП-286М кількість робочих циклів трибосистеми до появи початкових ознак заїдання збільшилася в 3 і 5 разів відповідно при σ_{max} 250 і 700 МПа.

Крім розглянутих вище мастильних і антифрикційних властивостей синтетичного мастила AeroShell Grease 33, воно демонструє більш ефективні протизносні властивості порівняно з мастилом ВНІНП-286М при використанні в аналогічних умовах експлуатації. Зокрема, при змащуванні пар тертя мастилом AeroShell Grease 33 спостерігається зменшення сумарного лінійного зносу випереджаючої та відстаючої поверхонь в 1,3 та 1,7 рази при σ_{max} 250 та 700 МПа відповідно (рис. 3.18) у порівнянні з мастилом ВНІНП-286М.

За результатами аналізу експериментальних даних щодо триботехнічних характеристик досліджуваних мастил виявлено, що найбільший вплив на знос має контактне навантаження (σ_{max}), питома робота тертя ($A_{\text{терт}}$) і товщина мастильного шару (h). З урахуванням кореляційного впливу отримана емпірична залежність лінійного зносу ($L_{\text{лін}}$) від зазначених параметрів:

$$L_{\text{лін}} = \frac{\sigma_{\text{max}}^{0,1} \cdot A_{\text{терт}}^{0,1}}{h^{0,2}} \quad (3.3)$$

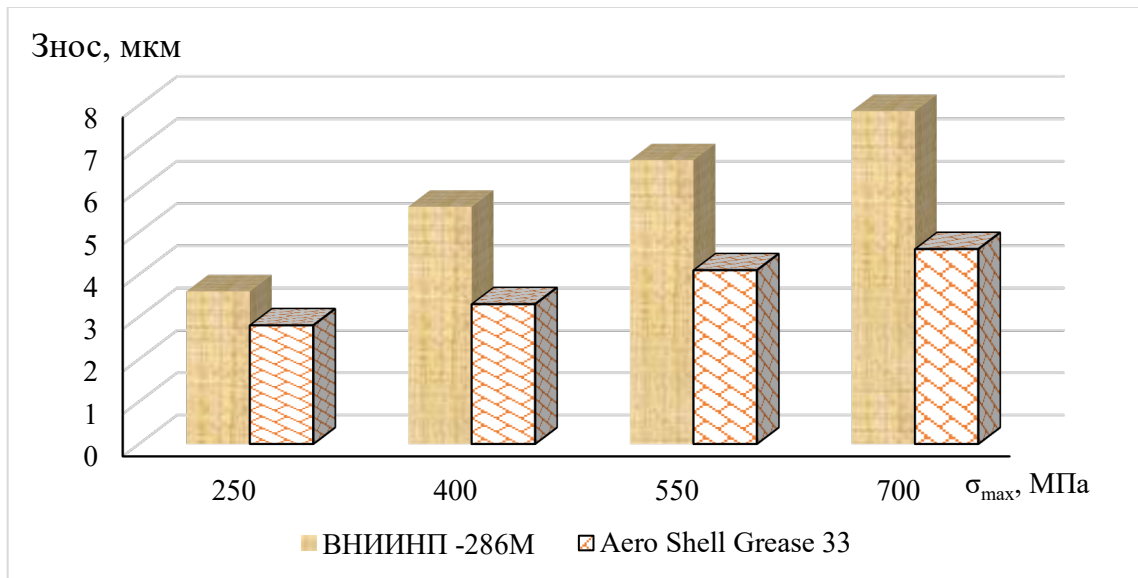


Рис. 3.18. Загальний лінійний знос випереджаючої та відстаючої поверхонь в нестационарних умовах тертя.

Отримані розрахункові значення $L_{\text{лін}}$ за формулою (3.3) демонструють високий рівень збіжності з результатами вимірювань лінійного зносу, отриманими за допомогою методу штучних баз (прилад ПМТ-3). Це свідчить про наявність якісної апроксимації залежності, що пропонується для оцінювання лінійного зносу контактних поверхонь в критичних умовах роботи. (рис. 3.19).

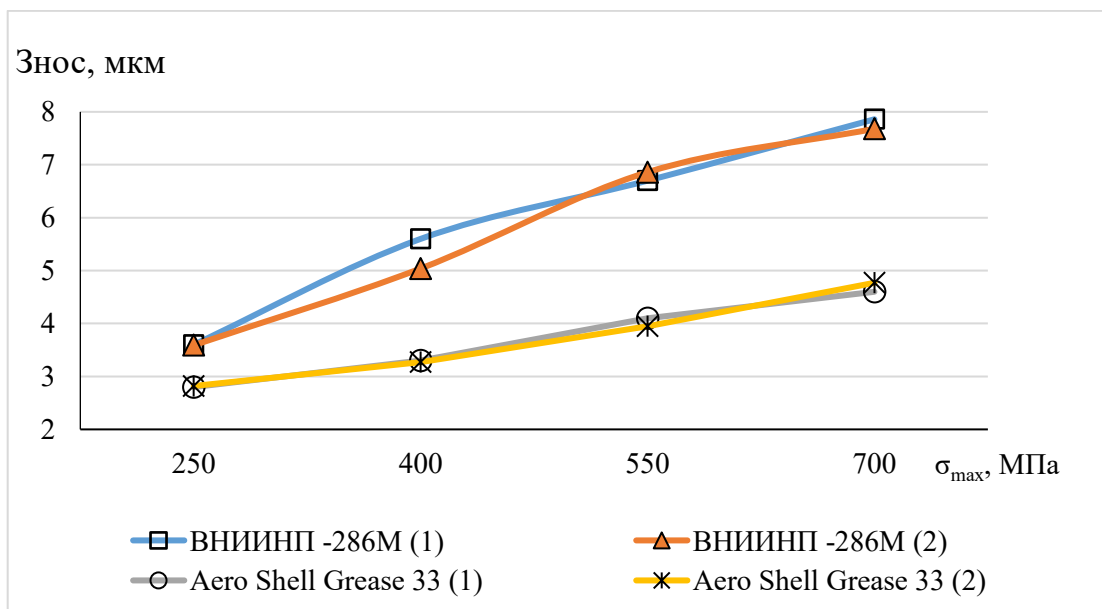


Рис. 3.19. Лінійний знос поверхонь в умовах кочення з проковзуванням: 1 – експериментальні значення (метод штучних баз), 2 – розрахункові значення за формулою (3.3).

Запропонована емпірична залежність дозволяє прогнозувати максимальний знос контактних поверхонь в критичних умовах тертя, до яких відносяться умови припинення подачі мастильного матеріалу в зону контакту і перехід роботи трибосистеми в режим масляного голодування. Якісна оцінка даного процесу характеризується інтенсифікацією деструкційних процесів в граничному шарі мастильного матеріалу і деформаційними змінами тонких поверхневих шарів металу, що призводять до підвищення енергонавантаженості трибоконтракту і збільшення зносу контактних поверхонь.

Висновки до розділу 3.

1. Встановлено, що стала товщина мастильного шару в режимі прискореного масляного голодування на сталі 9ХС на 30-40 % перевищує товщину шару, зафіксовану на сталі 30ХГСА. Незалежно від типу матеріалу контактних поверхонь, збільшення проковзування з 3 до 20 % обумовлює зростання товщини мастильного шару в контакті в 2 рази, що спричинено більш інтенсивною активацією поверхонь тертя внаслідок зростання дотичних напружень зсуву.

2. Визначено механізм ступеневого руйнування граничних мастильних шарів на сталі 9ХС в режимі масляного голодування в умовах кочення з проковзуванням: за умов примусового видалення мастила з зони контакту – під дією градієнта швидкості зсуву відбувається порушення суцільності граничних шарів внаслідок їх стрімкої дезорієнтації протягом 5 хв з наступним проявом ознак заїдання контактних поверхонь; без примусового видалення мастила з зони контакту (припинено додаткову подачу мастила) – тривалість руйнування граничних шарів мастила AeroShell Grease 33 збільшується до 55 хв за рахунок «резерву» синтетичної суміші вуглеводнів і естеру в анізотропних граничних шарах.

3. Зменшення твердості контактних поверхонь в 1,5 рази (HRC 55 – сталь 9ХС, HRC 35 – сталь 30ХГСА) в режимі масляного голодування без примусового видалення мастила AeroShell Grease 33 спричинює зростання лінійного зносу в 2 рази для випереджаючої і відстаючої поверхонь, прояву ознак заїдання внаслідок

домінування пружно-пластичних деформацій в поверхневих шарах сталі 30ХГСА та інтенсифікації механодеструкції граничних шарів протягом 32 хв.

4. Домінування граничного режиму мащення при збільшенні ступеня проковзування з 3 до 40 % спричинено зростанням градієнту швидкості зсуву до $8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, що призводить до зниження несучої здатності мастильної плівки внаслідок її дезорієнтації та унеможливлення відновлення тиксотропних властивостей структурними компонентами мастила AeroShell Grease 33.

5. Встановлена залежність процесів відновлення мастильних шарів в контакті після режиму масляного голодування за умов поновлення постачання мастила AeroShell Grease 33 від ступеня проковзування: при проковзуванні 3 % через 15 хв товщина мастильної плівки досягає 1,9 мкм, при проковзуванні 40 % через 20 хв товщина мастильної плівки складає 0,35 мкм.

6. Мастило AeroShell Grease 33 забезпечує домінування граничного режиму мащення ($\lambda = 0,7$) в нестационарних умовах тертя в режимі масляного голодування, на відміну від граничного з ознаками сухого ($\lambda = 0,15$) для мастила Ера ВНІНП-286М, за рахунок "резерву" мастильного матеріалу, що забезпечується при попередній нормальній роботі трибосистеми за рахунок більшої схильності синтетичних компонентів мастила до полімеризаційних явищ та збільшенням товщини мастильної плівки, в середньому, в 3,5 рази.

7. Використання мастила AeroShell Grease 33 забезпечує зниження енергонавантаженості трибоконтакту – питома робота тертя в умовах масляного голодування складає 1200-2000 Дж/мм², що в 3,6-5 разів нижче за умов використання мастила Ера ВНІНП-286М, що є визначальним чинником для підвищення зносостійкості сталі 30ХГСА в 2,2 рази та збільшення вдвічі циклів наробітки до проявів перших ознак заїдання контактних поверхонь.

8. Встановлені загальні закономірності ознак заїдання пар тертя локальних контактів, незалежно від типу мастила та матеріалу контактних поверхонь, які проявляються в прагненні до мінімальних значень товщини граничних мастильних шарів, моменту тертя та питомої роботи тертя, що свідчить про неможливість

відновлення метастабільних структур та досягнення трибосистемою граничних значень енергії активації руйнування.

9. В діапазоні контактного навантаження 250 – 700 МПа мастило AeroShell Grease 33 характеризується більш ефективними мастильними властивостями, в порівнянні з мастилом Ера ВНІНП-286М: при σ_{max} 250 МПа товщина граничних плівок, сформованих компонентами мастила AeroShell Grease 33, в 1,9 разів перевищує товщину граничних плівок мастила ВНІНП-286М, при σ_{max} 550 – 700 МПа цей показник збільшується в 8 - 10 разів.

10. Зростання контактного навантаження з 250 до 700 МПа для пар тертя локальних контактів при коченні з проковзуванням 20 % призводить до збільшення коефіцієнту тертя в 3,4 і 2,5 разів для Ера ВНІНП-286М і AeroShell Grease 33 відповідно за рахунок локального руйнування структурованих граничних мастильних шарів, зменшення ефективної в'язкості мастильного матеріалу і проявом гідродинамічних ефектів при механічному і термічному плавленні плівки.

11. Різке скорочення періоду напрацювання трибосистеми до перших ознак заїдання в умовах масляного голодування при збільшенні контактного навантаження з 250 до 700 МПа в 15 і 9 разів відповідно при змащуванні контактних поверхонь ВНІНП-286М і AeroShell Grease 33 обумовлено *домінуванням* граничного з ознаками сухого ($\lambda = 0,21$) і граничного ($\lambda = 1,67$) режимів мащення для ВНІНП - 286М і AeroShell Grease 33 відповідно, при яких інтенсифікуються механо-хімічні процеси в тонких поверхневих шарах металу, підвищується ступінь їх деформаційних змін, що спричинює нерівноважні кінетичні переходи трибосистеми, порушення самоорганізації дисипативних структур, збільшення питомої роботи тертя.

12. Застосування мастила AeroShell Grease 33 сприяє зниженню питомої роботи тертя, в середньому, в 2 - 3 рази та забезпечує зниження загального лінійного зносу випереджаючої і відстаючої поверхонь в 1,3 і 1,7 разів при σ_{max} 250 и 700 МПа відповідно, в порівнянні з мастилом ВНІНП - 286М.

13. Отримана емпірична залежність лінійного зносу пар тертя локальних контактів в умовах кочення з проковзуванням урахуванням кореляційного впливу на даний показник контактного навантаження, питомої роботи тертя і товщини

мастильного шару, що дозволяє прогнозувати максимальний знос контактних поверхонь в умовах припинення подачі мастильного матеріалу в зону контакту і переходу роботи трибосистеми в режим масляного голодування.

РОЗДІЛ 4

КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТИКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ТРИБОТЕХНІЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Надійність механічних систем закладається на стадії проектування, забезпечується при виготовленні і підтверджується в період експлуатації машин та механізмів. Мазильний матеріал в значній мірі впливає на показники надійності. Сучасні вимоги до надійності трибомеханічних систем пов'язані з якісним поліпшенням мазильних матеріалів, їх складових і, в цілому, обумовлені поглибленим аналізом стану мазильного середовища і контактної поверхні металу в процесі тертя. У сучасних умовах технологія виробництва мазильних матеріалів і їх компонентів інтенсивно розвивається і удосконалюється. Створюються нові мазильні матеріали на мінеральній і синтетичній основах, ведуться серйозні розробки з оптимізації компонентного складу олів і мазил, вдосконалюються їх фізичні, хімічні та експлуатаційні властивості.

Першочергово, вже на стадії проектування конструктор повинен забезпечуватися методичною базою щодо вибору не тільки матеріалів деталей машин за критеріями міцності, а й методичним забезпеченням щодо вибору мазильних матеріалів, що включає оцінку температурного діапазону застосування, сумісності з матеріалами пар тертя, аналіз протизношувальних властивостей, несучої здатності мазильного шару, схильності до формування захисних шарів на поверхнях тертя та ін.

Мазильні матеріали, оптимально підібрані для вирішення конкретної технічної задачі, можуть дати значний ефект за рахунок економії енергії, зниження зносу, витрат на технічне обслуговування і ремонт, збільшення терміну служби машин і устаткування, і, нарешті, вони можуть бути раціональним засобом вирішення актуальних проблем екології і охорони навколишнього середовища [178].

Актуальним напрямом при впровадженні нових зразків мазильних матеріалів у виробництво є розробка алгоритму кваліфікаційних випробувань щодо визначення

рівня експлуатаційних властивостей оливи. При цьому обсяг методів оцінки якісних характеристик мастил повинен включати як лабораторні дослідження, так і модельні стенди дослідження або установки.

В Україні ведуться розробки нових технічних умов на низку авіаційних мастильних матеріалів. Одним із перспективних до виробництва та впровадження в експлуатацію є маслосуміш СМ-9 [1] Область застосування маслосуміші СМ-9: призначена для застосування у редукторах трансмісії вертольотів у зимовий період. Склад маслосуміші СМ-9 згідно [179] - суміш АМГ-10 і ТСгіп у співвідношенні 50 % оливи ТСгіп і 50 % гідравлічної рідини АМГ-10 (FH-15, FH-51) або 67 % оливи ТСгіп і 33 % гідравлічної рідини АМГ-10 (FH-15, FH-51). Гідравлічна рідина АМГ-10 виробляється на основі глибокодеароматизованої низькозастигаючої фракції, одержуваної з продуктів гідрокрекінгу суміші парафіністих нафт і складається з нафтових та ізопарафінових вуглеводнів. Гідравлічна рідина АМГ-10 містить загущаючу та антиокислювальну присадки, а також спеціальний відмінний органічний барвник. Олива для гіпоїдних передач ТСгіп належить до групи універсальних олив з протизадирними присадками високої ефективності та багатофункціональної дії. Олива ТСгіп забезпечує нормальне функціонування гіпоїдних передач, що працюють з ударними навантаженнями при контактних напруженнях вище 3000 МПа та об'ємній температурі оливи до 150 °С.

Для авіаційних мастильних матеріалів вітчизняних виробників необхідно розробити заходи щодо впровадження оливи в експлуатацію (стендові, льотні випробування, експлуатація під наглядом), спрямованих на оцінку працездатності авіатехніки із застосуванням нової оливи, встановлення ресурсу та обмежень застосування. Після отримання позитивних результатів випробувань на всіх етапах нова марка оливи може бути вписана в посібник з експлуатації.

4.1. Контроль якості маслосуміші СМ-9 за триботехнічними показниками.

Об'єкти досліджень та умови експерименту. Мастильний матеріал: зразок № 1 – олива «Бора Б» СМ-9 (ТУ У 19.2-38474081-017:2018 зі зм. 1 «Оливи трансмісійні

«Бора Б») та зразок № 2 – маслосуміш авіаційна СМ-9 (ТУ 0253-001-49878493-2005 зі зм. 1-13) [180].

Матеріал пар тертя: ролики зі сталі 40ХН (HRC 38, Ra 0,34 мкм). Змащування контактних поверхонь здійснювалось шляхом занурення нижнього ролика в ванночку з мастильним матеріалом.

Режим тертя: нестационарні умови – циклічність проведення в умовах пуск – стаціонарна робота – гальмування – зупинка (рис. 4.1).

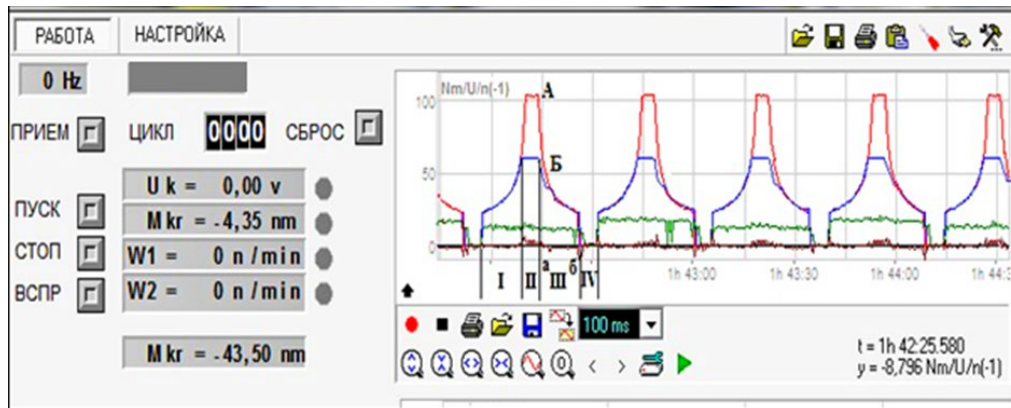


Рис. 4.1. Інтерфейс програми роботи трибосистеми в нестационарних умовах тертя: I – пуск; II – стаціонарна робота; III – гальмування; IV – зупинка.

Максимальна частота обертів: для випереджаючої поверхні – 700 об/хв, для відстаючої поверхні – 500 об/хв Проковзування – 30 %. Шлях тертя за один цикл: для випереджаючої поверхні – 91,845 м, для відстаючої поверхні – 62,8 м. Загальний шлях тертя: для випереджаючої поверхні – 9184,5 м, для відстаючої поверхні – 6280 м.

Максимальне контактне навантаження по Герцу – 200 МПа.

Кількість циклів в експерименті: 100 циклів (з 1-го по 45-й цикл – температура оливи 20 °С, з 46-го по 50-й цикл – нагрівання оливи, з 51-го по 100-й цикл – температура оливи 100 °С). Тривалість циклу – 80 с.

Проведені дослідження на програмно-апаратному комплексі за допомогою роликової аналогії моделювали роботу зубчастих передач в умовах кочення з проковзуванням. Похибки одержаних експериментальних значень досліджуваних показників знаходяться в межах 7 – 10 %.

Проаналізуємо кінетику зміни триботехнічних параметрів при напрацюванні в нестационарних умовах тертя.

Досліджувані мастильні матеріали зразок № 1 та зразок № 2 характеризується високими антифрикційними властивостями в досліджуваному температурному діапазоні мастильного матеріалу (рис. 4.2). Для зразка № 1 середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,0183, незалежно від температури мастильного матеріалу, коефіцієнт тертя стабільний, діапазон коливань даного параметру знаходиться в межах 0,015...0,026. Підвищення коефіцієнта тертя на 58 – 60 циклах обумовлено зміною природи граничних шарів при підвищенні температури мастильного матеріалу. Для зразка № 2 середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,0147, незалежно від температури мастильного матеріалу, коефіцієнт тертя нестабільний, діапазон коливань даного параметру знаходиться в межах 0,009...0,034. Встановлене періодичне зростання/зниження коефіцієнту тертя при напрацюванні свідчить про нестабільність триботехнічних процесів в фрикційному контакті.

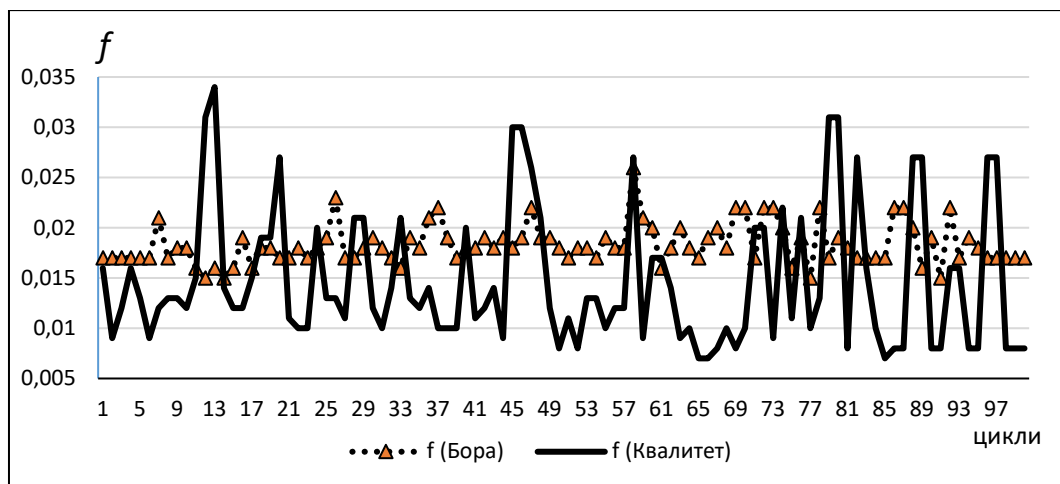


Рис. 4.2. Кінетика зміни коефіцієнта тертя.

Порівняємо кінетику зміни мастильних властивостей авіаційних олив в триботехнічному контакті. Досліджувана олива «Бора Б» СМ-9 (зразок № 1) характеризується ефективними мастильними властивостями як в період пуску, так і при максимальних досліджуваних обертах (рис. 4.3). 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. При пуску, температура мастильного матеріалу 20 °С, переважає змішаний режим мащення, при зростанні температури мастильного матеріалу до 100 °С домінує еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний) режим мащення, що свідчить про ефективні пускові властивості оливи «Бора Б» СМ-9. При максимальних обертах досліджуваних зразків домінує гідродинамічний режим мащення, незалежно від температури оливи, що свідчить про ефективне розділення контактних поверхонь внаслідок утворення мастильного шару.

Маслосуміш авіаційна СМ-9 (зразок № 2) характеризується ефективними мастильними властивостями при максимальних досліджуваних обертах, забезпечуючи гідродинамічний режим мащення. Загальна товщина мастильного шару для зразка № 2, в середньому, в 1,32 рази менше, в порівнянні зі зразком № 1 (рис. 4.3). В період пуску встановлено нестабільність мащення, до 20 % циклів спостерігається сухий – граничний з ознаками сухого режим мащення, що обумовлено тривалим періодом формування та адаптації граничних шарів мастильного матеріалу до нестационарних умов тертя.

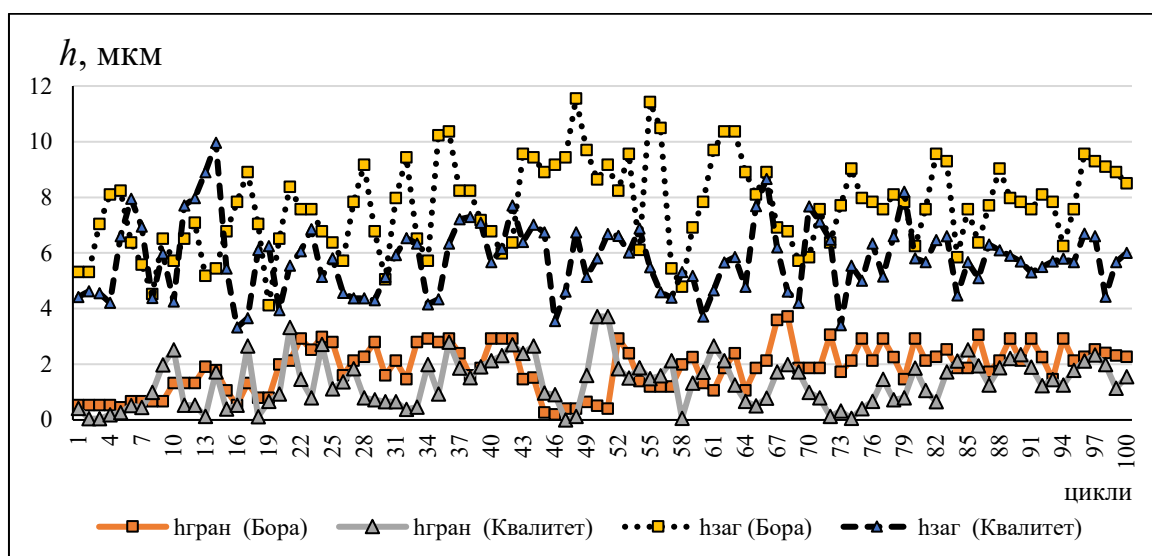


Рис. 4.3. Кінетика зміни товщини граничних адсорбційних шарів ($h_{\text{гран}}$) та загальної товщини мастильного шару ($h_{\text{заг}}$) в контакті при напрацюванні.

Оскільки оливи використовуються в редукторах трансмісії вертольотів, де діють великі контактні навантаження та градієнти швидкості зсуву, доцільно проаналізувати реологічні показники мастильних матеріалів.

Олива «Бора Б» СМ-9 (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 мастильного шару на рівні, в середньому, 13,89 МПа з діапазоном розбіжностей в межах 10,91.....18,85 МПа.

Незважаючи на високі градієнти швидкості зсуву в контакті, від $1,99 \cdot 10^3$ до $2,26 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, які виникають при максимальній швидкості ковзання 0,71 м/с в умовах кочення з проковзуванням, мастильний матеріал характеризується високою ефективною в'язкістю, в середньому, 5142 Па·с (рис. 4.4). Це свідчить про стійкість компонентів оливи до деструкції в умовах зростання градієнту швидкості зсуву. Найбільше зниження ефективної в'язкості в контакті до 378.....914 Па·с відбувається в умовах початкового підвищення температури оливи (45 – 50 цикли випробувань). Це обумовлено зміною природи граничних адсорбційних шарів, які характеризуються ефективною адаптацією в широкому діапазоні температур.

Для маслосуміші авіаційної СМ-9 (зразок № 2) встановлено інші зміни реологічних показників в нестационарних умовах мащення. По-перше, середні показники напруження зсуву мастильного шару в 1,27 разів менше, в порівнянні з зразком № 1, та становлять 10,98 МПа. Однак, для даного мастильного матеріалу встановлено широкий діапазон розбіжностей в межах 5,19....29,38 МПа. Це обумовлено тривалою адаптацією граничних шарів мастильного матеріалу до високих градієнтів швидкості зсуву в умовах кочення з 30% проковзуванням, які досягають $1,17 \cdot 10^3$ до $7,2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Спостерігається періодична деструкція граничних

шарів мастильного матеріалу в фрикційному контакті при наробітку, що свідчить про зниження їх протизношувальних властивостей.

По-друге, низька схильність до структуризації компонентів мастильного матеріалу на активованих тертям поверхнях металу обумовлює менш виражену залежність ефективної в'язкості оливи від градієнту швидкості зсуву, середні показники знаходяться на рівні 500 Па·с. При зростанні температури оливи до 100 °С в умовах початкового підвищення температури оливи встановлено зниження ефективної в'язкості до 80 Па·с, однак при подальшому напрацюванні пар тертя даний параметр зростає до 600 – 800 Па·с (рис. 4.4).

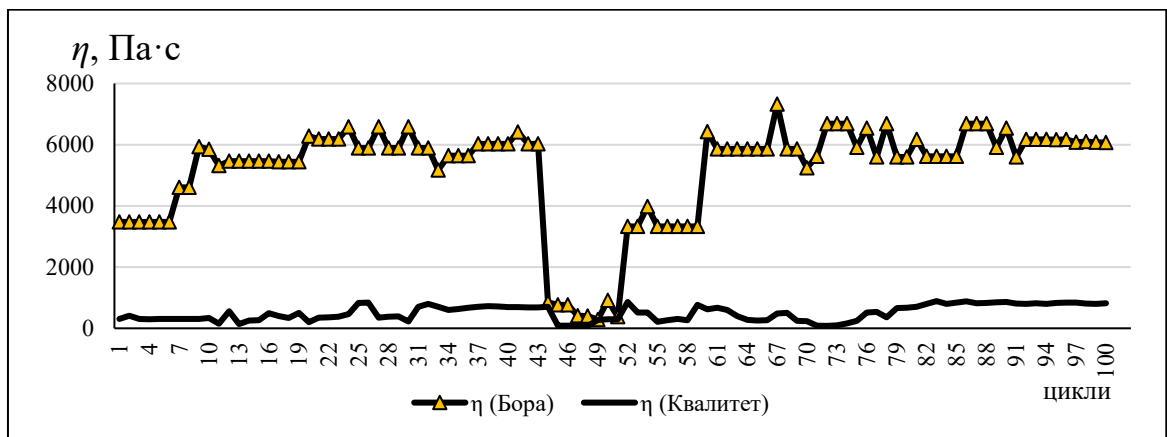


Рис. 4.4. Кінетика зміни ефективної в'язкості оливи (η) в контактi.

Важливим експлуатаційним параметром трибосистеми є енергонавантаженість фрикційного контакту, яку можна оцінити за кінетикою зміни питомої роботи тертя ($A_{\text{терт}}$). Даний параметр залежить від типу мастильного матеріалу, матеріалу контактних поверхонь, умов роботи трибосистеми.

Одержані експериментальні значення $A_{\text{терт}}$ для зразка № 1 в діапазоні 1186.....6328 Дж/мм² характеризують нормальні умови роботи трибосистеми (рис. 4.5). З підвищенням температури оливи з 20 до 100 °С питома робота тертя зростає, в середньому, в 1,6 раз, що свідчить про перехід трибосистеми в більш складні умови тертя. Однак, досліджуваний мастильний матеріал за таких умов забезпечує реалізацію в контактi гідродинамічного режиму мащення, а метал характеризується високою зносостійкістю.

Для зразка № 2 встановлено більш інтенсивні енергетичні процеси в фрикційному контакті. Питома робота тертя нестабільна, характеризується широким діапазоном коливань в межах 1300...33430 Дж/мм², незалежно від температури мастильного матеріалу. Не досягнення метастабільного стану трибосистеми за енергетичним показником може призвести до інтенсифікації деструкційних процесів в приповерхневих шарах металу та зниженню його зносостійкості.

