

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Якобчук Олександр Євгенійович**



УДК 621.891

**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

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2024

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному авіаційному університеті.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Мікосянчик Оксана Олександрівна,**  
Національний авіаційний університет,  
професора, завідувача кафедри прикладної механіки та  
інженерії матеріалів Аерокосмічного факультету

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Войтов Віктор Анатолійович,**  
Державний біотехнологічний університет,  
завідувач кафедри транспортних технологій та логістики

кандидат технічних наук, доцент  
**Шимчук Сергій Петрович,**  
Луцький національний технічний університет,  
доцент кафедри галузевого машинобудування

Захист дисертації відбудеться «11» червня 2024 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, корпус 1, ауд. 1.334.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058 Україна, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1 та на сайті <http://asdoc.nau.edu.ua/golovne-menyu/specz%D1%96al%D1%96zovan%D1%96-vchen%D1%96-radi-z-prisudzhennya-stupenya-doktora-nauk/specz%D1%96al%D1%96zovana-vchena-rada-d-26.062.06/05.02.04-%C2%ABtertya-ta-znoshuvannya-v-mashinax%C2%BB>.

Автореферат розісланий «08» травня 2024 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент



Михайло СВИРИД

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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., Матвеевський Р.М., Мнацаканов Р.Г., Петрусевич А.І., Порохов В.С., Райко М.В., Ребіндер П.О., Varus 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 нестационарних 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 механізм зношування пар тертя в нестаціонарних 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 полягає у наступному:**

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 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.

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 багатофункціональних присадок на властивості мастильних матеріалів і поверхні тертя при додаванні їх до базових олив – [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 тертяковзання – [9]; проаналізовано умови зміни тепловиділення в локальних контактах при різних значеннях проковзування в умовах кочення – [10]; встановлені закономірності зміни протизадирних 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 літієвій 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» (Tokyo, 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, поставлені мета та завдання досліджень, визначені наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, наведені дані щодо апробації і впровадження.

У першому розділі розглянуто сучасні аспекти підвищення довговічності вузлів тертя шляхом використання високоякісних мастильних матеріалів. Проаналізовано напрямки взаємозамінності мастильних матеріалів з метою

забезпечення надійної роботи парку авіаційної техніки України, зменшення витрат на технічне обслуговування повітряних суден, що ґрунтуються на впровадженні в експлуатацію багатоцільових мастильних матеріалів, якість яких має відповідати міжнародним стандартам та допускам Airbus, Boeing, McDonnell Douglas, Embraer. 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. Важливими аспектами вибору мастильного матеріалу є як врахування режимів роботи вузлів та агрегатів, практичного досвіду при експлуатації та обслуговуванні повітряних суден, так і комплексна оцінка якості мастильних матеріалів за показниками стійкості до окислення, стабільності до деструкції при високих градієнтах швидкості зсуву, несучої здатності граничного шару в критичних умовах роботи, деемульгуючими, антифрикційними та протизношувальними властивостями.

Визначено, що впровадження в експлуатацію високотехнологічних та високоефективних авіаційних промислових мастильних матеріалів з заданими характеристиками є однією з першочергових задач для підвищення надійності пар тертя.

Ґрунтуючись на вищезазначеному, визначена мета роботи і напрямки теоретичних і експериментальних досліджень.

**У другому розділі** проаналізовано стандарти оцінки якості мастильних матеріалів у відповідності до ГОСТ, ДСТУ, DIN, SAE, NLGI, наведено показники якості та фізико-хімічні характеристики досліджуваних авіаційних мастильних матеріалів, зазначено перспективи їх впровадження у державній авіації України. Наведено функціональні характеристики лабораторної одноконтактної установки СМЦ-2 з цифровим керуванням потужністю; розглянуто переваги програмно-апаратного комплексу з двома кінематично незалежними приводами для проведення випробувань в режимі кочення з діапазоном проковзування між контактуючими поверхнями від 3 до 40 %; представлено натурну установку, що імітує контакт циліндр-площина.

