

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



МІЛАНЕНКО ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.891

**НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ ЗАСАДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МАЩЕННЯ
І ЗНОСОСТІЙКОСТІ ВУЗЛІВ ТЕРТЯ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ РОБОТИ**

05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Реферат

на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному транспортному університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант:

Доктор технічних наук, професор
Дмитриченко Микола Федорович,
Національний транспортний університет, в.о. ректору

Опоненти:

Доктор технічних наук, професор
Войтов Віктор Анатолійович,
Державний біотехнологічний університет,
Завідувач кафедри транспортних технологій та логістики,
м. Харків

Доктор технічних наук, професор
Диха Олександр Володимирович,
Хмельницький національний університет,
Завідувач кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства,
м. Хмельницький

Доктор технічних наук, професор
Воронін Сергій Володимирович,
Український державний університет залізничного транспорту,
Завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин,
м. Харків

Захист дисертації відбудеться «12» квітня 2024 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д70.052.02 в Хмельницькому національному університеті за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11, аудиторія 4-005.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Хмельницького національного університету за адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Кам'янецька, 110/1. Реферат розіслано «11» березня 2024 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



С.В. Смутко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перспективи розвитку сучасного машинобудування та інфраструктури в Україні в тісній мірі пов'язані з економічними питаннями, зокрема, рентабельністю експлуатації тих чи інших машин і механізмів. Питання економічності, в свою чергу, тісно пов'язані з відповідним забезпеченням надійності експлуатації цих машин і механізмів, і, в кінцевому рахунку, вони зумовлюються цілим комплексом конструкторських, інженерних та експлуатаційних досліджень, які загалом, і визначають економічність використання машин і механізмів.

Одним зі шляхів поліпшення техніко-економічних показників машин і механізмів є підвищення ефективності мащення та зносостійкості вузлів тертя. Цьому питанню присвячені багато робіт вітчизняних і закордонних вчених, які зробили вагомий внесок щодо формування розуміння складних механо-фізико-хімічних процесів, які протікають в мікроскопічному об'ємі зони контакту тертя.

Фундаментальні роботи Д. Доусона, Р. Гохара, Дж. Хігінсона, М. Дмитриченка в області еластогідродинаміки (ЕГД), А. Петрусевича, С. Пінегіна та Ю. Дроздова в області контактної міцності, І. Крагельського, А. Камерона, Б. Костецького, П. Ребіндера, М. Райко в області граничного тертя, зробили вагомий внесок в теорію і практику розвитку фундаментальних основ тертя, мащення і зношування.

Багато проблем триботехніки, які пов'язані з експлуатацією вузлів тертя, потребують не тільки теоретичних і експериментальних досліджень, а й проведення стендових та експлуатаційних випробувань на реальній техніці, оскільки багато швидкоплинних процесів, що відбуваються в мікрооб'ємі (мікро-ЕГД) контакту тертя реальних вузлів, вносять суттєві корективи щодо результатів досліджень. Завдання підвищення ефективності мащення та зносостійкості пар тертя, які працюють в екстремальних умовах роботи, вимагає систематичних досліджень модифікування мастильних шарів оптимальними хімічно-активними компонентами, як один із дієвих та сучасних технологій поліпшення реологічних та триботехнічних показників, в тому числі, для надання універсальності мастильним матеріалам з метою скорочення матеріальних та фінансових витрат на технічне обслуговування вузлів тертя. Проведення відповідних досліджень та випробувань не можливе без використання сучасного автоматизованого обладнання, як в лабораторних і заводських умовах, так і на оригінальній техніці в умовах експлуатації в реальному масштабі часу щодо забезпечення точності і достовірності результатів. В іншому випадку, результати залишаються на рівні феноменологічного факту, для пояснення якого, або не існує теоретичного обґрунтування, або воно протирічить з позицій різних наукових шкіл, які займаються цими питаннями.

Насьогодні, відсутня єдина точка зору щодо підвищення мастильної здатності та зносостійкості в умовах змішаного тертя, проміжного режиму між рідинним та граничним тертям, в якому експлуатуються більшість вузлів, де змінюються структура модифікованого шару, його реологічні та триботехнічні характеристики. Ще додається те, що змішане тертя є переважно нестійким режимом внаслідок швидкоплинних процесів в зоні фрикційного контакту, наприклад, в умовах мастильного голодування, в якому виникають розриви мастильних та модифікованих шарів на дискретних ділянках фактичної площі контакту при високих навантаженнях. Тому, комплексне вирішення вищенаведених питань з використанням результатів науково-прикладних досліджень мастильних середовищ в лабораторних і заводських умовах та на підприємствах-експлуатантах техніки, дозволить розробити сучасні методики і технології підвищення ефективності мащення та зносостійкості пар тертя в зоні фрикційного контакту з урахуванням контактнo-механічних, реологічних і фізико-хімічних аспектів. Відповідний комплексний підхід складе базову основу науково-обґрунтованих підходів по розробці сучасних мастильних матеріалів та оптимізованих конструкцій вузлів тертя, які працюють в реальних умовах експлуатації у транспортних засобах.

Таким чином, науково-технічною проблемою є реалізація стійкого мащення в умовах змішаного тертя та створення в зоні фрикційного контакту неконформних і конформних вузлів тертя модифікованих шарів з оптимальною мастильною здатністю та структурною пристосовуваністю до екстремальних умов роботи, спрямоване на підвищення ефективності мащення та зносостійкості пар тертя за контактнo-механічними, реологічними і фізико-хімічними аспектами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Національного транспортного університету та інших підприємств. Автор був відповідальним виконавцем і співвиконавцем держбюджетних тем. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №ДЗ/508-2011 (0111U007602) за програмою «Державне замовлення» на тему «Дослідження впливу зміни фізико-хімічних властивостей олив у процесі експлуатації на надійність та довговічність пар тертя транспортних засобів». Автором створено технологію визначення збалансованої рецептури при виготовленні олив для дизельних двигунів та трансмісій. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №ДБ/13-2012 (0112U000139) в Національному транспортному університеті за бюджетною програмою «Оцінка еластогідродинамічних показників трансмісійних і моторних олив в нестаціонарних умовах роботи з метою підвищення довговічності вузлів тертя транспортних засобів». Автором розроблено методику підвищення ефективності мащення олив за кінетикою швидкісних, навантажувальних, температурних чинників та динамікою надходження мастильного матеріалу в зону (мікро-)ЕГД контакту. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №ДБ/19-2013 (0113U000296) в Національному транспортному університеті за бюджетною програмою «Дослідження закономірностей формування граничних модифікованих шарів у оливах за різним якісним станом з метою оптимізації ресурсу елементів трибосистем». Автором встановлені закономірності формування модифікованих шарів у середовищі олив за різним залишковим ресурсом, що сприятиме корегуванню фізико-хімічного складу товарних олив з метою оптимізації їх ресурсу. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №ДБ/34-2015 (0115U002289) в Національному транспортному університеті за бюджетною програмою «Збільшення ресурсу використання універсальної моторно-трансмісійної оливи у вітчизняних гусеничних машинах за рахунок оптимізації структурного складу оливи». Автором створена технологія збільшення ресурсу використання універсальної моторно-трансмісійної оливи з метою підвищення надійності та довговічності вузлів тертя транспортних засобів шляхом модифікування мастильного матеріалу. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №ДБ/45-2016 (0116U002634) в Національному транспортному університеті за бюджетною програмою «Дослідження ефективності застосування модифікаторів тертя у вітчизняних мастильних матеріалах з метою підвищення надійності транспортних засобів». Автором розроблена методика визначення оптимальної концентрації модифікаторів тертя у трансмісійних оливах та створена технологія підвищення надійності трибосистем агрегатів транспортних засобів при використанні модифікованих мастильних матеріалів. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №ДБ/51-2018 (0118U001107) в Національному транспортному університеті за бюджетною програмою «Поліпшення пускових якостей і триботехнічних властивостей транспортних двигунів за низьких температур навколишнього середовища». Автором розроблена методика підвищення мастильної здатності модифікованих шарів в умовах примусового збільшення температури на пусковому етапі роботи ДВЗ. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №ДБ/56-2021 (0121U109607) в Національному транспортному університеті за бюджетною програмою «Поліпшення паливної економічності та екологічних показників транспортних двигунів використанням вторинних енергоресурсів». Автором розроблена методика вибору оптимальної концентрації модифікаторів тертя та присадок до моторних олив для вузлів тертя ковзання двигуна з використанням вторинних енергоресурсів.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка науково-прикладних засад підвищення ефективності мащення та зносостійкості вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи, з урахуванням зміни фактичної форми контакту, кінематики тертя, реологічних властивостей мастильних середовищ, нестаціонарності процесів тертя, локальної температури на основі комплексного підходу оцінки контактано-механічних, реологічних та фізико-хімічних аспектів.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні завдання:

– встановити умови попередження розриву мікро-ЕГД мастильного шару, які досягаються комплексом заходів поліпшення триботехнічних, реологічних і фізико-хімічних показників щодо

реалізації стійкого мікро-ЕГД мащення та створення на поверхнях тертя модифікованих шарів з оптимальною структурною пристосовуваністю;

- визначити закономірності зміни долі гідродинамічного тиску мастильних шарів відносно контактного тиску на виступах мікронерівностей щодо забезпечення реалізації стійкого мікро-ЕГД мащення для підшипникових вузлів тертя з урахуванням зміни типу (реологічних властивостей) мастильних матеріалів та кінематики тертя;

- визначити умови зменшення западани мінімальної товщини мастильного шару на виході із зони мікро-ЕГД контакту в умовах мастильного голодування для забезпечення реалізації стійкого мікро-ЕГД мащення підшипникових вузлів тертя;

- визначити умови модифікування якісного та кількісного хімічного складу активних компонентів в складі сумішей та олів для забезпечення створення на поверхнях тертя модифікованих шарів з оптимальною структурною пристосовуваністю для підшипникових вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи, за протизношувальними, протизадирними і антифрикційними властивостями;

- визначити умови модифікування якісного та кількісного хімічного складу активних компонентів в складі сумішей та олів для забезпечення реалізації стійкого мащення в умовах змішаного тертя та створення на поверхнях тертя модифікованих шарів з оптимальною структурною пристосовуваністю для неконформних вузлів ДВЗ, що працюють в екстремальних умовах роботи, в тому числі у пластично-деформованому контакті, за механічними, протизношувальними, реологічними і антифрикційними властивостями;

- визначити умови модифікування якісного та кількісного хімічного складу активних компонентів в складі сумішей та олів для забезпечення реалізації стійкого мащення в умовах змішаного тертя та створення на поверхнях тертя модифікованих шарів з оптимальною структурною пристосовуваністю для конформних вузлів ДВЗ, що працюють в екстремальних умовах роботи, в тому числі у пластично-деформованому контакті, за протизношувальними, реологічними і антифрикційними властивостями;