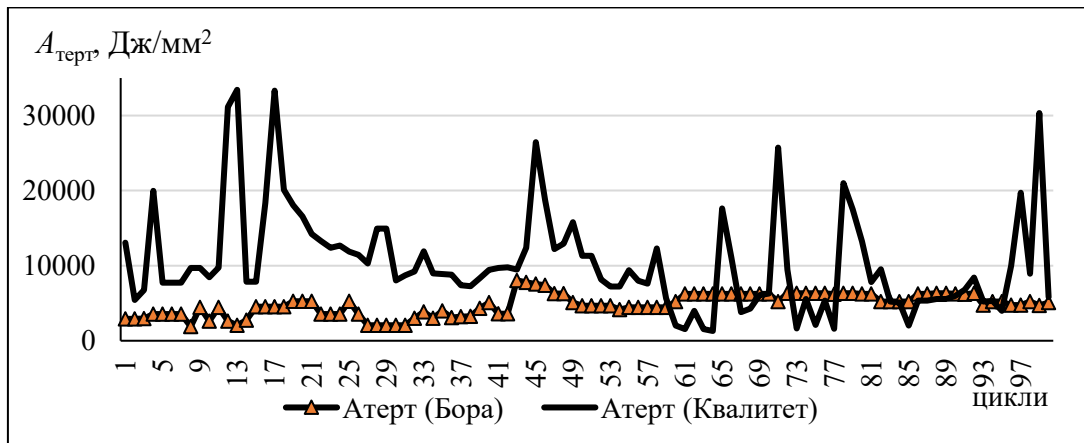


Рис. 4.5. Кінетика зміни питомої роботи тертя при напрацюванні.

Узагальнені результати проаналізованих триботехнічних параметрів досліджуваних мастильних матеріалів представлені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Антифрикційні, мастильні та реологічні характеристики СМ-9

Показники	Мастильний матеріал			
	зразок № 1 олива «Бора Б» СМ-9 (виробництво: ТОВ «Бора Б»)		зразок № 2 маслосуміш авіаційна СМ-9 (виробництво: ООО «Квалитет Авиа»)	
	Температура мастильного матеріалу			
	20	100	20	100
1	2	3	4	5
Коефіцієнт тертя	0,016 – 0,023	0,015 – 0,026	0,009 – 0,034	0,007 – 0,031
Товщина граничних адсорбційних шарів, мкм	0,53 – 2,9	0,398 – 3,58	0,048 – 3,32	0 – 3,72

1	2	3	4	5
Загальна товщина мастильного шару в контактi, мкм	4,5 – 10,36	4,78 – 10,36	3,32 – 9,964	3,41 – 8,66
Режим мащення при пуску	1,1 (граничний) – 6 (гідродинамічний)	0,82 (з ознаками сухого) – 7,73 (гідродинамічний)	0,1 (з ознаками сухого) – 6,9 (гідродинамічний)	0 (сухий) – 7,74 (гідродинамічний)
Режим мащення при максимальних обертах	9 – 21 (гідродинамічний)	9 – 21 (гідродинамічний)	6,91 – 20,72 (гідродинамічний)	7,09 – 18,01 (гідродинамічний)
Напруження зсуву масляного шару, МПа	10,91 – 16,29	11,17 – 18,85	6,45 – 26,3	5,19 – 29,39
Ефективна в'язкість в контактi, Па·с	3477 – 6581	3326 – 7368	142,7 - 836	80 - 889
Питома робота тертя, Дж/мм ²	1186 – 5275	4147 – 6328	5452 - 33430	1300 - 30330

Однією з найголовніших характеристик олив в процесі експлуатації є їх протизношувальні властивості, тому встановлення закономірностей зношування пар тертя дозволить прогнозувати їх довговічність та безвідмовність.

Загальний лінійний знос роликів зі сталі 40ХН становить 4,9 мкм та 5,74 мкм при змащуванні пар тертя відповідно оливою зразок № 1 та зразок № 2 (рис. 4.6). Знос відстаючої поверхні в 2,38 (зразок № 1) та в 1,9 (зразок № 2) разів перевищує знос випереджаючої поверхні, що обумовлено, за теорією К.Т. Трубіна [181, 182], зниженням межі витривалості відстаючої поверхні внаслідок зростання швидкості втомного руйнування в умовах різновекторного направлення сил тертя в контактi на випереджуючій та відстаючій поверхнях.

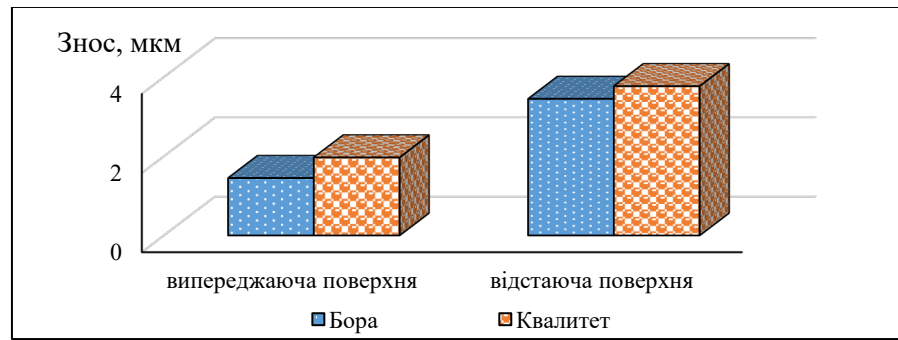


Рис. 4.6. Знос контактних поверхонь при напрацюванні.

Інтенсивність зношування як випереджаючої, так і відстаючої поверхонь характеризується низькими значеннями, що свідчить про високу зносостійкість контактних поверхонь та ефективні протизношувальні характеристики досліджуваних олив (табл. 4.2). При змащуванні пар тертя зразком № 2 інтенсивність зношування випереджаючої та відстаючої поверхонь зростає в 1,36 та в 1,09 разів відповідно, в порівнянні з зразком № 1.

Таблиця 4.2

Протизношувальні характеристики маслосуміші СМ-9

Показники	Мастильний матеріал			
	зразок № 1 олива «Бора Б» СМ-9		зразок № 2 маслосуміш авіаційна СМ-9	
	Знос контактних поверхонь (сталь 40ХН) після 100 циклів напрацювання			
Загальний лінійний знос дослідних зразків, мкм	4,9		5,74	
Знос, мкм	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня
	1,45	3,45	1,97	3,77
Інтенсивність зношування	$1,57875 \cdot 10^{-10}$	$5,49363 \cdot 10^{-10}$	$2,14492 \cdot 10^{-10}$	$6,00318 \cdot 10^{-10}$
Зносостійкість	$6,33 \cdot 10^9$	$1,82 \cdot 10^9$	$4,66 \cdot 10^9$	$1,67 \cdot 10^9$
	Мікротвердість дослідних зразків (сталь 40ХН)			
Мікротвердість поверхні до експерименту (вихідна), МПа	4377	4590	4310	4658
Мікротвердість поверхні після 100 циклів напрацювання, МПа	2764	2758	3118	2914

Оскільки компоненти мастильного матеріалу впливають на приповерхневі шари металу, модифікуючи їх в процесі тертя, була проведена оцінка міцністних

характеристик контактних поверхонь. Зниження мікротвердості сталі 40ХН після напрацювання 100 циклів встановлено в 1,58 та в 1,66 разів для випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно при змащуванні зразком № 1; та в 1,38 і в 1,6 разів для випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно при змащуванні зразком № 2. Знеміцнення поверхневих шарів металу обумовлено проявом ефекту Ребіндера – адсорбційною пластифікацією твердих тіл під дією поверхнево - активних речовин оливи. Товщина пластифікованого шару може складати до 0,1 мкм. Дане явище позитивно впливає на триботехнічні процеси в контакті, оскільки забезпечується зменшення поверхневої енергії контактних поверхонь при адсорбції активних компонентів присадки оливи та формуванні граничних адсорбційних шарів як фізичної, так і хімічної природи. Це призводить до підвищення зносостійкості контактних поверхонь за рахунок зниження опору поверхневого шару твердого тіла пластичному деформуванню, полегшення пластичного зсуву у зернах та виходу дислокацій на поверхню, утворення більш дрібнозернистої структури.

4.2. Оцінка триботехнічних показників авіаційної оливи ВО-12.

Досліджувались оливи двох виробників: зразок № 1 – олива «Бора Б» ВО-12 (виробництво: ТОВ «Бора Б», Україна, продукція випускається за ТУ У 19.2-38474081-017:2018 зі зм. 1 «Оливи трансмісійні «Бора Б» Технічні умови») та зразок № 2 – олива всесезонна ВО-12 (виробництво: ООО «Квалитет Авіа», продукція випускається за ТУ 38.401-58-359-2005 зі зм. 1). Олива «Бора Б» ВО-12 розроблена з метою організації робіт з імпортозаміщення та подолання критичної залежності оборонної промисловості України від імпортних поставок олив даного типу.

Дослідження мастильних матеріалів проводилось на програмно-апаратному комплексі (ПАК) для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів за методикою, аналогічною для маслосуміші СМ-9. Матеріал контактних поверхонь: ролики зі сталі 40ХН (HRC 36 - 37, Ra 0,33 мкм).

Розглянемо кінетику зміни триботехнічних параметрів олив при напрацюванні в нестационарних умовах тертя. Досліджувані зразки олив характеризується ефективними припрацювальними властивостями, зниження коефіцієнту тертя в 3 та

в 1,5 раз встановлено на 5-му циклі напрацювання відповідно для зразка № 1 та зразка № 2. Встановлені високі антифрикційні властивості зразка № 1 та зразка № 2 в досліджуваному температурному діапазоні мастильного матеріалу (рис. 4.7).

Для зразка № 1 середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,0068 та 0,0081 при температурі оливи 20 та 100 °С відповідно, коефіцієнт тертя стабільний, діапазон коливань даного параметру знаходиться в межах 0,004...0,02. Підвищення коефіцієнта тертя в 2,4 рази на 45 – 52 циклах обумовлено зміною природи граничних шарів при підвищенні температури мастильного матеріалу.

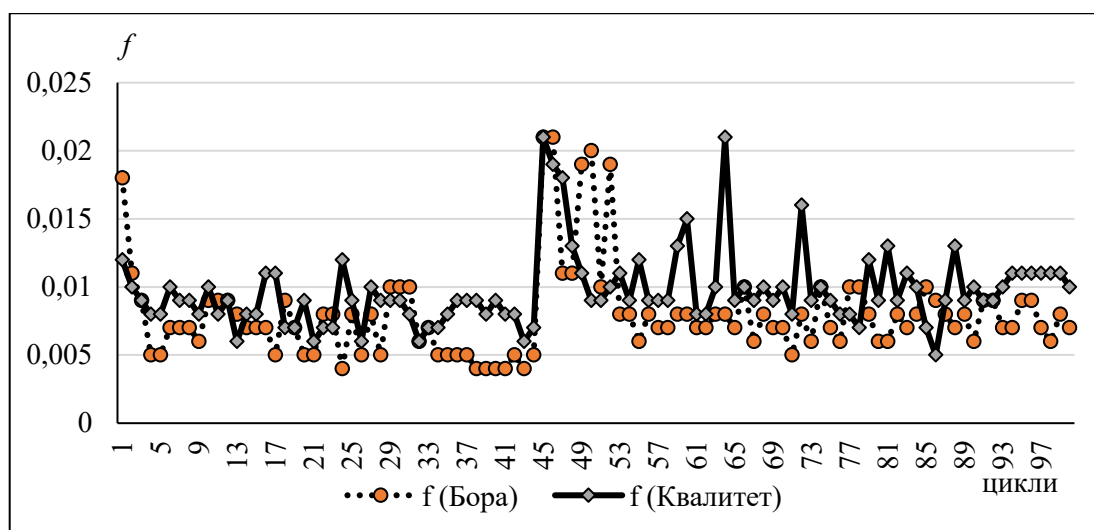


Рис. 4.7. Кінетика зміни коефіцієнта тертя в умовах кочення з проковзуванням.

Для зразка № 2 середні значення коефіцієнту тертя становлять 0,0085 та 0,01 при температурі оливи 20 та 100 °С відповідно, що в 1,25 разів перевищує показники, встановлені для зразка № 1. Коефіцієнт тертя з підвищенням температури на початковому етапі напрацювання зростає в 1,92 рази на 45 – 50 циклах наробітку, до 75 циклу стабілізації даного параметра не встановлено, діапазон коливань коефіцієнту тертя знаходиться в межах 0,006 – 0,021. Встановлене періодичне зростання/зниження коефіцієнту тертя при підвищенні температури свідчить про нестабільність триботехнічних процесів у фрикційному контакті.

Порівняємо кінетику зміни мастильних властивостей авіаційних олив в триботехнічному контакті. Досліджувана олива «Бора Б» ВО-12 характеризується ефективними мастильними властивостями як в період пуску [183, 184], так і при

максимальних досліджуваних обертах (рис. 4.8). 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, в 2-3 % циклів встановлено граничний з ознаками сухого режим мащення.

При пуску, температура мастильного матеріалу 20 °С, переважає еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний) режим мащення, при зростанні температури мастильного матеріалу до 100 °С домінує змішаний режим мащення, що свідчить про ефективні пускові властивості оливи «Бора Б» ВО-12 (рис. 4.9).

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

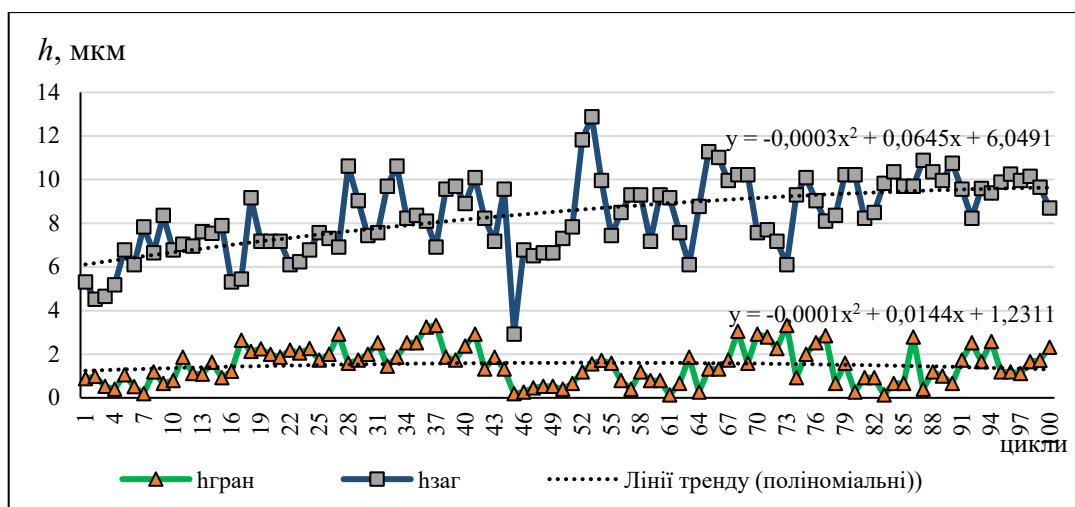


Рис. 4.8. Кінетика зміни товщини граничних адсорбційних шарів ($h_{\text{гран}}$) та загальної товщини мастильного шару ($h_{\text{заг}}$) в контактi при змащуванні оливою «Бора Б» ВО-12.

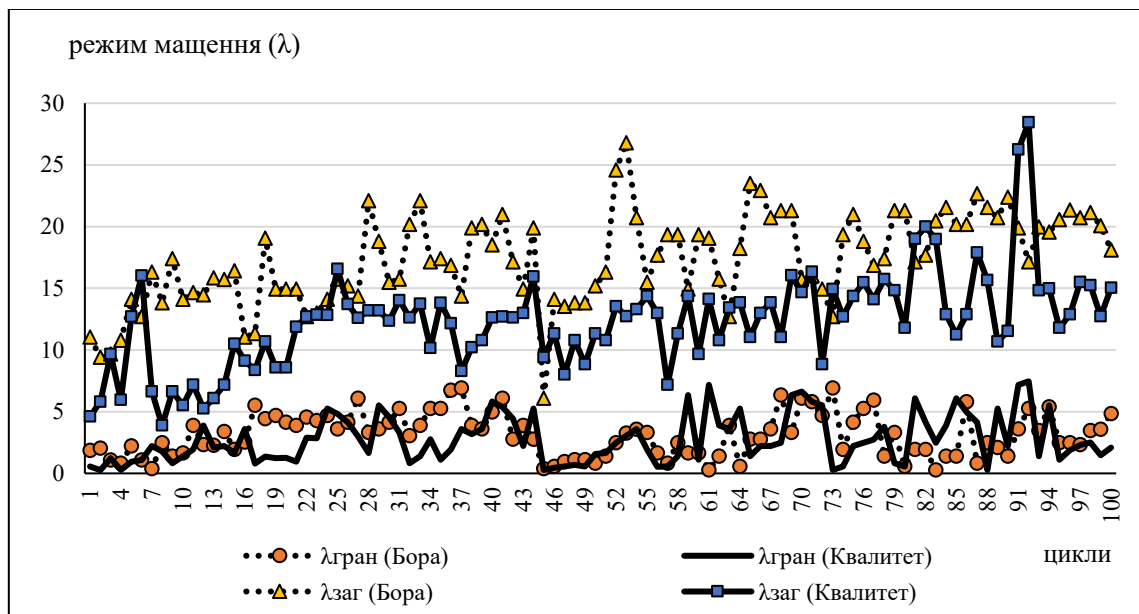


Рис. 4.9. Кінетика зміни режиму мащення в триботехнічному контакті в період пуску ($\lambda_{\text{гран}}$) та при максимальних обертах ($\lambda_{\text{заг}}$).

Досліджувана олива всесезонна ВО-12 характеризується ефективними мастильними властивостями як в період пуску, так і при максимальних досліджуваних обертах. Закономірності кінетики зміни товщини граничних адсорбційних шарів мастильного матеріалу на активованих тертях контактних поверхонь та загальної товщини мастильного шару аналогічні змінам, встановленим для зразка № 1. Відмінності полягають в наступному. При об'ємній температурі оливи 20 °С товщина граничних адсорбційних шарів становить, в середньому, 1,21 мкм, що в 1,41 разів менше, в порівнянні з зразком № 1 (рис. 4.10). Це призводить до погіршення режиму мащення в контактї при пуску і домінуванні змішаного режиму мащення. При зростанні температури мастильного матеріалу короткочасно, на 45 – 50 циклах, товщина граничних шарів знижується в 3,1 рази, обумовлюючи реалізацію граничного режиму мащення при пуску. Однак, відбувається ефективна адаптація граничних шарів до динамічних умов навантаження при високих температурах, їх товщина зростає в 4 рази, що забезпечує реалізацію еластогідродинамічного режиму мащення.

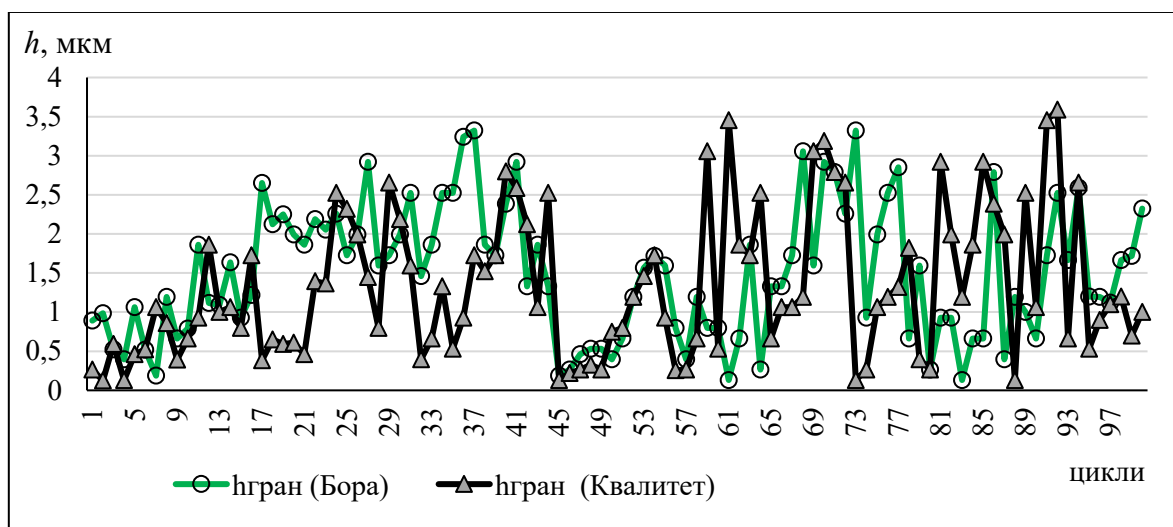


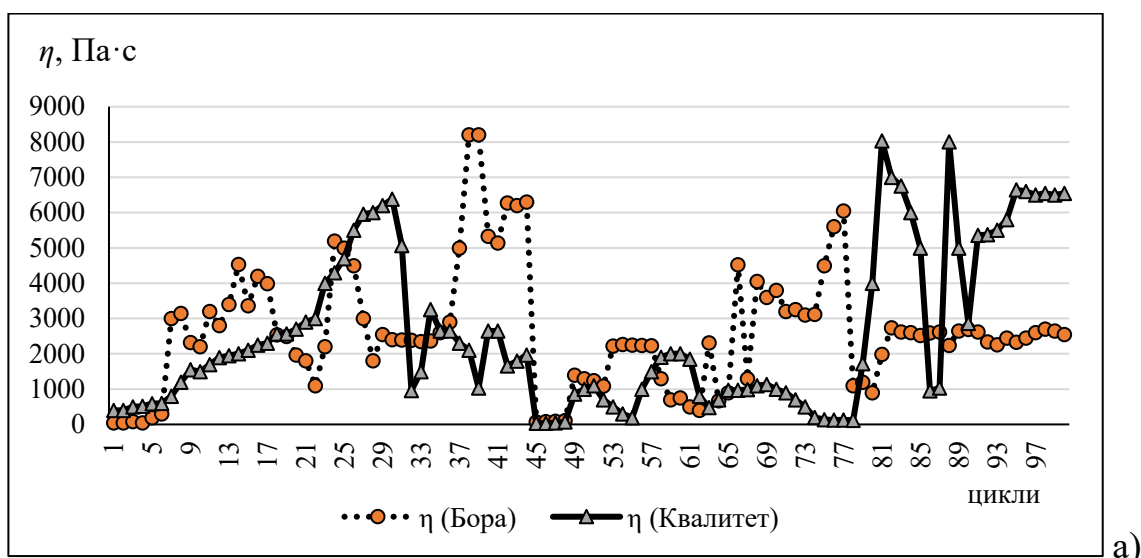
Рис. 4.10. Кінетика зміни товщини граничних адсорбційних шарів ($h_{\text{гран}}$) в контакті при змащуванні оливою ВО-12 виробників Бора та Квалитет.

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 1,38 разів менше, в порівнянні з зразком № 1, незалежно від температури мастильного матеріалу. Аналогічно і розрахунковий показник режиму мащення (λ) в 1,38 разів менше, в порівнянні з зразком № 1 (рис. 4.9).

Визначення реологічних характеристик авіаційних олив в триботехнічному контакті набуває першочергового значення, оскільки структуризація граничних шарів олив на поверхні металу призводить прояву неньютонівських властивостей олив в фрикційному контакті. Згідно [185], інтенсивність в'язкої дисипації в будь-якій точці потоку визначається значеннями ефективної в'язкості середовища та складових тензора швидкостей деформацій, у разі залежності реологічних параметрів від температури відповідна її зміна призводить до зміни в'язкості і, отже, впливає розподілу кінематичних і динамічних характеристик течії. Визначення реологічних параметрів олив авіаційного призначення дозволить більш глибоко оцінити навантажувально-швидкісний та температурний діапазон їх використання в осьових шарнірах втулок гвинтів вертольотів.

Характеристика зразка № 1. Олива «Бора Б» ВО-12 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 на рівні, в середньому, 6,2 МПа (рис. 4.11,б).

Незважаючи на високі градієнти швидкості зсуву мастильного шару в контакті, від $1,09 \cdot 10^3$ до $3,47 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, 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, 2627 Па·с (рис. 4.11, а). Це свідчить про стійкість компонентів оливи до деструкції в умовах зростання градієнту швидкості зсуву. Найбільше зниження ефективної в'язкості в контакті до 82 Па·с відбувається в умовах початкового підвищення температури оливи (45 – 50 цикли випробувань). Це обумовлено зміною природи граничних адсорбційних шарів, які характеризуються ефективною адаптацією в широкому діапазоні температур.



а)

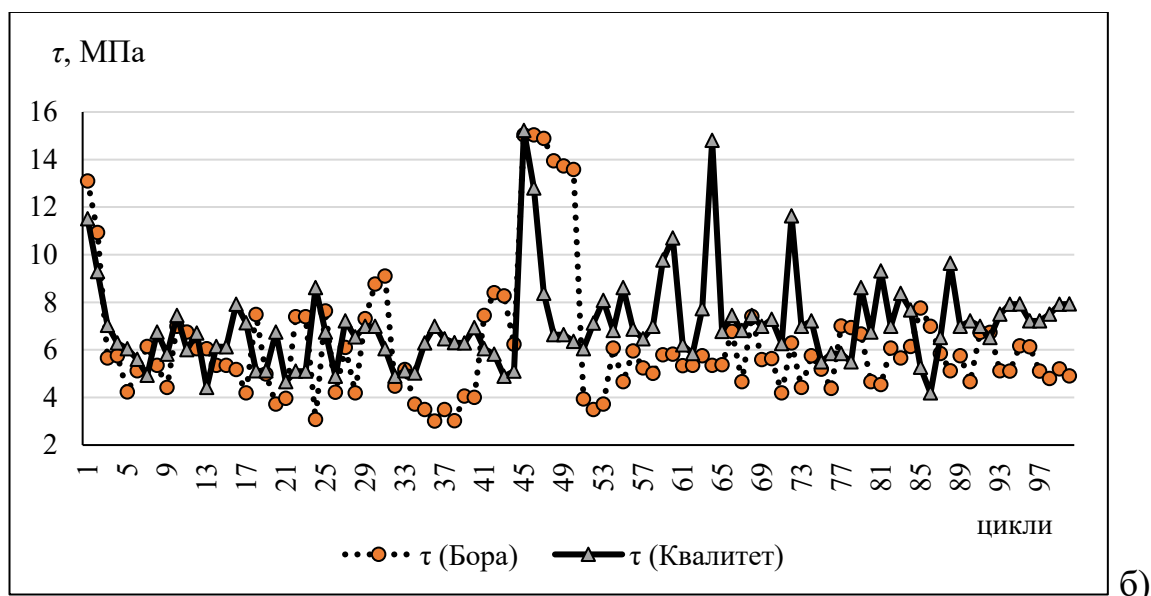


Рис. 4.11. Кінетика зміни ефективної в'язкості (η) оливи ВО-12 в контактi (а) та напруження зсуву мастильного шару (τ) (б).

Характеристика зразка № 2. Олива всесезонна ВО-12, аналогічно зразку № 1, характеризується ефективними реологічними властивостями. Напруження зсуву мастильних шарів встановлено на рівні, в середньому, 7,05 МПа, що в 1,14 рази перевищує аналогічні показники для зразка № 1 (рис. 4.11, б).

В порівнянні з зразком № 1, ефективна в'язкість в контактi також, в середньому, 2550 Па·с, однак із збільшенням температури періодично, до 80 циклу наробітку встановлено різке зниження цього параметру до 130 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 контактi при максимальній швидкості ковзання 0,71 м/с в умовах кочення з проковзування. В середньому, γ становить $1,85 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, діапазон зміни параметру при напрацюванні – від $1,09 \cdot 10^3$ до $2,52 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$.

Проаналізуємо енергонавантаженість фрикційного контакту. Одержані експериментальні значення $A_{\text{терт}}$ для зразка № 1 в діапазоні 144.....3435 Дж/мм² характеризують умови роботи трибосистеми з незначними енергетичними процесами (рис. 4.12). З підвищенням температури оливи з 20 до 100 °С питома робота тертя зростає, в середньому, в 1,2 рази, що свідчить про перехід трибосистеми в більш

складні умови тертя. В початковий період підвищення температури мастильного матеріалу питома робота тертя зростає до 3400 – 9000 Дж/мм². Однак, зриву мастильного шару не встановлено, досліджуваний мастильний матеріал за таких умов забезпечує реалізацію в контактї граничного з ознаками сухого режиму мащення з швидким переходом до гідродинамічного режиму мащення.

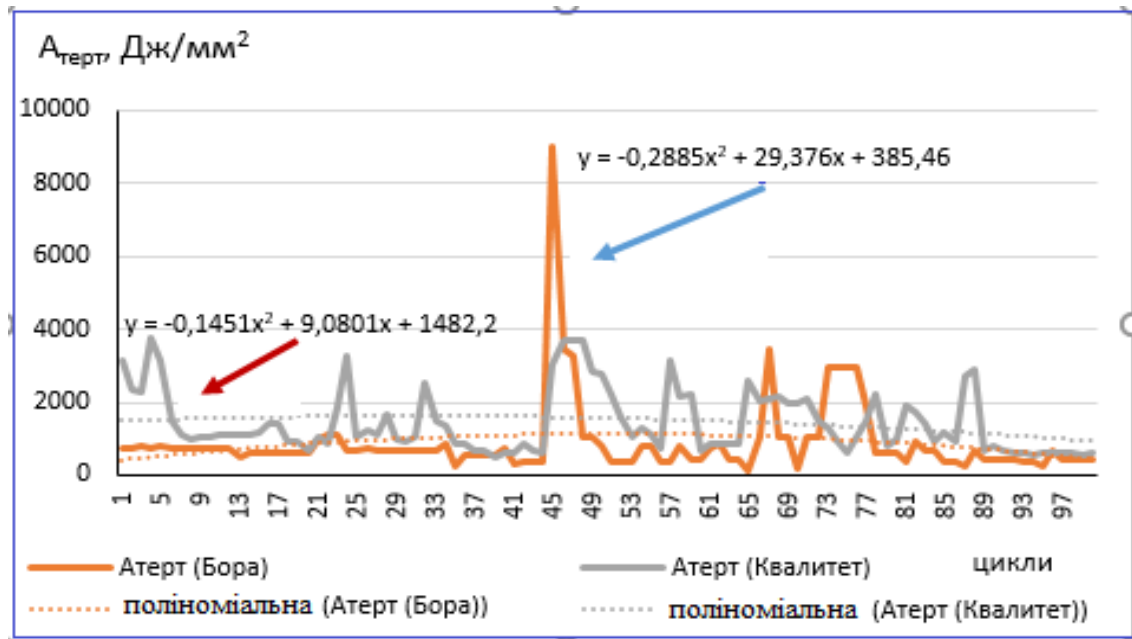


Рис. 4.12. Кінетика зміни питомої роботи тертя при змащуванні сталі 40ХН оливою ВО-12.

Для зразка № 2 питома робота тертя в контактї підвищується, в порівнянні з зразком № 1, в середньому, в 1,62 рази, діапазон зміни цього параметра становить 519...3733 Дж/мм². Зафіксовано періодичні стрімкі періоди підвищення $A_{\text{терт}}$ в контактї в 2,5...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.

Узагальнені результати проаналізованих триботехнічних параметрів трибоконтакту при використанні авіаційної оливи ВО-12 представлені в таблиці 4.3.

Ефективність застосування певного типу мастильного матеріалу насамперед необхідно аналізувати за кінетикою зміни його протизношувальних властивостей.