Розроблені методики оцінки триботехнічних показників авіаційних мастильних матеріалів на етапі лабораторних досліджень дозволяють аналізувати спектр необхідних експлуатаційних параметрів трибоконтакту. Проведення оцінки якості мастильних матеріалів за антифрикційними, змащувальними, протизношувальними та антиокислювальними показниками з урахуванням типу базової основи, наявності функціональних присадок дозволяє встановити взаємозв'язок між трибологічними показниками контакту, складом мастильного матеріалу та активованими поверхневими шарами контактних поверхонь та визначити механізми структурної пристосованості трибосистеми.

Обґрунтовано застосування статистичного аналізу триботехнічних параметрів, що спрямовано на виявлення впливових змінних і отримання уявлення про їхні індивідуальні та спільні зв'язки з результатом. Проаналізовано застосування емпіричних залежностей при моделюванні трибологічних процесів.



У третьому розділі проаналізовано протизадирні властивості літєвих синтетичних мастил AeroShell Grease 33 і Ера ВНІІП-286М при розвитку процесів масляного голодування.

Визначено механізм ступеневого руйнування граничних мастильних шарів мастила AeroShell Grease 33 на сталі 9ХС в режимі масляного голодування: за умов примусового видалення мастила із 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 із зони контакту тривалість руйнування граничних шарів збільшується до 55 хв. за рахунок «резерву» синтетичної суміші вуглеводнів і естеру в анізотропних граничних шарах. Зменшення твердості контактних поверхонь (HRC 55 – сталь 9ХС, HRC 35 – сталь 30ХГСА) в режимі масляного голодування спричинює зростання лінійного зносу пар тертя в 2 рази, прояву ознак заїдання внаслідок домінування пружно-пластичних деформацій в поверхневих шарах сталі 30ХГСА та інтенсифікації механодеструкції граничних шарів протягом 32 хв.

В діапазоні контактного навантаження 250 – 700 МПа мастило AeroShell Grease 33 характеризується більш ефективними змащувальними властивостями: при  $\sigma_{max}$  250 МПа товщина граничних плівок в 1,9 разів перевищує товщину граничних плівок мастила ВНІІП-286М, при  $\sigma_{max}$  550 – 700 МПа цей показник збільшується в 8 – 10 разів.

Використання мастила AeroShell Grease 33 забезпечує зниження енергонавантаженості трибоконтакту – питома робота тертя в умовах масляного голодування в 3,6 – 5 разів нижче за умов використання мастила Ера ВНІІП-286М (рис. 1), що є визначальним чинником для підвищення зносостійкості сталі 30ХГСА в 2,2 рази та збільшення вдвічі циклів наробітки до проявів ознак заїдання.

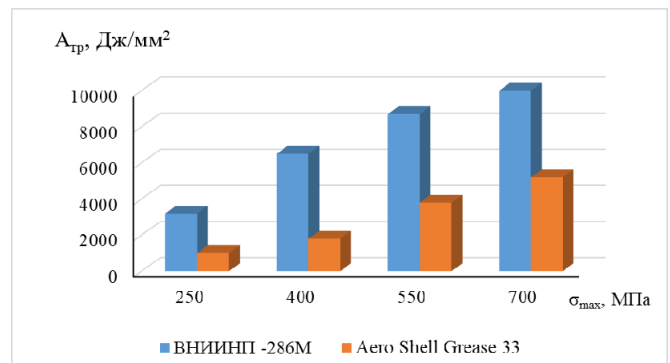


Рис. 1. Зміна питомої роботи тертя при підвищенні контактного навантаження

Встановлено, що 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 ВНІІП-286М і AeroShell Grease 33 (табл. 1) обумовлено домінуванням

Таблиця 1 – Зміна градієнта швидкості зсуву змащувальних шарів і кількість циклів напрацювання пар тертя до прояву ознак заїдання

Мастильний матеріал	Контактне навантаження, МПа			
	250	400	550	700
	Градієнт швидкості зсуву змащувальних шарів, с <sup>-1</sup>			
Ера ВНІІП – 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 ВНІІП – 286М	300	80	50	20
AeroShell Grease 33	900	150	130	100

граничного режиму мащення з показником  $\lambda = 0,21$  та  $\lambda = 1,67$  для ВНІІНП-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.