- встановити кореляційний взаємозв'язок між температурою в локальній зоні контакту і об'ємною температурою модифікованої оливи при збільшенні контактного навантаження в період припрацювання та визначити термомеханічну стійкість модифікованої оливи в порівнянні зі штатною оливою з метою встановлення оптимальної структурної пристосовуваності модифікованих шарів;

- визначити механізми зменшення напружено-деформованого стану при зміні фактичної форми контакту тертя на основі побудови математичної моделі оцінки максимальних контактних напружень, деформацій та їх локалізації в підповерхневій області контакту за глибиною та за напрямом кочення;

- визначити умови реалізації стійкого мікро-ЕГД мащення і дати практичні рекомендації щодо застосування модифікованих олів для підшипникових вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи, на основі побудови математичної моделі оцінки мінімальної товщини на виході з контакту і товщини мастильного шару в центральній області мікро-ЕГД контакту з урахуванням зміни фактичної форми контакту та типу мастильного матеріалу;

- визначити умови реалізації стійкого мащення в умовах змішаного тертя і зниження інтенсивності зношування та дати практичні рекомендації щодо застосування модифікованих олів для вузлів ДВЗ, що працюють в екстремальних умовах роботи, на основі побудови математичної моделі оцінки товщини мастильного шару та інтенсивності зношування з урахуванням зміни ходу поршня (кута повороту коленвалу) і кількості обертів двигуна та типу мастильного матеріалу;

- розробити і впровадити у виробництво нові модифіковані оливи для підшипникових вузлів тертя та вузлів ДВЗ, що працюють в екстремальних умовах роботи, та перевірити в експлуатації запропоновану нову концепцію методології підвищення ефективності мащення та зносостійкості вузлів тертя для відповідних олів при проведенні прискорених та довготривалих випробувань на оригінальній техніці.

Об'єкт дослідження – процеси мащення, тертя та зношування модифікованих шарів в зоні фрикційного контакту в умовах тертя кочення, тертя кочення з частковим проковзуванням та тертя ковзання в екстремальних умовах роботи неконформних і конформних вузлів тертя.

Предмет дослідження – закономірності впливу механічних властивостей поверхонь тертя з урахуванням зміни форми контакту, реологічних і фізико-хімічних властивостей мастильних середовищ на протизношувальні, протизадирні та антифрикційні властивості модифікованих шарів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані на підставі фундаментальних положень трибології, контактної міцності і руйнування твердих тіл, фрикційного контакту, хімотології і реології мастильних шарів, концепції модифікування та зносостійкості трибосистем, нестаціонарності процесів тертя. Експериментальні дослідження виконувались на основі теорії моделювання та планування експерименту в лабораторних умовах. Прискорені та довготривалі стендові та експлуатаційні випробування проводились на оригінальному обладнанні і машинах, розміщених на стратегічних підприємствах України. Обробка результатів експериментально-розрахункових досліджень виконана із застосуванням інформаційних технологій з використанням методів рішення багатофакторних нелінійних задач множинної регресії та багаторядної селекції вибору оптимальних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. *Вперше* запропоновано нову концепцію методології підвищення мастильної здатності та зносостійкості вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи, на основі комплексних розрахунково-експериментальних досліджень, що враховують: нестаціонарні умови тертя, форму локального контакту та кінематику тертя, реологічні властивості мастильних шарів, температуру контакту, склад компонентів в мастильному середовищі.

2. *Вперше* побудовано математичну модель напружено-деформованого фрикційного контакту, яка розкриває механізми зниження контактних напружень і деформацій у підповерхневій зоні з урахуванням форми контакту. Модель дозволяє ідентифікувати: зони концентрації дотичних напружень; отримати оптимальну форму контакту за рахунок перерозподілу контактного напруження в ортогональному напрямку кочення.

3. *Удосконалено* модель формування мінімальної товщини мастильного шару в зоні мікро-ЕГД контакту, яка дозволяє реалізувати стійке мащення підшипникових вузлів тертя. Модель враховує фактичні форми контакту на всьому діапазоні зміни еліптичності та реологічні властивості мастильного матеріалу.

4. *Удосконалено* модель мастильної здатності та зносостійкості в зоні фрикційного контакту на основі експериментально-розрахункових критеріїв оцінки товщини модифікованого шару та інтенсивності зношування пар тертя ДВЗ. Модель враховує робочі характеристики кута повороту коленвала і кількість обертів двигуна та реологічні властивості мастильного матеріалу.

5. *Набули подальшого розвитку* критеріальні підходи щодо ідентифікації перехідних зон від режиму рідинного до граничного тертя на основі комплексної оцінки модифікування фізико-хімічного складу мастильних середовищ для вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи. Запропоновані та обґрунтовані критерії: критерій режиму мащення, критерій еліптичності, реологічний критерій та критерій тиску при переході від рідинного до змішаного тертя. Введені критерій пластичності та температурний критерій щодо запобігання втрати міцності і термомеханічної стійкості модифікованих шарів при переході від змішаного до граничного тертя.

6. *Набули подальшого розвитку* теоретичні засади еластогідродинамічного мащення в частині впливу фактичної форми контакту на механічні властивості поверхонь тертя та фізичного уявлення про будову мікро-ЕГД мастильного шару.

7. *Набули подальшого розвитку* фізико-хімічні основи змішаного тертя щодо мащення в перехідній зоні: встановлені закономірності зміни товщини, реологічних властивостей модифікованих шарів, лінійного зносу та хімічного складу активних компонентів модифікаторів тертя, протизношувальних і протизадирних присадок, органічних наномодифікаторів.

Практична цінність одержаних результатів.

1. *Розроблені і впроваджені* у промисловість 2 нові модифіковані оливи за різним призначенням, що збільшили ресурс відносно штатного напрацювання і забезпечили поліпшені триботехнічні та фізико-хімічні показники після штатного напрацювання:

– модифікована авіаційна олива АРІАН МС-8пн в системі мащення підшипникових вузлів тертя на авіаційному газотурбінному двигуні ДР-59л у газоперекачувальних агрегатах при довготривалих експлуатаційних випробуваннях впродовж 8000 мотогодин (на компресорній станції КС-4 „Зіньківська” Диканського ЛВУМГ, УМГ «Київтрансгаз», НАК «Нафтогаз України»);

– модифікована моторна олива АРІАН Ультрагаз в системі мащення на газовому двигун-генераторі ДВГА-500 у когенераційних установках при довготривалих експлуатаційних випробуваннях впродовж 4160 мотогодин (АТВТ «Первомайськдизельмаш»).

2. *Розроблені і впроваджені* у промисловість 2 нові модифіковані моторні оливи, що забезпечили поліпшені триботехнічні та фізико-хімічні показники в екстремальних умовах експлуатації на потужних газових двигун-генераторах:

– модифікована моторна олива ПРОТЕК STATGAS 40 в системі мащення на газовому двигун-генераторі ДВГА-630 у когенераційних установках при експлуатаційних випробуваннях впродовж 2000 мотогодин (ТОВ СП «Світловодськпобут»);

– модифікована моторна олива ПРОТЕК STATGAS 40МА в системі мащення на газовому двигун-генераторі САТ 3520В (САТЕРPILLAR) при експлуатаційних випробуваннях впродовж 2300 мотогодин (КПТМ «Черкаситеплокомуненерго»).

3. *Розроблено і впроваджено* у промисловість нову модифіковану універсальну моторно-трансмісійну оливу АРІАН ЄМТ-8, яка забезпечила поліпшені триботехнічні та фізико-хімічні показники: на одноциліндровому двигуні 1 ЧН 8×11; на вихоркамерному двигуні 2ДТХ№10; в системі мащення двигуна 2ДТХ№13, трансмісії і гідравлічної системи трактору ХТЗ-1410 впродовж 200 мотогодин на кожному етапі, що дало можливість скоротити матеріальні витрати при використанні єдиної оливи замість трьох олів (Харківське конструкторське бюро КП ХКБД).

4. *Розроблені і впроваджені* методики оцінки та технології підвищення ефективності мащення і зносостійкості вузлів тертя за результатами, що видані акредитованими лабораторіями вітчизняних заводів-виробників мастильних матеріалів ТОВ ЗТМ АРІАН, м. Фастів, Київська обл. та ТОВ КСМ ПРОТЕК, смт. Клавдієво-Тарасово, Київська обл.

5. *Модернізовані* універсальний автоматизований стенд тертя для проведення триботехнічних і реологічних досліджень вузлів ДВЗ та стенд оптико-інтерферометричних досліджень форми контакту і товщини мастильного шару для підшипникових вузлів тертя в Національному транспортному університеті, м. Київ.

Матеріали роботи використовуються у навчальному процесі НТУ при підготовці бакалаврів, магістрів та аспірантів за спеціальностями 131 – Прикладна механіка, 132 – Матеріалознавство.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Роботи, виконані без співавторства та разом зі співавторами, наведені в переліку публікацій. 3 робіт, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем, що наведені в переліку публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: 72 – 77, 79 наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету (Квітень-травень 2016 – 2021, 2023, Київ, НТУ); Міжнародній науковій конференції «Cluster-Casting-Future», (Вересень 9-12, 2014, Жешув - Свильча, Польща); Міжнародній науковій конференції: «Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів і машин» (Листопад 16-17, 2022, Київ); Всеукраїнській науковій конференції здобувачів освіти і молодих учених «ВІДБУДОВА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ» (21.06.2023, Київ); Міжнародній науковій конференції: TRANSBALTICA XIV: Transportation Science and Technology Proceedings of the 14th International Conference TRANSBALTICA, (Вересень 14-15, 2023, Вільнюс, Литва); Міжнародній науковій конференції: The 4th International Conference on Business and Technology (ICBT'2023), (Листопад 1-2, 2023, Стамбул, Туреччина).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 50 наукових праць, у тому числі: 7 статей у фахових виданнях, що внесені до наукометричної бази Scopus; 3 статті у іноземних спеціалізованих виданнях; 3 у монографіях; 16 статей у фахових спеціалізованих виданнях; 15 тез доповідей у міжнародних та науково-технічних конференціях; 1 патент на винахід та 5 свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 464 сторінки. Обсяг анотації складає 26 сторінок. Дисертація містить 138 ілюстрацій (із них тих, що займають повну сторінку – 4), 43 таблиці (із них тих, що займають повну сторінку – 1). Список використаних джерел із 280 найменувань займає 31 сторінку. Додаток містить 36 сторінок. Обсяг основної частини дисертації становить 359 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведена загальна характеристика дисертаційної роботи, розкрито сучасний стан і важливість наукового завдання, поставлена мета досліджень і обґрунтовано актуальність роботи, визначені наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, сформульовані науково-прикладні напрями досліджень, представлені результати публікацій та апробації на конференціях.

У першому розділі проведено обґрунтування актуальності і проблематики завдання, проведений літературний аналіз джерел щодо сучасного стану напрямків досліджень за темою дисертаційної роботи.