**Експлуатаційні властивості контакту при змащуванні
авіаційною оливою ВО-12**

Показники	Масильний матеріал			
	зразок № 1 олива «Бора Б» ВО-12 (виробництво: ТОВ «Бора Б»)		зразок № 2 олива всесезонна ВО-12 (виробництво: ООО «Квалитет Авиа»)	
	Температура масильного матеріалу, °С			
	20	100	20	100
Коефіцієнт тертя	0,004 – 0,018	0,005 – 0,02	0,006 – 0,021	0,005 – 0,021
Товщина граничних адсорбційних шарів, мкм	0,328 – 3,321	0,132 – 2,92	0,125 – 2,8	0,132 – 3,587
Загальна товщина масильного шару в контакті, мкм	4,517 – 10,52	6,11 – 12,88	1,86 – 7,97	3,454 – 13,68
Режим мащення при пуску	0,39 (напівсухий)- 6,9 (гідродинамічний)	0,27 (напівсухий) – 6,9 (гідродинамічний)	0,26 (напівсухий) – 5,8 (гідродинамічний)	0,27 (напівсухий) – 7,46 (гідродинамічний)
Режим мащення при максимальних обертах	9,39 – 22,1 (гідродинамічний)	12,7 – 26,7 (гідродинамічний)	3,86 (еластогідродинамічний) – 16,58 (гідродинамічний)	7,18 – 28,45 (гідродинамічний)
Напруження зсуву масильного шару, МПа	3,02 – 13,1	3,49 – 13,73	4,42 – 15,22	4,19 – 15,22
Ефективна в'язкість в контакті, Па·с	48,17 – 8206	400 – 6049	400 - 6381	116 - 8036
Питома робота тертя, Дж/мм ²	231 – 1092	144 – 3435	519 - 3733	580 - 3700

Загальний лінійний знос роликів зі сталі 40ХН становить 2,48 мкм та 3,88 мкм при змащуванні пар тертя відповідно оливою зразок № 1 та зразок № 2, при використанні зразка № 2 знос пар тертя зростає в 1,57 разів (табл. 4.4, рис. 4.13).

**Показники лінійного зносу та мікротвердості сталі 40ХН при змащуванні
оливою ВО-12**

Показники	Тип мастильного матеріалу при змащуванні сталі 40ХН			
	зразок № 1 олива «Бора Б» ВО-12 (виробництво: ТОВ «Бора Б»)		зразок № 2 олива всесезонна ВО-12 (виробництво: ООО «Квалитет Авиа»)	
Загальний знос дослідних зразків, мкм	2,48		3,88	
	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня
Знос, мкм	0,66	1,82	1,45	2,43
Інтенсивність зношування	7,186E-11 (7,186·10 ⁻¹¹)	2,898E-10 (2,898·10 ⁻¹⁰)	1,57875E-10 (1,57875·10 ⁻¹⁰)	3,86943E-10 (3,86943·10 ⁻¹⁰)
Зносостійкість	1,39E+10 (1,39·10 ¹⁰)	3,45E+09 (3,45·10 ⁹)	6,33E+09 (6,33·10 ⁹)	2,58E+09 (2,58·10 ⁹)
Мікротвердість дослідних зразків (сталь 40ХН)				
Мікротвердість поверхні до експерименту (вихідна), МПа	4729	4824	4700	4960
Мікротвердість поверхні після 100 циклів напрацювання, МПа	3027	3642	4423	3945

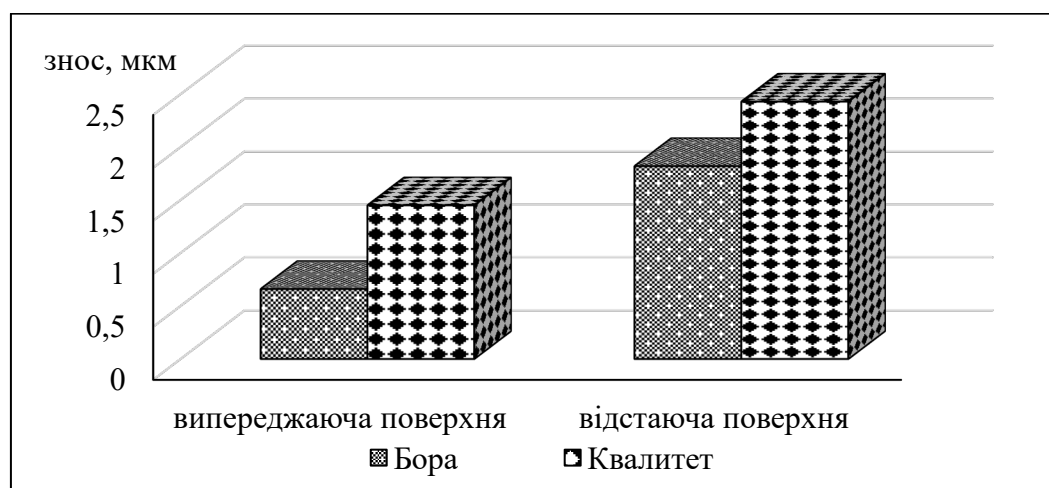


Рис. 4.13. Лінійний знос контактних поверхонь сталі 40ХН при напрацюванні (змащування оливою ВО-12).

Знос відстаючої поверхні в 2,76 (зразок № 1) та в 1,68 (зразок № 2) разів перевищує знос випереджаючої поверхні, що обумовлено зростанням швидкості

втомного руйнування в умовах різновекторного направлення сил тертя в контактї на випереджаючій 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 2,2 та в 1,38 разів відповідно, в порівнянні з зразком № 1.

Проведемо оцінку зносостійкості пар тертя з позицій аналізу тонкої поверхневої кристалічної структури, яка формується при терті та відображує напружено-деформований стан контактних поверхонь. Для такого аналізу застосовано метод трибоспектрального неперервного індентування (склерометрія) на мікротвердомірі ПМТ-3 [186, 187].

Наведемо результати аналізу міцністних і деформаційних властивостей поверхневого шару відстаючої поверхні сталі 40ХН при змащуванні двома типами досліджуваних мастильних матеріалів при неперервному навантаженні на індентор від 0,06 до 20 сН. Для поверхні, що змащувалась зразком № 1 встановлено, що максимальна сила тертя при тангенціальному зміщенні складає 0,9 сН при зростанні навантаження від 0,06 до 14 сН, надалі, при збільшенні навантаження до 20 сН спостерігається зниження сили тертя в 1,8 разів (рис. 4.14). При використанні в якості мастильного матеріалу зразка № 2 результати неперервного індентування поверхні сталі 40ХН наступні: збільшення навантаження від 0,06 до 20 сН обумовлює поступове зростання сили тертя від 0,7 до 1,55 сН, максимальні значення сили тертя перевищують в 1,72 рази показники, встановлені для поверхневих шарів матеріалу, мащення якого відбувалося в середовищі зразка № 1.

Таким чином, при використанні зразка № 1 встановлено зниження опору локальних мікрооб'ємів матеріалу поверхневих шарів металу контактному деформуванню в напрямку тангенціального руху.

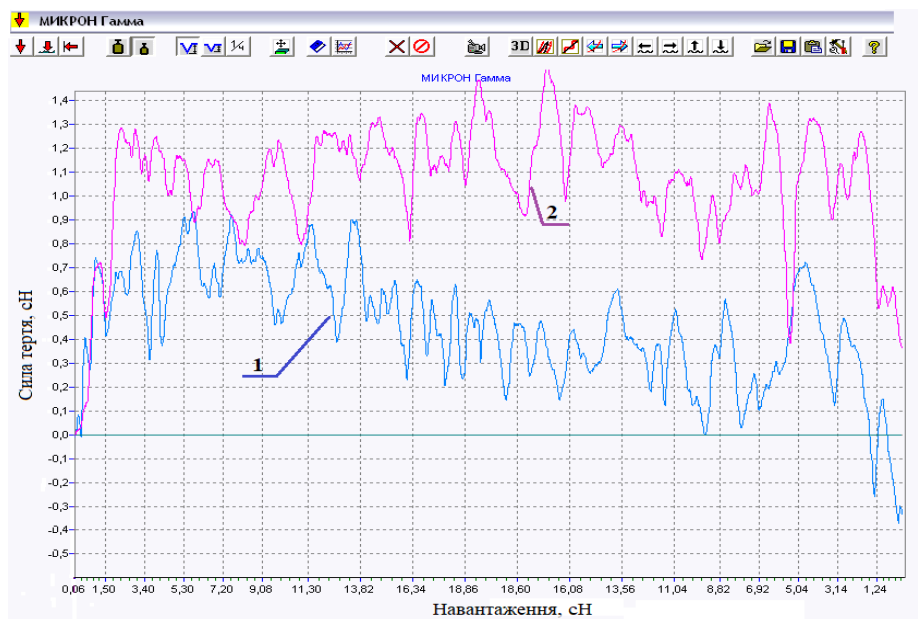


Рис. 4.14. Кінетика зміни сили тертя при скануванні поверхні індентором.

Після напрацювання 100 циклів встановлено зниження мікротвердості сталі 40ХН в 1,56 та в 1,33 разів для випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно при змащуванні зразком № 1; та в 1,06 і в 1,25 разів для випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно при змащуванні зразком № 2 (рис. 4.15).

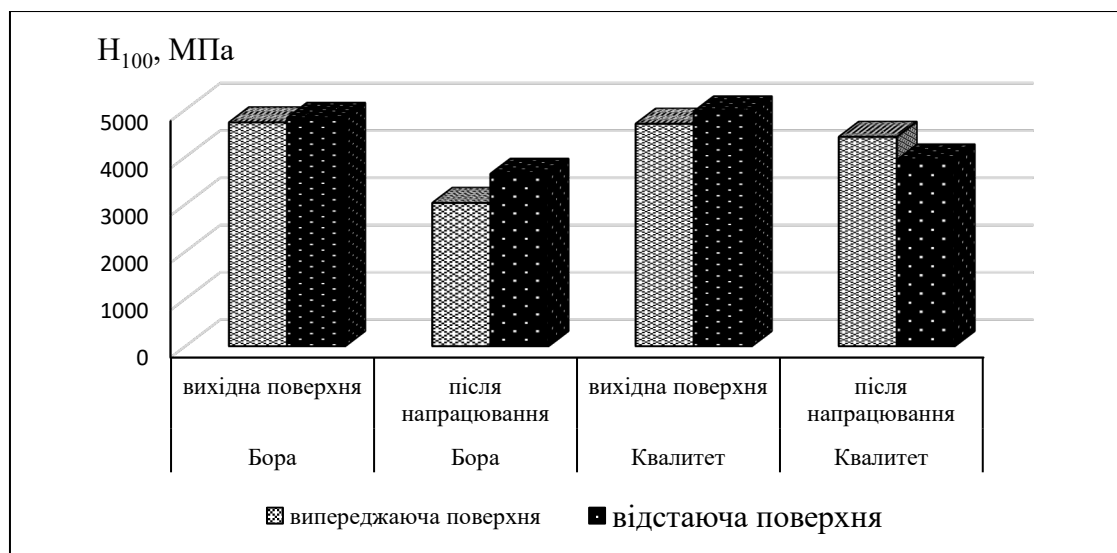


Рис. 4.15. Мікротвердість вихідної поверхні сталі 40ХН та після 100 циклів наробітки дослідних зразків.

Знеміцнення поверхневих шарів металу обумовлено проявом ефекту Ребіндера – адсорбційною пластифікацією твердих тіл під дією поверхнево-активних речовин

оливи. Дане явище позитивно впливає на триботехнічні процеси в контактi, оскільки забезпечується зменшення поверхневої енергії контактних поверхонь при адсорбції активних компонентів присадки оливи та формуванні граничних адсорбційних шарів як фізичної, так і хімічної природи. Це призводить до підвищення зносостійкості контактних поверхонь за рахунок зниження опору поверхневого шару твердого тіла пластичному деформуванню, полегшення пластичного зсуву у зернах та виходу дислокацій на поверхню, утворення більш дрібнозернистої структури.

Проаналізуємо характерні ознаки сформованих поверхневих структур на трасі сканування на основі визначення статистичних зв'язків між опором локальних мікрооб'ємів матеріалу контактному деформуванню методами теорії випадкових процесів [188].

При змащуванні сталі 40ХН мастильним матеріалом зразок 1 в умовах кочення з проковзуванням при терті формується поверхневий шар з дрібнофрагментною структурою. При навантаженні на індентор $P = 20$ сН максимальна глибина впровадження становить 0,9 мкм, до 70 % довжини траси індентування переважно фрагменти зміцнені, спостерігається формування однорідного поверхневого шару, що спричинює зниження величини і розкиду сили тертя при індентуванні (табл. 4.5, рис. 4.16).

Таблиця 4.5

**Міцнісні характеристики поверхневих шарів сталі 40Х після
напрацювання**

Матеріал	Максимальна глибина індентування, мкм	Зміцнюючі фрагменти			Знеміцнюючі фрагменти		
		Площа, %	Геометричні розміри		Площа, %	Геометричні розміри	
			Довжина, мкм	Висота, мкм		Довжина, мкм	Висота, мкм
Відстаюча поверхня (змащування – зразок № 1)	0,9	70	5-45	0,1-0,5	30	10-30	0,1-0,4
Відстаюча поверхня (змащування – зразок № 2)	1,55	60	10-60	0,15-0,55	40	15-105	0,2-0,9

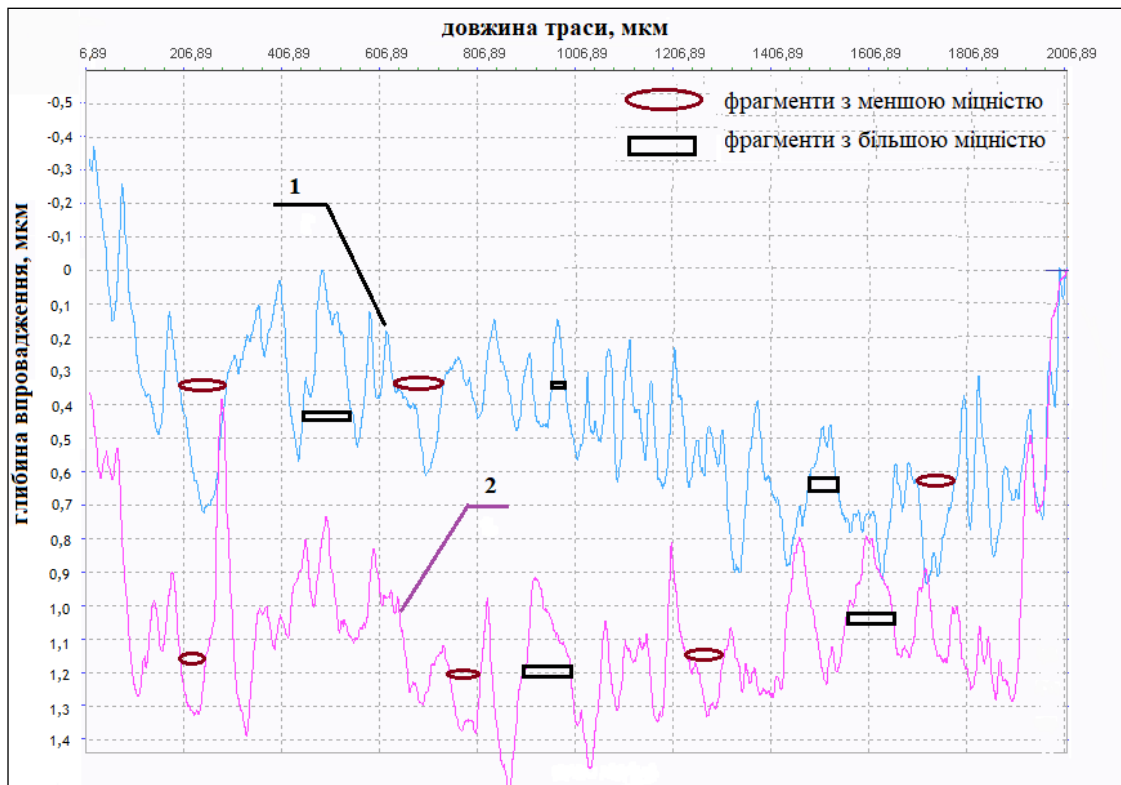


Рис. 4.16. Зміна глибини впровадження індентора по довжині траси сканування поверхневого шару сталі 40ХН після тертя: 1 – змащування зразком 1, 2 – змащування зразком 2.

Використання в якості мастильного матеріалу зразка 2 призводить до утворення при терті вторинних структур, зміцнюючі та знеміцнюючі фрагменти яких характеризуються більшими геометричними розмірами. Максимальна глибина при індентуванні зростає в 1,7 разів, встановлено збільшення і підвищення амплітуди сили тертя при склерометрії.

Слід зазначити, що в сформованому поверхневому шарі внаслідок структурної пристосованості при терті спостерігаються западини глибиною 0,1 – 0,5 мкм при змащуванні зразком 1, при змащуванні зразком 2 глибина западин збільшується в 2 рази (рис. 4.16), що може суттєво знизити, згідно [189] втомну міцність контактних поверхонь, оскільки вони є концентраторами напружень.

У формуванні поверхневої структури різних ділянок диспергованого тертя шару беруть участь різні механізми [190, 191]. Домінуючий механізм фрагментації зерен деформаційним шляхом, що забезпечує збільшення щільності дислокацій

внаслідок пружно-пластичних деформацій при терті, супроводжується у певному температурному інтервалі паралельно протікаючими процесами рекристалізації і відпочинку, дифузійними процесами, адсорбційно-пластифікуючим ефектом за наявності поверхнево-активних речовин мастильного матеріалу, що призводять до зменшення щільності дислокацій або росту зерна.

При терті поверхнева структура формується в результаті імпульсного застосування механічної енергії, яка з великою швидкістю перетворюється на внутрішню енергію матеріалу та теплоту. У тонкому приповерхневому шарі швидкість і ступінь деформації істотно вище, порівняно з нижчими ділянками. Тому оцінка деформаційних змін приповерхневих шарів сталі 40ХН важлива з огляду на прогнозування зносостійкості контактних поверхонь. Оскільки умови експерименту були однакові, змінним чинником був лише мастильний матеріал, розглянемо структурні зміни приповерхневих шарів сталі при терті.

На одержаних на растровому електронному мікроскопі (РЕМ-106I) РЕМ-зображення у цифровому форматі мікрошліфів по глибині доріжки тертя можна виділити приповерхневу зону з частково деформованими шарами металу та зону основного матеріалу. Якщо при застосуванні зразка 1 глибина зони з деформованими шарами складає 10 мкм, то при застосуванні зразка 2 цей параметр збільшується втричі (рис. 4.17).

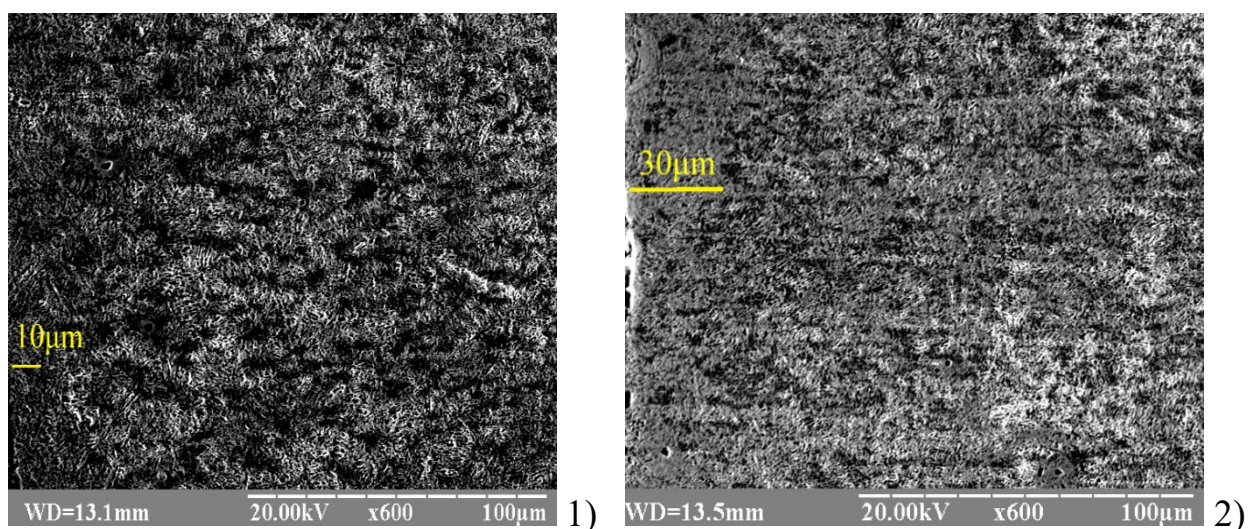


Рис. 4.17. Цифрові РЕМ-знімки мікрошліфів сталі 40ХН після тертя: 1 – змащування зразком 1, 2 – змащування зразком 2.

Таким чином, використання в якості мастильного матеріалу зразка 1, який проявляє більш ефективні мастильні, антифрикційні та реологічні характеристики, забезпечується підвищення зносостійкості пар тертя за рахунок незначних змін структурного стану приповерхневих шарів елементів трибосполучень внаслідок їхньої здатності витримувати деформації та протистояти зародженню внутрішніх дефектів, що лежать в основі перебігу процесів поверхневого руйнування. Зниження зносостійкості пар тертя при використанні зразка 2 обумовлено зменшенням товщини граничних адсорбційних шарів в 1,41 рази при 20 °С, а при зростанні температури мастильного матеріалу до 100 °С в 3,1 рази, що призводить до погіршення режиму мащення в контакті при пуску, зниження демпфуючих властивостей граничних шарів і більш інтенсивного поширення пружно-пластичних деформацій вглиб матеріалу контактних поверхонь.

В роботі [192] встановлено вплив складності навантаження в трибоз'єднанні на збільшення зносостійкості пар тертя за зменшенням величини рівноважної шорсткості поверхні у поздовжньому та поперечному напрямках.

Дослідження морфології поверхні при терті, кількісна та якісна оцінка деформаційного рельєфу, надають інформацію про ступінь структурної пристосованості елементів трибоспряження. При терті формується рівноважна шорсткість контактних поверхонь: при змащуванні зразком 1 $Ra = 0,264$ мкм, $Rz = 1,362$ мкм, зразком 2 – $Ra = 0,362$ мкм, $Rz = 1,697$ мкм. Якщо при використанні оливи зразок 1 шорсткість матеріалу зменшується в 1,25 разів в процесі тертя, то при використанні оливи зразок 2 цей параметр збільшується в 1,1 рази.

Значення шорсткості поверхні в поперечному та поздовжньому напрямках вказують на підвищення однорідності мікрогеометрії поверхні при терті (рис. 4.18).

Також при використанні мастильного матеріалу зразок 1 фактична площа контакту (ФПК) поверхонь збільшується на 7 %, в порівнянні з ФПК для поверхонь, змащування яких відбувалося оливою зразок 2.

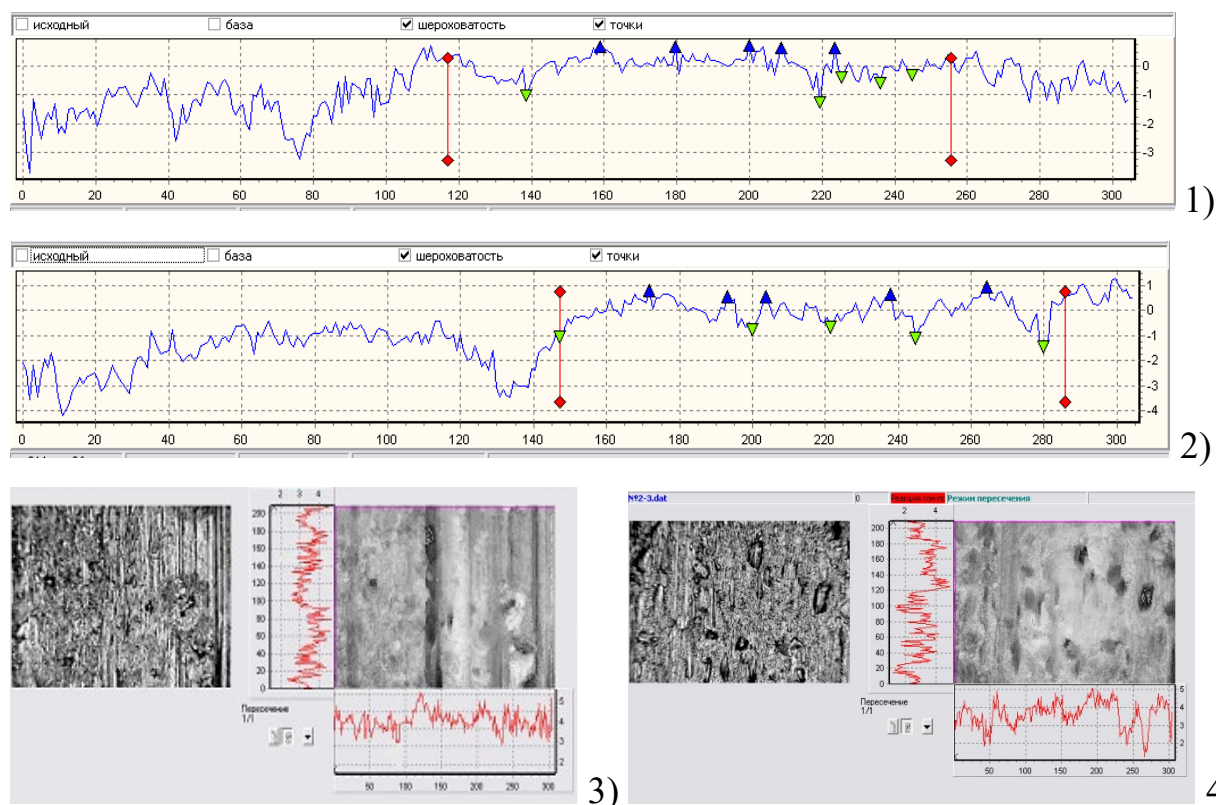


Рис. 4.18. Мікрогеометричні параметри поверхонь тертя: 1, 3 – при змащуванні зразком 1; 2, 4 – при змащуванні зразком 2.

Збільшення ФПК в умовах кочення з проковзуванням спричинює зменшення впливу динамічного фактору, що дає можливість зменшити розсіювання енергії в контакті й забезпечити зносостійкість контактних поверхонь.

4.3. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив.

Оцінка якості мастильних матеріалів за фізико-хімічними та триботехнічними показниками надає можливість прогнозувати інтенсивність спрацьовування присадок, стійкість до окислювання, протизношувальні характеристики та ін.

Мета даного етапу досліджень полягала в встановленні взаємозв'язку між антиокислювальними та протизношувальними властивостями авіаційної оливи ВО-12 для осьових шарнірів втулок гвинтів вертольотів.

Досліджувались оливи двох виробників: зразок № 1 – олива «Бора Б» ВО-12 (ТУ У 19.2-38474081-017:2018 зі зм. 1 «Оливи трансмісійні «Бора Б» Технічні умови») та зразок № 2 – олива всесезонна ВО-12 (ТУ 38.401-58-359-2005 зі зм. 1).

Дослідження мастильних матеріалів зразків № 1 та № 2 проводилось на програмно-апаратному комплексі для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів. Максимальне контактне навантаження по Герцу – 300 МПа. Режим тертя – нестационарний, 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). Тривалість циклу – 80 с. Максимальна частота обертів для випереджаючої поверхні – 700 об/хв, для відстаючої поверхні – 679 об/хв. Проковзування – 3 %. Загальний шлях тертя: для випереджаючої поверхні – 9184,5 м, для відстаючої поверхні – 8936 м.

Матеріал контактних поверхонь – ролики зі сталі 40ХН (HRC 36-37, Ra 0,35 мкм). Змащування контактних поверхонь здійснювалось шляхом занурення нижнього ролика в ванночку з оливою.

Антиокислювальні властивості визначали за ДСТУ ГОСТ 18136:2019 – Оливи. Метод визначення стабільності проти окислення (ГОСТ 18136-2017, IDT). Окислення дослідних зразків олив проводили в наступних умовах: температура 120 °С, час окислення – 96 годин, витрата повітря – 5 л/год, каталізатор – 100 мг/кг Cu та 100 мг/кг Fe у вигляді нафтенатів. Кінетика зміни кінематичної в'язкості досліджуваних олив представлена в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Кінематична в'язкість при 100 °С для авіаційних олив ВО-12, окислених при 120 °С

Тривалість окислення, годин	Кінематична в'язкість при 100 °С, мм ² /с		Швидкість зростання кінематичної в'язкості за годину	
	Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 1	Зразок № 2
0	12,5	12,4	0	0
12	12,51	12,5	0,0008	0,008
24	12,53	12,62	0,0017	0,01
36	12,56	12,75	0,0025	0,011
48	12,6	12,89	0,0033	0,012
60	12,67	13,05	0,0058	0,013
72	12,77	13,23	0,008	0,015
84	12,95	13,77	0,015	0,045
96	13,2	14,52	0,02	0,0625

Зростання температури до 120 °С призводить до інтенсифікації окислювальних процесів. Наслідками окислення є підвищена в'язкість олив через полімеризацію

молекул окисленої базової основи мастильних матеріалів, утворення органічних кислот, лаків та відкладень, а також виснаження більшості присадок до олив. Підвищення кінематичної в'язкості досліджуваних олив при 100 °С за тривалості окислення 96 годин встановлено для зразка № 1 на 0,7 мм²/с, для зразка № 2 – 2,12 мм²/с. Якщо до 24 години окислення авіаційних олив швидкість окислення зразка № 1 була меншою в 6...10 разів, в порівнянні з зразком № 2, то при збільшенні тривалості окислення до 96 годин відношення по швидкості окислювання досліджуваних зразків зменшувалось до 3 разів, що свідчить про інтенсифікацію окислювальних процесів зразка № 1 при тривалості окислення більше 70 годин.

Окислення мастильного матеріалу – це хімічний процес, який змінює його якість і призводить до втрати хімічних та фізичних властивостей. Якісний мастильний матеріал містить антиоксидантні присадки. Оскільки виробники досліджуваних зразків авіаційних олив використовують поліфункціональні пакети присадок, окислення олив починається з розчеплення антиоксидантних присадок, що з часом призводить до зменшення концентрації даної присадки та її виснаження. Першочерговим показником даного процесу є зростання кислотного числа олив, яке було визначено за ГОСТ 11362-96 «Нафтопродукти та мастильні матеріали. Число нейтралізації. Метод потенціометричного титрування (ІСО 6619-88)» (рис. 4.19).

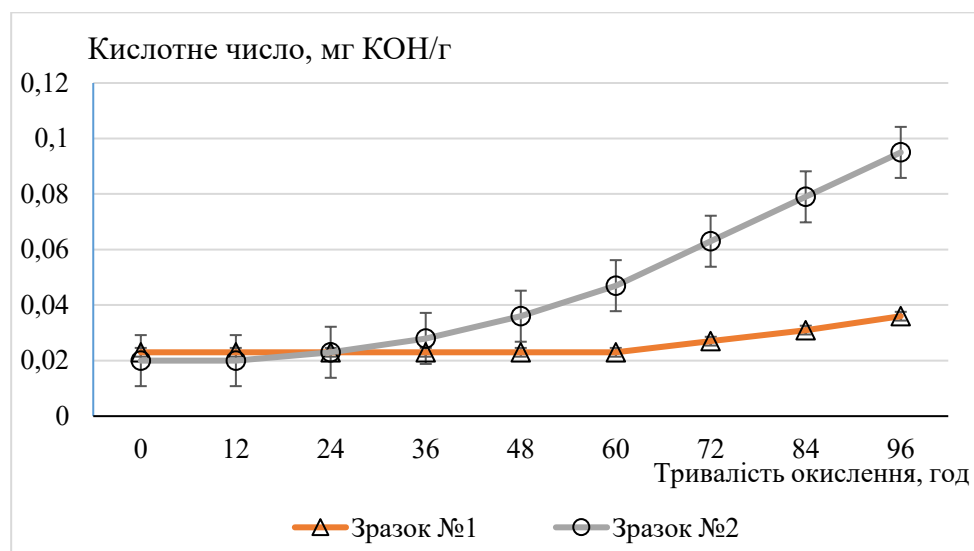


Рис. 4.19. Зміна кислотного числа авіаційних олив ВО-12 залежно від тривалості окислення при 120 °С.

Результати показують, що зразок № 2 легко окислюється, внаслідок чого утворюються кислі продукти, які підвищують його кислотне число. При тривалості окислення 96 годин кислотне число зразка № 2 зросло в 4,75 разів, приріст смол зафіксований на рівні 0,28 %. Зразок № 1 проявляє більшу стійкість до окислення – до 60 годин тривалості окислення при 120 °С кислотне число не змінюється, зростання даного показника зафіксовано в 1,57 разів лише в діапазоні тривалості окислення від 70 до 96 годин.