Застосування мастила AeroShell Grease 33 забезпечує зниження загального лінійного зносу випереджаючої і відстаючої поверхонь в 1,3 і 1,7 разів при  $\sigma_{max}$  250 і 700 МПа відповідно, в порівнянні з мастилом ВНІІНП-286М.

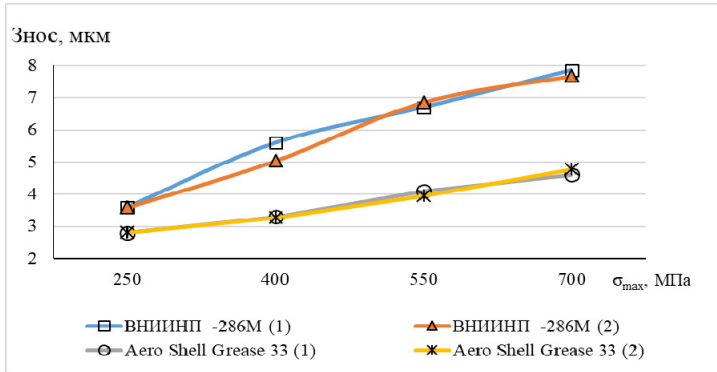


Рис. 2. Лінійний знос поверхонь: 1 – експериментальні значення, 2 – розрахункові

Отримана залежність лінійного зносу пар тертя в умовах кочення з проковзуванням з урахуванням кореляційного впливу на даний показник контактної навантаженості, питомої роботи тертя і товщини мастильного шару в умовах припинення подачі мастильного матеріалу в зону контакту (рис. 2).

У четвертому розділі представлено результати випробувань щодо визначення триботехнічних властивостей авіаційних

олів СМ-9 (для редукторів трансмісії вертольотів) та ВО-12 (для осевих шарнірів втулок гвинтів вертольотів) вітчизняного виробництва з метою імпортозаміщення.

Встановлено, що олива «Бора Б» СМ-9 характеризується ефективними змащувальними властивостями як в період пуску, так і при максимальних досліджуваних обертах пар тертя, 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. Питома робота тертя у фрикційному контакті при використанні оливи «Бора Б» СМ-9 знаходиться в діапазоні 1186...6328 Дж/мм<sup>2</sup>, для маслосуміші авіаційної СМ-9 встановлено більш інтенсивні енергетичні процеси в фрикційному контакті, питома робота тертя нестабільна, характеризується широким діапазоном коливань в межах 1300...33430 Дж/мм<sup>2</sup>, що призводить до інтенсифікації деструкційних процесів в приповерхневих шарах металу та зниженню його зносостійкості (табл. 2).

Таблиця 2 – Протизношувальні характеристики маслосуміші СМ-9

Показники	Мастильний матеріал			
	олива «Бора Б» СМ-9		маслосуміш авіаційна СМ-9	
	Знос контактних поверхонь (сталь 40ХН) після 100 циклів			
Загальний лінійний знос, мкм	4,9		5,74	
Інтенсивність зношування	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня	Випереджаюча поверхня	Відстаюча поверхня
	$1,579 \cdot 10^{-10}$	$5,494 \cdot 10^{-10}$	$2,145 \cdot 10^{-10}$	$6,003 \cdot 10^{-10}$
Мікротвердість поверхневих шарів дослідних зразків				
Мікротвердість (вихідна), МПа	4377	4590	4310	4658
Мікротвердість після тертя, МПа	2764	2758	3118	2914

Для оливи «Бора Б» ВО-12 встановлена кореляція антифрикційних та реологічних властивостей: коефіцієнт тертя стабільний, діапазон коливань даного параметру знаходиться в межах 0,004...0,02, 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. 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.

Для оливи «Бора Б» ВО-12 (зразок 1) встановлено 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 (рис. 3); підвищення кінематичної в'язкості при 100 °С за тривалості окислення 96 годин встановлено на 0,7 мм<sup>2</sup>/с в 3 рази менше за оливу всесезонну ВО-12 (зразок 2)).