Екстремальні умови роботи досліджувались в рамках контактано-механічних, реологічних та фізико-хімічних аспектів у неконформних вузлів тертя, що мають локальний точковий контакт, які характерні для різноманітних підшипникових вузлів тертя (кулькові та діжкоподібні роликові підшипники кочення) або локальний лінійний контакт, який характерний для зубчастих передач та деяких деталей ДВЗ (кулачкові механізми, вузли ГРМ та інші), а також для конформних вузлів ДВЗ, що мають повне прилягання поверхонь тертя (наприклад, між верхнім компресійним кільцем та внутрішньою стінкою гільзи циліндру ДВЗ).

Відповідні екстремальні умови роботи для вузлів тертя виникатимуть при недостатньому мащенні (мастильному голодуванні), коли мастильний матеріал не встигає регулярно потрапляти в зону контакту у зв'язку з декількох причин: 1) нестаціонарні умови тертя в режимі «stop-and-go» («пуск-зупинка»); 2) втрата механічної і в'язкісної стабільності мастильного матеріалу у зв'язку з проявом неньютонівських властивостей при високих швидкостях зсуву в умовах низькотемпературного запуску (реологічний аспект); 3) недостатня структурна пристосованість модифікованих шарів в умовах граничного тертя при високих навантаженнях в локальній зоні контакту (фізико-хімічний аспект). Характерні умови роботи призводять до генерування контактних (дотичних) напружень в підповерхневій зоні фрикційного контакту. Відповідні напруження викликатимуть деформаційні процеси в результаті повторних мікропластичних зсувів в зоні дискретних ділянок контакту по вершинах мікронерівностей поверхонь тертя (контактано-механічний аспект).

Таким чином, підвищення ефективності мащення і зносостійкості вузлів тертя в екстремальних умовах роботи, необхідно розглядати з позиції попередження контактано-руйнування з метою запобігання викришування (пітінгу) підшипникових вузлів тертя в результаті повторних мікропластичних зсувів та протидії задиру (холодного заїдання) вузлів ДВЗ в зоні дискретних ділянок фрикційного контакту по вершинах мікронерівностей.

Для вузлів ДВЗ, екстремальні умови роботи суттєво пов'язані з нестаціонарними умовами тертя та термомеханічною стійкістю в зоні фрикційного контакту, особливо, при низькотемпературному запуску. Нестационарні умови роботи при частих пуск-зупинках при низькотемпературному запуску ДВЗ часто призводять до недостатнього мащення (мастильного голодування) в зоні фрикційного контакту по причинах того, що по-перше, не вистачає кількості мастильного матеріалу в зоні контакту щоб сформувати мастильний шар оптимальної товщини, по-друге, внаслідок неньютонівської поведінки мастильні шари не встигають зреласувати і набути стабільної структурної в'язкості (реологічний аспект) і, по-третє, мати необхідну структурну пристосовуваність новоутворених модифікованих шарів впродовж прогрівання двигуна після низькотемпературного запуску (фізико-хімічний аспект), що в решті, призводить до появи задирів

(холодного заїдання) в зоні дискретних ділянок контакту по вершинах мікронерівностей поверхонь тертя (контактно-механічний аспект).

Для екстремальних умов роботи вузлів ДВЗ важливим чинником є температурний фактор, а саме, важливо провести порівняння середньовизначеної локальної температури на околицях фрикційного контакту та критичної локальної температури, яка характеризує пластично-деформований стан контакту у режимі граничного тертя, яке може виникати в зоні верхньої мертвої точки (в.м.т.) за ходом поршню двигуна. Визначення середньої локальної температури спочатку досягається встановленням різниці температур між об'ємною температурою оливи та локальною температурою на околицях фрикційного контакту. Недостатня середньовизначена температура, що визначається за сумою особливих точок температур на околицях фрикційного контакту, в порівнянні з номінальною критичною температурою, дає необхідні підстави щодо модифікування фізико-хімічного складу мастильних середовищ з метою забезпечення оптимальної структурної пристосованості модифікованих шарів до екстремальних умов роботи.

На сучасному етапі розвитку трибології недостатньо вирішених прикладних завдань щодо визначення максимальних контактних напружень та деформацій, які генеруються на дискретних ділянках у підповерхневій зоні фрикційного контакту та їх місцеположення. Вони необхідні для проведення адекватної оцінки напружено-деформованого стану реальних контактних поверхонь тертя у фактичних зонах частого руйнування за глибиною та вздовж напрямку кочення (в ортогональному напрямі). Відповідна оцінка напружено-деформованого стану поверхонь тертя надасть можливість підбирати оптимальну форму контакту за відповідними еквівалентними механічними властивостями. Проблема складає в тому, що існуючі розрахунки оцінки напружено-деформованого стану поверхонь тертя основані на вирішенні контактної задачі Герца, в яких форма контакту розраховується, а не вимірюється. Але, у реально змашених неконформних вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи, реально виміряна форма контакту суттєво відрізняється від розрахункової форми контакту. Таким чином, відповідні розрахунки задачі Герца за розрахованими даними форми контакту, можуть суттєво спотворювати результати, наприклад, для умов недостатнього мащення при змішаному терті, коли фактична форма контакту (рис. 1 б) суттєво відрізняється від форми контакту (рис. 1 а) в умовах мащення при рідинному терті. Насьогодні, реальну (фактичну) форму контакту можна виміряти тільки методом оптичної інтерферометрії.

Найбільш інформативним способом дослідження перехідних зон тертя, а саме від рідинного до змішаного тертя та від змішаного до граничного тертя, які виникатимуть при недостатньому мащенні, є застосування методу оптичної інтерферометрії та вивчення відповідних переходів з позиції мікро-ЕГД теорії мащення та граничного тертя. Характерні особливості мікро-ЕГД мащення наочно показані на мікроінтерферограмах (рис. 2 а, б).

В екстремальних умовах роботи неконформних вузлів тертя, яке пов'язано з виникненням недостатнього мащення при низькотемпературному режимі, коли мастильний матеріал не встигає потрапляти в зону контакту та вчасно зрелаксувати в зоні на виході з контакту у зв'язку з проявом неньютонівських властивостей мастильних шарів, зона (западина) мінімальної товщини (див. рис. 2 а) зміщується до центральної області контакту і формує другу западину вже у центральній області контакту (див. рис. 2 б). Відповідні западини товщини плівки впливають на закономірності утворення гідродинамічного та контактного тисків. Порушення стійкого мікро-ЕГД мащення настає, коли ефективність мащення характеризується переважанням контактного тиску P'_a на дискретних ділянках контакту над гідродинамічним тиском P'_f мастильного шару, тобто, коли $P'_a > P'_f$, але при цьому сумарний тиск P не перевищує критичного значення тиску $P_{кр}$ (рис. 3 а). Перевищення сумарного тиску P на ΔP (величину несучої здатності) призводить до розривів мастильного шару і до появи задиру. Товщина мастильного шару в зоні мікро-ЕГД контакту при змішаному терті неконформних вузлів тертя (див. рис. 3, а) має певні особливості, що відрізняє її від товщини ЕГД мастильного шару при рідинному терті, а саме, характерну западину в центральній

області контакту згідно мікроінтерферограми (див. рис. 2, б), що виникає в умовах недостатнього мащення.

При формуванні характерної западини профілю товщини мастильного шару в центральній області контакту $h_{МЕГД}$, як показано на рис. 3 а, спостерігається суттєве збільшення герцівського тиску $P_{МЕГД}$ відносно другого піку тиску (Петрусевича), що може бути вище критичного значення на величину несучої здатності плівки ΔP , тобто коли $P_{МЕГД} > P_{кр}$. Характерний місцевий сплеск (пульсація) контактного тиску від виступів мікронерівностей на дискретній ділянці в центральній зоні мікро-ЕГД контакту пов'язане з відповідним формуванням другої западини товщини мастильного шару в центральній області контакту, що призводить до розривів мастильного шару в відповідній зоні пульсації тиску.

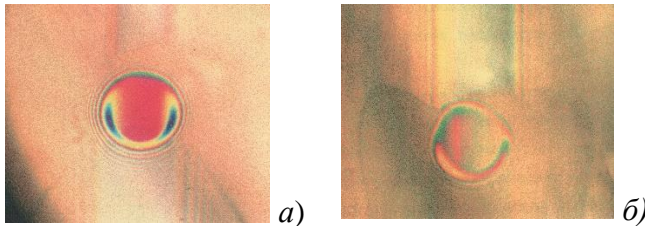


Рис. 1 а, б. Мікроінтерферограми фактичної форми точкового контакту підшипникового вузла в умовах стійкого мікро-ЕГД мащення (рідинного тертя) - (а) та недостатнього мащення (змішаного тертя) - (б).

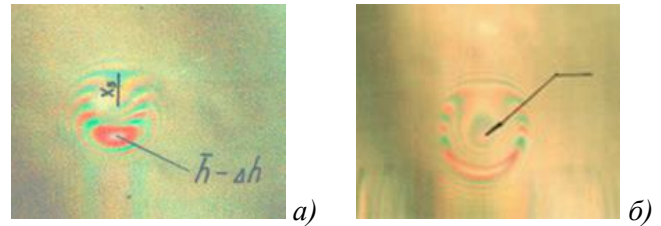


Рис. 2 а, б. Мікроінтерферограми мікро-ЕГД зони точкового контакту підшипникового вузла з характерним зміщенням (а) та формуванням западини (б) товщини плівки в центральній області контакту при низькотемпературному режимі.

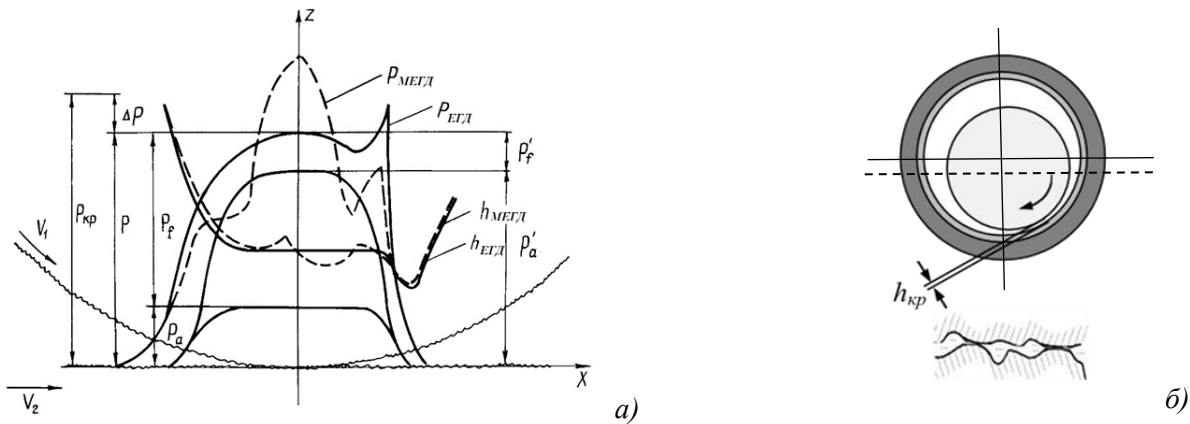


Рис.3 а, б. Розподіл тиску та товщини мастильного шару для ЕГД і мікро-ЕГД умов мащення (а), що виникають в мікроклинах контакту (б) неконформних вузлів: ΔP – несуча здатність контактних поверхонь; $P_{кр}$ – критичний тиск; P_f ; P'_f – гідродинамічний тиск ЕГД і мікро-ЕГД мастильних шарів; P_a ; P'_a – контактний тиск ЕГД і мікро-ЕГД мікронерівностей; $h_{ЕГД}$; $h_{МЕГД}$ – товщини ЕГД і МЕГД-мастильного шару.