При дослідженні триботехнічних характеристик вузла тертя при змащуванні авіаційними оливами ВО-12 двох марок встановлено, що загальний лінійний знос роликів зі сталі 40ХН становить 2,18 мкм та 3,9 мкм при змащуванні пар тертя відповідно оливою зразок № 1 та зразок № 2, при використанні зразку № 2 знос контактних поверхонь зростає в 1,8 разів (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Знос сталі 40ХН та мікротвердість контактних поверхонь

Показники	Мастильний матеріал			
	зразок № 1		зразок № 2	
	Знос контактних поверхонь після 100 циклів напрацювання			
Загальний знос, мкм	2,18		3,9	
	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня
Знос, мкм	0,8	1,38	1,75	2,15
	Мікротвердість поверхневих шарів (H ₂₀)			
Мікротвердість поверхні до експерименту (вихідна), МПа	4730	4790	4750	4760
Мікротвердість поверхні після 100 циклів напрацювання, МПа	3753 (знеміцнення, Δ H ₂₀ = 977)	3675 (знеміцнення, Δ H ₂₀ = 1115)	3368 (знеміцнення, Δ H ₂₀ = 1382)	3058 (знеміцнення, Δ H ₂₀ = 1702)

Для всіх досліджуваних контактних поверхонь, незалежно від марки оливи, встановлення зниження мікротвердості поверхневих шарів сталі після напрацювання 100 циклів. Даний параметр зменшується в 1,26 і в 1,3 рази для випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно при змащуванні зразком № 1 та в 1,41 і в 1,56 разів для випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно при змащуванні зразком № 2 (табл. 4.7). Знеміцнення поверхневих шарів металу, імовірно, обумовлено

пластифікуючим ефектом поверхнево-активних речовин, концентрація яких зростає внаслідок термо-механічної активації при терті в нестационарних умовах мащення (приріст кислотного числа для зразку № 1 та зразку № 2 становив відповідно 0,005 та 0,01 мг КОН/г оливи).

Якщо при визначенні стабільності проти окислення олив за ДСТУ ГОСТ 18136:2019 каталізаторами прискорення реакцій окиснення є Cu та Fe у вигляді нафтенатів, то при терті каталізатором окислення виступає активована поверхня металу. Механізм каталітичного окиснення олив при терті пов'язують з передачею електронів від металевого каталізатора до вільнорадикальних продуктів реакцій окиснення вуглеводнів при температурах від 100 до 300 °С [193]. Інтенсифікація реакцій окислення при терті не тільки призведе до зміни фізико-хімічних властивостей оливи, але також призведе до втрати об'єму оливи за рахунок утворення летких компонентів, що може спричинити зменшення товщини плівки в контакті і, отже, сприятиме прояву процесів масляного голодування [194].

Таким чином, зміна фізико-хімічних властивостей авіаційних олив при експлуатації може призвести до втрати мастильної здатності, що створює передумови до заклинювання підшипника. Отже, вибір мастильного матеріалу для важконавантажених вузлів тертя має ґрунтуватися на його стійкості до окислення, що вимагає оцінки та прогнозування окислювальних характеристик мастильних матеріалів. Відповідно до Керівництва з льотної експлуатації та Регламенту з технічного обслуговування вертольотів типу Мі, періодичність заміни всесезонної оливи ВО-12 в осьових шарнірах втулок гвинтів вертольотів становить від 150 ± 10 до 200 ± 10 годин наробітку втулки [195, 156]. Оскільки вертольоти періодично можуть експлуатуватися у складних погодних умовах та за наявності агресивних речовин у навколишньому середовищі, то їх вузли та агрегати будуть працювати в позаштатних умовах. При цьому відбувається інтенсифікація окислювальних реакцій, спрацьовування присадок в мастильному матеріалі, що може призвести до збільшення зносу елементів трибоспряження. Тому запровадження програми регулярного відбору мастильного матеріалу під час експлуатації вертольотів типу Мі з періодичністю 30 - 50 годин дозволить визначити правильний інтервал заміни

мастильного матеріалу, що забезпечить підвищення зносостійкості елементів трибоспряжень.

Висновки до розділу 4.

1. Олива «Бора Б» СМ-9 проявляє вищі антифрикційні властивості, в порівнянні з маслосумішню авіаційною СМ-9 коефіцієнт тертя стабільний, діапазон коливань даного параметру знаходиться в межах 0,015...0,026.

2. Встановлено, що олива «Бора Б» СМ-9 характеризується ефективними мастильними властивостями як в період пуску, так і при максимальних досліджуваних обертах пар тертя (700/500 об/хв для випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно), відбувається формування граничних адсорбційних шарів мастильного матеріалу на активованих тертям контактних поверхнях, зриву мастильного шару при пуску та безпосереднього металевого контакту поверхонь тертя не встановлено. При пуску, температура мастильного матеріалу 20 °С, переважає змішаний режим мащення, при зростанні температури мастильного матеріалу до 100 °С домінує еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний) режим мащення, при максимальних обертах пар тертя домінує гідродинамічний режим мащення, незалежно від температури оливи. Маслосуміш авіаційна СМ-9 характеризується ефективними мастильними властивостями лише при максимальних досліджуваних обертах пар тертя, забезпечуючи гідродинамічний режим мащення. Загальна товщина мастильного шару в 1,32 рази менше, в порівнянні з оливою «Бора Б» СМ-9. В період пуску встановлено нестабільність мащення, до 20 % циклів спостерігається сухий – граничний з ознаками сухого режим мащення.

3. Для оливи «Бора Б» СМ-9 напруження зсуву мастильного шару становлять 13,89 МПа з діапазоном розбіжностей в межах 10,91.....18,85 МПа. Незважаючи на високі градієнти швидкості зсуву в контакті, від $1,99 \cdot 10^3$ до $2,26 \cdot 10^5$ с⁻¹, мастильний матеріал характеризується високою ефективною в'язкістю, в середньому, 5142 Па·с, що свідчить про стійкість компонентів оливи до деструкції та ефективну адаптацію граничних шарів мастильного матеріалу.

4. Питома робота тертя в фрикційному контакті при використанні оливи «Бора Б» СМ-9 знаходиться в діапазоні 1186.....6328 Дж/мм², що свідчить про нормальні умови роботи трибосистеми. Для маслосуміші авіаційної СМ-9 встановлено більш інтенсивніші енергетичні процеси в фрикційному контакті, питома робота тертя нестабільна, характеризується широким діапазоном коливань в межах 1300....33430 Дж/мм², що може призвести до інтенсифікації деструкційних процесів в приповерхневих шарах металу та зниженню його зносостійкості.

5. Загальний лінійний знос роликів зі сталі 40ХН становить 4,9 мкм та 5,74 мкм при змащуванні пар тертя відповідно оливою «Бора Б» СМ-9 та маслосумішню авіаційною СМ-9. Знос відстаючої поверхні в 2,38 (олива «Бора Б» СМ-9) та в 1,9 (маслосуміш авіаційна СМ-9) разів перевищує знос випереджаючої поверхні. Інтенсивність зношування контактних поверхонь характеризується низькими значеннями, що свідчить про високу зносостійкість контактних поверхонь та ефективні протизношувальні характеристики досліджуваних олив. При змащуванні пар тертя маслосумішню авіаційною СМ-9 інтенсивність зношування випереджаючої та відстаючої поверхонь зростає в 1,36 та в 1,09 разів відповідно, в порівнянні з оливою «Бора Б» СМ-9. При напрацюванні пар тертя встановлено знеміцнення поверхневих шарів металу, що позитивно впливає на триботехнічні процеси в контакті.

6. Встановлена кореляція антифрикційних та реологічних властивостей: для оливи «Бора Б» ВО-12 коефіцієнт тертя стабільний, діапазон коливань даного параметру знаходиться в межах 0,004...0,02, олива характеризуються низькими напруженнями зсуву мастильного шару (на рівні 6,2 МПа) та ефективною в'язкістю 2627 Па·с, що свідчить про стійкість компонентів оливи до деструкції в умовах зростання градієнту швидкості зсуву. Для оливи всесезонної ВО-12 середні значення коефіцієнту тертя при температурі оливи 20 та 100 °С в 1,25 разів перевищують показники, встановлені для оливи «Бора Б» ВО-12. Встановлене періодичне зростання/зниження коефіцієнту тертя при підвищенні температури свідчить про нестабільність триботехнічних процесів в фрикційному контакті, напруження зсуву

мастильних шарів зростає в 1,14 рази, що обумовлено тривалою адаптацією граничних шарів мастильного матеріалу.

7. Олива «Бора Б» ВО-12 характеризується ефективними мастильними властивостями як в період пуску, так і при максимальних досліджуваних обертах. При пуску, температура мастильного матеріалу 20 °С, переважає еластогідродинамічний режим мащення, при зростанні температури мастильного матеріалу до 100 °С домінує змішаний режим мащення, що свідчить про ефективні пускові властивості оливи. При максимальних обертах досліджуваних зразків домінує гідродинамічний режим мащення, незалежно від температури оливи. Загальна товщина мастильного шару і режим мащення в контакті для оливи всесезонної ВО-12 в 1,38 разів менше, в порівнянні з оливою «Бора Б» ВО-12, незалежно від температури мастильного матеріалу.

8. Питома робота тертя в фрикційному контакті при використанні оливи «Бора Б» ВО-12 знаходиться в діапазоні 144.....3435 Дж/мм², що характеризує нормальні умови роботи трибосистеми з незначними енергетичними процесами. З підвищенням температури оливи з 20 до 100 °С питома робота тертя зростає, в середньому, в 1,2 рази, що свідчить про перехід трибосистеми в більш складні умови тертя. Для оливи всесезонної ВО-12 питома робота тертя в контакті підвищується в 1,62 рази, діапазон зміни цього параметра становить 519....3733 Дж/мм². Зафіксовано періодичні стрімкі періоди підвищення $A_{\text{терт}}$ в контакті в 2,5.....3,5 разів, що свідчить про інтенсифікацію енергетичних процесів на межі мастильний матеріал – метал, в поверхневих шарах металу та підвищення зношування пар тертя.

9. Загальний лінійний знос роликів зі сталі 40ХН становить 2,48 мкм та 3,88 мкм (знос пар тертя зростає в 1,57 разів) при змащуванні пар тертя відповідно оливою «Бора Б» ВО-12 та оливою всесезонною ВО-12. Знос відстаючої поверхні в 2,76 (олива «Бора Б» ВО-12) та в 1,68 (олива всесезонна ВО-12) разів перевищує знос випереджаючої поверхні. При змащуванні пар тертя оливою всесезонною ВО-12 інтенсивність зношування випереджаючої та відстаючої поверхонь зростає в 2,2 та в 1,38 разів відповідно, в порівнянні з оливою «Бора Б» ВО-12.

10. При напрацюванні пар тертя встановлено прояв пластифікуючого ефекту Ребіндера, що позитивно впливає на триботехнічні процеси в контакті за рахунок зменшення поверхневої енергії контактних поверхонь при адсорбції активних компонентів присадки оливи та формуванні граничних адсорбційних шарів: зниження мікротвердості сталі 40ХН після напрацювання 100 циклів встановлено в 1,56 та в 1,33 разів для випереджаючої та відстаючої поверхонь відповідно при змащуванні оливою «Бора Б» ВО-12; забезпечується зниження опору локальних мікрооб'ємів матеріалу поверхневих шарів металу контактному деформуванню в напрямку тангенціального руху – максимальні значення сили тертя при індентуванні менше в 1,72 рази за показники, встановлені для поверхневих шарів матеріалу, мащення якого відбувалося в середовищі оливи всесезонної ВО-12.

11. Підвищення зносостійкості сталі 40ХН в умовах кочення з проковзуванням при змащуванні оливою «Бора Б» ВО-12, на відміну від оливи всесезонної ВО-12, забезпечується за рахунок незначних змін структурного стану приповерхневих шарів елементів трибосполучень внаслідок їхньої здатності витримувати деформації та протистояти зародженню внутрішніх дефектів, що лежать в основі перебігу процесів поверхневого руйнування:

- при терті формується однорідний поверхневий шар з дрібнофрагментною структурою, до 70 % довжини траси індентування переважно фрагменти зміцнені;
- зміцнюючі та знеміцнюючі фрагменти характеризуються меншими геометричними розмірами, максимальна глибина при індентуванні менше в 1,7 разів, зменшується амплітуда сили тертя при склерометрії;
- глибина западин менше в 2 рази, що забезпечує підвищення втомної міцності контактних поверхонь;
- втричі зменшується глибина приповерхневої зони з деформованими шарами металу, даний параметр складає 10 мкм;
- при структурній пристосованості пар тертя локальних контактів забезпечується формування однорідності мікрогеометрії поверхні – рівноважна шорсткість поверхні у поздовжньому та поперечному напрямках зменшується в 1,25

рази, що призводить до збільшення на 7 % фактичної площі контакту поверхонь та сприяє зменшенню впливу динамічного фактору при несталих умовах роботи.

12. Олива «Бора Б» ВО-12 проявляє більшу стійкість до окислення – до 60 годин тривалості окислення при 120 °С кислотне число не змінюється, зростання даного показника зафіксовано в 1,57 разів лише в діапазоні тривалості окислення від 70 до 96 годин; підвищення кінематичної в'язкості при 100 °С за тривалості окислення 96 годин встановлено на 0,7 мм²/с (в 3 рази менше за оливу всесезонну ВО-12); швидкість окислення до 24-ї години менше в 6...10 разів, до 96-ї години в 3 рази, в порівнянні з оливою всесезонною ВО-12.

13. При терті каталізатором окислення виступає активована поверхня металу, що спричинює інтенсифікацію реакцій окислення компонентів олив та призводить до зміни фізико-хімічних властивостей оливи – відбувається підвищення в'язкості олив через полімеризацію молекул окисленої базової основи мастильних матеріалів, утворення органічних кислот, лаків та відкладень, а також виснаження більшості присадок.

РОЗДІЛ 5

ВПЛИВ ВОДИ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ АВІАЦІЙНИХ МАСТИЛ

5.1. Оцінка антифрикційних та протизношувальних властивостей емульсій мастило-вода.

Дані дослідження спрямовані на оцінку триботехнічних властивостей авіаційних мастил при низьких температурах за умов наявності води в мастилі. При аналізі впливу льоду на антифрикційні та протизношувальні властивості мастильних матеріалів проводилась візуальна оцінка якісних змін консистенції мастил і досліджувались мікрогеометричні параметри трибоконтакту з огляду поведінки льоду як абразивного матеріалу.

В якості мастильних матеріалів були взяті літєві мастила авіаційного призначення Era ВНІНП 286М та AeroShell Grease 33. Дослідження проводили для трьох випадків: товарні мастила, в яких, згідно сертифікату якості, відсутній вміст води; емульсії мастил з концентрацією води 10 та 20 % до кожного типу мастила. Після ретельного перемішування зразки були розміщені у морозильній камері при температурі мінус 10 °С.

Випробування проводили на натурній установці в умовах ковзання (див. розділ 2.5). Для дослідження були обрані контрзразок і зразки зі сталі 30ХГСА.

Максимальний тиск (p_{max}) в контакті:

$$p_{max} = 0,564 \sqrt{\frac{N_l}{\Theta_{\Sigma r}}} = 0,564 \sqrt{\frac{30/20}{8,46 \times 10^{-6} \times 25}} = 47,5 \text{ МПа} \quad (5.1)$$

Швидкість ковзання складала 1,1 – 1,15 м/с. При дослідженні визначалися момент тертя, температура зразка і контрзразка.

Візуальний контроль емульсій мастило – вода встановив суттєві відмінності щодо стабільності досліджуваних мастил (рис. 5.1).

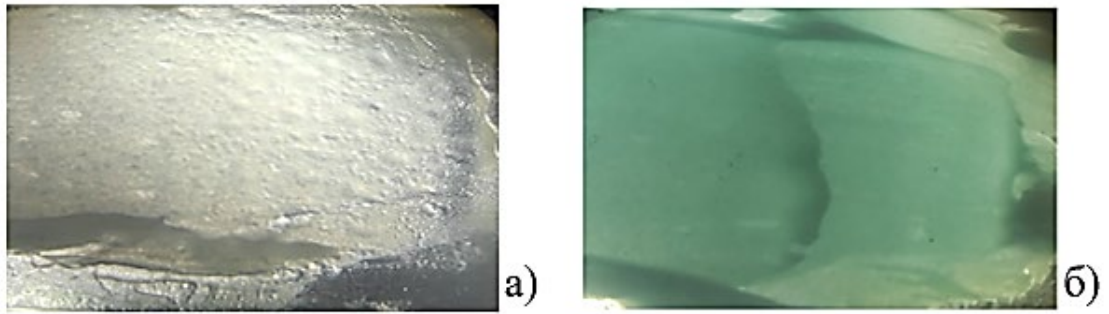


Рис. 5.1. Емульсії мастило – вода в охоложеному стані при мінус 10 °С при концентрації води 20 % в мастилі Ера ВНІНП-286М (а) та AeroShell Grease 33 (б) ($\times 4,8$).

Для мастила Ера ВНІНП-286М встановлена висока спорідненість до води – вода в концентрації 10 % однорідно розподіляється в об'ємі мастила за кімнатної температури, при охолодженні до мінус 10 °С спостерігається переважно кристалізація води, однак при концентрації води 20 % наявні поодинокі структури зв'язаної некристалізованої води, які займають 10 % площі спостереження (рис. 5.2 а, б, в).

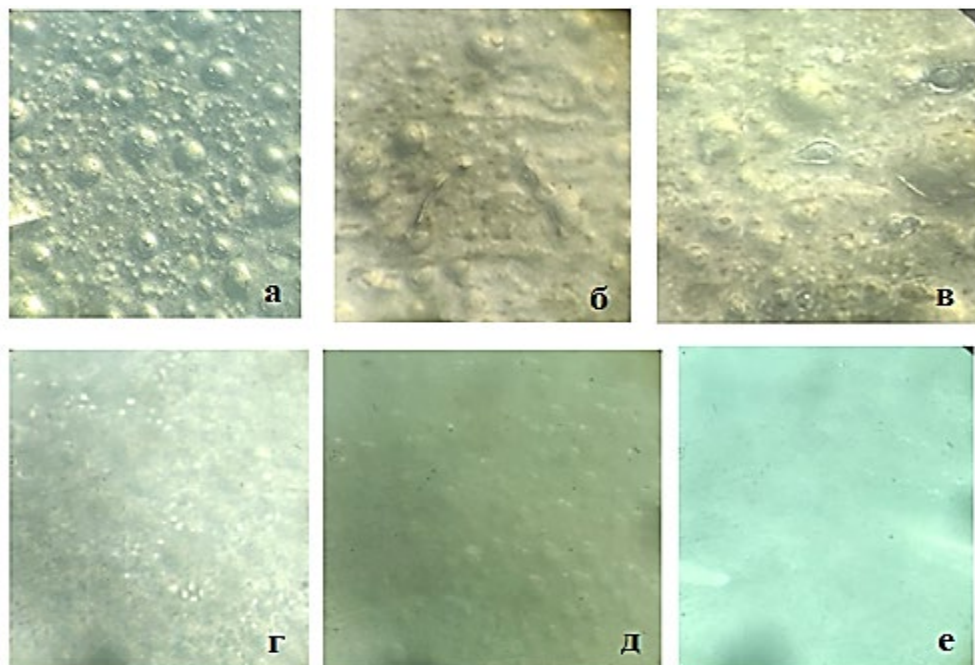


Рис. 5.2. Візуальний контроль емульсії мастило – вода при мінус 10 °С: мастило Ера ВНІНП-286М товарне (а), емульсії з 10 % (б) та 20 % (в) води; мастило AeroShell Grease 33 товарне (г), емульсії з 10 % (д) та 20 % (е) води ($\times 32$).

Якщо при додаванні 10 % води до мастила ВНІНП-286М утворюється однорідна емульсія, то при збільшенні концентрації води до 20 % спостерігається часткове розділення емульсії з відділенням до 5 % чистої води. Таким чином, мастило ВНІНП-286М утворює стабільну емульсію з водою при концентрації останньої до 15 %.

Незалежно від концентрації води, мастило AeroShell Grease 33 характеризується ефективними деемульгуючими властивостями, протягом 1-3 хвилин спостерігається повне розділення емульсії на мастило – вода, при охолодженні консистенція мастила однорідна, вода кристалізується в нижній частині ємності (рис. 5.2 г, д, е)

При нагріванні охолоджених емульсій до плюс 10 °С спостерігається розшарування в мастилi ВНІНП-286М, мастило AeroShell Grease 33 характеризується однорідною текстурою (рис. 5.3).

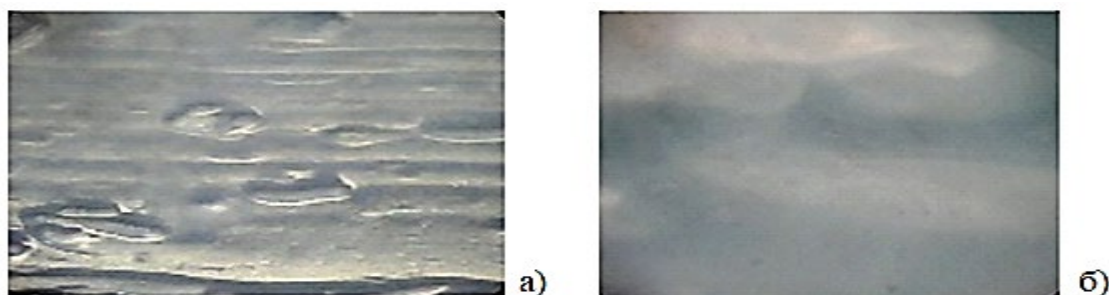


Рис. 5.3. Емульсії мастило – вода (20 %) після охолодження при мінус 10 °С з наступним нагріванням до плюс 10 °С: а – мастило Ера ВНІНП-286М, б – мастило AeroShell Grease 33 ($\times 32$).

Проаналізуємо триботехнічні характеристики емульсій. Для емульсій ВНІНП-286М – вода встановлено підвищення коефіцієнта тертя в контактi на 10 % незалежно від часу напрацювання, в порівнянні з товарним мастилом (рис. 5.4).

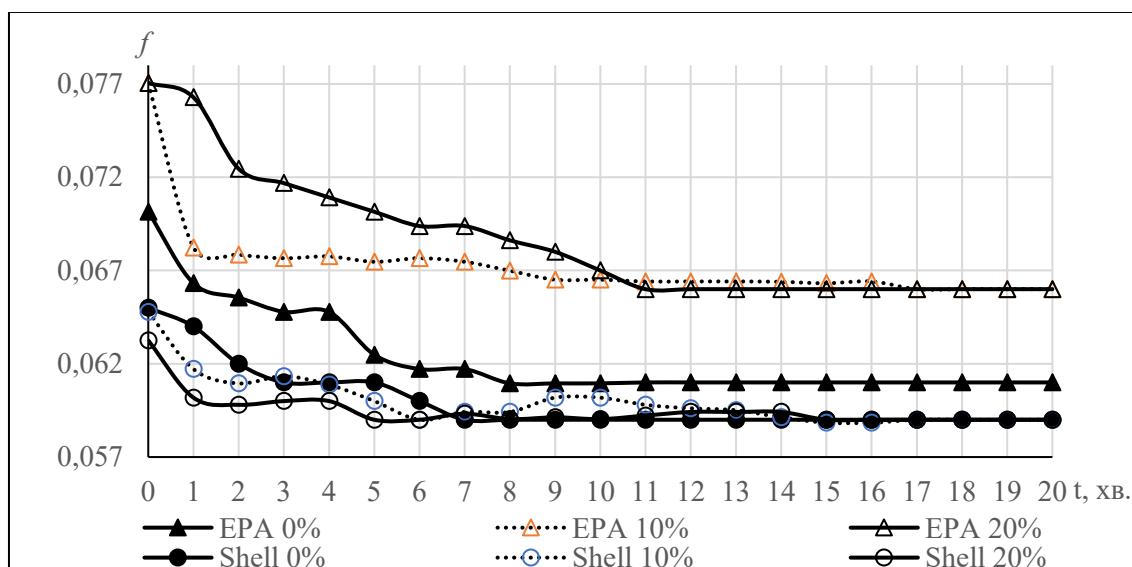


Рис. 5.4. Зміна коефіцієнта тертя при напрацюванні для товарних мастил Ера ВНІНП-286М та AeroShell Grease 33 та їх емульсій з водою: 0, 10 та 20 % – концентрація води.

Якщо для товарного мастила стабілізація коефіцієнту тертя на рівні 0,061 зафіксована на 7-8 хвилині, то для емульсій даний параметр стабілізується на 11-12 хвилині напрацювання. Заслуговує на увагу аналіз кінетики зміни температури в триботехнічному контакті. Приріст температури в контакті до завершення експерименту становив плюс 13, 11 та 10 °С відповідно для товарного мастила та емульсій з 10 та 20 % води (рис. 5.5).

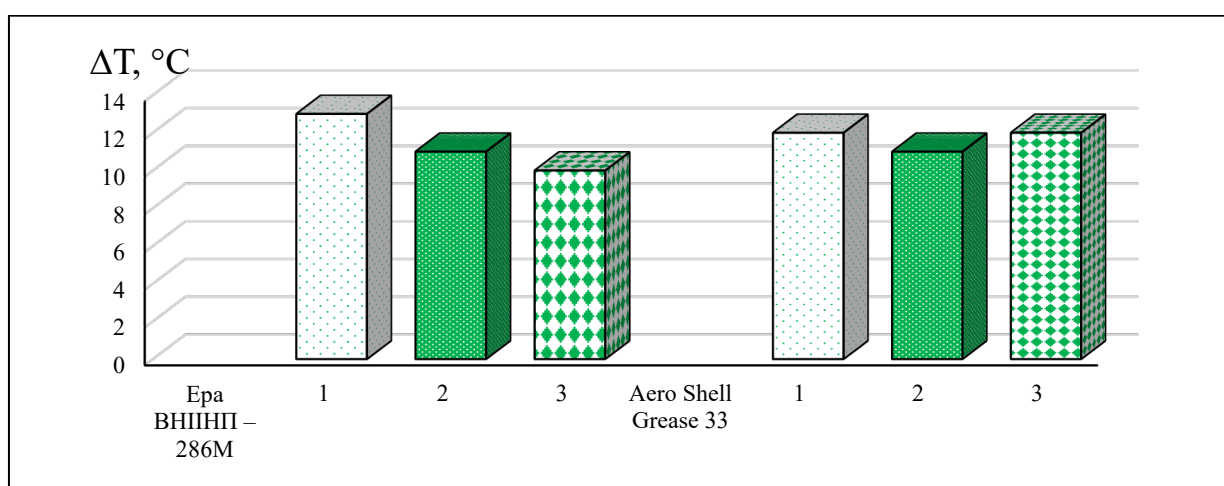


Рис. 5.5. Приріст температури в зоні контакту через 20 хвилин напрацювання: 1 – товарні мастила; 2 – емульсія з 10 % води; 3 – емульсія з 20 % води.

Таким чином, на 15 та 23 % зменшується інтенсивність підвищення температури в триботехнічному контакті при змащуванні емульсіями з 10 та 20 % води відповідно. Припускаємо, що механізм цього процесу полягає в теплофізичних властивостях води, які суттєво відрізняються від мастил. Зокрема, питома теплоємність води 4200 Дж/(кг·град), що, в середньому, в 2 рази більше за питому теплоємність мастила; коефіцієнт теплопровідності води становить 0,58 Вт/(м·град), що в 3 рази більше за аналогічний параметр мастила. Зазначені теплофізичні властивості для мастильних матеріалів визначають їх здатність відводити теплоту з зони контакту, знижуючи таким чином теплову напруженість трибосистеми. В нашому випадку, збільшення концентрації розчиненої води в емульсії забезпечує менш інтенсивне зростання температури в триботехнічному контакті, що спричинено підвищенням теплоємності емульсії, в порівнянні з товарним мастилом.

На відміну від мастила ВНІНП-286М, додавання води в мастило AeroShell Grease 33 не призводить до погіршення його антифрикційних характеристик. В початковий період роботи коефіцієнт тертя як для товарного мастила AeroShell Grease 33, так і для його емульсій з водою, становить 0,065, що на 8 % менше, ніж для мастила ВНІНП-286М та на 15 % менше за коефіцієнт тертя для емульсій ВНІНП-286М – вода. Стабілізація коефіцієнту тертя на рівні 0,059 відбувається на 5-й хвилині напрацювання, в порівнянні з мастилом ВНІНП-286М, для AeroShell Grease 33 коефіцієнт тертя зменшується на 3 % ефективніше, а в порівнянні з емульсіями – на 11 %. Приріст температури в контакті протягом 20 хв напрацювання складає 11-12 °С як для товарного мастила AeroShell Grease 33, так і для його емульсій з водою (рис. 5.6). Таким чином, завдяки ефективним деемульгуючим властивостям мастила AeroShell Grease 33, внаслідок розділення емульсії на мастило-вода, попадання води в мастило не впливає на його антифрикційні характеристики.

Проаналізуємо вплив води на протизношувальні властивості досліджуваних мастил. Емульсії ВНІНП-286М з 10 та 20 % води призводять до підвищення вагового зносу трибосистеми на 11 та 15 % відповідно (рис. 5.6).

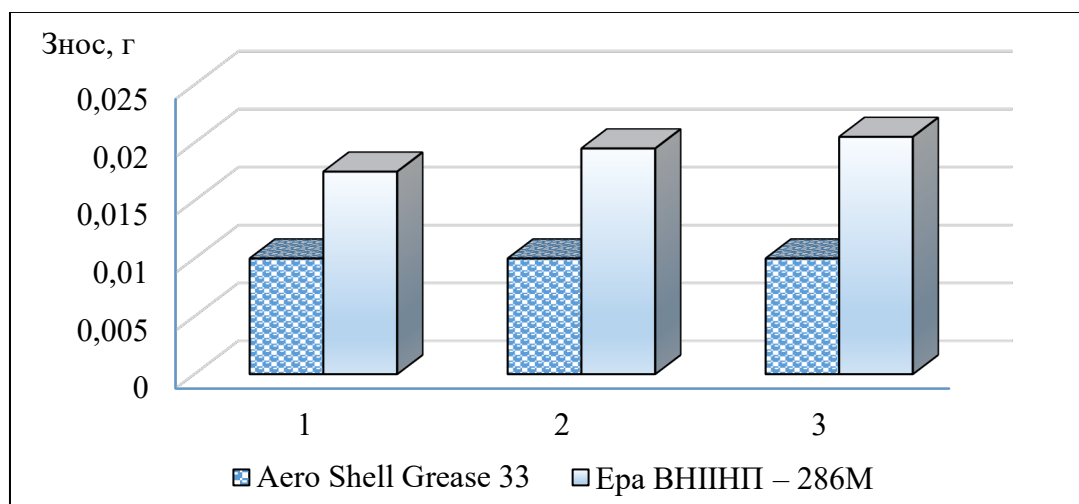


Рис. 5.6. Ваговий знос сталі 30ХГСА при змащуванні товарними мастилами (1), емульсіями мастил з водою в концентрації 10 (2) та 20 % (3).

Використання мастила AeroShell Grease 33 забезпечує зниження зносу сталі 30ХГСА в 1,75 разів, для емульсій з 20 % води – в 2 рази, в порівнянні з мастилом ВНІНП-286М. Наявність до 20 % води в мастилі AeroShell Grease 33 не впливає на зносостійкість трибосистеми в досліджуваних умовах експерименту.

Проаналізуємо мікрогеометричні характеристики вихідної поверхні сталі та поверхні, утвореної при структурній пристосованості при терті; для даних досліджень використано лазерний скануючий диференційно-фазовий мікроскоп-профілометр [197]. Оцінка мікрорельєфу поверхні проводилась для зразку 1 (рис. 2.14) – вихідної поверхні та поверхні тертя після напрацювання 20 хв при змащуванні емульсіями досліджуваних мастил з 20 % води (рис. 5.7).