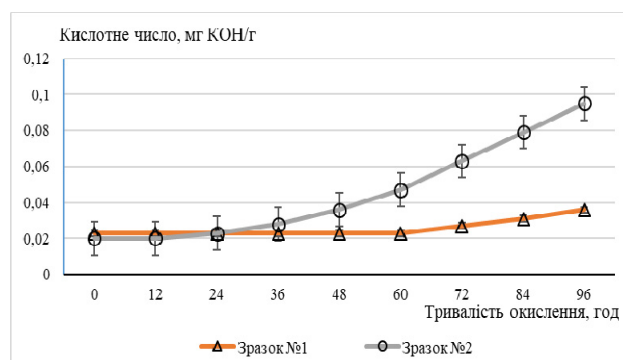


Рис. 3. Зміна кислотного числа авіаційних олив ВО-12 залежно від тривалості окислення

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. 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.

Проведено оцінку зносостійкості пар тертя (методом трибоспектрального неперервного індентування): при використанні зразка 1 встановлено зниження опору локальних мікрооб'ємів матеріалу поверхневих шарів металу контактному деформуванню в напрямку тангенціального руху в 1,72 рази.

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).

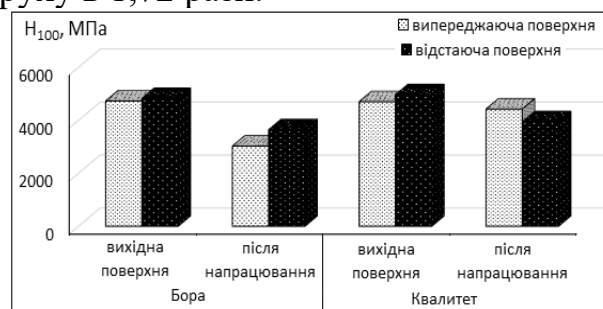


Рис. 4. Мікротвердість поверхні сталі 40ХН.

Знеміцнення поверхневих шарів металу обумовлено проявом ефекту Ребіндера, що позитивно впливає на триботехнічні процеси в контакті, оскільки забезпечується зменшення поверхневої енергії контактних поверхонь при адсорбції активних

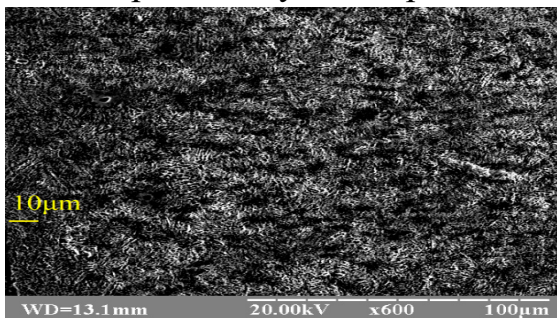
компонентів присадки оливи та формуванні граничних адсорбційних шарів. Це призводить до підвищення зносостійкості контактних поверхонь за рахунок зниження опору поверхневого шару твердого тіла пластичному деформуванню, полегшення пластичного зсуву у зернах.

При змащуванні сталі 40ХН мастильним матеріалом зразок 1 при терті формується поверхневий шар з дрібнофрагментною структурою. При навантаженні на індентор  $R=20$  сН максимальна глибина впровадження становить 0,9 мкм, до 70 % довжини траси індентування переважно фрагменти зміцнені, спостерігається формування однорідного поверхневого шару (табл. 3).