Таким чином, в нестационарних умовах тертя в режимі «stop-and-go» («пуск-зупинка») вузлів тертя, перехід від рідинного до змішаного тертя і, навпаки, є **неминучим процесом**, що залежить від вчасного та регулярного постачання мастильного матеріалу в зону контакту. Вчасне та регулярне постачання мастильного матеріалу в зону контакту дуже складно реалізувати на практиці. У зв'язку з цим, прийнявши відповідний неминучий процес недостатнього мащення в екстремальних умовах роботи, питання реалізації стійкого мікро-ЕГД мащення розглядається за комплексним підходом щодо підвищення ефективності мащення і зносостійкості пар тертя за контактнo-механічним, реологічним та фізико-хімічним аспектами.

В розробленій моделі напружено-деформованого стану контактних поверхонь за фактичної форми контакту неконформних вузлів тертя в екстремальних умовах роботи, для оцінки впливу мастильного матеріалу, актуальним є встановлення межі переходу від рідинного до змішаного

тертя. Відповідна межа характеризується мікро-ЕГД мащенням, при якій товщини мастильного шару будуть практично розмірні з висотами мікронерівностей металевих поверхонь. Напрямами, які потребують подальших досліджень, є визначення характерних особливостей мікро-ЕГД контакту, що характеризуються впливом механічних властивостей матеріалу, реологічної оцінки в'язкості від тиску (п'єзокоефіцієнту в'язкості) та в'язкості від густини (стисливості) мастильних матеріалів. У відповідних умовах, важливим є врахування рівня шорсткості контактних поверхонь, оскільки виникатимуть дискретні ділянки контактного тиску матеріалу, що можуть досягати рівня гідродинамічного тиску мастильних шарів, які зменшують рівень підйомної сили та в'язкого тертя в зазорі мастильного шару. В екстремальних умовах роботи, інтенсифікація збільшення кількості дискретних ділянок контактного тиску від виступів мікронерівностей з характерними розривами мастильного шару, вимагає врахування шорсткості контактних поверхонь на всіх етапах теоретично-експериментальних досліджень щодо забезпечення стійкого режиму мащення в умовах змішаного тертя.

Внаслідок складного напружено-деформованого стану в зоні фрикційного контакту підшипникових вузлів в умовах змішаного тертя, значний вплив мають реологічні властивості мастильних шарів. В існуючих моделях мікро-ЕГД тертя, не враховується вплив реологічних властивостей мастильних матеріалів, а існують тільки певні узагальнення у вигляді гіпотетичних версій. Тому, проведення моделювання оцінки товщини мастильного шару з урахуванням зміни типу (реологічних властивостей) мастильних матеріалів в зоні фрикційного контакту, є перспективним напрямком підвищення ефективності мащення і зносостійкості пар тертя.

В екстремальних умовах роботи вузлів тертя незалежно від кінематики тертя, коли діють високі навантаження та локальні температури, хімічна дія з боку мастильного матеріалу та його компонентів (хімічно-активних речовин - ХАР або поверхнево-активних речовин - ПАР) суттєво впливає на стан структурної пристосованості модифікованих шарів при граничному терті. Це пов'язує з дією дотичних напружень значно більшої величини, які викликають появу на контактних поверхнях максимальних контактних напружень, що стимулюють втому самих поверхонь, у протилежність втому, що розвивається під поверхнею. Встановлено, що деякі ХАР і ПАР, знижують поверхневі сили і, таким чином, зменшують дотичні напруження, тим самим, підвищуючи втому довговічність.

На нинішньому стані застосування мастильних матеріалів, модифікування мастильних середовищ відповідними ХАР і ПАР для підвищення мастильної здатності модифікованих шарів і зносостійкості пар тертя, носять, в основному, фрагментальний характер і не розглядається це питання в комплексі. Актуальність останніх досліджень потребує встановлення взаємозв'язку якісного та кількісного хімічного складу компонентів в мастильному матеріалі та локальної температури (термомеханічної стійкості) на околицях фрикційного контакту, оскільки на сьогодні експериментально визначений і доведений ефект синергізму функціональної дії сумісно застосованих присадок різної природи в залежності від критичної температури. Підвищення мастильної здатності модифікованих шарів і зносостійкості пар тертя відбувається за рахунок утворення модифікованих шарів різної природи, а після їх руйнування починається взаємодія активних компонентів середовища з поверхнями тертя із утворенням хімічно утворених граничних шарів (ХМГШ), міцність яких залежить від термомеханічної стійкості відповідних шарів, що утворюються в зоні фрикційного контакту. Таким чином, забезпечення оптимальної термомеханічної стійкості, наряду з фізико-хімічними і реологічними властивостями модифікованих шарів, є важливим фактором наближення умов модельних випробувань до реальних умов експлуатації вузлів тертя та придання універсальності застосування мастильних матеріалів у гібридній техніці в якості моторної, трансмісійної та гідравлічної оливо.

В екстремальних умовах тертя домінує, як правило, змішаний режим мащення, тому моделювання оцінки ефективності мащення та зносостійкості пар тертя необхідно розглядати в комплексі з позиції контактної міцності напружено-деформованого стану, мікро-ЕГД умов тертя та

локальних температур в зоні мікро-ЕГД контакту з урахуванням зміни форми контакту та типу мастильного матеріалу за контактнo-механічними, реологічними та фізико-хімічними аспектами на основі результатів моделювання оцінки товщини мастильного шару та інтенсивності зношування пар тертя.

Приймаючи за увагу багатофакторність завдання підвищення ефективності мащення і зносостійкості підшипникових вузлів та вузлів ДВЗ, був задіяний комплексний підхід щодо оцінки контактнo-механічних, реологічних та фізико-хімічних аспектів, а на її основі, сформульовані відповідні мета та напрямки теоретичних і експериментальних досліджень.

У другому розділі запропоновано нову концепцію методології підвищення ефективності мащення та зносостійкості вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи, яка здебільшого підходить до умов змішаного тертя, де ведеться обґрунтування та методичне забезпечення функціональних зв'язків між механічними властивостями контактних деформованих поверхонь тертя та фактичною форми контакту, фізичними (реологічними) властивостями мастильних середовищ та товщиною мастильного шару, якісним і кількісним хімічним складом активних компонентів та структурною пристосовуваністю модифікованих шарів і характеристиками зношування підшипникових вузлів тертя та вузлів ДВЗ.

Для підшипникових вузлів тертя модернізовано стенд оптико-інтерферометричних досліджень, що забезпечує управління швидкоплинними процесами, які відбуваються в мікро-ЕГД мастильному шарі, при відтворенні якісної та кількісної картини підведення і розподілу мастильного матеріалу в межах фактичної форми контакту у всьому діапазоні зміни еліптичності від колового до практично лінійного контакту. Використання сучасної фото- та відео-телевізійної записуючої техніки дозволило з високою збіжністю результатів експериментів, оцінювати товщину мастильного шару у будь-якій локальній точці в межах зони мікро-ЕГД точкового контакту в умовах тертя кочення та кочення з частковим проковзуванням. Відповідне обладнання надає можливість адекватно оцінювати розподіл товщини мастильного шару в зоні мікро-ЕГД контакту, який знаходиться в напружено-деформованому стані за фактичної форми контакту.

Запропоновано методику оцінки механічної складової напружено-деформованого стану з урахуванням зміни фактичної форми контакту для підшипникових вузлів тертя, а саме, розроблений спрощений розрахунок максимальних контактних напружень і деформацій та максимальних дотичних напружень з відповідним положенням їх локалізації в підповерхневій зоні контакту за глибиною та вздовж напрямку кочення без використання складних розрахунків еліптичних інтегралів на ЕОМ. Відповідна оцінка дозволяє достовірно оцінювати напружено-деформований стан поверхонь за фактичної форми контакту реальних підшипникових вузлів тертя. В подальшому, це дозволило підбирати оптимальну форму контакту за відповідними еквівалентними механічними властивостями.

Розроблено методику оцінки реологічної складової мастильного матеріалу в залежності від зміни максимального контактного тиску та температури, а саме, оцінка зміни динамічної в'язкості та густини в залежності від контактного тиску і температури для підшипникових вузлів тертя. Визначений вплив типу (реологічних властивостей) мастильного матеріалу за визначеними залежностями: в'язкість – тиск – температура (п'єзокоефіцієнт в'язкості) і густина – тиск (стисливість) з метою відтворення реологічних процесів, які відбуваються в мастильному шарі в зоні мікро-ЕГД точкового контакту, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкостей та напружень зсуву мастильних шарів. Обґрунтовані основні триботехнічні параметри швидкості, навантаження, матеріалів та форми контакту для подальшої побудови математичної моделі оцінки товщини мастильного шару на основі емпіричних залежностей для підшипникових вузлів тертя.

Визначений функціонал впливу елементного складу і концентрації компонентів в мастильних середовищах на протизношувальні, протизадирні та антифрикційні властивості, а на її основі, розроблена двоетапна методика оцінки протизношувальних, протизадирних та антифрикційних властивостей модифікованих шарів за допомогою енерго-дисперсійного рентгено-флуорисцентного спектрометра (ЕДРФС) щодо оцінки якісного та кількісного хімічного складу компонентів в складі сумішей або олів, трибометра CSM для визначення сили тертя, товщини сформованих модифікованих шарів або лінійного зносу в залежності від пробігу досліджуваних

зразків в режимі реального часу та чотирикулькової машини тертя (ЧКМТ) щодо визначення діаметру плями зношування, індексу задиру та критичного навантаження в заводських умовах.