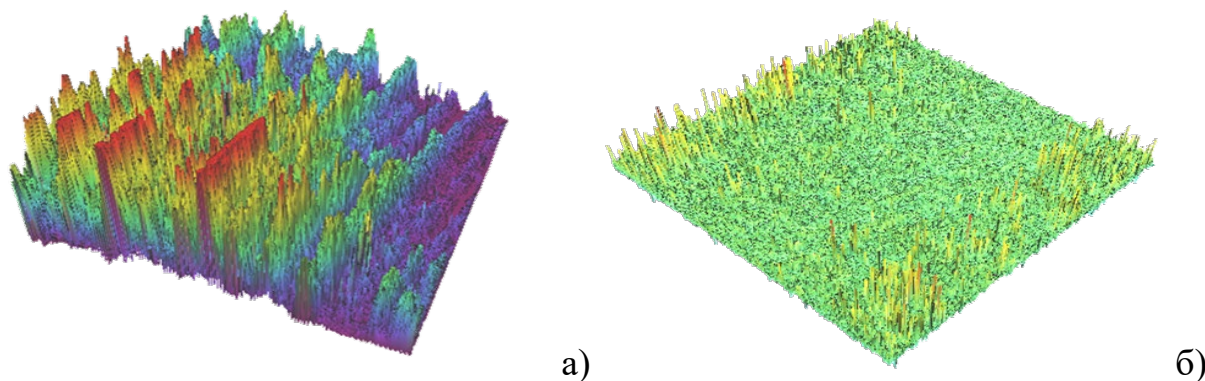


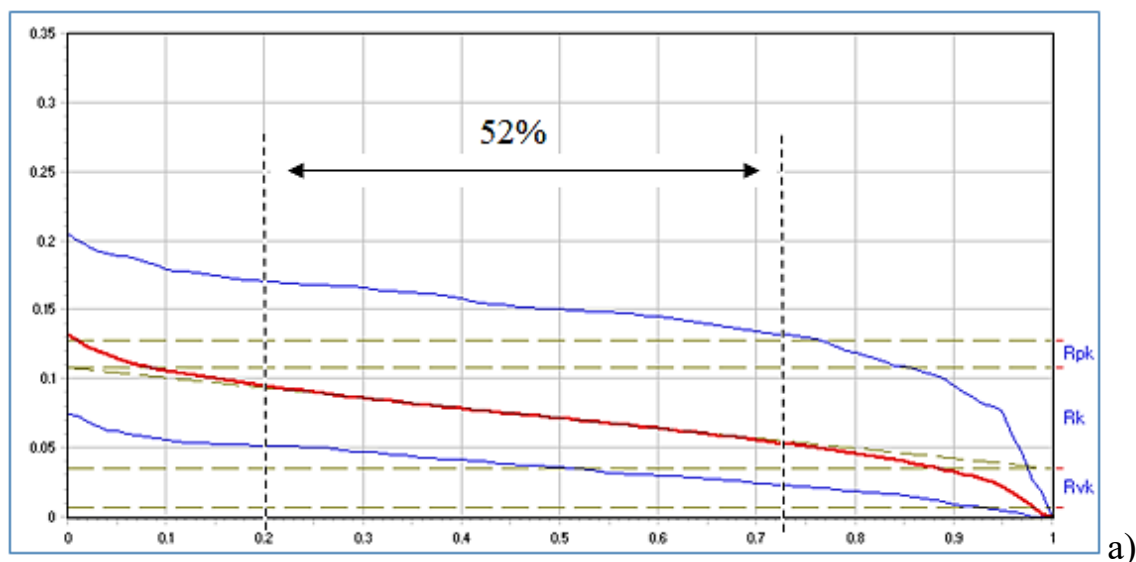
Рис. 5.7. Вихідна поверхня сталі 30ХГСА (а) та доріжка тертя після напрацювання (б) при змащуванні емульсією мастило ВНІНП-286М – вода 20 %.

Якість поверхневого шару сталі оцінювалась за параметрами, представленими в табл. 5.1 та на рис. 5.8.

Таблиця 5.1

Параметри мікрорельєфу поверхневого шару сталі 30ХГСА

Параметри	Вихідна поверхня	Доріжка тертя (змащування емульсією ВНІНП-286М – вода 20 %)	Доріжка тертя (змащування емульсією AeroShell Grease 33 – вода 20 %)	Доріжка тертя (змащування AeroShell Grease 33)
R_a , мкм (середнє арифметичне відхилення профілю)	0,08	0,041	0,038	0,038
R_{max} , мкм (найбільша висота профілю)	0,21	0,26	0,1	0,11
R_{pk} , мкм (усереднена висота виступів)	0,022	0,1	0,018	0,016
R_k , мкм (центральна висота мікронерівностей)	0,078	0,021	0,03	0,033
R_{vk} , мкм (усереднена глибина западин)	0,03	0,017	0,018	0,02
Δ Мг,% – частка центральної області профілю згідно DIN 4776	58	33	71	73



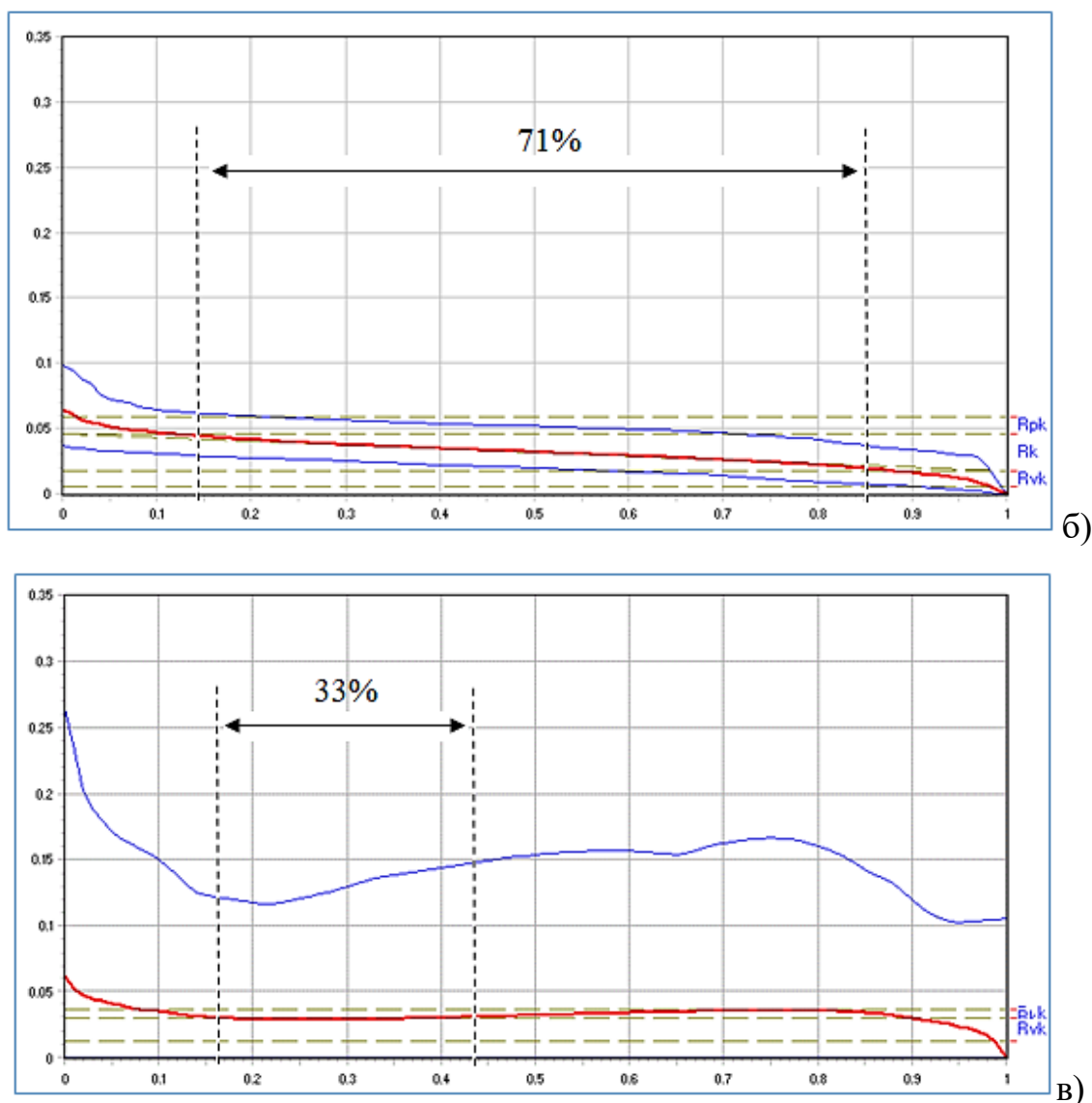


Рис. 5.8. Оцінка мікрорельєфу поверхні сталі 30ХГСА за кривою Аббота (а) – вихідна поверхня, (б) – емульсією на основі мастила AeroShell Grease 33, (в) – емульсією на основі мастила ВНІНП-286М.

Численними експериментальними дослідженнями доведено, що мастильний матеріал суттєво впливає на процес структурної пристосованості елементів трибоспряження, ключовим моментом якого є формування мікрорельєфу контактних поверхонь в процесі припрацювання [168, 198 – 200]. Порівняльний аналіз мікрогеометричних характеристик вихідної поверхні та доріжки тертя встановив більш ефективну структурну пристосованість контактних поверхонь при змащуванні емульсією на основі мастила AeroShell Grease 33, в порівнянні з емульсією на основі мастила ВНІНП-286М, за наступними критеріями:

- в 2 рази зменшується як рівноважна шорсткість, так і найбільша висота профілю поверхневих шарів в процесі припрацювання;
- на 26 % збільшується частка основного матеріалу, яка визначає відносну опорну довжину профілю (рис. 5.8).

Зазначимо, що наявність води в мастилі AeroShell Grease 33 не впливає на мікрогеометричні параметри структурної пристосованості пар тертя в досліджуваному інтервалі часу. Вважаємо, що для оцінки впливу води в емульсіях мастило-вода необхідно проводити більш тривалі дослідження. Негативними наслідками появи води в мастилі може бути розчинення та вимивання присадок, що спричинює інтенсифікацію окислення та знос пар тертя. Дана частина представлених досліджень передбачала оцінку впливу води за температури нижче 0 градусів, експерименти були короткотривалими (додаткового оснащення для охолодження в трибоконтакті не передбачалось, використовувався лише попередньо охолоджений мастильний матеріал).

Порівнюючи антифрикційні властивості товарного мастила AeroShell Grease 33 при температурі плюс 10 °C та в охолодженому стані до температури мінус 10 °C встановлено, що коефіцієнт тертя в початковий період напрацювання для охолодженого мастила збільшується в 1,4 рази, при стабілізації f дане співвідношення становить 1,27 рази (рис. 5.9 (1, 2)).

За 20 хвилин напрацювання трибосистеми приріст температури в контакті становить 7 та 13 °C відповідно для мастила при початковій температурі -10 та +10 °C (рис. 5.9 (3, 4)).

На основі даних щодо зміни коефіцієнту тертя та температури для мастила AeroShell Grease 33 припускаємо про наступний механізм мащення емульсій мастило-вода: потрапляючи в мастило, вода ефективно деемульгується, що унеможлиблює її потрапляння в зону тертя. Доказом цього є стабільність, незмінність та відсутність розбіжностей антифрикційних та протизношувальних властивостей товарного мастила, параметрів мікрорельєфу поверхневого шару сталі 30ХГСА при структурній пристосованості в процесі тертя за умов потрапляння в мастило води. Високі

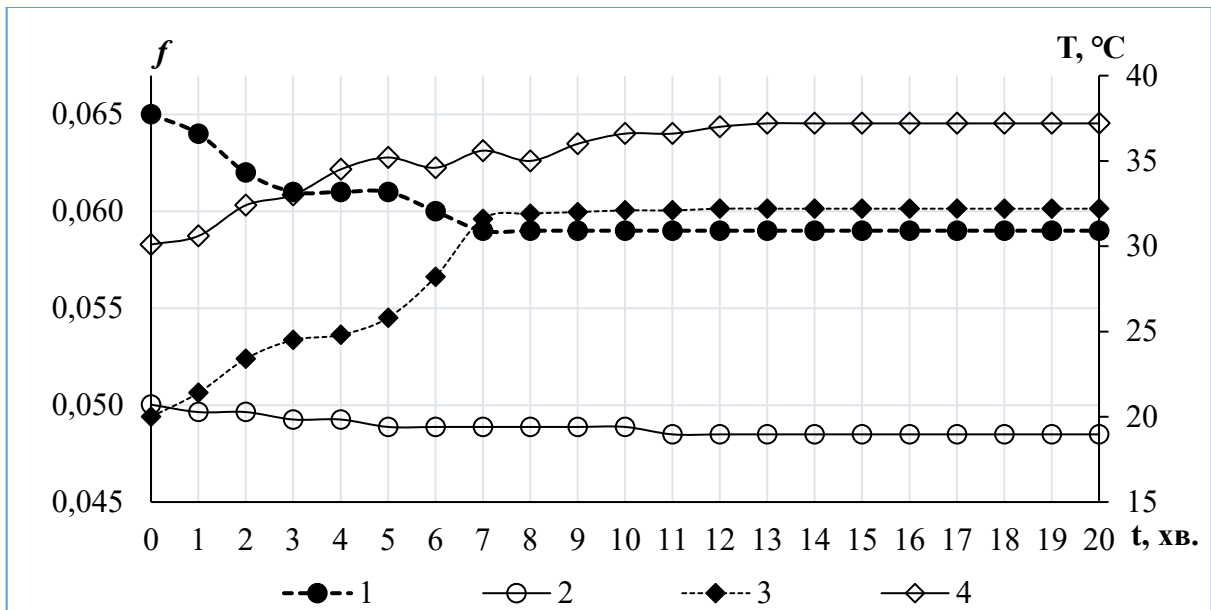


Рис. 5.9. Кінетика зміни коефіцієнту тертя (f) та температури в трибоконтакті (T) при змащуванні мастилом AeroShell Grease 33: 1 – f при температурі мастила $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – f при температурі мастила $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 – початкова температура мастила $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – початкова температура мастила $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

гідрофобні властивості даного мастила запобігають появі корозійних процесів при експлуатації механізмів. Таким чином, в порівнянні з мастилом Ера ВНІНП-286М, яке проявляє схильність до утворення стійких емульсій з водою, рекомендації щодо використання мастила AeroShell Grease 33 в якості багатоцільового для конструктивних елементів механізації крила літаків сімейства АН направлені як на підвищення терміну служби мастила, так і на забезпечення довговічності і надійності конструктивних елементів.

5.2. Багатофакторний аналіз узагальнення числових даних дослідження.

Процедура багатофакторного аналізу дозволить обчислити зведену статистику для кожної змінної, а також кореляції та коваріації між змінними [136, 137]. Для багатофакторного аналізу результатів використано процедуру Multiple Variable Analysis програмного продукту STATGRAPHICS Centurion.

У завдання багатофакторного аналізу входить виявлення величини кореляційного зв'язку між залежною змінною і незалежними факторами та між самими незалежними факторами [145, 201, 202].

На основі одержаних експериментальних даних триботехнічних властивостей контакту при змащуванні мастилами AeroShell Grease 33 та ВНІІП - 286М необхідно визначити характерні параметри, які мають суттєвий вплив на знос пар тертя. В якості залежної змінної обрано загальний лінійний знос (*wear*) випереджаючої і відстаючої поверхонь в нестационарних умовах тертя, в якості незалежних змінних обрано питому роботу тертя (*work*), товщину (*thickness*) граничних мастильних шарів, коефіцієнт тертя (*friction*), контактне навантаження (*load*), пенетрація при 25 °С, (*penetration*).

Для перевірки гіпотези про існування кореляційної залежності між незалежними та залежними змінними проведено *n* незалежних спостережень, результати яких подані в кореляційній таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Параметри для багатофакторного аналізу

Мастильний матеріал	Знос (<i>wear</i>), мкм	Робота тертя, (<i>work</i>) Дж/мм ²	Товщина (<i>thickness</i>) граничних мастильних шарів, мкм	Коефіцієнт тертя (<i>friction</i>)	Контактне навантаження (<i>load</i>), МПа	Пенетрація, 10 ⁻¹ мм
Ера ВНІІП -286М	3,52	2760	1,31	0,007	250	230
	5,53	6045	0,29	0,024	400	
	6,63	8240	0,07	0,037	550	
	7,79	9555	0,03	0,043	700	
	3,6	3200	1,5	0,015	250	
	5,6	6500	0,5	0,032	400	
	6,7	8700	0,15	0,045	550	
	7,86	10000	0,1	0,051	700	
	3,67	3655	1,71	0,023	250	
	5,68	6940	0,69	0,04	400	
	6,65	9150	0,32	0,053	550	
	7,9	10450	0,29	0,059	700	

AeroShell Grease 33	2,72	855	2,47	0,0075	250	284
	3,25	1665	1,93	0,0125	400	
	4,04	3660	1,13	0,0165	550	
	4,5	5050	0,46	0,0225	700	
	2,8	1000	2,8	0,01	250	
	3,3	1800	2,3	0,015	400	
	4,1	3800	1,5	0,019	550	
	4,6	5200	0,8	0,025	700	
	2,86	1130	3,13	0,0125	250	
	3,35	1955	2,65	0,0175	400	
	4,16	3930	1,9	0,0215	550	
	4,65	5345	1,1	0,0275	700	

Дана таблиця дозволяє нам зробити аналіз $n = 24$ спостережень за $k = 5$ факторами. За даними табл. 5.2 побудовано матрицю діаграм розсіювання для всіх пар змінних (рис. 5.10).

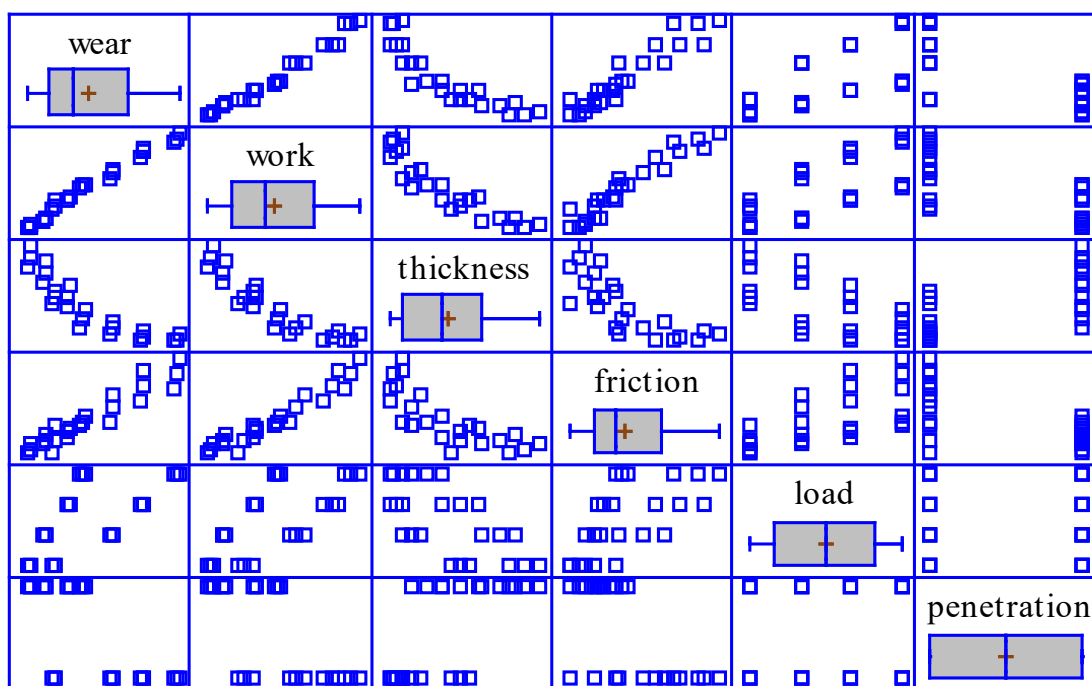


Рис. 5.10. Матриця діаграм розсіювання змінних факторів.

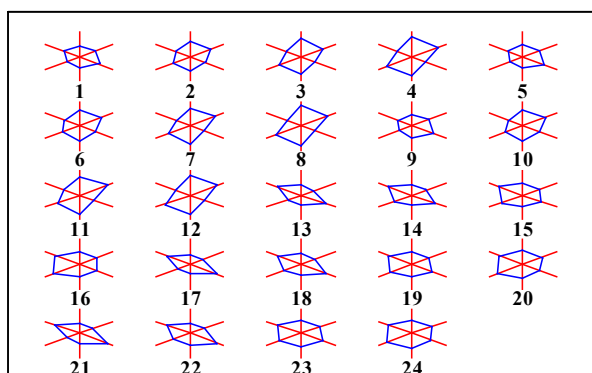
Цей графік показує всі двовимірні діаграми розсіювання для змінних, обраних для аналізу. Кожна пара змінних відкладається двічі, один раз з першою змінною на осі X , а другий раз з нею на осі Y . На всіх графіках у першому ряду на осі Y відкладено *wear*. В першому стовпчику теж маємо *wear*, відкладений по осі X . Це графічний

еквівалент кореляційної матриці, який допомагає визначити найбільшу кореляцію між змінними.

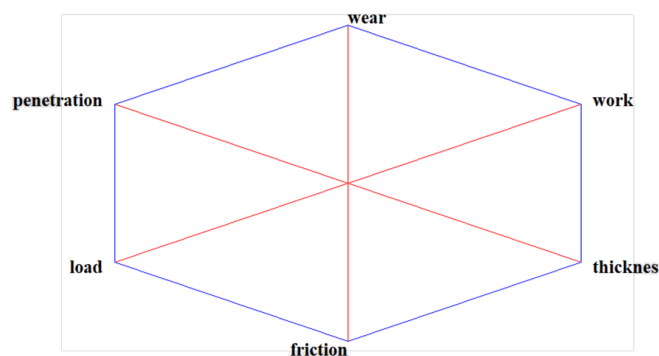
Діаграми у вигляді прямокутника з прямолінійними відрізками вказують на 95 % надійності для довірчого інтервалу та медіани (середнього варіаційного ряду), а знак "плюс" для позначення місцезнаходження вибіркового середнього.

Проведемо впорядкування множини проведених досліджень у порівняно однорідні групи, застосувавши кластеризацію методом k -середніх.

На рис. 5.11 представлено діаграму сонячних променів, призначену для відображення значень кількох кількісних змінних у кожному конкретному випадку. Кожен з маленьких багатокутників є гліфом і представляє один рядок вибірки даних. Відстань від центру багатокутника до кожної вершини представляє значення однієї змінної для цього рядка.



а)



б)

Рис. 5.11. Відображення значень кількох кількісних змінних для одного рядка даних: а) – гліфи вибірових даних, б) – ключовий гліф змінних багатокутника.

Відстань від центру до вершини кожного багатокутника представляє спостережуване значення відповідної змінної. Кількісна характеристика зносу представлена у верхній частині променя (на місці 12-годинникової стрілки) на кожному гліфі, а характеристика значень коефіцієнту тертя представлена на місці 6-годинникової стрілки. Кінці променів розташовані на рівні середнього значення кожної змінної плюс три стандартних відхилення, а центр - на рівні середнього значення мінус три стандартних відхилення. Відстань від центру фігури до кожної вершини використовується для представлення відносної величини вибраної змінної.

Гліфи дозволяють зробити кластеризацію рядів, тобто визначення рядів, які є схожими між собою. Так гліфи 13, 14, 17, 18, 21 та 22 мають характерно великі значення відносної величини товщини мастильної плівки і penetрації, гліфи 6, 9, 19, 20, 23 та 24 мають приблизно однакові відносні середні значення для всіх змінних і тому мають схожу форму. Візуалізація оцінки значимості змінних в проведених експериментах дає можливість подання багатовимірною розподілу даних на двовимірній/багатомірній площині, при якому принаймні якісно відображені основні закономірності, властиві вихідному розподілу, – його кластерна структура, особливості, внутрішні залежності між ознаками.

В табл. 5.3 наведено зведену статистику для кожної з обраних змінних даних. Вона включає міри центральної тенденції, міри варіабельності та міри форми. Особливий інтерес тут представляють стандартизована асиметрія і стандартизований ексцес, за допомогою яких визначається можливість апроксимації вибірки за допомогою нормального розподілу.

Таблиця 5.3

Зведені дані статистичного аналізу

	wear	work	thickness	friction	load	penetration
Кількість спостережень, <i>n</i>	24	24	24	24	24	24
Середнє значення параметра	4,81	5024,38	1,214	0,0265	475,0	257,0
Середнє квадратичне відхилення	1,682	3074,11	0,0,968	0,0151	171,312	27,581
Коефіцієнт варіації	34,96%	61,18%	79,73%	57,1%	36,07%	10,73%
Minimum	2,72	855,0	0,03	0,007	250,0	230,0
Maximum	7,9	10450,0	3,13	0,059	700,0	284,0
Розмах	5,18	9595,0	3,1	0,052	450,0	54,0
Коефіцієнт асиметрії	1,259	0,71	0,95	1,439	0	0
Коефіцієнт ексцесу	-0,855	-1,117	-1,003	-0,539	-1,394	-2,19

Значення цих статистичних показників за межами діапазону від -2 до +2 вказують на значні відхилення від норми, що робить недійсними багато статистичних

процедур, які зазвичай застосовуються до цих даних. У цьому випадку наступні змінні показують стандартизовані значення асиметрії за межами очікуваного діапазону. Коефіцієнт варіації для питомої роботи тертя і товщини мастильної плівки вказують на суттєву неоднорідність вибірки за цими параметрами.

Характерна симетричність щільності розподілу для незалежних змінних навантаження і пенетрації. Ця сама тенденція простежується і на діаграмі розсіювання (рис. 5.10).

Довірча ймовірність визначається конкретними умовами; зазвичай використовують значення $1 - \alpha$, що дорівнюють 0,90; 0,95; 0,99.в нашому дослідженні ми приймаємо $\alpha = 5 \%$, а довірча ймовірність $P = 0,95$ відповідно.

В табл. 5.4 представлено довірчі інтервали для середніх значень та стандартних відхилень кожної зі змінних. Ці інтервали обмежують похибку вибірки в оцінках параметрів генеральних сукупностей, з яких отримані дані.

Таблиця 5.4

Довірчі інтервали для оцінюваних параметрів

Параметр	Середнє значення	Стандарт на похибка	Нижня границя	Верхня границя	Середнє квадратичне відхилення	Нижня границя	Верхня границя
wear	4,81	0,343	4,10	5,52	1,682	1,307	2,359
work	5024,38	627,499	3726,29	6322,46	3074,11	2389,24	4312,23
thickness	1,214	0,1975	0,805	1,6224	0,968	0,752	1,357
friction	0,0265	0,0031	0,0201	0,033	0,015	0,012	0,021
load	475,0	34,969	402,661	547,339	171,312	133,146	240,31
penetration	257,0	5,6299	245,354	268,646	27,581	21,436	38,689

Коефіцієнти кореляції Пірсона між кожною парою змінних наведено в табл. 5.5. P -Value перевіряє статистичну значущість оцінених кореляцій. P -Value нижче 0,05 вказують на статистично значущі ненульові кореляції на рівні довірчої ймовірності 95,0 %. Наступні пари змінних мають P -Value нижче 0,05: wear та work, wear та thickness, wear та friction, wear та load, wear та penetration, work та thickness, work та friction, work та load, work та penetration, thickness та friction, thickness та load, thickness та penetration, friction та load, friction і penetration.

Кореляційна матриця лінійного зв'язку між парами змінних

	wear	work	thickness	friction	load	penetration
wear		0,9890	-0,8784	0,9476	0,6786	-0,6782
<i>P</i> -Value		0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0003
work	0,9890		-0,9079	0,9586	0,6909	-0,6896
<i>P</i> -Value	0,0000		0,0000	0,0000	0,0002	0,0002
thickness	-0,8784	-0,9079		-0,7759	-0,6630	0,6689
<i>P</i> -Value	0,0000	0,0000		0,0000	0,0004	0,0004
friction	0,9476	0,9586	-0,7759		0,6416	-0,6245
<i>P</i> -Value	0,0000	0,0000	0,0000		0,0007	0,0011
load	0,6786	0,6909	-0,6630	0,6416		0,0000
<i>P</i> -Value	0,0003	0,0002	0,0004	0,0007		1,0000
penetration	-0,6782	-0,6896	0,6689	-0,6245	0,0000	
<i>P</i> -Value	0,0003	0,0002	0,0004	0,0011	1,0000	

На рис. 5.12 представлено оцінені коефіцієнти кореляції Пірсона або часткові кореляції між парами змінних у вигляді матриці, де колір вказує на величину кореляції, яка варіюється від -1 до +1.

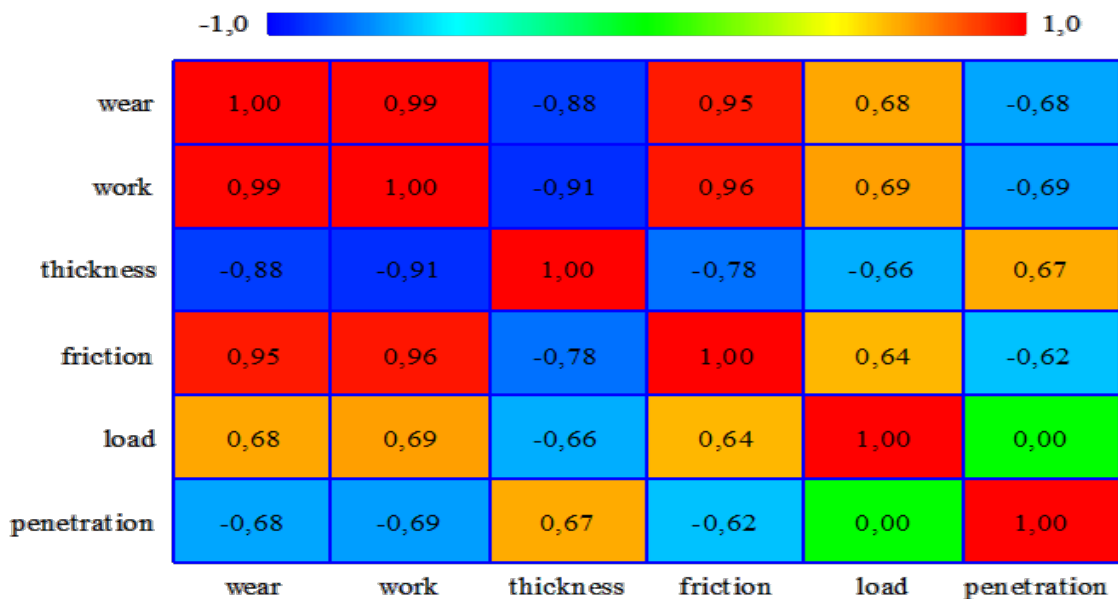


Рис. 5.12. Коефіцієнти кореляції Пірсона.

Таким чином, за коефіцієнтами кореляції Пірсона визначено, що питома робота тертя, товщина мастильного шару та коефіцієнт тертя найбільше впливають на знос контактних поверхонь – коефіцієнти кореляції даних параметрів $\geq 0,9$, для таких параметрів, як навантаження та пенетрація встановлено зниження рівня кореляційного зв'язку з зносом в 1,35 рази.

5.3. Регресійний аналіз та побудова рівняння множинної лінійної регресії числових даних дослідження.

Предметом регресійного аналізу є знаходження виду рівняння регресійної залежності для вивчення взаємозв'язку між однією змінною (залежною) і однією або більше іншими змінними (незалежними). Оцінка коефіцієнтів регресії та інші статистичні параметри дозволяють визначити, наскільки рівняння адекватно описує відносини в досліджуваному наборі даних.