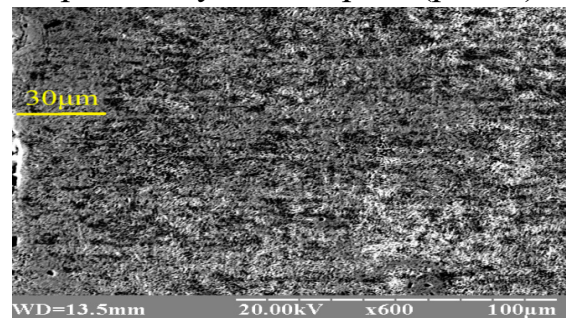
Таблиця 3 – Міцнісні характеристики поверхневих шарів сталі 40Х

Відстаюча поверхня	Максимальна глибина індентування, мкм	Зміцнюючі фрагменти			Знеміцнюючі фрагменти		
		Площа, %	Геометричні розміри		Площа, %	Геометричні розміри	
			Довжина, мкм	Висота, мкм		Довжина, мкм	Висота, мкм
Мащення зразком 1	0,9	70	5-45	0,1-0,5	30	10-30	0,1-0,4
Мащення зразком 2	1,55	60	10-60	0,15-0,55	40	15-105	0,2-0,9

Якщо при застосуванні зразка 1 глибина зони з деформованими шарами складає 10 мкм, то при застосуванні зразка 2 цей параметр збільшується втричі (рис. 5).



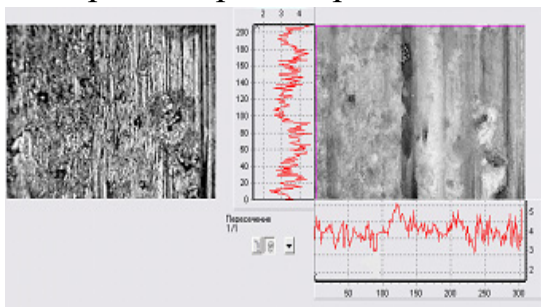
олива «Бора Б» ВО-12 (зразок 1)



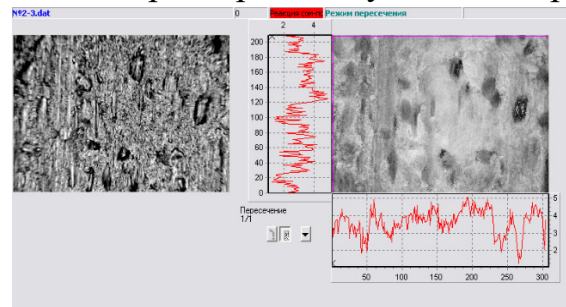
олива всесезонна ВО-12 (зразок 2)

Рис. 5. Цифрові РЕМ-знімки мікрошліфів сталі 40ХН після тертя.

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  $R_a = 0,264$  мкм,  $R_z = 1,362$  мкм, зразком 2 –  $R_a = 0,362$  мкм,  $R_z = 1,697$  мкм (рис. 6). 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.



олива «Бора Б» ВО-12 (зразок 1)



олива всесезонна ВО-12 (зразок 2)

Рис. 6. Мікрогеометричні параметри поверхонь тертя

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. Збільшення ФПК в умовах кочення з проковзуванням спричинює зменшення впливу динамічного фактору, що дає можливість зменшити розсіювання енергії в контакті й забезпечити підвищення зносостійкості контактних поверхонь. При змащуванні пар тертя оливою «Бора Б» ВО-12 інтенсивність зношування випереджаючої та відстаючої поверхонь зменшується в 2,2 та в 1,38 разів відповідно, в порівнянні з оливою всесезонною ВО-12.

У п'ятому розділі проведено оцінка антифрикційних та протизношувальних властивостей емульсій мастило – вода. Дослідження проводили для трьох випадків: товарні мастила Ера ВНІНП-286 та AeroShell Grease 33, в яких, згідно із сертифікатом якості, відсутній вміст води; емульсії мастил при температурі мінус 10 °С з концентрацією води 10 та 20 %.

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 -10 °С спостерігається переважно її кристалізація, при концентрації води 20 % наявні поодинокі структури зв'язаної некристалізованої води, які займають 10 % площі спостереження (рис. 7). 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.