Для вузлів ДВЗ, модернізовано універсальний автоматизований стенд тертя (УАСТ) на базі машини тертя СМЦ-2 з програмованим комплексом у вигляді аналого-цифрового перетворювача (АЦП) для відтворення умов управління швидкоплинних процесів, що виникають в зоні фрикційного контакту в умовах тертя кочення з частковим проковзуванням (для неконформних вузлів ДВЗ) та тертя ковзання (для конформних вузлів ДВЗ) в нестационарних умовах (пуск – зупинка). Для обміну параметричною інформацією між перетворювачем (тензодатчиком) і ПК, розроблений програмований комплекс АЦП, який дозволив перетворювати аналогові сигнали параметричних даних у цифровий код і, таким чином, спостерігати результати випробувань в режимі реального часу. На УАСТ відтворена можливість досліджувати поля локальних температур тепловізійним методом на околицях фрикційного контакту при використанні різних режимів навантаження та температури щодо встановлення взаємозв'язку між об'ємною температури оливи та локальною температури в зоні контакту з метою визначення середньовизначеної локальної температури. Обґрунтовані основні триботехнічні параметри швидкості, навантаження, матеріалів та форми контакту з метою проведення статистичної обробки результатів експерименту щодо побудови математичної моделі оцінки товщини мастильного шару на основі емпіричних залежностей для вузлів тертя ДВЗ. Запропонована методика розрахунку товщини модифікованого шару та інтенсивності зношування пар тертя на основі результатів математичного моделювання оцінки триботехнічних параметрів для вузлів ДВЗ в зоні фрикційного контакту при зміні ходу поршню і кількості обертів двигуна та типу (реологічних властивостей) мастильних матеріалів.

Застосування автоматизованого та високоточного обладнання при моделюванні швидкоплинних процесів тертя в зоні контакту підшипникових вузлів тертя та вузлів ДВЗ в режимі реального часу на всіх етапах випробувань, дозволило проаналізувати кінетику розвитку трибологічних процесів залежно від часу напрацювання, форми контакту, типу мастильних середовищ за різним якісним та кількісним хімічним складом, поля локальних температур.

У третьому розділі запропоновано новий критеріальний підхід щодо модифікування фізико-хімічного складу мастильних середовищ для вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи, а також проаналізовані теоретичні аспекти трибологічних процесів, які протікають в модифікованому шарі в зоні фрикційного контакту.

Відповідний критеріальний підхід модифікування фізико-хімічного складу мастильних середовищ спрямоване на вирішення завдання підвищення зносостійкості і ефективності мащення вузлів тертя в екстремальних умовах роботи, ідентифікуючи за введеними критеріями (таблиця 1 і рис. 4) перехідні зони за умови: попередження розриву мікро-ЕГД мастильного шару при переході від рідинного до змішаного тертя; появи пластично-деформованого стану та збільшення термомеханічної стійкості при переході від змішаного до граничного тертя.

Таблиця 1. Критерії комплексної оцінки модифікування фізико-хімічного складу мастильних середовищ для вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи

№	Назва	Визначення
1	Критерій режиму мащення	$\lambda = \frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}$
2	Критерій еліптичності	$k' = 1,03 \cdot \beta^{0,64}.$
3	Критерій тиску	$\frac{P_h}{P_\Sigma} = \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{h_{min}}{h_0}\right)^{6,3}$
4	Реологічний критерій	$\alpha_{сер.} = \frac{\ln(\eta_1/\eta_2)}{P_2 - P_1}$
5	Критерій пластичності	$\mu = \frac{E'}{H_\mu} \cdot \left(\frac{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}{r}\right)^{\frac{1}{2}}$
6	Температурний критерій	$T_{сер.} = T_m + \Delta T$

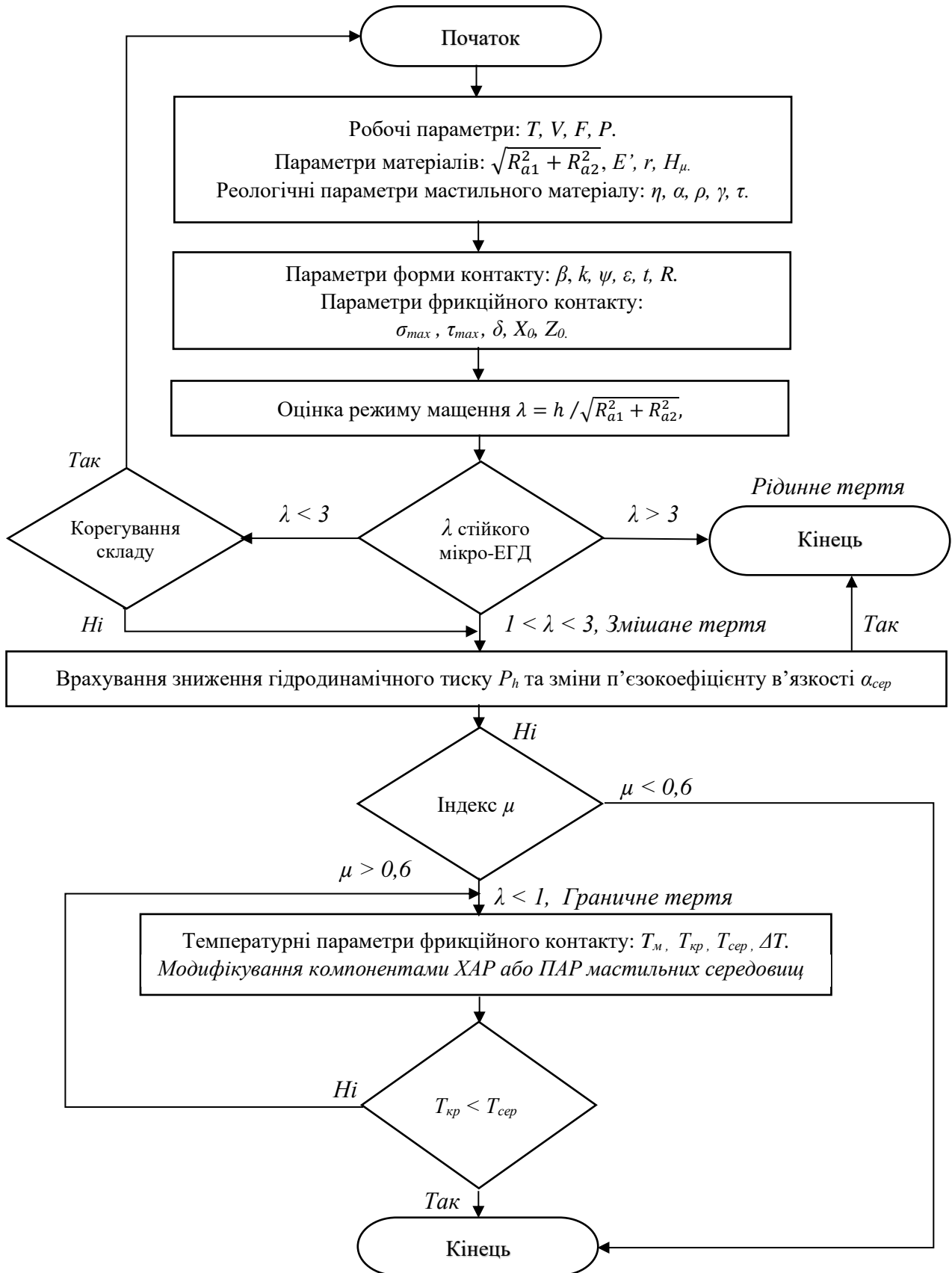


Рис. 4. Структурна схема критеріального підходу комплексної оцінки модифікування фізико-хімічного складу мастильних середовищ.

Визначені трансцендентні параметри обчислення еліптичних інтегралів для уточнення спрощеної методики розрахунку максимальних контактних напружень та деформацій, максимальних дотичних напружень з відповідним положенням їх локалізації в підповерхневій зоні

контакту за глибиною та вздовж напрямку кочення в локальній зоні фрикційного контакту тертя при зміні форми контакту. Загальна похибка обчислень ітераційним методом трансцендентних параметрів форми контакту i , розрахованих за спрощеною методикою, не перевищувало 4% (рис. 5 і 6). Результати такої незначної похибки вказує на достовірність і високу точність результатів, що наблизило умови модельних випробувань до реальних умов експлуатації.

Встановлено емпіричне співвідношення між параметром еліптичності k' та відношенням радіусів кривин β в діапазоні $1 \leq \beta \leq 25$, яке необхідно для критеріальної оцінки впливу еліптичності (див. таблицю 1) на товщину мастильного шару:

$$k' = 1,03 \cdot \beta^{0,64}. \quad (1)$$

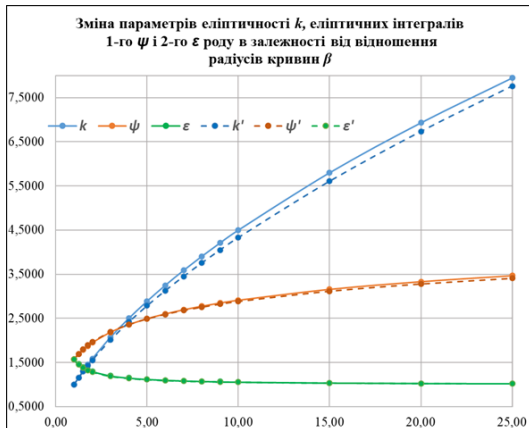


Рис. 5. Порівняння обчислених трансцендентних параметрів форми контакту (k , ψ , ε) і, визначених за спрощеним розрахунком (k' , ψ' , ε'), як функції відношення кривин β .

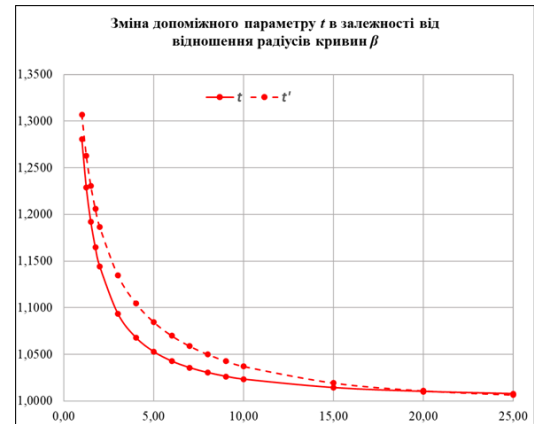


Рис. 6. Порівняння обчисленого трансцендентного допоміжного параметру форми контакту (t) і, визначеного за спрощеним розрахунком (t'), як функцію відношення кривин β .

Розглянуто основні аспекти товщини мастильного шару в зоні мікро-ЕГД контакту з урахуванням впливу шорсткості контактних поверхонь тертя.

Встановлено взаємозв'язок якісного і кількісного хімічного складу компонентів (ХАР або ПАР) в мастильних середовищах та режими зміни локальних температур в зоні фрикційного контакту, що в комплексі дозволяють оцінювати концентрацію компонентів, розчинених у вуглеводнях (нейтральних базових основах або в мастильних матеріалах), в залежності від об'ємної температури. Встановлено, що зміна локальних температур в зоні фрикційного контакту, по різному впливає на агрегований стан компонентів ХАР або ПАР в мастильному середовищі. Дотримання умови $T_{кр} < T_{сер}$, дає можливість застосовувати відповідні компоненти ХАР або ПАР в мастильному середовищі для збільшення термомеханічної стійкості модифікованих шарів в зоні фрикційного контакту вузлів, що працюють в екстремальних умовах роботи.

У четвертому розділі проведені експериментально-розрахункові дослідження впливу форми контакту та типу мастильних середовищ за контактнo-механічними, реологічними та фізико-хімічними аспектами щодо підвищення ефективності мащення та зносостійкості підшипникових вузлів тертя, які працюють в екстремальних умовах роботи.