Для перевірки гіпотези про існування лінійної кореляційної залежності між незалежними та залежними змінними і для знаходження параметрів рівняння регресії використаємо дані спостережень, що наведені у табл. 5.2.

Для дослідження взаємозв'язку і впливу незалежних змінних складемо загальне рівняння. Регресійний аналіз може бути представлений наступним рівнянням:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + e, \quad (5.2)$$

де y – загальний лінійний знос (*wear*) випереджаючої і відстаючої поверхонь в нестационарних умовах тертя, мкм, a – інтерсепт визначає значення на осі y , коли всі змінні рівняння дорівнюють 0, b_j – коефіцієнт регресії (нахил) для змінної x_j , x_1 – питома робота тертя (*work*), Дж/мм², x_2 – товщина (*thickness*) граничних мастильних шарів, мкм, x_3 – коефіцієнт тертя (*friction*) x_4 – контактне навантаження (*load*), МПа, x_5 – пенетрація при 25 °С, (*penetration*), 10⁻¹ мм і e – помилка рівняння регресії.

Одночасне включення декількох змінних у рівняння регресії дає змогу контролювати вплив факторів, що заважають. Такий підхід дозволяє дослідити зв'язок між роботою тертя і товщиною граничних мастильних шарів, контролюючи інші важливі фактори, що впливають на цей зв'язок. Значення b_1 , b_2 , b_3 , b_4 і b_5 у наведеному вище рівнянні дають оцінку впливу роботи тертя, товщини мастильних шарів, коефіцієнту тертя, навантаження і пенетрація, як властивість мастильного матеріалу, тоді як кожна з незалежних змінних є контрольованою.

Метод ANOVA зазвичай починається з повного рівняння регресії, що містить всі основні змінні та взаємодії відповідно до рівняння (5.2) і описує вплив двох або більше кількісних факторів X на залежну змінну Y . Багатофакторний аналіз числових даних дослідження показав, що розглянуті дані містять змінні, які вказують на

неоднорідність вибірки і відповідно можуть несуттєво впливати на рівняння регресії. Тому для оптимізації процедури побудови рівняння регресії і його аналізу було виконано покроковий регресійний аналіз числових даних дослідження [147]. В такому аналізі змінні з найвищими *P-Value* видаляються з рівняння регресії, щоб зменшити складність рівняння з мінімальним впливом на його якість. Під час процедури скорочення кількості змінних, вони видаляються індивідуально, оскільки кожен крок скорочення призводить до зміни відхилення рівняння, що призводить до нових значень *F*-критерію та *P-Value*. Щоб зберегти цілісність рівняння, змінні видаляються лише тоді, коли вони не з'являються у взаємодіях вищого порядку [203 – 206].

В табл. 5.6 наведено результати параметрів множинного регресійного аналізу для всіх прийнятих змінних вибірки відповідно до початкової (нульової) гіпотези побудови рівняння регресії [147].

Таблиця 5.6

Множинний регресійний аналіз результатів спостережень

Параметр	Оцінка параметра	Стандартне відхилення оцінки	<i>T</i> Statistic <i>t</i> -статистика (Стьюдента)	<i>P-Value</i> Максимальний рівень значимості
<i>a</i> , constant (постійна)	-0,621828	1,89988	-0,327299	0,7472
<i>x</i> ₁ , work	0,000974869	0,000182288	5,34796	0,0000
<i>x</i> ₂ , thickness	0,498675	0,202018	2,46846	0,0238
<i>x</i> ₃ , friction	-45,659	19,9577	-2,28779	0,0345
<i>x</i> ₄ , load	-0,000968284	0,00127118	-0,761721	0,4561
<i>x</i> ₅ , penetration	0,00622252	0,0079528	0,782432	0,4441

В даній таблиці показник *t*-статистика – це локальний статистичний показник, який показує можливості прогнозування для кожної незалежної змінної окремо [207].

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}, \quad (5.3)$$

де *r* – лінійна кореляція для обраної змінної.

t-критерій Стьюдента аналізує коефіцієнти регресії в рівнянні, які значно відрізняються від 0. Оскільки *t*-критерій застосовується до кожної незалежної змінної, рівняння повертає значення *t*-статистики для кожної незалежної змінної, а не одне

значення для всього рівняння. Кожне значення t -статистики в аналізі пов'язане із P -Value, яке вказує на значущість незалежної змінної.

При визначенні того, чи можна спростити рівняння, звертаємо увагу на те, що P -Value більше 0,05 для незалежних змінних становить 0,4561 належить навантаженню і 0,4441 належить пенетрації мастильних матеріалів, ці члени рівняння не є статистично значущим на рівні довірчої ймовірності 95,0 % або вище, а отже, слід розглянути можливість вилучення даних змінних із рівняння.

В цьому випадку є доцільним використання зворотного покрокового відбору – виконується зворотна покрокова регресія. Починаючи з рівняння, яке включає всі змінні, процедура видаляє змінні по одній, якщо вони не є статистично значущими. Вилучені змінні можуть бути додані до рівняння на наступних кроках, якщо вони стануть статистично значущими. На кожному кроці покрокового відбору ми оцінюємо два характеристичні коефіцієнти рівняння. Коефіцієнт детермінації R^2 описує якість рівняння і постійно зменшується з вилученням факторів.

Скоригований коефіцієнт детермінації R^2_{adj} можна інтерпретувати як критерій ефективності рівняння, оскільки він також враховує наявну кількість точок вимірювання та кількість факторів, включених у рівнянні. Таким чином, вилучення найбільш незначущих факторів може призвести до збільшення R^2_{adj} .

Виконання покрокового відбору змінних дозволив провести покроковий регресійний аналіз і побудову нового статистично значущого рівняння регресії. Результати покрокового регресійного аналізу наведено в табл. 5.7 та 5.8.

Таблиця 5.7

Множинний покроковий регресійний аналіз результатів спостережень

Параметр	Оцінка параметра	Стандартне відхилення оцінки	T Statistic t -статистика (Стьюдента)	P -Value Максимальний рівень значимості
a , constant (постійна)	0,800399	0,475842	1,68207	0,1081
x_1 , work	0,000881482	0,000133169	6,61926	0,0000
x_2 , thickness	0,529655	0,190924	2,77417	0,0117
x_3 , friction	-40,0501	17,9748	-2,22813	0,0375

Дисперсійний аналіз результатів спостережень

Джерело дисперсії	Сума квадратів	df – число ступенів свободи	Середній квадрат	F-критерій	P-Value
По рівнянню регресії	64,0384	3	21,3461	414,01	0,0000
Відхилення від рівняння регресії	1,0312	20	0,0515598		
Total (Corr.)	65,0696	23			

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 98,4152 \%$.

Скоригований Коефіцієнт детермінації, приведений до числа ступенів свободи $R^2_{d.f.}$ (скориговано для d.f.) = 98,1775 %.

R^2 (прогнозований) = 97,6551 %.

Стандартна похибка оцінювання = 0,290572.

Середня абсолютна похибка – середнє значення відхилень = 0,17169.

Коефіцієнт Дарбіна-Уотсона і відповідний йому максимальний рівень значущості = 1,94579 (P=0,3310).

Значення автокореляції залишків із кроком 1 = -0,0377896

Остаточне рівняння множинної лінійної регресії має вигляд:

$$\text{wear} = 0,800399 + 0,000881482 \cdot \text{work} + 0,529655 \cdot \text{thickness} - 40,0501 \cdot \text{friction}$$

$$y = 0,800399 + 0,000881482 \cdot x_1 + 0,529655 \cdot x_2 - 40,0501 \cdot x_3 \quad (5.4)$$

Оскільки P-Value в таблиці ANOVA менше 0,05, то існує статистично значущий зв'язок між змінними на рівні довіри 95,0 %.

Таблиця 5.9 довірчих інтервалів вказує на потенційну похибку оцінки розрахунку, пов'язану з кожним коефіцієнтом рівняння.

Таблиця 5.9

Довірчі інтервали для оцінок коефіцієнтів

Параметр	Оцінка параметра	Стандартне відхилення оцінки	Нижня границя	Верхня границя
a , constant (постійна)	0,800399	0,475842	-0,192193	1,79299
x_1 , work	0,000881482	0,000133169	0,000603695	0,00115927
x_2 , thickness	0,529655	0,190924	0,131394	0,927915
x_3 , friction	-40,0501	17,9748	-77,545	-2,55529

Дані результати кореляційної матриці вказують наскільки добре ефекти різних незалежних змінних були відокремлені один від одного (табл. 5.10). Отримані кореляції використовуються для визначення наявності мультиколінеарності, тобто кореляції між прогнозованими змінними. В даному випадку існує 3 кореляції з абсолютними значеннями більше 0,5 (не враховуючи постійний член), що в свою чергу підтверджує правильність підбору лінійного рівняння.

Таблиця 5.10

Кореляційна матриця для оцінок коефіцієнтів

	constant	work	thickness	friction
a , constant (постійна)	1,0000	-0,8890	-0,9797	0,7359
x_1 , work	-0,8890	1,0000	0,9138	-0,9612
x_2 , thickness	-0,9797	0,9138	1,0000	-0,7913
x_3 , friction	0,7359	-0,9612	-0,7913	1,0000

Одним з способів проілюструвати результати рівняння множинної регресії є аналіз графіку компонентних ефектів (вливів), який відображає частину підігнаної регресійного рівняння, що відповідає будь-якій окремій змінній. За результатами покрокової регресії побудовано графіки, що показують частину підігнаного рівняння і дозволяють отримати рівняння кожної лінії для зносу в залежності від незалежної змінної: роботи тертя, товщини мастильного матеріалу і коефіцієнту тертя.

На рис. 5.5 окремо показано лінії, що відображають відносну зміну прогнозованих значень зносу, яка відбувається при зміні відповідно роботи тертя, товщини мастильного матеріалу і коефіцієнту тертя в межах спостережуваного діапазону. Кожна точка наноситься на графік шляхом додавання її залишку (відхилення) до лінії. Вивчаючи розмір відхилень по відношенню до зміни прогнозованих значень відгуку, можна судити про важливість обраної незалежної змінної. Вертикальні позиції дорівнюють ефекту компонента плюс відхилення від підігнаного рівняння. Це дозволяє оцінити відносну важливість фактору порівняно із відхиленнями. На рис. 5.13 деякі відхилення є такими ж великими, якщо не більшими,

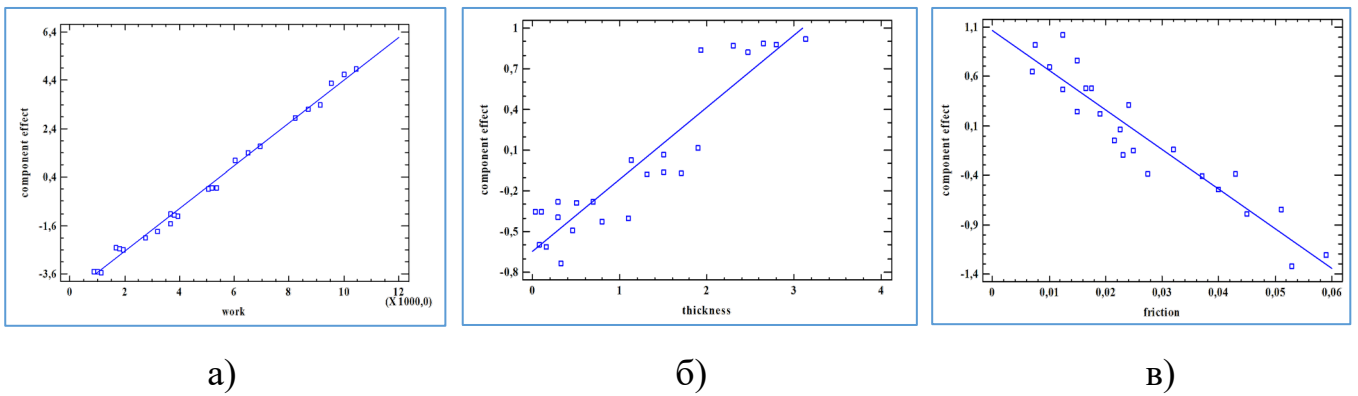


Рис. 5.13. Графіки компонентних ефектів: а) – вплив змінної роботи тертя на знос, б) – вплив змінної товщини мастильного матеріалу, в) – вплив змінної коефіцієнту тертя.

ніж ефект від кожної змінної, що вказує на те, що інші важливі фактори можуть бути відсутніми у рівнянні.

На рис. 5.14 представлено графік, що відображає спостережувані значення зносу (по вертикальній осі – observed) в порівнянні із прогнозованими значеннями (по горизонтальній осі – predicted) за підібраним рівнянням.

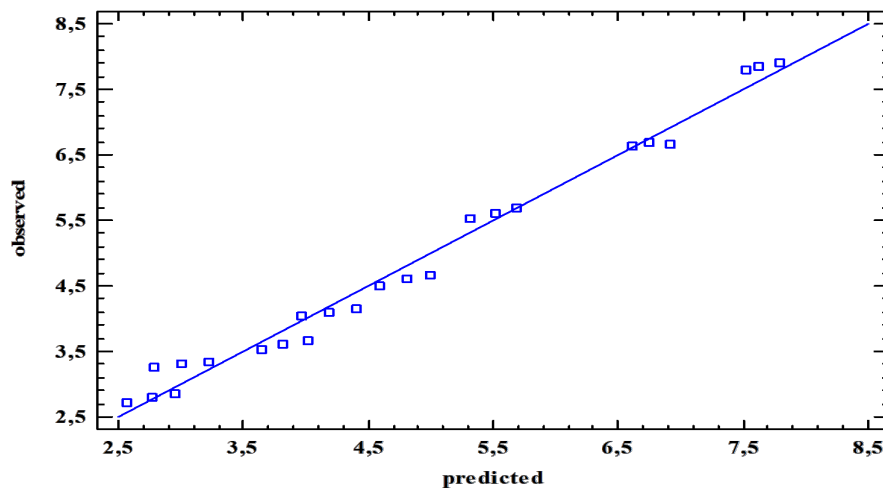


Рис. 5.14. Графік спостереження в порівнянні з прогнозом зносу.

Як видно з графіку, точки випадковим чином розкидані навколо діагональної лінії, що свідчить надійність обраного рівняння. Таким чином, чим ближче точки лежать до діагональної лінії, тим краще рівняння прогнозує спостережувані дані.

Як і у всіх статистичних рівняннях, належною практикою є вивчення відхилень. У регресії відхилення визначаються за допомогою різниці між значеннями спостережуваних даних та прогнозними значеннями за підібраного рівняння:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (5.5)$$

Графік на рис. 5.15 вказує на залежність відхилень від номера рядка у вибірці згідно табл. 5.2.

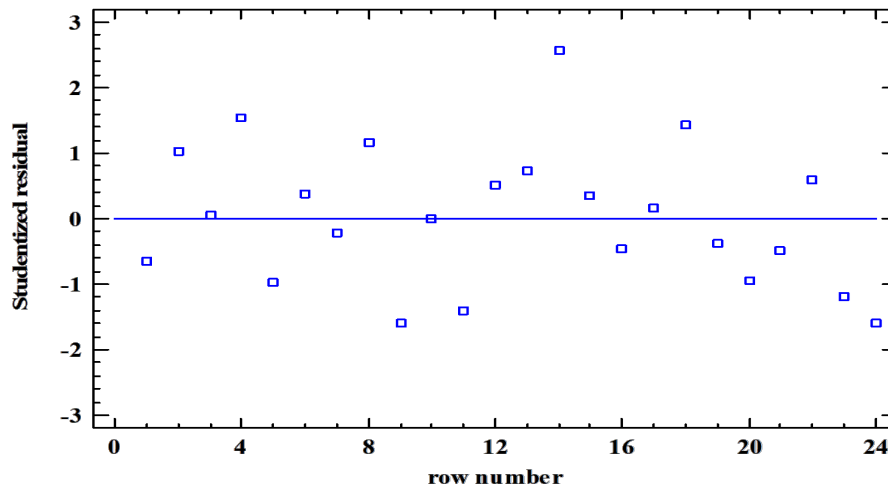


Рис. 5.15. Графік залежності стьюдентизованих відхилень від ряду досліджуваних значень.

Будь-яка не випадкова закономірність може вказувати на послідовну кореляцію в даних, якщо порядок рядків відповідає порядку, в якому дані були зібрані.

Нормальний розподіл ймовірності відхилень представлено на рис. 5.16.

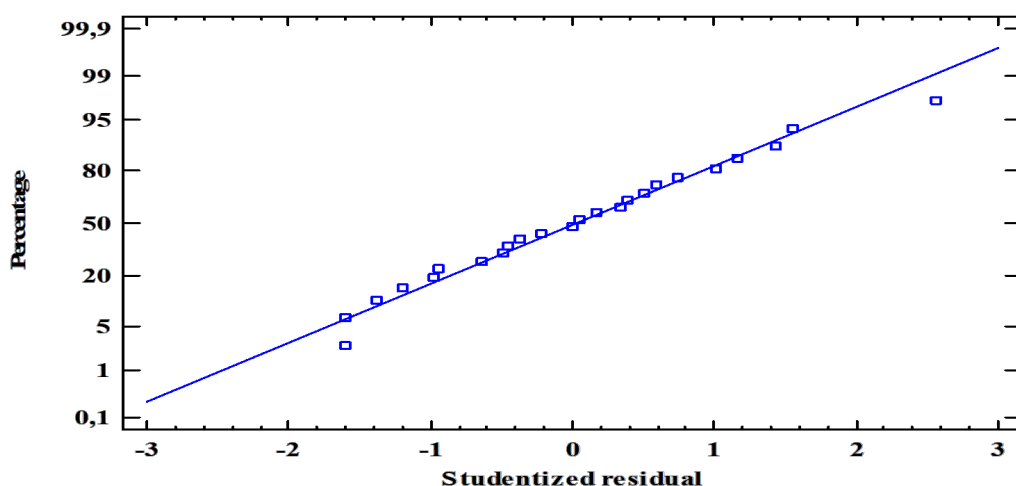


Рис. 5.16. Графік залежності стьюдентизованих відхилень від ряду досліджуваних значень.

Цей графік відображає відхилення на графіку в масштабі, щоб допомогти визначити, чи могли відхилення обґрунтовано походити від нормального розподілу. Якщо так, то вони повинні розташовуватися близько до діагональної лінії. Для побудови цього графіка відхилення були відсортовані від найменших до найбільших. Потім вони були нанесені на графік відносно значень $(i-0.375)/(n+0.25)$, де n – кількість відхилень. За винятком окремих спостережень в крайньому правому та лівому кутах, які цілком можуть бути викидами, відхилення цілком можуть походити з нормального розподілу, що вказує на правильність розрахунків для нормального розподілу ймовірностей відхилень.

Висновки до розділу 5.

1. Встановлені високі деемульгуючі властивості мастила AeroShell Grease 33, емульсія мастила з водою в концентрації до 20 % при температурі від -10 до +10 °С повністю розділяється, що унеможливорює потрапляння води в зону контакту, на відміну від мастила Ера ВНІНП-286М, яке утворює стабільну емульсію з водою при концентрації останньої до 15 %.

2. Досліджено, що наявність води в мастилi AeroShell Grease 33 не впливає на його антифрикційні характеристики, коефіцієнт тертя на 15 та 11 % менше відповідно в початковий період напрацювання та при стабілізації даного параметру в контактi, в порівнянні з емульсіями мастила Ера ВНІНП-286М.

3. Встановлено механiзм зменшення приросту температури в контактi пар ковзання при змащуванні емульсіями мастила Ера ВНІНП-286М, що полягає в підвищенні теплоємності емульсії за рахунок розчиненої води, яка характеризується вищими теплофізичними властивостями, на відміну від мастила, що спричинює зниження теплової напруженості трибосистеми.

4. Мастило AeroShell Grease 33 характеризується високими протизношувальними властивостями – ваговий знос сталі 30ХГСА зменшується в 1,75 разів, в порівнянні з мастилом Ера ВНІНП-286М; наявність води в мастилi не призводить до зростання зносу сталі, на відміну від мастила Ера ВНІНП-286М,

емульсії якого з 10 та 20 % води спричинюють підвищення вагового зносу сталі на 11 та 15% відповідно.

5. Визначена більш ефективна структурна пристосованість локальних контактів пар ковзання при змащуванні мастилом AeroShell Grease 33 та його емульсіями, на відміну від мастила/емульсії Ера ВНІНП-286М, яка проявляється в зменшенні в 2 рази рівноважної шорсткості, в 1,6 рази найбільшої висоти профілю та в зростанні на 26 % відносної опорної довжини профілю, що забезпечує формування мікрорельєфу поверхневих шарів металу за принципом оптимальної механічної схеми контактної взаємодії.

6. Багатофакторним статистичним аналізом визначено основні фактори, які впливають на знос контактних поверхонь, визначено статистичні показники для кожної з обраних змінних даних спостереження, а саме: середні значення, середні квадратичні відхилення, коефіцієнти варіації, мінімальні та максимальні значення змінних.

7. Проведено розрахунок коефіцієнтів кореляції між незалежними змінними. Кореляційна матриця показує, які змінні мають сильний зв'язок між собою.

8. Побудовано регресійне рівняння зносу з використанням множинного регресійного аналізу. Проведено оцінку параметрів рівняння для кожної незалежної змінної, підтверджено адекватність рівняння за допомогою аналізу дисперсії (ANOVA), t -критерію Стьюдента, P -Value, F -критерію, які характеризують та оцінюють значущість незалежних змінних.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано вибір основних показників, за якими проводилась комплексна оцінка якості авіаційних мастильних матеріалів відповідно до міжнародних стандартів, специфікацій та допусків виробників авіаційної техніки за несучою здатністю мастильного шару, за антифрикційними, протизношувальними та деемульгуючими властивостями, за стійкістю до окислення та стабільністю до деструкції компонентів мастильного матеріалу в умовах динамічного навантаження.

2. Визначені механізми ступеневого руйнування граничних шарів мастильних матеріалів в умовах масляного голодування, які спричинюють перехід трибосистеми в граничний режим мащення внаслідок зростання градієнту швидкості зсуву до $8 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, що призводить до механодеструкції анізотропних граничних шарів з тривалістю їх руйнування від 5 до 55 хвилин з подальшим проявом ознак заїдання пар тертя локальних контактів.

3. Обґрунтовано вибір мастила AeroShell Grease 33 для забезпечення самоорганізації дисипативних структур пар тертя в умовах кочення з проковзуванням в діапазоні контактного навантаження 250 - 700 МПа за рахунок ефективних мастильних властивостей (товщина мастильного шару зростає в 2 - 10 разів), зниження коефіцієнта тертя та питомої роботи тертя в 2 рази, що сприяє зниженню лінійного зносу контактних поверхонь в 1,7 разів та збільшенню в 3 - 5 разів періоду напрацювання пар тертя до перших ознак заїдання при переході до умов тертя без мастильного матеріалу.

4. Розроблена методика оцінки триботехнічних властивостей емульсій мастиловода, за якою встановлена ефективна структурна пристосованість локальних контактів пар ковзання при змащуванні мастилом/емульсіями AeroShell Grease 33, що проявляється в формуванні оптимального мікрорельєфу поверхневих шарів металу при терті (зменшуються в 2 рази рівноважна шорсткість та в 1,6 рази найбільша висота профілю, на 26 % зростає відносна опорна довжина профілю) та зниженням зносу сталі на 15 % за рахунок високих деемульгуючих властивостей мастила AeroShell Grease 33.

5. Встановлено зменшення інтенсивності зношування сталі в нестаціонарних умовах роботи при виборі авіаційних олив «Бора Б» СМ-9 та «Бора Б» ВО-12 за рахунок зниження енергетичних процесів в локальному контакті шляхом забезпечення олівами стабільності антифрикційних властивостей та домінування еластогідродинамічного режиму мащення при пуску внаслідок ефективної адаптації та структуризації граничних шарів мастильного матеріалу з напруженнями зсуву 6 - 18 МПа,

6. Встановлено механізм підвищення зносостійкості сталі 40ХН при змащуванні оливою «Бора Б» ВО-12, що полягає в реалізації пластифікуючого ефекту Ребіндера, який проявляється в зниженні мікротвердості поверхневих шарів металу в 1,4 рази, зменшенні сили тертя при індентуванні в 1,72 рази, локалізації деформованих в процесі тертя приповерхневих шарів металу до 10 мкм, формуванні однорідного поверхневого шару з дрібнофрагментною структурою.

7. Обґрунтовано вибір авіаційної оливи «Бора Б» ВО-12 для запобігання утворення кислот, лаків та відкладень на активованих при терті контактних поверхнях, які є каталізатором окислення, на основі високої стійкості базової основи і присадок оливи до окислення при каталізаторах Cu та Fe (у вигляді нафтенатів) – зростання кислотного числа в 1,57 рази спостерігається лише в діапазоні 70 - 96 годин окислення, підвищення кінематичної в'язкості при окисленні та швидкості окислення в 3 рази менше, в порівнянні з оливою всесезонною ВО-12.

8. Застосуванням багатofакторного аналізу вибрано впливові показники триботехнічних характеристик, множинним регресійним аналізом одержано рівняння множинної лінійної регресії для прогнозування зносу пар тертя з урахуванням питомої роботи тертя в контакті, мастильних та антифрикційних характеристик мастильних матеріалів. Якість одержаного рівняння підтверджує коефіцієнт детермінації на рівні 98 % при встановленому інтервалі довіри на рівні 95 %, значущість незалежних змінних оцінена за *t*-критерієм Стюдента, *P*-Value, *F*-критерієм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Хімко А. М., Токарук В. В. Розробка методики контролю та діагностики експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів за триботехнічними параметрами. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 1 (90). С. 11–19. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(90\).15234](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(90).15234).
2. Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Педан Є. В., Березівський Н. М. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 2 (99). С. 4–13. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(99\).17611](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(99).17611).
3. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. Триботехніка та основи надійності машин: навч. посіб. Київ : Інформавтодор, 2006. 216 с.
4. Parovay E. F., Falaleev S. V. CFD analysis of a starved four-pad tilting-pad journal bearing with an elastic support of pads. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. 302 012010.
5. Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Лопата В. М., Калініченко В. І. Змащувальна дія олив при нестаціонарних процесах в умовах припрацювання. *Проблеми трибології*. 2016. № 1. С. 69–75.
6. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: навч. посіб. Тернопіль: Вид-во ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.
7. Chapter one the definition and classification of lubricants. *Tribology Series* / ed. by V. Štěpina, V. Veselý. 1992. Vol. 23. P. 1–8.
8. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення / В. Я. Чабанний та ін.; упоряд. В. Я. Чабанний. Кіровоград: Центр.-Укр. вид-во, 2008. 353 с.
9. EC: Lesson 27. Lubricants : classification and properties. *e-Krishi Shiksha*. URL: <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=993> (дата звернення: 13.08.2020).
10. Moore D. F. Preface. *Principles and applications of tribology*. 1975. P. 388. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-017902-5.50004-5>.

11. Base oils - Nynas. *Nynas*. URL: <https://www.nynas.com/en/products/base-oils> (дата звернення: 16.10.2020).
12. Мнацаканов Р. Г., Довбуш В. О., Якобчук О. Є., Микосянчик О. О. Мастильна дія пластичних і напіврідких мастил. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2003. № 3-4 (18). С. 73–76. URL: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.18.15390>.
13. Coronel E. Solving problems in surface engineering and tribology by means of analytical electron microscopy : doctoral thesis. 2005. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-4785> (дата звернення: 08.08.2019).
14. Axen N., Hogmark S., Jacobson S. Friction and wear measurement techniques. *Modern tribology handbook*, vol. 1 / ed. by B. Bhushan. London, 2001. P. 493–510.
15. Lubricants. *Automotive & Transportation*. URL: <https://automotive-transportation.basf.com/global/en/fuel-and-lubricants/fuel-and-lubricant-solutions/lubricants.html> (дата звернення: 10.09.2020).
16. Afonso, I.S.; Nobrega, G.; Lima, R.; Gomes, J.R.; Ribeiro, J.E. Conventional and Recent Advances of Vegetable Oils as Metalworking Fluids (MWFs): A Review. *Lubricants*. 2023. 11. P.160. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040160>.
17. Mnatsakanov R. G., Yakobchuk O. Y., Khimko A. M. Analysis of the changes in the load-bearing capacity of lubricating layers of lithium greases at contact load changing. *The Eighth World Congress “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY”: Safety in Aviation And Space Technologies: proceedings*, Kyiv, 10–12 October 2018. Kyiv, 2018. P. 1.4.9–1.4.12.
18. Zhang S., Hu L., Feng D., Wang H. Anti-Wear and Friction-Reduction Mechanism of Sn and Fe Nanoparticles as Additives of Multialkylated Cyclopentanes Under Vacuum Condition. *Vacuum*. 2013. 87. P.75–80. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2012.07.009>.
19. Uy D., Simko S. J., Carter R. O., Jensen R. K., Gangopadhyay A. K. Characterization of Anti-Wear Films Formed From Fresh and Aged Engine Oils. *Wear*. 2007. 263 (7-12), P. 1165–1174. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.026>.

20. Naveira Suarez A., Grahn M., Pasaribu R., Larsson R. The Influence of Base Oil Polarity on the Tribological Performance of Zinc Dialkyl Dithiophosphate Additives. *Tribol. Int.* 2010. 43 (12), P. 2268–2278. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.07.016>.

21. Jisa R., Ristic A., Brenner J., Lebersorger T., Ilo S., Neumayer H., Franek F. Effectiveness of Lubricant Additives for Copper-Alloy-Steel Sliding Contacts. *Lubr. Sci.* 2010. 22 (5). P. 183–193. URL: <https://doi.org/10.1002/lis.118>.

22. Ранский А. П., Гордиенко О. А., Прокопчук С. П., Гаврилюк М. А., Петрук Р. В. Дитиокарбаматы и их комплексные соединения как присадки к смазочным материалам. «Проблеми хімотології»: Матеріали III Міжнар. науково-техн. конф., м. Київ, 20–24 верес. 2010 р. Одеса, 2010. С. 22–24.

23. Маленко В. І., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Мікосянчик О. О. Порівняльні реологічні характеристики мінеральних і синтетичних олив. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2006. Вип. 45. С. 170–178.

24. Su H., Chen Y., Ma R., Li W., Zhao G., Qi Y., Lou W. Influence of Additive Chemistry on the Tribological Behavior of Steel/Copper Friction Pairs. *Lubricants*. 2022. 10 (5). 91. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants10050091>

25. Barnhill W. C., Qu J., Luo H., Meyer H. M., Ma C., Chi M., Papke B. L. Phosphonium-Organophosphate Ionic Liquids as Lubricant Additives: Effects of Cation Structure on Physicochemical and Tribological Characteristics. *ACS Appl. Mater. & Interface*. 2014, 6 (24), P. 22585–22593. URL: <https://doi.org/10.1021/am506702u>.

26. Мнацаканов Р. Г., Довбуш В. О., Якобчук О. Є. Зміна структури і складу поверхневих шарів контактних поверхонь. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2002. № 4 (15). С. 63–66. URL: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.15.15277>.

27. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Мікосянчик О. О. Дія олив на поверхні тертя при додаванні багатофункціональних присадок. *Автошляховик України: Окремий випуск. Вісник Північного наукового центру ТАУ*. 2003. № 6. С. 10–14.

28. Пластичні мастила: властивості та якість : підручник / С. В. Бойченко та ін. ; ред. С. В. Бойченко. Київ : Центр учб. літ., 2021. 274 с.