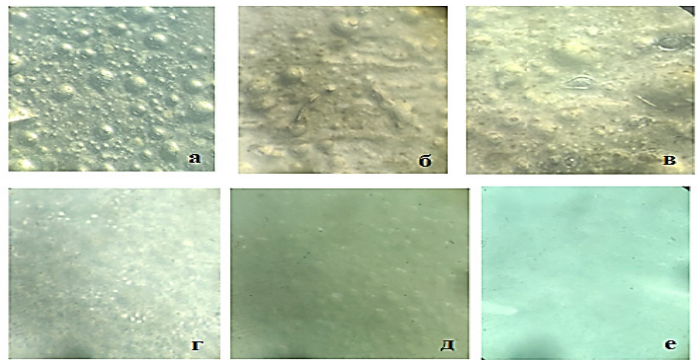


Рис. 7. Візуальний контроль емульсії мастило – вода: Ера ВНІНП-286М товарне (а), емульсії з 10% (б) та 20% (в) води; мастило AeroShell Grease 33 товарне (г), емульсії з 10% (д) та 20% (е) води.

Для емульсій ВНІНП-286М – вода встановлено підвищення коефіцієнта тертя в контакті на 10 %, в порівнянні з товарним мастилом (рис. 8). Додавання води в мастило AeroShell Grease 33 не призводить до погіршення його антифрикційних характеристик.

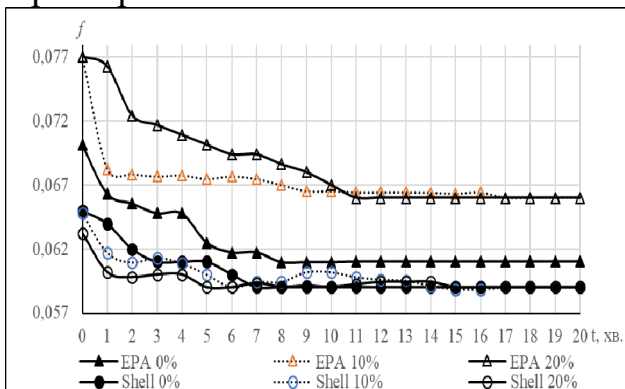


Рис. 8. Зміна коефіцієнта тертя для мастил: 0, 10 та 20 % – концентрація води.

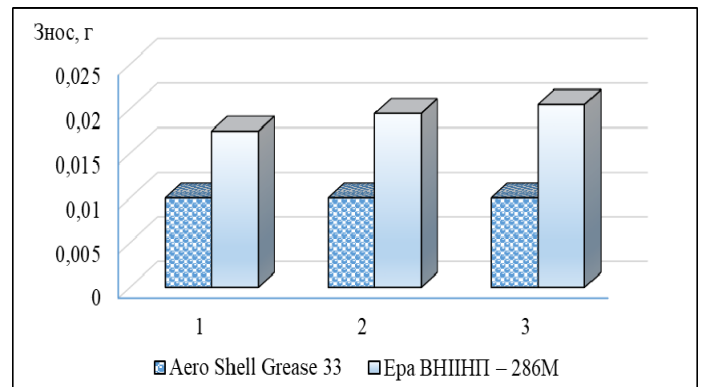


Рис. 9. Ваговий знос сталі 30ХГСА при змащуванні товарними мастилами (1), емульсіями мастил з водою в концентрації 10 (2) та 20 % (3).

Емульсії ВНІНП-286М з 10 та 20 % води призводять до підвищення вагового зносу трибосистеми на 11 та 15 % відповідно (рис. 9). 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.

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 Ера ВНІНП-286М та його емульсій з 10 та 20 % води. При змащуванні цими емульсіями зменшується інтенсивність підвищення температури в триботехнічному контакті на 15 та 23 % 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.

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 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 (табл.4).

Таблиця 4 – Параметри мікрорельєфу поверхневого шару сталі 30ХГСА згідно DIN 4776

Параметри	Вихідна поверхня	Доріжка тертя	Доріжка тертя	Доріжка тертя
		(емульсія ВНІНП – 286М – вода 20 %)	(емульсія AeroShell Grease 33 – вода 20 %)	(AeroShell Grease 33)
Ra, мкм	0,08	0,041	0,038	0,038
Rmax, мкм	0,21	0,26	0,1	0,11
Rpk, мкм	0,022	0,1	0,018	0,016
Rk, мкм	0,078	0,021	0,03	0,033
Rvk, мкм	0,03	0,017	0,018	0,02
Δ Mr, %	58	33	71	73

Зазначимо, що наявність води в мастилі AeroShell Grease 33 не впливає на мікрогеометричні параметри структурної пристосованості пар тертя в досліджуваному інтервалі часу. Отже, потрапляючи в мастило AeroShell Grease 33, вода ефективно деемульгується, що унеможливорює 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 гідрофобні властивості даного мастила запобігають появі корозійних процесів при експлуатації механізмів.