Встановлено, що в екстремальних умовах роботи, коли підшипникові вузли тертя знаходяться в напружено-деформованому стані, збільшення еліптичності контакту суттєво зменшує рівень максимальних контактних напружень і деформацій, максимальних дотичних напружень та положення їх локалізації за глибиною та за напрямом кочення в підповерхневій зоні контакту, що пов'язано з рівномірним розподіленням контактного тиску у новоутвореній більш витягнутій зоні вздовж великій вісі еліптичного контакту. Підвищення контактного навантаження призводить до збільшення величин максимальних контактних напружень, деформацій, максимальних дотичних напружень та положення їх локалізації за глибиною та за напрямом кочення, але не впливає на характер зменшення відповідних напружень, деформацій та положення локалізації при збільшенні еліптичності форми контакту.

Визначено важливу роль впливу реології мастильних матеріалів для підшипникових вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи. Встановлено, що підвищення максимального контактного тиску у 2 рази, збільшує динамічну в'язкість мастильного шару в мікро-ЕГД контакті, в середньому у 50 разів, для більшості моторних, трансмісійних і універсальних олів. Причому, встановлено меншу чутливість олів з високим класом в'язкості від максимального контактного тиску щодо формування товщини мастильного шару, яке сприяє суттєвому збільшенню гідродинамічного тиску відносно контактного тиску, тобто, реалізації стійкого мікро-ЕГД мащення (рис. 7). Встановлено незначний вплив до 5% матеріалів металевих поверхонь на товщину мастильного шару в умовах мікро-ЕГД мащення, що є підтвердженням важливої ролі впливу саме реології мастильних матеріалів в порівнянні з матеріалами поверхонь тертя.

Встановлені умови реалізації стійкого мікро-ЕГД режиму мащення для підшипникових вузлів тертя в діапазоні зміни параметру режиму мащення $\lambda = 2,8 \div 3,2$, що відповідає пограничній зоні між рідинним та змішаним тертям, при якій починають порушуватись необхідні умови розриву мікро-ЕГД мастильного шару. Узагальнюючи закономірності зміни товщини мастильного шару, для забезпечення стійкого мікро-ЕГД режиму мащення, необхідно: для олів з низьким класом в'язкості мати швидкість у 2,6 рази більшу, ніж для олів з високим класом в'язкості і, приблизно - у 2 рази більшу, ніж для олів з середнім класом в'язкості при терті кочення. При терті кочення з частковим проковзуванням 15%, для забезпечення стійкого мікро-ЕГД режиму мащення, необхідно збільшувати швидкість, в середньому на 60%, щоб забезпечити формування товщини мастильного шару на 33% більшу, ніж при чистому терті кочення для всіх досліджуваних олів.

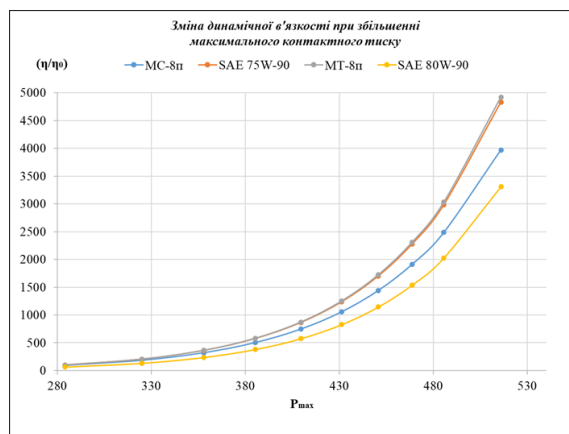


Рис. 7. Вплив реологічних властивостей (зміни динамічної в'язкості) досліджуваних олів при збільшенні максимального контактного тиску при температурі в зоні контакту $T = 343 \text{ K}$.

Також встановлені умови реалізації стійкого мікро-ЕГД режиму мащення для підшипникових вузлів тертя в діапазоні зміни параметру режиму мащення $\lambda = 2,8 \div 3,2$ при збільшенні контактного навантаження, при якому відбувається зменшення мінімальної товщини і товщини мастильного шару в центральній області контакту, що обумовлює перехід від рідинного до змішаного тертя. Причому, для олів низького і середнього класу в'язкості, мінімальна товщина мастильного шару зменшується, в середньому на 13%, для олів високого класу в'язкості – на 11% при збільшенні контактного навантаження, тобто, оливи високого класу в'язкості мають меншу чутливість щодо збільшення контактного навантаження за рахунок формування мастильних шарів високої несучої здатності на поверхнях тертя.

Для підшипникових вузлів тертя, встановлено формування товщини мастильного шару при зміні параметру режиму мащення $\lambda = 2,4 \div 4,0$ в межах мікро-ЕГД мащення при збільшенні відношення радіусів кривин в діапазоні $1 \leq \beta \leq 25$ для всіх досліджуваних олів. Збільшення форми контакту у відповідному діапазоні для всіх досліджуваних олів, призводить до підвищення мінімальної товщини в зоні мікро-ЕГД контакту, в середньому у 2 рази, а товщини мастильного шару в центральній області мікро-ЕГД контакту, в середньому на 40%. Причому, суттєве підвищення саме мінімальної товщини мастильного шару відносно товщини в центральній області

контакту при збільшенні еліптичності форми контакту, свідчить про зменшення западни мінімальної товщини (див. рис. 2 а, б) в зоні контакту.

Згідно розробленої двоетапної методики підвищення ефективності мащення і зносостійкості пар тертя підшипникових вузлів щодо встановлення оптимального якісного та кількісного хімічного складу мастильних середовищ (сумішей та олів) із досліджуваними активними компонентами, визначені оптимальні суміші (Зразки 1, 2, 3) у визначених концентраціях на першому етапі за протизношувальними, протизадирними і антифрикційними властивостями. На другому етапі, визначений кращий зразок (Зразок 3), якій містить модифікатор тертя сульфідної групи EP у визначеній концентрації - 2,1% за наступними результатами (рис. 8-9): за формуванням оптимальної товщини (до 150 нм) модифікованих шарів та швидкістю їх адаптування (на 700 м) до екстремальних умов тертя з самого початку пробігу до стабілізації беззношувального процесу тертя (на 9000 м, див. рис. 8), за стрімким падінням сил тертя - на 40% впродовж 1000 м і подальшим їх стабілізуванням до кінця пробігу (див. рис. 9). Далі (таблиця 2), модифікатор тертя сульфідної групи EP у концентрації 2,1% в складі модифікованої моторно-трансмісійної оливи ПРОТЕК ЄМТ-8, підтвердив кращі результати при порівнянні зі штатною оливою МТ-8п: за збільшенням критичного навантаження на 78Н, за зменшенням діаметру плями зношування на 10% та за збільшенням індексу задиру на 18% при всіх рівних умовах випробувань.

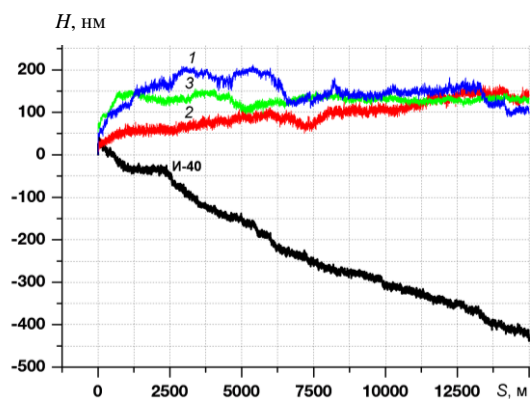


Рис. 8. Залежність товщини модифікованого шару (глибини відбитку лінійного зносу) H від пробігу S на 2-му етапі випробувань досліджуваних зразків: 1 — Зразок 1; 2 — Зразок 2; 3 — Зразок 3; 4 — I-40A.

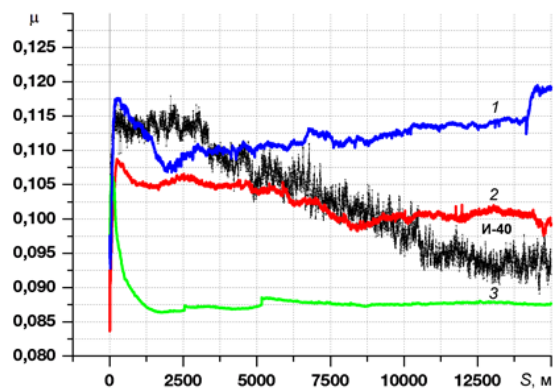


Рис. 9. Залежність коефіцієнту тертя μ від пробігу S досліджуваних зразків: 1 — Зразок 1; 2 — Зразок 2; 3 — Зразок 3; 4 — I-40A в чистому вигляді.

Таблиця 2. Результати триботехнічних досліджень на ЧКМТ моторно-трансмісійних олів ПРОТЕК ЄМТ-8 і МТ-8п.

Найменування показників	Модифікована олива ПРОТЕК ЄМТ-8	Штатна олива МТ-8п
Триботехнічні характеристики олів за температурою 293К впродовж 1 години випробувань:		
- Індекс задиру (I_z), Н, не менше;	580	490
- Критичне навантаження (P_k), Н, не менше;	1381	1303
- Діаметр плями зношування (D_z) при контактному навантаженні за Герцом – 196Н, тривалість випробування – 1 год., мм, не більше.	0,29	0,32

У п'ятому розділі проведені експериментально-розрахункові дослідження вузлів ДВЗ в нестационарних умовах тертя, які працюють в екстремальних умовах роботи при низькотемпературному запуску, за контактено-механічними, реологічними та фізико-хімічними аспектами щодо підвищення ефективності мащення та зносостійкості вузлів ДВЗ.

Для неконформних вузлів ДВЗ за кінетикою зміни мікротвердості модифікованих шарів сталі 40Х та шорсткості відстаючої контактної поверхні в умовах тертя кочення з частковим проковзуванням 15% при збільшенні контактних напружень, визначена оптимальна суміш сульфідної групи EP з концентрацією 2,1%.

Встановлено, що з 1200 до 2400 циклів – це єдина суміш, яка зміцнює випереджаючу поверхню до 200 МПа, а відстаючу поверхню - розміцнює тільки до 100 МПа в порівнянні з іншими зразками. Незалежно від рівня контактних напружень для відповідної суміші, мінімальне тертя спостерігається при мінімальній шорсткості $R_a = 0,32$ мкм. При середніх контактних напруженнях ($\sigma_{max} = 570$ МПа), характерно зменшення шляху припрацювання по мірі зменшення вихідної шорсткості поверхні в зоні фрикційного контакту, що обумовлено зменшенням коефіцієнту тертя за рахунок наявності в мастильному середовищі ХАР у вигляді суміші сульфідної групи ЕР у визначеній концентрації.