29. Nycogrease - nycogrease. NYCO. URL: <https://www.nycogrease.com/products/nycogrease-4/>.
30. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Хімко А. М., Харченко О. В. Огляд класифікацій за фізико-механічними та експлуатаційними властивостями мастил закордонного виробництва. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 3 (88). С. 52–70. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(88\).14920](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(88).14920)
31. The AeroShell Book : Eighteenth Edition. York Road, London : Shell Aviation Limited, OIAM/L Shell Centre, 2012. 373 p.
32. Мнацаканов Р. Г., Довбуш В. О., Якобчук О. Є. Первісне порівняння ресурсів роботи зубчастої передачі на маслі та пластичному мастилі. *ABIA-2001: матеріали III Міжнар. науково-техн. конф., м. Київ, 24–26 квіт. 2001 р. Київ, 2001. С. 12.*
33. Методичні рекомендації по хімотології № 58 / К. І. Баранський та ін. ; ред. В. П. Пивовар. Київ, 2009. 35 с.
34. Якобчук О. Є., Бородій В. М., Хімко А. М. Сучасні методики досліджень характеристик мастильних матеріалів для важко навантажених пар тертя. *Державна політика розвитку цивільної авіації XXI століття: Економічний патріотизм і стратегічні можливості України* : матеріали науково-практ. конф., м. Київ, 7–8 лют. 2008 р. Київ, 2008. С. 32.
35. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Токарук В. В. Прогнозування лінійного зносу контактних поверхонь в екстремальних умовах тертя. *Проблеми тертя та зношування*. 2018. № 4 (81). С. 4–12. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(81\).13321](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(81).13321)
36. Якобчук О. Є., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Хімко А. М., Токарук В. В. Протизадирні властивості мастила AeroShell Grease 33 при використанні конструкційних сталей 9ХС і 30ХГСА. *Проблеми тертя та зношування*. 2018. № 1 (78). С. 27–36. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(78\).12756](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(78).12756).
37. Mikosyanchyk, O.O., Mnatsakanov, R.H., Lopata, L.A. et al. Wear Resistance of 30KhGSA Steel Under the Conditions of Rolling with Sliding. *Mater Sci* 55, 402–408 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00317-9>.

38. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Хімко А. М. Оцінка параметрів мастильного матеріалу в умовах масляного голодування трибоконтакту. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 2 (87), С. 21–28. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(87\).14721](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(87).14721).

39. Якобчук О. Є. Аналіз можливості заміни мастила ВНІНП-286М на AeroShell Grease 33 у вузлах механізації крила у літаках сімейства АН. *Проблеми тертя та зношування*. 2019. № 2 (83), С. 29-36. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(83\).13689](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(83).13689).

40. Якобчук О. Є., Хімко А. М., Бородій В. М., Краля В. О. Вплив режимів тертя на зносостійкість деталей в умовах тертя–ковзанням. *Сучасні проблеми машинознавства: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 22–23 верес. 2008 р., Київ, 2008. С. 32.*

41. The AeroShell Book. 20th ed. London : Shell International Petroleum Co. Ltd., 2021. 370 p. URL: <https://www.shell.com/aviation>.

42. Mobilgrease 33 High-Performance Aircraft Lubricant. <https://shop.boeing.com/>. URL: <https://shop.boeing.com/aviation-supply/p/MOBIL33-35-2LB=3Z> (дата звернення: 11.01.2024).

43. Mobilgrease™ 33. *Welcome to Mobil™*. URL: <https://www.mobil.com/en-ba/aviation/pds/gl-xx-mobilgrease-33> (дата звернення: 11.01.2024)..

44. Mobilgrease 33. *Exxon mobil. aviation lubricates* : Technical Data Sheet. P. 5. URL: <https://aviooil.com/wp-content/uploads/2015/01/Mobilgrease-33-TDS.pdf>..

45. Grease compatibility and conversion guidance: Tech Topic. ExxonMobil, 2017. 3 p. URL: <https://www.exxonmobil.com/en/aviation>.

46. Anderol specialty lubricants technical data sheets. *Online Materials Information Resource* - *MatWeb*. URL: <https://www.matweb.com/search/GetMatsByManufacturer.aspx?manID=1051>.

47. NLGI grease service classification. *Lubricants designed specifically for agriculture, fleet & heavy-duty equipment | Farm-Oyl*. URL: <https://www.farmoyl.com/resources/nlgi-grease-service-classification>.

48. The AeroShell Book : Eighteenth Edition. York Road, London : Shell Aviation

Limited, OIAM/L Shell Centre, 2012. 373 p.

49. Мастило ЦИАТИМ-201 Агрінол. "ТОВ "ТЕХНО-СІНТЕЗ ОЙЛ"". URL: <https://sintez-oil.com.ua/ua/p250494578-smazka-tsiatim-201.html>.

50. DIN 51502: 1990. Lubricants and related materials; designation of lubricants and marking the containers for lubricants, lubrication equipment and lubrication points. Official edition.

51. Мастило НК-50 - МАСПРОМ производитель олив и смазок в Украине. МАСПРОМ. URL: <https://masprom.com.ua/uk/p/59552216-smazka-nk-50/>.

52. Мастило авіаційна СЕДА - МАСПРОМ производитель олив и смазок в Украине. МАСПРОМ. URL: <https://masprom.com.ua/uk/p/59552328-smazka-aviacionnaya-seda/> (дата звернення: 02.09.2020).

53. Мастило ВНИИМП-261 Сапфір - МАСПРОМ производитель олив и смазок в Украине. МАСПРОМ. URL: <https://masprom.com.ua/uk/p/59552076-smazka-vniinp-261-sapfir/> (дата звернення: 02.09.2020).

54. ТУ 38.101950-00. Мастило Ера (ВНІІМП-286М). Технічні умови. Вид. офіц.

55. Мнацаканов Р. Г., Довбуш В. О., Якобчук О. Є., Микосянчик О. О. Мастильна дія пластичних і напіврідких мастил. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2003. № 3-4 (18). С. 73–76. URL: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.18.15390>.

56. Mnatsakanov R. G., Yakobchuk O. Y., Khimko A. M. Analysis of the changes in the load-bearing capacity of lubricating layers of lithium greases at contact load changing. *The Eighth World Congress "AVIATION IN THE XXI-st CENTURY": Safety in Aviation And Space Technologies : proceedings*, Kyiv, 10–12 October 2018. Kyiv, 2018. P. 1.4.9–1.4.12.

57. Механізація крила літака: опис, принцип роботи та пристрій. *Центральний Інформаційний Вісник*. URL: <https://government.com.ua/nashi-hroshi/mekhanizatsiya-krila-litaka-opis-printsip-roboti-ta-pristrii.html>.

58. Yakobchuk O. Y., Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Khimko A. M. Analysis of the Use of Lubricants in the Nodes of High Lift Devices in Antonov Family Aircrafts. *ABIA-2019*, proceedings of the Fourteenth International Conference of Science

and Technology, Київ, Україна, 23 квітня 2019–25 квітня 2019; НАУ: Київ, 2019; С. 19.25–19.29.

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2019/schedConf/presentations>

59. Хімко А. М., Якобчук О. Є., Бородій В. М., Задніпровська С. М., Холод Н. В. Особливості зношування вузлів механізації крила літаків, що працюють в умовах динамічних навантажень. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2009. № 3 (40). С. 33–36. URL: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.40.1741>.

60. Дзудзило А. Механізація крила та хвостового оперення літака • Дзудзило. *Дзудзило*. URL: <https://dzudzylo.com/aviatsiya/mehanizatsiya-kryla-ta-hvostovogo-operennya-litaka.html>.

61. Khimko A., Kralya V., Yakobchuk A., Kostuchik V., Sidorenko A. Units wearability of aircraft wing lift devices. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2011. Вип. 55. С. 112–117. URL: <https://doi.org/10.18372/0370-2197.55.3249>.

62. Раздел 27. Система управления самолетом. *Руководство по технической эксплуатации самолета Ан-148-100А, Ан-148-100В, Ан-148-100Е*. Киев, 2006. С. 357.

63. Amarnath M., Sujatha C. Surface Contact Fatigue Failure Assessment in Spur Gears Using Lubricant Film Thickness and Vibration Signal Analysis. *Tribology Transactions*. 2015. Vol. 58, no. 2. P. 327–336. URL: <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.971993>.

64. Krantz T, Anderson C, Shareef I, Fetty J. Testing aerospace gears for bending fatigue, pitting, and scuffing. In *Proceedings of the ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Cleveland, Ohio, USA, 2017, Damage to gears. <https://khkgears.net/new/>. URL: https://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear_technical_reference/damage_to_gears.html.

65. Bearing steel microstructures after aircraft gas turbine engine service / J. R. Nygaard et al. *Materials Science and Technology*. 2014. Vol. 30, no. 15. P. 1911–1918. URL: <https://doi.org/10.1179/1743284714y.0000000548>.

66. Comparing Data Sources for Condition Monitoring Suitability / M. Fromberger et al. *Forschung im Ingenieurwesen*. 2019. Vol. 83, no. 3. P. 521–527.

URL: <https://doi.org/10.1007/s10010-019-00331-y>.

67. Surface texture measurements of gear surfaces using stylus instruments: Good Practice Guide No. 147 / W. Sun et al. Middlesex: NPL Management Limited, 2017. 42 p.

68. PD ISO/TR 15144-1:2014 Calculation of micropitting load capacity of cylindrical spur and helical gears Part 1: Introduction and basic principles, International Standards Organisation.

69. BS ISO/TR 13989-1:2000 Calculation of scuffing load capacity of cylindrical, bevel and hypoid gears – Part 1: Flash temperature method, 2000 International Organization for Standardization.

70. BS ISO/TR 13989-2:2000 Calculation of scuffing load capacity of cylindrical, bevel and hypoid gears – Part 2: Integral temperature method, 2000 International Organization for Standardization.

71. Харченко О. В., Пащенко С. В. Концептуальні засади подальшого розвитку авіації збройних сил України. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2020. Т. 16, № 23. С. 6–11.
URL: https://dndia.org.ua/doc/znp/ZNP_DNDIA_2020.pdf.

72. Дерев'янюк І. Г. Конструкція і експлуатація вертольота Мі-2: навч. посіб. Кременчук: КЛК НАУ, 2019. 91 с.

73. Skiba K. Designing and FEM simulation of the helicopter rotor and hub. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2019. Т. 710. С. 012003.
URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/710/1/012003>.

74. Kowaleczko G., Piatkowski L. Estimation of Extreme Loads of the Mi-24 Helicopter During Maneuvers Using Simulation Method. Preprints, 2022. 12 p. (Preprint. 2022010128).

75. Вертодроми: монографія / Першаков В.М., Белятинський А. О., Близнюк Т.В., Семироз Н.Г. Київ: Вид-во НАУ, 2014. 370 с.

76. Spalling damage – about tribology. *Tribology - About Tribology*.
URL: <https://www.tribonet.org/wiki/spalling-damage/>.

77. Lyu Y., Bergseth E., Olofsson U. Open system tribology and influence of weather condition. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/srep32455>.

78. Timken bearing damage analysis with lubrication reference guide. The Timken Company, 2023. 23 p.

79. Yao T., Zhang N., Zhang M., She X., Liao X., Shen Y., Gan Z. Effect of iron and copper on the thermal oxidation stability of synthetic hydrocarbon aviation lubricating oil. *Catalysis Communications*. 2021. T. 161. C. 106363. URL: <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2021.106363>.

80. Raof N. A., Yunus R., Rashid U., Azis N., Yaakub Z. Effect of molecular structure on oxidative degradation of ester based transformer oil. *Tribology International*. 2019. T. 140. C. 105852. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105852>.

81. Железний Л. В., Бутовець В. В. Кінетика окиснення комплексних літійових мастил на синтетичних оливах. *Каталіз и нефтехимия*. 2007. Т. 15. С. 122–126. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/3623>.

82. Çamur H., Al-Ani A. M. R. Prediction of Oxidation Stability of Biodiesel Derived from Waste and Refined Vegetable Oils by Statistical Approaches. *Energies*. 2022. Т. 2, № 15. С. 407. URL: <https://doi.org/10.3390/en15020407> (дата звернення: 07.01.2024).

83. Gloeckner P., Rodway C. The Evolution of Reliability and Efficiency of Aerospace Bearing Systems. *Engineering*. 2017. Т. 09, № 11. С. 962–991. URL: <https://doi.org/10.4236/eng.2017.911058>.

84. Якобчук О. Є., Хімко А. М., Бородій В. М., Краля В. О. Вплив режимів тертя на зносостійкість деталей в умовах тертя–ковзання. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2008. Вип. 50. С. 144-148. URL: <https://doi.org/10.18372/0370-2197.50.2998>.

85. Бородій В. М., Кудрін А. П., Якобчук О. Є., Хімко М. С. Вплив тиску на формування профілю і товщини мастильної плівки у локальному контакті кочення в умовах еластогідродинамічного мащення. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. № 3 (72). С. 45–51.

86. Albagachiev A. Y., Buyanovskii I. A., Dunaev A. V., Gvozdev A. A., Samusenko V. D. Serpentes as Additives to Oils: Efficiency and Mechanism of Lubrication / A. Y. Albagachiev et al. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021. Vol. 50, no. 5. P. 459–468. URL: <https://doi.org/10.3103/s1052618821050034>.

87. Maeno N., Arakawa M. Adhesion Shear Theory of Ice Friction at Low Sliding Velocities, Combined With Ice Sintering. *Journal of Applied Physics*. 2004. T. 95, № 1. C. 134–139. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1633654>.
88. Korneev S. V., Dudkin V. M., Kolunin A. V. Water contamination and colloidal stability of motor oils. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2006. Vol. 42, no. 4. P. 273–275. URL: <https://doi.org/10.1007/s10553-006-0071-6>.
89. Kokieva G., Spiridonova A., Anosova A., Belomestnykh V., Pekhutov A. Research of problems of technical operation of agricultural machines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 937, no. 3. P. 032053. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032053>.
90. Likhanov V. A., Devetyarov R. R., Kopchikov V. N. Formation of Nitrogen Oxides in Diesel Engine Operating on Methanol and Rapeseed Methyl Ester. *Traktory i sel hozmashiny*. 2015. Vol. 82, no. 5. P. 3–5.
91. Liang Y., Wang W., Zhang Z., Xing H., Wang C., Zhang Z., Guan T., Gao D. Effect of Material Selection and Surface Texture on Tribological Properties of Key Friction Pairs in Water Hydraulic Axial Piston Pumps. *Lubricants*. 2023. T. 11, № 8. C. 324. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants11080324>.
92. Лазаренко Є. К. Основи генетичної мінералогії. Львів : Львів. ун-ту, 1963. 410 с.
93. Malkin T. L., Murray B. J., Brukhno A. V., Salzmann C. G. Structure of Ice Crystallized From Supercooled Water / T. L. Malkin та ін. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. T. 109, № 4. C. 1041–1045. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1113059109>.
94. Strobel T. A., Somayazulu M., Sinogeikin S. V., Dera, P., Hemley R. J. Hydrogen-Stuffed, Quartz-like Water Ice. *Journal of the American Chemical Society*. 2016. Vol. 138, no. 42. P. 13786–13789. URL: <https://doi.org/10.1021/jacs.6b06986>.
95. Evans D. C. B., Nye J. F., Cheeseman K. J. The Kinetic Friction of Ice. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. 1976. T. 347, № 1651. C. 493–512. URL: <https://doi.org/10.1098/rspa.1976.0013>.
96. Montagnat M., Schulson E. M. On friction and surface cracking during sliding of

ice on ice. *Journal of Glaciology*. 2003. Vol. 49, no. 166. P. 391–396. URL: <https://doi.org/10.3189/172756503781830647>.

97. Higgins D. D., Marmo B. A., Jeffree C. E., Koutsos V., Blackford J. R. Morphology of ice wear from rubber-ice friction tests and its dependence on temperature and sliding velocity. *Wear*. 2008. T. 265, № 5-6. C. 634–644. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.12.015>.

98. Marmo B. A., Blackford J. R., Jeffree C. E. Ice friction, wear features and their dependence on sliding velocity and temperature. *Journal of Glaciology*. 2005. T. 51, № 174. C. 391–398. URL: <https://doi.org/10.3189/172756505781829304>.

99. Classification of lubricants [SubsTech]. *main_page [SubsTech]*. URL: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=classification_of_lubricants.

100. Kunselman M., Starks Y. NLGI New Grease Specification Update. *NLGI – Serving the grease industry since 1933*. URL: <https://www.nlgi.org/wp-content/uploads/2020/01/Press-Release-October-2019.pdf>.

101. NLGI Lubricant Consistency Grades. *SUNOCO – original US lubricants brand*. URL: <https://sunocoukraine.com/en/info-data/nlgi-klasy-konsystentsii-masty/>.

102. D4950–19. Standard Classification and Specification for Automotive Service Greases. Replaces D4950–14. Official edition. 3 p. URL: <https://doi.org/10.1520/D4950-19>.

103. DIN 51818. Lubricants; Consistency Classification of Lubricating Greases; Nlgi Grades. Effective from 2024-01-18. Official edition. German Institute for Standardisation, 1981.

104. Grease Info. *Boucher and Jones Fuels Inc. - Wholesale Marketer for Petro-Canada*. URL: <https://www.boucherandjones.com/grease.htm>.

105. DIN - German Institute for Standardization. *din-en*. URL: <https://www.din.de/en>.

106. DIN 51825. Lubricants - Lubricating Greases K - Classification and Requirements. Effective from 2004-06-07. Official edition. German Institute for Standardisation, 2004. 7 p.

107. DIN 51826. Lubricants - Lubricating Greases G - Classification and

Requirements. Effective from 2015-04-01. Official edition. German Institute for Standardisation, 2015. 7 p. URL: <https://doi.org/10.31030/2304584>.

108. DIN 51807-1:2020-03. Test of the Behaviour of Lubricating Greases in the Presence of Water - Part 1: Static Test. Replaces DIN 51807-1:2018-05 ; effective from 2020-03-01. Official edition. German Institute for Standardisation, 2020. 8 p.

109. Безпека є основною вимогою при проектуванні літаків «АН» Безпека авіації. ДП «Антонов». URL: <https://www.antonov.com/safety> (дата звернення: 07.01.2024).

110. Про затвердження Інструкції з контролю якості пально-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у державній авіації України: Наказ М-ва оборони України від 08.12.2016 р. № 662. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0060-17#Text> (дата звернення: 07.01.2024).

111. Мнацаканов Р. Г. Триботехнические характеристики смазочных материалов в неустановившихся условиях работы: монографія. Киев: Киевс. университет инженеров гражданской авиации, 1997. 347 с.

112. Гусев Ю. В. Як оборонна промисловість може стати драйвером післявоєнної економіки України. *Економічна правда*. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2022/08/30/690957/> (дата звернення: 07.01.2024).

113. AeroShell Grease 33. <https://www.vaibavsri.com/>. URL: <http://vaibavsri.in/pdfdocs/1449239358.pdf>.

114. MIL-PRF-23827, Revision C. Grease, Aircraft and Instrument, Gear and Actuator Screw. Effective from 1998-08-28. Official edition. AMENDMENT 2. 2006. 10 p.

115. BMS 3-33. *Welcome to QC Lubricants*. URL: <https://qclubricants.com/mcdonnell-douglas/bms333.htm> (дата звернення: 08.09.2020).

116. AeroShell Aviation Grease | Aircraft Grease | Shell Global. *Shell Global*. URL: <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aeroshell/aeroshell-greases.html> (date of access: 08.09.2020).

117. AeroShell Grease 33 : Technical data sheet. 2019. P. 2. URL: <https://www.shell->

livedocs.com/data/published/en-GB/358a0adb-8c84-4744-9548-61e84316fcc5.pdf.

118. D6184. Standard Test Method for Oil Separation From Lubricating Grease. Official edition. ASTM, 1998. 3 p. URL: https://www.kelid1.ir/FilesUp/ASTM_STANDARS_971222/D6184.PDF.

119. D2596. Standard Test Method for Measurement of Extreme-Pressure Properties of Lubricating Grease (Four-Ball Method). Replaces D2596±96 ; effective from 2002-01-01. Official edition. ASTM, 1997. URL: <http://www.shxf17.com/pdf/ASTMD2596-97.pdf>.

120. Tribological Testing by 4 Ball Methods. *Nye Lubricants, A Member of the FUCHS Group*. URL: <https://www.nyelubricants.com/tribological-testing-by-4-ball-methods>.

121. Маслосмесь авіаційна СМ-9 - МАСПРОМ виробитель олив и смазок в Україні. *МАСПРОМ*. URL: <https://masprom.com.ua/uk/p/59551820-maslosmes-sm-9/>.

122. Yoshida S. Scale-independent approach to deformation and fracture of solid-state materials. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2011. Vol. 46, no. 5. P. 380–388. URL: <https://doi.org/10.1177/0309324711404788>.

123. Kovalsky B. I., Shram V. G., Petrov O. N., Vereshchagin V. I., Sokolnikov A.N. Thermal-oxidative stability control of motor oils by thermal energy with cyclic temperature change. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1515. P. 052019. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/5/052019>.

124. Mikosianchyk O. A., Mnatsakanov R. G., Khimko A. N., Kichata N. N., Yakobchuk A. E. Theoretical Aspects of the Structural and Rheological State of Boundary Lubricating Layers in Friction Pairs. *Problems of Tribology*. 2018. № 3(89). P. 47–52. URL: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2018-89-3-47-52>.

125. Мнацаканов Р. Г. Влияние неустановившихся условий работы на смазочную способность олив и смазок при качении и качении со скольжением: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. Киев, 1986. 256 с.

126. Мікосянчик О. О. Оцінка триботехнічних параметрів мастильних матеріалів при граничному мащенні в умовах локального контакту : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.04. Київ, 2006. 231 с.

127. Мікосянчик О. О. Структурно-енергетичні та реологічні показники

мастильного шару в контактi тертя в умовах несталих режимiв роботи : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.04. Київ, 2017. 416 с. URL: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/27289>.

128. Пристрiй для оцiнки триботехнiчних характеристик трибоелементiв : пат. 88748 Україна : G01N3/56. № u201313450 ; заявл. 19.11.2013 ; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6. 5 с. URL: <https://ipro-pua.com/inv/pdf/0444ji5q-pub-description.pdf>.

129. Райко М. В. Исследование смазочного действия нефтяных олиф в условиях работы зубчатых передач: дис. ... докт. техн. наук 05.02.04. Київ, 1974. 369 с.

130. Mikosianchuk O., Yakobchuk O., Mnatsakanov R., Khimko A. Evaluation of Operational Properties of Aviation Oils by Tribological Parameters. *Problems of Tribology*. 2021. 26 (1/99). С. 43–50. URL: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-99-1-43-50>.

131. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є. Особливості мастильного процесу в умовах перемінних контактних напруг, підвищених кутових швидкостей і зміцнення контактних поверхонь. *Вісник Національного транспортного університету*. 2003. № 8. С. 20–24.

132. Микротвердомер ПМТ – 3: Інструкція по використанню. 17 с.

133. Cantley R. E. The Effect of Water in Lubricating Oil on Bearing Fatigue Life. *ASLE Transactions*. 1977. Vol. 20, no. 3. P. 244–248. URL: <https://doi.org/10.1080/05698197708982838>.

134. Марчук Р. М., Мнацаканов Р. Г. Трибометрична машина для дослідження трибологічних характеристик полімерів. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 2(99). С. 32–38. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(99\).17624](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(99).17624).

135. Kragelsky I. V., Alisin V. V. Friction Wear Lubrication: Tribology Handbook. Elsevier Science & Technology Books, 1981.

136. Якобчук О. Є., Юцкевич С. С., Кисельова Т. В., Якобчук І. О., Сидоренко К. О. Статистичний аналіз результатів дослідження триботехнічних характеристик мастильних матеріалів при терті. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 4 (101). С. 84–96. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(101\).18082](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(101).18082).

137. Multiple Variable Analysis : Revised: 8.11.2020. Statgraphics Technologies, Inc, 2017. 20 p.

138. Coefficient of Determination (R Squared): Definition, Calculation. *Statistics*

How To. URL: <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/coefficient-of-determination-r-squared/>.

139. Frost J. How to Interpret P-values and Coefficients in Regression Analysis. *Statistics By Jim*. URL: <https://statisticsbyjim.com/regression/interpret-coefficients-p-values-regression/>.

140. Визначення P-value, значимість, формула, таблиця, визначення P-value. *Microbiology Note – Online Biology Notes*. URL: <https://microbiologynote.com/uk/p-value-definition-significance-formula-table-finding-p-value/>.

141. Data Science Linear Regression P-Value. *W3Schools Online Web Tutorials*. URL: https://www.w3schools.com/datascience/ds_linear_regression_pvalue.asp.

142. Sullivan L. Hypothesis Testing - Analysis of Variance (ANOVA). URL: https://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/mph-modules/bs/bs704_hypothesistesting-anova/bs704_hypothesistesting-anova_print.html.

143. Lee E. Mode choice. *Geographic Information Systems for Intermodal Transportation*. 2023. P. 287–308. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90129-1.00010-9>.

144. Fox J. J. *Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models*. SAGE Publications, Incorporated, 2015. 816 p.

145. Pearce J. Regression, Linear and Nonlinear. *International Encyclopedia of Human Geography*. 2009. P. 302–308. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-008044910-4.00507-1>.

146. ANOVA table - PrepNuggets. *PrepNuggets*. URL: <https://prepuggets.com/glossary/anova-table/>.

147. *Multiple Regression: Revised*: 8.11.2020. Statgraphics Technologies, Inc, 2019. 32 p.

148. Ochkov V. F. Formula in Scientific and Technical Publications: Problems and Solutions. *Cloud of Science*. 2014. T. 1. № 3. P.421-456.

149. Porokhov V. S. Tribological methods for testing oils and additives. *Mashinostroenie*, 1983. 183 p.

150. Gromakovsky D. G., Sorokin A. N., Ibatullin I. D. Properties of a Modern Additive for Motors and Transmission Fluid. *2-nd International conference on synthetic lubricants and functional fluids*, AIM-Centro Italiano di tribologia Milano. 1995. P. 145–146.

151. Gromakovsky D. G., Kovshov A. G., Ibatullin I. D., Dynnikov A. V. Problems of Kinetics of Surface Destruction / *Proceedings of VII-th International Symposium “INTERTRIBO 2002”*, Stara Lesna. 2002. P. 57–58.

152. Asaduzzaman Chowdhury M., Helali M. The frictional behavior of materials under vertical vibration. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2009. Vol. 61, no. 3. P. 154–160. URL: <https://doi.org/10.1108/00368790910953677>.

153. Asaduzzaman Chowdhury M. The effect of natural frequency of the experimental set-up on the wear rate. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2010. Vol. 62, no. 6. P. 356–360. URL: <https://doi.org/10.1108/00368791011076254>.

154. Bogdanovich P. N., Bogdanovich S. P., Krivenkov A. A. Friction and wear in machines: workshop for students of technical specialities. Gomel: BelGUT, 2014. 134 p.

155. Поверхностная прочность материалов при трении / ред. Б. И. Костецкий. Киев : Техника, 1976. 291 с.

156. Cloud Object Storage - Amazon S3 - AWS. URL: https://s3.us-east-2.amazonaws.com/keller-heartt-assets/Data+Sheets/aeroshell%2033%20TDS_ASG_33MS%20.pdf.

157. Dmitrichenko N. F., Mnatsakanov R. G., Mikosyanchik O. A., Kushch A. I. Wear kinetics of contact surfaces with use of C60 fullerene additive to motor oil. *Journal of Friction and Wear*. 2009. Vol. 30, no. 6. P. 399–403. URL: <https://doi.org/10.3103/s106836660906004x>.

158. Al-Samieh M. F., Rahnejat H. Physics of lubricated impact of a sphere on a plate in a narrow continuum to gaps of molecular dimensions. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2002. Vol. 35, no. 18. P. 2311–2326. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/35/18/313>.

159. Johns-Rahnejat P. M., Rahmani R., Rahnejat H. Current and Future Trends in Tribological Research. *Lubricants*. 2023. Vol. 11, no. 9. P. 391.

URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants11090391>.

160. Ziegltrum A., Lohner T., Stahl K. TEHL Simulation on the Influence of Lubricants on the Frictional Losses of DLC Coated Gears. *Lubricants*. 2018. Vol. 6, no. 1. P. 17. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants6010017>.

161. Nagîț G, Mihalache AM, Dodun O, Hrițuc A, Slătineanu L, Merticaru V. Change in Time of the Value of Dry and Lubricated Friction Coefficients for Surfaces Generated by Different Processing Methods. *Lubricants*. 2023. Vol. 11, no. 10. P. 436. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants11100436>.

162. Yakobchuk O. Y., Mikosianchyk O. O., Mnatsakanov R. G. Investigation of the Phenomenon of Lubrication Starvation in Conditions of Rolling With Sliding. *ABIA-2023: матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, Київ, 18–21 квіт. 2023. Київ, 2023. С. 1.66–1.69. URL: <https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2023/schedConf/presentations>.*

163. Мікосянчик О. О. Кінетика зміни мікротвердості поверхневих шарів металу при адаптації граничних адсорбційних шарів мастильного матеріалу в зоні контакту. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2013. Т. 2. С. 56–61.

164. Laber S., Laber A. Modifying Operating Conditions of the Friction Pair with an Additive Added to the Lubricant while Operating. *Solid State Phenomena*. 2015. Vol. 220-221. P. 230–238. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.220-221.230>.

165. Zhu Y., Olofsson U., Chen H. Friction Between Wheel and Rail: A Pin-On-Disc Study of Environmental Conditions and Iron Oxides. *Tribology Letters*. 2013. Vol. 52, no. 2. P. 327–339. URL: <https://doi.org/10.1007/s11249-013-0220-0>.

166. Zhu Y., Olofsson U., Persson K. Investigation of Factors Influencing Wheel–rail Adhesion Using a Mini-Traction Machine. *Wear*. 2012. T. 292-293. С. 218–231. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.006>.

167. Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. H., Lopata L. A., Marchuk V. E., Yakobchuk O. E. Wear resistance of 30KhGSA steel under the conditions of rolling with sliding. *Materials science*. 2019. Vol. 55. No. 3. P. 402–408. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-019-00317-9>.

168. Mikocyanchyk O., Mnatsakanov R., Zaporozhets A., Kostynik R. Influence of

the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Т. 1, № 82. С. 24. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75857>.

169. Ляшенко Я. А. Фазовый переход первого рода между жидкоподобной и твердоподобной структурами граничной смазки. *Журнал технической физики*. 2012. Т. 1, № 82. С. 19–28.

170. Kragel'skii I.V., Vinogradova I.E. Friction coefficients, 1962. 220 p.

171. Мікосянчик О. О. Влияние переменного градиента скорости сдвига на реологические и противоизносные свойства контакта в режиме пуск – остановка. *Вісник КрНУ ім. М. Остроградського*. 2016. Т. 3, № 98. С. 44–55.

172. Kostetsky V. I. The structural-energetic concept in the theory of friction and wear (synergism and self-organization). *Wear*. 1992. Vol. 159, no. 1. P. 1–15. URL: [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90280-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90280-1).

173. Мікосянчик О. О., Кудрін А. П., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Токарук В. В. Оцінка теплових процесів у фрикційному контакті при коченні з проковзуванням. *Проблеми тертя та зношування*. 2017. № 4 (77). С. 4–15.

174. Blok H. “Seizure-Delay” Method for Determining the Seizure Protection of EP Lubricants. *Pre-1964 SAE Technical Papers*. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1939. URL: <https://doi.org/10.4271/390146>.

175. 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*. 2021. Vol. 50. No. 3. P. 229–235. URL: <https://doi.org/10.3103/S1052618821030110>.

176. Ляшенко Я. А., Хоменко А. В., Метлов Л. С. Феноменологическая теория плавления тонкой пленки смазки между двумя атомарно-гладкими твердыми поверхностями. *Журнал технической физики*. 2010. Т. 8, № 80. С. 120–126.

177. Tribological Test Methods. *Lubricants*. Chichester, UK, 2014. P. 113–132. URL: <https://doi.org/10.1002/9781118799734.ch6>.

178. Singh Y., Singh P., Sharma A., Choudhary P., Singla A., Singh N. Optimization of wear and friction characteristics of Phyllanthus Emblica seed oil based lubricant using

response surface methodology. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018. Vol. 27, no. 4. P. 1145–1155. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.04.001>.

179. Про затвердження Інструкції з організації контролю якості стиснутих та зріджених газів у державній авіації України: Наказ М-ва оборони України від 22.01.2014 р. № 47. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0234-14#Text>.