Таким чином, в порівнянні з мастилом Ера ВНІПІ-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.

На основі одержаних експериментальних даних триботехнічних властивостей контакту при змащуванні мастилами AeroShell Grease 33 та ВНІПІ-286М багатофакторним аналізом визначено 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*). За кореляційною матрицею лінійного зв'язку між парами змінних оцінені коефіцієнти кореляції Пірсона та визначено, що питома робота тертя, товщина мастильного шару та коефіцієнт тертя найбільше впливають на знос контактних поверхонь (рис. 10).

На основі регресійного аналізу (програма обробки статистичних даних STATGRAPHICS Centurion, регресійний аналіз ANOVA) одержано рівняння множинної лінійної регресії:

$$\text{wear} = 0,800399 + 0,000881482 \cdot \text{work} + 0,529655 \cdot \text{thickness} - 40,0501 \cdot \text{friction};$$

$$y = 0,800399 + 0,000881482 \cdot x_1 + 0,529655 \cdot x_2 - 40,0501 \cdot x_3.$$

Оскільки *P-Value* в таблиці ANOVA менше 0,05, то існує статистично значущий зв'язок між змінними на рівні довіри 95,0 %. На рис. 11 представлено графік, що відображає спостережувані значення зносу (по вертикальній осі – *observed*) в порівнянні із прогнозованими значеннями (по горизонтальній осі – *predicted*) за підібраним рівнянням: точки випадковим чином розкидані навколо діагональної лінії, що свідчить про надійність обраного рівняння.

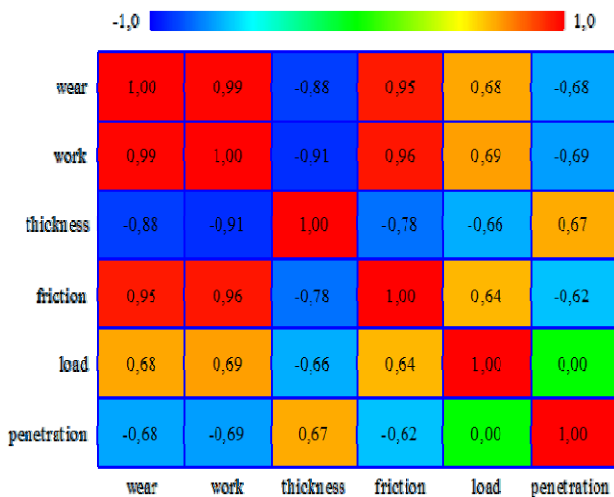


Рис. 10. Коефіцієнти кореляції Пірсона.

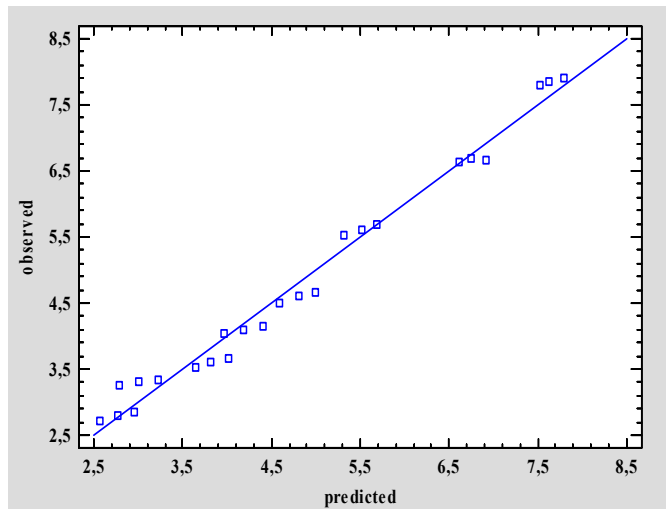


Рис. 11. Графік спостереження в порівнянні з прогнозованою оцінкою зносу.