Для неконформних вузлів ДВЗ встановлена наявність двох ділянок реологічної складової досліджуваних сумішей з ХАР, що розділяє прояв ньютонівських і неньютонівських властивостей при збільшенні градієнту швидкості зсуву в умовах низькотемпературного запуску. Визначена межа переходу із первинної у вторинну реологічну ділянку, коли досліджувані суміші з різними компонентами ХАР, починають проявляти неньютонівські властивості за різних швидкостей зсуву: суміш з модифікатором тертя СФ в концентрації 1,61% - при швидкості зсуву $3,4 \cdot 10^6$ с⁻¹; суміш з присадкою ДФЦ – при швидкості зсуву $4 \cdot 10^6$ с⁻¹; суміш з модифікатором тертя ЕР в концентрації 2,1% – при швидкості зсуву $4,4 \cdot 10^6$ с⁻¹ (рис. 10).

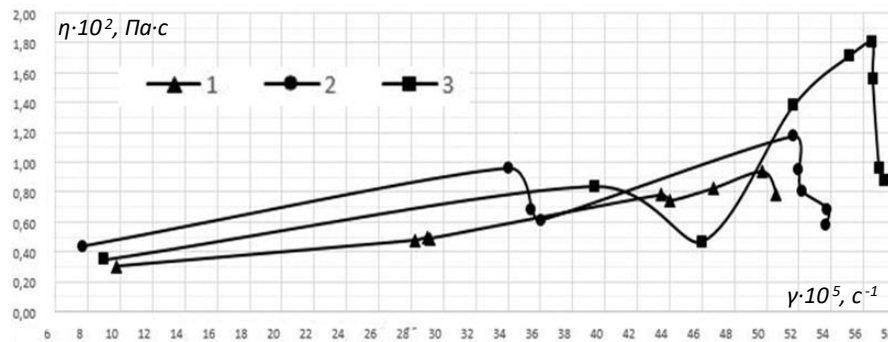


Рис. 10. Зміна ефективної в'язкості η від градієнту швидкості зсуву γ ($\sigma_{max} = 680$ МПа) при низькотемпературному запуску впродовж прогрівання від $T = 255$ К до 348К для досліджуваних зразків: 1 – Зразок 1; 2 – Зразок 2, 3 – Зразок 3.

Таким чином, визначено, що суміш з модифікатором тертя сульфідної групи ЕР в концентрації 2,1% (Зразок 1), забезпечує оптимальну мастильну здатність модифікованих шарів за найбільших швидкостей зсуву, що вказує на високі енергозберігаючі властивості та кращу механічну стабільність щодо прояву неньютонівських властивостей в порівнянні з іншими сумішами. Аналіз експериментальних досліджень динаміки зміни товщини мастильного шару (рис. 11) і антифрикційних властивостей (коефіцієнту тертя, рис. 12) показав найкращі триботехнічні властивості Зразку 1, який створює на відстаючій поверхні найміцніші хімічно модифіковані граничні шари (ХМГШ), де суттєву роль відіграє рівень концентрації (кількісного складу) відповідних активних хімічних компонентів.

Для конформних вузлів ДВЗ в нестационарних умовах тертя ковзання при змішаному терті впродовж прогрівання, визначена оптимальна суміш з фулереноподібних структур $C_{60} - C_{70}$ (СФС) в концентрації 2% за кінетикою зміни напруження зсуву, градієнту швидкості зсуву та ефективної в'язкості та за динамікою формування товщини поверхневого шару і зміни коефіцієнту тертя від напрацювання, яке пояснюється полегшенням проходження зсувних процесів, в середньому на 25%, у модифікованому шарі практично з перших секунд напрацювання, високими полімеризаційними властивостями молекул фулерену, які створюють полімеризаційні шари у вигляді самогенеруючих органічних плівок (СОП), зменшеним та стабільним напруженням зсуву (механічною взаємодією між поверхневими шарами) при високих швидкостях зсуву.

За динамікою формування товщини модифікованого шару та зміни коефіцієнту тертя від напрацювання, встановлений суттєвий вплив концентрації компонентів поверхнево-активних речовин (ПАР) у вигляді СФС на закономірності формування СОП в нестационарних умовах тертя ковзання при низькотемпературному запуску впродовж прогрівання. Активація полімеризаційної

здатності компонентів у вигляді СФС призводить до поліпшення триботехнічних характеристик та покращення реологічних властивостей модифікованих шарів і знаходиться в прямій залежності від концентрації сумішей у відповідних умовах.

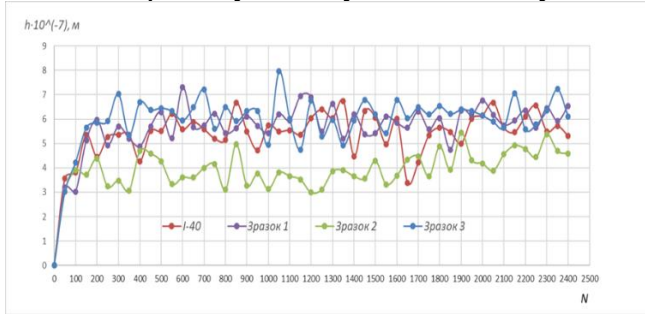


Рис. 11. Динаміка формування товщини модифікованого шару h від напрацювання N ($\sigma_{max} = 550$ МПа) при $\gamma = 4 \cdot 10^6$ с⁻¹ в умовах низькотемпературного запуску впродовж прогрівання від $T = 255$ К до 348 К для досліджуваних зразків: 1 – Зразок 1; 2 – Зразок 2, 3 – Зразок 3.

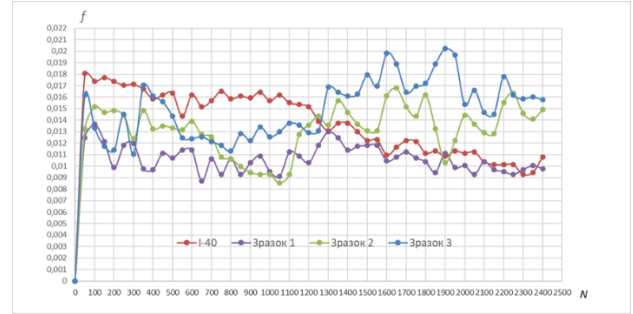


Рис. 12. Динаміка зміни коефіцієнту тертя f від напрацювання N ($\sigma_{max} = 550$ МПа) при $\gamma = 4 \cdot 10^6$ с⁻¹ в умовах низькотемпературного запуску впродовж прогрівання від $T = 255$ К до 348 К для досліджуваних зразків: 1 – Зразок 1; 2 – Зразок 2, 3 – Зразок 3.

Для неконформних вузлів ДВЗ за кінетикою зносу роликів (рис. 13 а, б і 14 а, б) в нестаціонарних умовах тертя кочення з частковим проковзуванням 15%, визначена істотна відмінність лінійного зносу для випереджаючої та відстаючої поверхонь. Встановлено, що зростання лінійного зносу для випереджаючої поверхні складає 15%, а для відстаючої поверхні - 49% при $T = 348$ К. Сумарний лінійний знос поверхонь тертя при збільшенні контактних напружень до $\sigma_{max} = 680$ МПа перевищує аналогічний показник при $\sigma_{max} = 550$ МПа - у 3,2 рази. Впродовж прогрівання до $T = 363$ К, встановлено, що зростання лінійного зносу для випереджаючої поверхні складає 9%, а для відстаючої поверхні - 16%. Сумарний лінійний знос поверхонь тертя при збільшенні контактних напружень до $\sigma_{max} = 680$ МПа перевищує аналогічний показник при $\sigma_{max} = 550$ МПа - у 1,78 рази. Таким чином, для відстаючої контактної поверхні при максимальному напруженні $\sigma_{max} = 680$ МПа впродовж прогрівання до температури $T = 363$ К, спостерігається суттєве зменшення лінійного зносу, що пов'язане з деяким сповільненням інтенсивності зношування більш небезпечних дискретних ділянок за рахунок утворення міцних ХМГШ з компонентів ХАР сульфідної групи ЕР у визначеній концентрації 2,1% (Зразок 1), які локально екранують відповідними захисними плівками пошкоджені локальні зони фрикційного контакту поверхню відстаючого ролику в нестаціонарних умовах тертя кочення з проковзуванням.

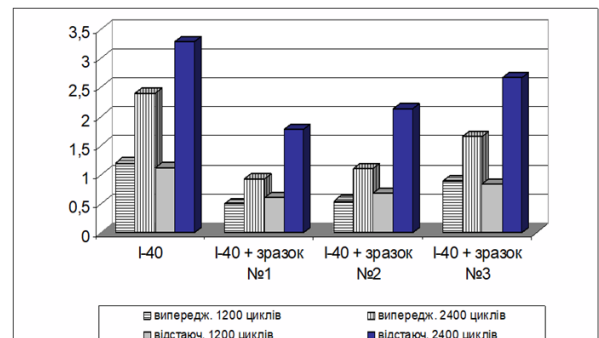
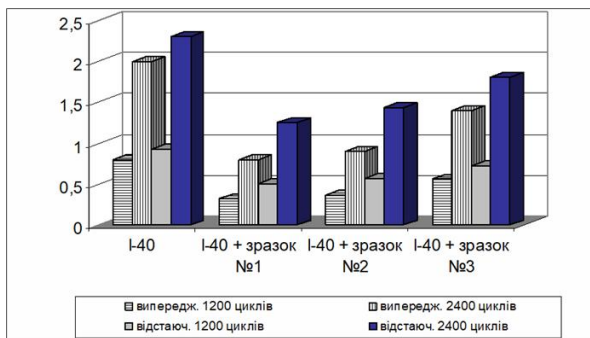


Рис. 13 а, б. Лінійний знос L_i поверхонь тертя для сумішей I-40A, 1; 2; 3: а) $\sigma_{max} = 550$ МПа; б) $\sigma_{max} = 680$ МПа, впродовж прогрівання до $T = 348$ К.

Для конформних вузлів ДВЗ за кінетикою зносу втулки в нестаціонарних умовах тертя ковзання, визначений суттєвий вплив концентрації СФС на рівень лінійного зносу досліджуваних сумішей: значення лінійного зносу змінюється в достатньо широкому діапазоні (0,48...0,67 мкм) по мірі збільшення концентрації від 0,5 до 3%.

Причому, встановлена певна закономірність щодо зміни лінійного зносу впродовж 2400 циклів напрацювання по мірі збільшення концентрації від 0,5 до 3%: спочатку - зменшення

лінійного зносу при досяганні мінімального значення з концентрацією СФС у 2%; надалі - збільшення лінійного зносу при досяганні максимального значення з концентрацією СФС у 3%. Для досліджуваної суміші СФС з 2%-ою концентрацією СФС, визначено мінімальне значення лінійного зносу, що становить 0,48 мкм, або на 25% меншою, при порівнянні з мінімальною концентрацією СФС у 0,5% (рис. 15 а, б).