180. Піна, Т., Mikosianchuk, O., Mnatsakanov, R. and Yakobchuk O. 2021. Development of methods for evaluation of lubrication properties of hydraulic aviation oils. *Problems of Tribology*. 2021. №3(101). P. 42–47. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-101-3-42-47>

181. Ságová, Z.; Tarasov, V.V.; Klácková, I.; Korshunov, A.I.; Sága, M. Study of Anisotropic Friction in Gears of Mechatronic Systems. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 21. P. 11021. URL: <https://doi.org/10.3390/app122111021>.

182. Ludwig M., Müller C., Groche P. Simulation of Dynamic Lubricant Effects in Sheet Metal Forming Processes. *Key Engineering Materials*. 2010. Vol. 438. P. 171–178. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.438.171>.

183. Якобчук О. Є., Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко А.М. Методика оцінки триботехнічних властивостей авіаційної оливи ВО-12. *AVIA-2021: матеріали XV науково-практ. конф., м. Київ, 20–22 квіт. 2021 р. Київ, 21. С. 1.1–1.5.* <https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2021/paper/view/8024/694>.

184. Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Мнацаканов Р. Г., Хімко А.М. Оцінка якості авіаційної оливи. *Theory, practice and science: abstracts of XXIII International Scientific and Practical Conference, Tokyo, 27–30 April 2021. Tokyo, 2021. P. 438–442.* URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2021.I.XXIII>.

185. Ding J., Li W., Z. Shen S. Research and Applications of Shear Thickening Fluids. *Recent Patents on Materials Science*. 2011. Vol. 4, no. 1. P. 43–49. URL: <https://doi.org/10.2174/1874464811104010043>.

186. Запорожець В.В., Закієв І.М., Білякович О.М., Захарченко А.В. Методика та приладне забезпечення для оцінки мікро механічних властивостей тонких поверхневих шарів. *Надтверді інструментальні матеріали на рубежі тисячоліть: отримання, властивості, застосування: Матеріали міжнар. науково-техн. конф.,*

м. Київ, 4–6 лип. 2001 р. Київ, 2001. С. 262–263.

187. Zaporozhets V. V. Dynamic characteristics of the strength of surface layers and their evaluation. *Friction and wear*. 1980. Vol. 1, no. 4. P. 602–609.

188. Кубич В. И., Ивченко Л. И. Трибоспектральный анализ поверхностных слоев медьсодержащего покрытия на чугунной подложке. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. 2012. Ч.2, № 25. С. 318–322.

189. Burmak A. P., Vasylyev M. O., Zakiev V. I., Voron M. M., Voloshko S. M. Modification of Surface Layers of Stainless Steel AISI 420 by a Combination of Thermal and Ultrasonic Impact Influence. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2022, vol. 44, No. 6, P. 751–769 <https://doi.org/10.15407/mfint.44.06.0751>.

190. Takaki S. Limit of Dislocation Density and Ultra-Grain-Refining on Severe Deformation in Iron. *Materials Science Forum*. 2003. Vol. 426-432. P. 215–222. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.426-432.215>.

191. Milman Y. V. Structure and Mechanical Properties of Materials in the Temperature Ranges of Cold, Warm and Hot Deformation. *Materials Science Forum*. 2003. Vol. 426-432. P. 4399–4404. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.426-432.4399>.

192. Циганов В. В. Науково-методологічні засади формування зносостійких поверхонь деталей при багатоконтактній термоконтатній дії : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.04. Київ, 2017. 41 с.

193. Yao T., Zhang N., Zhang M., She X. et. al. Effect of iron and copper on the thermal oxidation stability of synthetic hydrocarbon aviation lubricating oil. *Catalysis Communications*. 2021. Vol. 161. P. 106363. URL: <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2021.106363>.

194. Smook L. A., Sathwik Chatra K. R., Lugt P. M. Evaluating the oxidation properties of lubricants via non-isothermal thermogravimetric analysis: Estimating induction times and oxidation stability. *Tribology International*. 2022. Vol. 171. P. 107569. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107569>.

195. Дерев'янюк І. Г. Конструкція і експлуатація вертольоту Мі-8МТВ-1: конспект лекцій. Кременчук: КЛК НАУ, 2010. 90 с.
196. Перелік даних до Додаткового сертифіката типу № ДТВ-0009. 2013. *Державна авіаційна служба України*. URL: <https://avia.gov.ua/wp-content/uploads/2019/02/DTV-0009.pdf> (дата звернення: 23.05.2023).
197. Костюнік Р.Є., Стельмах О.У., Радзієвський В.А., Ковальчук О.Г., Бондар В.С. Методи і прилади для експериментального вивчення динамічних процесів граничних шарів безконтактних трибосистем ковзання. *Міжвузівський збірник "Наукові нотатки"*. 2021. № 71. С. 234–241. URL: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.33>.
198. Диха О. В. Розрахунково-експериментальні методи керування процесами граничного змащування технічних трибосистем: монографія. Хмельницький: ХНУ, 2018. 197 с.
199. Nemyrovskiy Ya.B., Shepelenko I.V., Posviatenko E.K., Chernovol M.I., Zlatopolskiy F.Y. Creation of progressive hole processing processes based on the study of contact phenomena during deforming broaching and finishing antifriction non-abrasive treatment in various technological environments. *Problems of Tribology*. 2022. Vol. 27, no. 1/103. P. 14–25. URL: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-103-1-14-25>.
200. Boiko M. V., Sidashov A. V., Boiko T. G., Burykin I. V. The mechanism of formation of boundary lubricating films during friction in a medium of di(2-ethylhexyl) sebacate. *Tribology International*. 2021. Vol. 165. P. 107222. URL: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107222>.
201. Mansouri M., Khonsari M.M., Holgerson M.H., Aung W. Application of analysis of variance to wet clutch engagement *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2002. Vol. 216, no. 3. P. 117–125. URL: <https://doi.org/10.1243/1350650021543942>.
202. Anandan B., Manikandan M. Machine learning approach with various regression models for predicting the ultimate tensile strength of the Friction stir welded AA 2050-T8 joints by the K-Fold Cross-Validation method. *Materials Today Communications*. 2022. P. 105286. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105286>.

203. Strobl P., Schermer E., Groetsch D., Pointner-Gabriel L., Voelkel K., Pflaum H., Stahl K. Identification and Validation of Linear Friction Models Using ANOVA and Stepwise Regression. *Lubricants*. 2022. Vol. 10, no. 11. P. 286. URL: <https://doi.org/10.3390/lubricants10110286>.

204. Strobl P., Schneider T., Voelkel K., Stahl K. Influence of the Steel Plate on the Friction Behavior of Automotive Wet Disk Clutches. *Kupplungs- und Bremssysteme für mobile und stationäre Anwendungen*. 2023. P. 21–48. URL: <https://doi.org/10.51202/9783181024140-21>.

205. Wu B., Qin D., Hu J., Liu Y. Experimental Data Mining Research on Factors Influencing Friction Coefficient of Wet Clutch. *Journal of Tribology*. 2021. Vol. 143, no. 12. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4050140>.

206. Siebertz K., Bebbler D. v., Hochkirchen T. Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments. Springer Vieweg, 2017. 527 p.

207. Regression analysis–ArcGIS Insights. Documentation. *ArcGIS*. URL: <https://doc.arcgis.com/en/insights/latest/analyze/regression-analysis.htm>.

ДОДАТКИ

А. Перелік літаків "АН", допущених до відпрацювання чергового етапу ресурсу та строку служби станом на 27.11.2023.

Б. Сертифікат якості 30ХГСА 9, 10, 11, 12, 16, 20, 38.

В. Список публікацій за темою дисертації.

Г. Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

ДОДАТОК А

Перелік літаків "АН", допущених до відпрацювання чергового етапу ресурсу та строку служби станом на 27.11.2023.

Перелік літаків "АН", допущених до відпрацювання чергового етапу ресурсу та строку служби станом на 27.11.2023				
List of AN- airplanes permitted for serving out next phase of service life and service time as of 27.11.2023				
Type of Aircraft Тип ПС	Model (Modification) Модель (Модифікація)	MSN Серійний №	Valid until Дійсний до	Decision № Рішення №
АН-2				
АН-2	АН-2 с/х	1Г21742	11.05.2024	002-21-036
АН-2	АН-2 с/х	1Г19303	01.11.2024	002-21-112
АН-2	АН-2-100	1Г17449	30.09.2025	002-22-015
АН-2	АН-2 с/х	1Г23334	01.11.2024	002-21-111
АН-2	АН-2 с/х	1Г18554	23.11.2024	002-21-123
АН-2	АН-2 с/х	1Г22113	03.12.2023	002-20-127
АН-2	АН-2 с/х	1Г20059	15.11.2024	002-21-126
АН-2	АН-2 с/х	1Г20923	25.11.2024	002-21-127
АН-2	АН-2 с/х	1Г22059	16.05.2024	002-20-121
АН-2	АН-2 ТП	1Г9609	16.01.2024	002-22-026
АН-2	АН-2 ТП	1Г23940	11.11.2024	002-21-038
АН-2	АН-2 ТП	1Г21252	25.03.2024	002-20-073
АН-2	АН-2 с/х	1Г17608	21.12.2023	002-20-135
АН-2	АН-2 П	1Г13937	30.04.2024	002-20-112
АН-2	АН-2 с/х	1Г20516	21.12.2023	002-20-136
АН-2	АН-2 с/х	1Г18305	25.10.2024	002-21-105
АН-2	АН-2 ТП	1Г21112	21.03.2026	002-22-054
АН-2	АН-2 с/х	1Г18601	08.11.2024	002-21-114
АН-2	АН-2 ТП	1Г17050	29.04.2024	002-20-111
АН-2	АН-2 с/х	1Г20557	24.11.2024	002-21-125
АН-2	АН-2 Т	1Г23530	25.05.2025	002-21-129
АН-2	АН-2 с/х	1Г18125	16.12.2023	002-22-083
АН-3Т				
АН-3Т	АН-3Т	1Г21432-2108	26.09.2028	003-23-052
АН-3Т	АН-3Т	1Г21431-2109	19.09.2028	003-23-053
АН-12				
АН-12	АН-12А	2340507	23.12.2023	012-22-78
АН-12	АН-12БП	6343705	27.01.2024	012-22-82
АН-12	АН-12Б	6344009	30.11.2023	012-22-072
АН-12	АН-12Б	6344304	31.03.2024	012-23-013
АН-12	АН-12Б	6344610	30.12.2024	012-23-061
АН-12	АН-12Б	7345004	10.05.2024	012-23-018
АН-12	АН-12БК	9346106	30.07.2024	012-23-033
АН-12	АН-12БК	9346810	29.12.2023	012-22-84
АН-12	АН-12БК	00347505	31.01.2024	012-23-2
АН-12	АН-12БК	01348005	29.05.2024	012-23-024
АН-12	АН-12БП	02348207	31.08.2024	012-23-040
АН-24				
АН-24	АН-24Б	97305305	26.04.2025	024-23-022
АН-24	АН-24Б	07306504	28.08.2025	024-23-034
АН-24	АН-24Б	17307303	29.11.2025	024-23-058
АН-24	АН-24РВ	47309910	30.07.2024	024-23-33
АН-24	АН-24РВ	47310509	28.11.2023	024-22-07
АН-26				
АН-26	АН-26	1509	30.03.2024	026-23-014
АН-26	АН-26	2208	30.05.2024	026-23-059
АН-26	АН-26-100	5109	23.03.2025	026-23-016
АН-26	АН-26-100	5806	29.09.2025	026-23-050
АН-26	АН-26-100	5901	24.11.2024	026-23-057
АН-26	АН-26	8205	19.06.2024	026-22-85
АН-26	АН-26	9510	27.04.2025	026-23-054
АН-26	АН-26	9608	29.01.2024	026-22-05
АН-26	АН-26-100	9807	27.05.2025	026-23-029
АН-26	АН-26	9903	24.09.2025	026-23-046

Type of Aircraft Тип ПС	Model (Modification) Модель (Модифікація)	MSN Серійний №	Valid until Дійсний до	Decision № Рішення №
АН-26	АН-26Б	10101	29.02.2024	026-22-11
АН-26	АН-26Б	10508	17.04.2024	026-22-23
АН-26	АН-26Б	10606	26.02.2024	026-22-09
АН-26	АН-26Б-100	11203	09.09.2024	026-23-042
АН-26	АН-26Б	12008	14.10.2024	026-22-59
АН-26	АН-26Б-100	12204	04.05.2025	026-23-023
АН-26	АН-26Б	12205	09.11.2024	026-23-047
АН-26	АН-26Б-100	12402	16.08.2024	026-22-38
АН-26	АН-26Б	12806	26.03.2025	026-23-015
АН-26	АН-26Б-100	12908	26.01.2025	026-23-006
АН-26	АН-26Б	13306	22.02.2024	026-22-56
АН-26	АН-26	13709	24.08.2024	026-22-49
АН-26	АН-26-100	13808	27.09.2024	026-23-045
АН-26	АН-26-100	13809	16.04.2024	026-23-21
АН-26	АН-26Б	13905	28.11.2023	026-21-115
АН-26	АН-26Б-100	14001	29.04.2024	026-22-28
АН-26	АН-26Б-100	14002	06.05.2024	026-22-27
АН-26	АН-26Б	14004	08.11.2024	026-22-64
АН-26	АН-26Б-100	14205	21.02.2025	026-23-009
АН-26	АН-26Б-100	14303	25.11.2024	026-22-69
АН-32				
АН-32	АН-32А	2509	24.02.2025	032-23-035
АН-32	АН-32Б	2806	31.01.2025	032-23-030
АН-32	АН-32П	2901	14.05.2025	032-23-027
АН-32	АН-32Б	3004	24.01.2025	032-23-025
АН-32	АН-32Б	3006	31.07.2024	032-22-67
АН-32	АН-32Б	3007	30.06.2024	032-23-031
АН-32	АН-32Б	3107	30.12.2024	032-22-76
АН-72/74				
АН-74	АН-74ТК-200	365.470.122.1089	12.04.2024	074-131-2020
АН-74	АН-74Д	365.470.98.943	21.08.2024	074-22-47
АН-74	АН-74-200	365.470.96.923	28.08.2024	074-22-62
АН-74	АН-74ТК-100С	365.470.95.896	25.07.2025	074-23-043
АН-74	АН-74	365.470.96.918	28.09.2024	074-23-007
АН-124-100				
АН-124-100	М	0105	10.08.2025	124-23-011
АН-124-100	М	0106	15.02.2025	124-22-53
АН-124-100	100	0210	04.04.2024	124-23-023
АН-124-100	100	0303	30.12.2023	124-2020-042
АН-124-100	150	0705	18.04.2024	124-21-101
АН-148				
АН-148	АН-148-100В	01-10	03.08.2041	148.0110-2020
АН-148	АН-148-100В	03-08	03.02.2043	рішення не потребується
АН-148	АН-148-100В	04-02	13.03.2045	рішення не потребується
АН-158				
АН-158	-	201-01	18.04.2043	рішення не потребується
АН-158	-	201-02	22.07.2043	рішення не потребується
АН-158	-	201-03	13.03.2043	рішення не потребується
АН-158	-	201-04	30.04.2044	рішення не потребується
АН-158	-	201-05	08.08.2044	рішення не потребується
АН-158	-	205-06	03.06.2045	рішення не потребується

№	Модель чи специфікація		ВБ	Метрологічний стан		Історичні показники						Заг. стан		Стор. стан		Проходивність		Відст. стан		
	Розшифр. Діагн.	Віднос. в'язк.		Узур. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.	Віднос. в'язк.
97	122	16	64	3.850-35,0кВ	1.5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
102	127	16	63	8.540-40,0кВ																

219 4543-71 рр.8

2



Е.Б. Ковалюк

ІНСТРУМЕНТ ЦЕРТИФІКАЦІЙНОГО БІЗНЕСУ

07.03.2023

Мінім. радіоміцність Освітлений-вільний радіолокаційний до 0.3 мВз / мГ
Смешань у закордінстві не мВз

Список публікацій за темою дисертації.

У фахових виданнях:

1. Мнацаканов Р. Г., Довбуш В. О., Якобчук О. Є. Зміна структури і складу поверхневих шарів контактних поверхонь. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2002. № 4 (15). С. 63–66. DOI: 10.18372/2306-1472.15.15277 (категорія Б).
2. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Мікосянчик О. О. Дія олив на поверхні тертя при додаванні багатофункціональних присадок. *Автошляховик України: Окремий випуск. Вісник Північного наукового центру ТАУ*. 2003. № 6. С. 10–14 (категорія Б).
3. Дмитриченко М. Ф., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є. Особливості мастильного процесу в умовах перемінних контактних напруг, підвищених кутових швидкостей і зміцнення контактних поверхонь. *Вісник Національного транспортного університету*. 2003. № 8. С. 20–24 (категорія Б).
4. Мнацаканов Р. Г., Довбуш В. О., Якобчук О. Є., Мікосянчик О. О. Мастильна дія пластичних і напіврідких мастил. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2003. № 3-4 (18). С. 73–76. DOI: 10.18372/2306-1472.18.15390 (категорія Б).
5. Маленко В. І., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Мікосянчик О. О. Порівняльні реологічні характеристики мінеральних і синтетичних олив. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2006. Вип. 45. С. 170–178 (категорія Б).
6. Якобчук О. Є., Хімко А. М., Бородій В. М., Краля В. О. Вплив режимів тертя на зносостійкість деталей в умовах тертя–ковзання. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2008. Вип. 50. С. 144-148. DOI: 10.18372/0370-2197.50.2998 (категорія Б).
7. Хімко А. М., Якобчук О. Є., Бородій В. М., Задніпровська С. М., Холод Н. В. Особливості зношування вузлів механізації крила літаків, що працюють в умовах динамічних навантажень. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2009. № 3 (40). С. 33–36. DOI: 10.18372/2306-1472.40.1741 (категорія Б).

8. Khimko A., Kralya V., Yakobchuk A., Kostuchik V., Sidorenko A. Units wearability of aircraft wing lift devices. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2011. Вип. 55. С. 112–117. DOI: 10.18372/0370-2197.55.3249 (категорія Б).

9. Хімко М. С., Якобчук О. Є., Хімко А. М., Науменко Н. О. Методика випробувань шарнірних підшипників на зносостійкість. *Проблеми тертя та зношування.* 2017. № 1 (74). С. 118-122 (категорія Б).

10. Мікосянчик О. О., Кудрін А. П., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Токарук В. В. Оцінка теплових процесів у фрикційному контакті при коченні з проковзуванням. *Проблеми тертя та зношування.* 2017. № 4 (77). С. 4–15 (категорія Б).

11. Якобчук О. Є., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Хімко А.М., Токарук В. В. Протизадирні властивості мастила Aero Shell Grease 33 при використанні конструкційних сталей 9ХС і 30ХГСА. *Проблеми тертя та зношування.* 2018. № 1 (78). С. 27–36. DOI:10.18372/0370-2197.1(78).12756 (категорія Б).

12. Mikosianchuk O. A., Mnatsakanov R. G., Khimko A. N., Kichata N. N., Yakobchuk A. E. Theoretical Aspects of the Structural and Rheological State of Boundary Lubricating Layers in Friction Pairs. *Problems of Tribology.* 2018. № 3(89). P. 47–52. DOI:10.31891/2079-1372-2018-89-3-47-52 (категорія Б).

13. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Токарук В. В. Прогнозування лінійного зносу контактних поверхонь в екстремальних умовах тертя. *Проблеми тертя та зношування.* 2018. № 4 (81). С. 4–12. DOI: 10.18372/0370-2197.4(81).13321 (категорія Б).

14. Якобчук О. Є. Аналіз можливості заміни мастила ВПІНП-286М на Aero Shell Grease 33 у вузлах механізації крила у літаках сімейства АН. *Проблеми тертя та зношування.* 2019. № 2 (83), С. 29-36. DOI: 10.18372/0370-2197.2(83).13689 (категорія Б).

15. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Хімко А. М. Оцінка параметрів мастильного матеріалу в умовах масляного голодування трибоконтракту. *Проблеми тертя та зношування.* 2020. № 2 (87), С. 21–28. DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14721 (категорія Б).

16. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Хімко А. М., Харченко О. В. Огляд класифікацій за фізико-механічними та експлуатаційними властивостями мастил закордонного виробництва. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 3 (88). С. 52–70. DOI: 10.18372/0370-2197.3(88).14920 (категорія Б).

17. Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Хімко А. М., Токарук В. В. Розробка методики контролю та діагностики експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів за триботехнічними параметрами. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 1 (90). С. 11–19. DOI: 10.18372/0370-2197.1(90).15234 (категорія Б).

18. Mikosianchyk O., Yakobchuk O., Mnatsakanov R., Khimko A. Evaluation of Operational Properties of Aviation Oils by Tribological Parameters. *Problems of Tribology*. 2021. 26 (1/99). С. 43–50. DOI: 10.31891/2079-1372-2021-99-1-43-50 (категорія Б).

19. Pina, T., Mikosianchyk, O., Mnatsakanov, R. and Yakobchuk O. 2021. Development of methods for evaluation of lubrication properties of hydraulic aviation oils. *Problems of Tribology*. 2021. №3(101). P. 42–47. DOI: 10.31891/2079-1372-2021-101-3-42-47 (категорія Б).

20. Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Педан Є. В., Березівський Н. М. Вплив ступеня окислення на протизношувальні властивості авіаційних олив. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 2 (99). С. 4–13. DOI: 10.18372/0370-2197.2(99).17611 (категорія Б).

21. Якобчук О. Є., Юцкевич С. С., Кисельова Т. В., Якобчук І. О., Сидоренко К. О. Статистичний аналіз результатів дослідження триботехнічних характеристик мастильних матеріалів при терті. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 4 (101). С. 84–96. DOI: 10.18372/0370-2197.4(101).18082 (категорія Б).

У іноземних спеціалізованих виданнях:

22. Svirid M. N., Wajs E., Primak L. B., Borodii V. N., Yakobchuk A. E. Improvement of the performance parameters of precision friction couples in the magnetic field. *Powder metallurgy and metal ceramics*. 2013. Vol. 52. No. 7. P. 417–423. DOI: 10.1007/s11106-013-9542-6 (Scopus, Quartile Q3).

23. Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. H., Lopata L. A., Marchuk V. E., Yakobchuk O. E. Wear resistance of 30KhGSA steel under the conditions of rolling with sliding. *Materials science*. 2019. Vol. 55. No. 3. P. 402–408. DOI: 10.1007/s11003-019-00317-9 (**Scopus, Quartile Q3**).

24. 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*. 2021. Vol. 50. No. 3. P. 229–235. DOI: 10.3103/S1052618821030110 (**Scopus, Quartile Q2**).

Матеріали та тези конференцій:

25. Мнацаканов Р. Г., Довбуш В. О., Якобчук О. Є. Первісне порівняння ресурсів роботи зубчастої передачі на маслі та пластичному мастилі. *АВІА-2001: матеріали III Міжнар. науково-техн. конф., м. Київ, 24–26 квіт. 2001 р. Київ, 2001. С. 12.*

26. Якобчук О. Є., Бородій В. М., Хімко А. М. Сучасні методики досліджень характеристик мастильних матеріалів для важко навантажених пар тертя. *Державна політика розвитку цивільної авіації XXI століття: Економічний патріотизм і стратегічні можливості України* : матеріали науково-практ. конф., м. Київ, 7–8 лют. 2008 р. Київ, 2008. С. 32.

27. Якобчук О. Є., Хімко А. М., Бородій В. М., Краля В. О. Вплив режимів тертя на зносостійкість деталей в умовах тертя–ковзанням. *Сучасні проблеми машинознавства*: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 22–23 верес. 2008 р., Київ, 2008. С. 32.

28. Mnatsakanov R. G., Yakobchuk O. Y., Khimko A. M. Analysis of the changes in the load-bearing capacity of lubricating layers of lithium greases at contact load changing. *The Eighth World Congress “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY”: Safety in Aviation And Space Technologies* : proceedings, Kyiv, 10–12 October 2018. Kyiv, 2018. P. 1.4.9–1.4.12.

29. Yakobchuk O. Y., Mikosyanchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Khimko A. M. Analysis of the Use of Lubricants in the Nodes of High Lift Devices in Antonov Family

Aircrafts. У *ABIA-2019*, proceedings of the Fourteenth International Conference of Science and Technology, Київ, Україна, 23 квітня 2019–25 квітня 2019; НАУ: Київ, 2019; С. 19.25–19.29.

<https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2019/schedConf/presentations>

30. Dukhota O. I., Popov O. V., Yakobchuk O. Y. Technological aspects of reliability control of aviation tribomechanical systems. *The Ninth World Congress “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY - Safety in aviation and space technology”*: proceedings, Kyiv, 22–24 September 2020. Kyiv, 2020. P. 1.2.36–1.2.42. <https://conference.nau.edu.ua/index.php/Congress/Congress2020/schedConf/presentations>.

31. Якобчук О. Є., Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко А.М. Методика оцінки триботехнічних властивостей авіаційної оливи ВО-12. *ABIA-2021* : матеріали XV науково-практ. конф., м. Київ, 20–22 квіт. 2021 р. Київ, 21. С. 1.1–1.5.

32. Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Мнацаканов Р. Г., Хімко А.М. Оцінка якості авіаційної оливи. *Theory, practice and science* : abstracts of XXIII International Scientific and Practical Conference, Tokyo, 27–30 April 2021. Tokyo, 2021. P. 438–442. URL: <https://doi.org/DOI:10.46299/ISG.2021.I.XXIII>.

33. Yakobchuk O. Y., Mikosianchyk O. O., Mnatsakanov R. G. Investigation of the Phenomenon of Lubrication Starvation in Conditions of Rolling With Sliding. *ABIA-2023* : матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції, Київ, 18–21 квіт. 2023. Київ, 2023. С. 1.66–1.69. URL: <https://conference.nau.edu.ua/index.php/AVIA/AVIA2023/schedConf/presentations>.


Патенти:

34. Спосіб відновлення поверхні тертя в імпульсному магнітному полі: Патент на корисну модель № 45918 Україна: G01N 3/56, F16C 33/14, М.М. Свирид, А.П. Кудрін, С.М. Задніпровська, А.М. Хімко, О.Є. Якобчук – u200907999; заявл. 29.07.2009; опубл. 25.11.2009, Бюл. № 22. – 2 с.

ДОДАТОК Г

Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

«ПОГОДЖЕНО»

Проректор з навчальної
роботи НАУ

 «21» 02 2024 р. Анатолій ПОЛУХІН

«ЗАТВЕРДЖЕНО»

Голова комісії з реорганізації НАУ
в.о. ректора

 «22» 02 2024 р. Володимир ЩЕГОЛА


АКТ

**про впровадження у навчальний процес
Національного Авіаційного Університету**

Наукових результатів дисертаційної роботи Якобчука Олександра Євгенійовича
«ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПАР ТЕРТЯ ЛОКАЛЬНИХ КОНТАКТІВ В
НЕСТАЦІОНАРНИХ УМОВАХ РОБОТИ ВИБОРОМ МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З
ЗАДАНИМИ ТРИБОТЕХНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ»

Комісія у складі:

голови 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 ГГС;
	Семетківська 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 дисертаційної роботи старшого викладача кафедри конструкції літальних апаратів Аерокосмічного факультету Якобчука Олександра Євгенійовича за темою «Підвищення зносостійкості пар тертя локальних контактів в нестационарних умовах роботи вибором мастильних матеріалів з заданими триботехнічними властивостями» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук впроваджені у навчальний процес кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів та кафедри конструкції літальних апаратів:

- шляхом розгляду методики вибору мастильних матеріалів за експлуатаційним призначенням в «Темі 1.2. Властивості мастильних матеріалів» лекційних занять з дисципліни «Триботехніка та основи надійності машин» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»;
- шляхом розробки практичної роботи «Визначення протизношувальних характеристик мастильних матеріалів в нестационарних умовах при коченні з проковзуванням» по «Темі 1.7. Передові та перспективні технології» та «Темі 1.8. Термін служби інструменту, продуктивність і прогресивні технології різання» з дисципліни «Новітні технологічні процеси у виробництві повітряних суден та їх обладнання» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня магістр за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка».

Голова комісії



Михайло СВИРИД

Секретар комісії



Інна СЕМАК

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник Головного
конструктора ДП «Антонов»

Лось О.В.

«24» 09 №1 2015 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів науково-дослідної роботи

«Методика випробування мастильних матеріалів, для редуктора підйомника закрилків типу 148.00.5737.000.000 в літаках АН 148, по визначенню триботехнічних властивостей мастильних матеріалів з різним вмістом (відсотковим) води», розроблена при виконанні науково-дослідної роботи за договором №1/15 від 03.03.2015 року «Розробка рекомендацій щодо використання мастильних матеріалів у вузлах та агрегатах літаків сімейства АН» представниками Національного авіаційного університету: д-р техн. наук, професор Мнацаканов Р.Г., старший викладач Якобчук О.Є., використовується в ДП «АНТОНОВ» для визначення триботехнічних властивостей мастильних матеріалів для редукторів механізації крила.

«Методика випробування мастильних матеріалів, для редуктора підйомника закрилків типу 148.00.5737.000.000 в літаках АН 148, по визначенню триботехнічних властивостей мастильних матеріалів з різним вмістом (відсотковим) води» підготовлена на належному якісному рівні і може бути використана в роботі авіаційних підприємств. Вважаємо за можливе подальше використання «Методики випробування мастильних матеріалів, для редуктора підйомника закрилків типу 148.00.5737.000.000 в літаках АН 148, по визначенню триботехнічних властивостей мастильних матеріалів з різним вмістом (відсотковим) води». Економічний ефект впровадження прогнозується на рівні 50,0 тис. грн. на рік.

Начальник відділу
систем керування польотом

Тижнов О.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «БОРА Б»

А. СТРОФИМЕНКО

12.2023р



АКТ

про реалізацію результатів наукових досліджень

ЯКОБЧУК Олександр Євгенійович

Результати наукових досліджень, які отримані особисто Якобчуком О.Є., реалізовані в розробленому комплексі технологічно-експериментальних методів дослідження триботехнічних характеристик вузла тертя при використанні мастильного матеріалу оливи «Бора Б» ВО-12 (ТУ У 19.2-38474081-017:2018 зі зм. 1 «Оливи трансмісійні «Бора Б» Технічні умови») на зразках зі сталі 40ХН (НРС 36 - 37, Ra 0,33 мкм), що призначена для змащування редукторів та втулок несучого гвинта для всесезонної експлуатації

За результатами триботехнічних випробувань оливи «Бора Б» ВО-12 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):

- ефективні змащувальні властивості як в період пуску, так і при максимальних досліджуваних обертах; переважає еластогідродинамічний (контактно-гідродинамічний) або гідродинамічний режим мащення;
- олива характеризується низькими напруженнями зсуву мастильного шару на рівні 6,2 МПа та ефективною в'язкістю 2627 Па·с, що свідчить про стійкість компонентів оливи до деструкції в умовах зростання градієнту швидкості зсуву;
- питома робота тертя в фрикційному контакті при використанні оливи «Бора Б» ВО-12 знаходиться в діапазоні 144.....3435 Дж/мм², що характеризує нормальні умови роботи трибосистеми з незначними енергетичними процесами;
- стабільний коефіцієнт тертя, діапазон коливань якого знаходиться в межах 0,004...0,02.

Вважаємо, що запропонована методика контролю та діагностики експлуатаційних властивостей оливи «Бора Б» ВО-12 дозволяє оцінити їх змащувальні, антифрикційні, протизношувальні та реологічні характеристики. На підставі оцінки триботехнічних властивостей оливи, з урахуванням сертифіката якості виробника оливи «Бора Б» ВО-12, можуть бути надані рекомендації застосування даної оливи в якості всесезонної оливи для використання в інтервалі температур навколишнього середовища від мінус 50 °С до 60 °С.

Даний акт не передбачає фінансових зобов'язань.

Головний технолог Канавський Д.М.