**У додатках** представлено: перелік літаків «АН», допущених до відпрацювання чергового етапу ресурсу та строку служби станом на 27.11.2023, сертифікат якості прутків сталі 30ХГСА та акти впровадження результатів наукових досліджень.

## 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 нестационарних 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 контактi, 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.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ 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 оливи на поверхні тертя при додаванні багатofункціональних 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 масел. *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 ВНШП – 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 трибоконтакту. *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. 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. DOI: 10.31891/2079-1372-2021-99-1-43-50 (категорія Б).

19. Іліна Т., Mikosianchuk O., Mnatsakanov R., Yakobchuk O. 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. Mikosyanchuk 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., Mikosianchuk 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., Mikosyanchuk 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 *АВІА-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.

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.

31. Якобчук О. Є., Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко А. М. Методика оцінки триботехнічних властивостей авіаційної оливи ВО-12. *АВІА-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.*

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.*

### Патент

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.

### 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.

При дослідженні мастильних матеріалів в умовах прискореного масляного голодування було встановлено, що мастило AeroShell Grease 33 продемонструвало кращі деемульгуючі властивості для стабільної антифрикційної та протизношувальної роботи в порівнянні з мастилом Ера ВНІНП-286М. При дослідженні вивчено механізми руйнування граничного шару мастильного матеріалу, розглядаючи переходи до граничного або режиму мащення з ознаками сухого через збільшення градієнтів швидкості зсуву. Крім того, досліджено вплив вибору мастильного матеріалу на інтенсивність зношування та характеристики поверхні: олива «Бора Б» СМ-9 зменшує інтенсивність зношування та сприяє еластогідро-динамічному мащенню, а олива «Бора Б» ВО-12 забезпечує стабільні коефіцієнти тертя та підвищену зносостійкість завдяки ефекту пластифікації Ребіндера.

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 поліфункціо-

нальних 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.

## SUMMARY

**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.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering by specialty: 05.02.04 – The friction and wear in the machines (13 – Mechanical engineering). National Aviation University, Kiev, 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.

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.

Under accelerated oil starvation, AeroShell Grease 33 forms a 30-40 % thicker initial lubricating layer on 9KhS steel than on 30KhGSA steel. A slippage increase from 3 to 20 % doubles the layer thickness due to heightened friction surface activation. A 1,5 times reduction in contact surface hardness leads to a doubling of linear wear on both surfaces, causing seizure signs in 30KhGSA steel.

General seizure patterns in friction pairs reveal minimal values of boundary lubricant layer thickness, friction torque, and specific friction work, indicating the inability to restore metastable structures.

AeroShell Grease 33 outperforms Era VNIINP-286M grease in lubricating properties, forming a boundary film thickness 1.9 times greater at 250 MPa stress and increasing to 8 - 10 times at 550 - 700 MPa.

Mechanisms of lubricating material breakdown under oil starvation lead to transition into boundary or regimes with features of dry lubrication due to shear rate gradient increases, causing mechano-destruction with durations from 5 to 55 minutes.

AeroShell Grease 33 exhibits high demulsifying properties, ensuring stability of anti-friction and anti-wear properties. It demonstrates effective structural adaptability, reducing equilibrium roughness and increasing relative supporting length.

«Bora B» SM-9 oil ensures stable anti-friction properties and dominance of elastohydrodynamic lubrication, reducing wear intensity of 40KhN steel by 1,2 times. «Bora B» VO-12 oil offers stable friction coefficient during startup, low shear stresses, reducing specific friction work and wear intensity for leading and trailing surfaces.

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.

**Keywords:** 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.

Підп. до друку 29.04.2024. Формат 60x84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 75-1.

Видавець і виготівник  
Національний авіаційний університет  
03058. Київ – 58, проспект Любомира Гузара, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 7604 від 15.02.2022