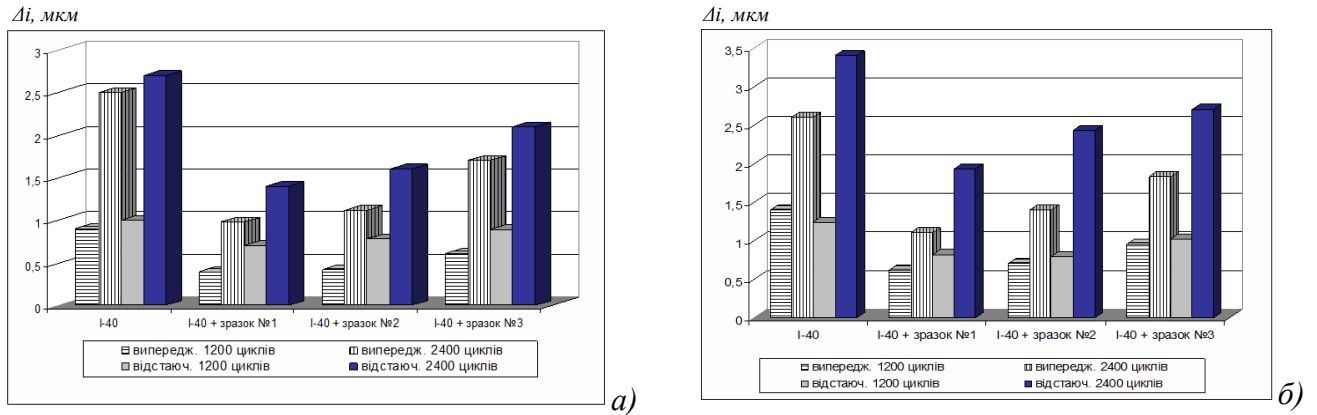


Рис. 14 а, б. Лінійний знос Δi поверхонь тертя для сумішей I-40A, 1; 2; 3:
а) $\sigma_{\text{max}} = 550 \text{ МПа}$; б) $\sigma_{\text{max}} = 680 \text{ МПа}$, впродовж прогрівання до $T = 363\text{K}$.

Відповідні фрактографічні дослідження доріжок тертя (рис. 16 а, б), зроблені за допомогою растрового електронного мікроскопу JEOL NEOSCOPE JCM 5000, підтвердили формування модифікованого шару при полімеризації СОП в зоні фрикційного контакту з характерною оплавленою та монолітною структурою поверхні після напрацювання 2400 циклів з суміші СФС у визначеній концентрації 2%, що характерно для стабільної та зміцненої субмікроструктури поверхневих шарів металу.

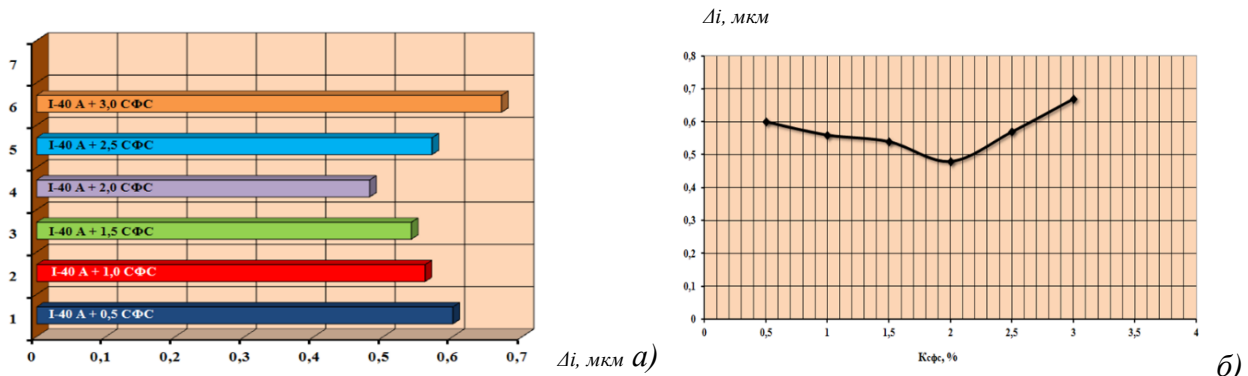


Рис. 15 а, б. Діаграма (а) та залежність (б) лінійного зносу Δi досліджуваних сумішей СФС з різною концентрацією при $\sigma_{\text{max}} = 68 \text{ МПа}$ впродовж прогрівання до $T = 363\text{K}$.

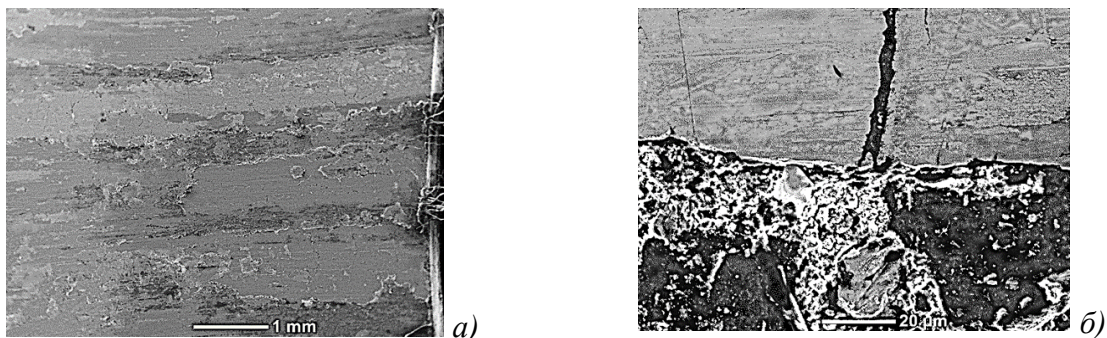


Рис. 16 а, б. Мікрофотографії доріжок тертя зони фрикційного контакту поверхні ролику після напрацювання 2400 циклів з суміші СФС в концентрації 2% впродовж прогрівання до $T = 363\text{K}$ при $\sigma_{\text{max}} = 68 \text{ МПа}$ зі збільшенням зображення у 100 (а) та 5000 разів (б) відповідно.

Для неконформних вузлів ДВЗ в нестаціонарних умовах тертя кочення з частковим проковзуванням 15% впродовж прогрівання до $T = 363K$, проведені дослідження модифікованої оливи ПРОТЕК ЄМТ-8, до якої додали модифікатор тертя сульфідної групи EP у визначеній концентрації 2,1%. За кінетикою зміни швидкості зсуву та ефективної в'язкості впродовж прогрівання до максимальної температури $T = 363K$, встановлено, що для модифікованої оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 в порівнянні зі штатною оливою МТ-8п, до кінця напрацювання у 2400 циклів: значення градієнту швидкості зсуву є вищим на 11%; значення ефективної в'язкості є вищим на 10%.

Таким чином, визначено, що модифікована олива ПРОТЕК ЄМТ-8 має кращі реологічні властивості в порівнянні зі штатною оливою МТ-8п при низькотемпературному запуску впродовж прогрівання, оскільки може працювати за більш високих швидкостей зсуву.

Для відповідних умов напрацювання, було встановлено пряму залежність коефіцієнту тертя від зміни напруження зсуву в зоні фрикційного контакту незалежно від температури. За динамікою зміни антифрикційних властивостей, для модифікованої оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 визначена сумарна величина коефіцієнту тертя (напруження зсуву), в середньому, меншою на 60% в порівнянні зі штатною оливою МТ-8п впродовж прогрівання до $T = 363K$, що вказує на суттєво зменшені енерговитрати на подолання внутрішнього тертя при застосуванні даної оливи за рахунок збільшення ефективної в'язкості при високих температурах.

За динамікою формування товщини модифікованого шару, що відбувається тільки при зупинках в нестаціонарних умовах тертя кочення з частковим проковзуванням 15% впродовж прогрівання до $T = 363K$, встановлено, що мастильна здатність модифікованих шарів при застосуванні модифікованої оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 підвищується за рахунок збільшення негідродинамічної складової товщини модифікованого шару в зоні фрикційного контакту на 60% в порівнянні зі штатною оливою МТ-8п на початку напрацювання. До кінця напрацювання (2400 циклів) – спостерігається поступове зростання і стабілізація негідродинамічної складової товщини модифікованого шару для штатної оливи МТ-8п, меншою в середньому на 67%, в порівнянні з модифікованою оливою ПРОТЕК ЄМТ-8.

Встановлені умови модифікування якісного та кількісного хімічного складу активних компонентів в складі модифікованих олив для конформних вузлів ДВЗ, які працюють в нестаціонарних умовах тертя ковзання, щодо забезпечення стійкого мащення та підвищення зносостійкості пар тертя. Для цього, досліджувались наномодифікатори СФС з відповідними концентраціями, в складі моторно-трансмісійної оливи ПРОТЕК ЄМТ-8, який мав вже в своєму складі модифікатор тертя EP. Необхідність додавання наномодифікаторів СФС в оптимальній концентрації до оливи ПРОТЕК ЄМТ-8, було важливим для перевірки їх синергетичної дії. Відповідний синергізм важливий, перш за все, для умов пластично-деформованого контакту конформних вузлів ДВЗ при низькотемпературному запуску впродовж прогрівання, де необхідно створювати на контактних поверхнях полімеризаційні шари, що краще адаптуються до процесів самоорганізації і самовідновлення в нестаціонарних умовах тертя ковзання. Результати показали, що при введенні до складу оливи ПРОТЕК ЄМТ-8 суміші фулереноподібних структур C_{60} - C_{70} в концентрації 2% спостерігається збільшення негідродинамічної складової товщини мастильного шару у 2 рази, зменшення коефіцієнту тертя у 2,4 рази та зменшення лінійного зносу у 2,2 рази.

Для конформних вузлів ДВЗ за динамікою формування товщини мастильного шару (рис. 17) та кінетикою зносу колодки від тривалості випробувань (рис. 18) в нестаціонарних умовах тертя ковзання впродовж прогрівання до $T = 363K$, визначений суттєвий вплив концентрації СФС в складі вже модифікованої моторної оливи АРІАН Ультрагаз, яка також мала в своєму складі модифікатор тертя EP у визначеній концентрації.

Таким чином, була підтверджена універсальність та синергізм ультрадисперсних наномодифікаторів на основі суміші фулеренів (СФС) з модифікаторами тертя EP. Відповідні результати можуть бути пояснені прискореним і вчасним адаптуванням процесів самоорганізації і самовідновлення новоутворених СОП до екстремальних умов роботи. Характерною рисою утворення СОП від компонентів СФС, є те, що дані плівки в прискореному режимі адаптуються та екранують контактні поверхні, саме в екстремальних умовах роботи, завдяки чому, мікропластичні

деформації локалізуються в тонкому приповерхневому шарі фулеріту за рахунок його пористої структури, запобігає розповсюдженню цих деформацій у глибину металу, що і забезпечує зміцнення модифікованого шару. Тому, згідно правила позитивного градієнту механічних властивостей за глибиною, утворення відповідних плівок, сприяє реалізації зовнішнього тертя щодо запобігання схоплювання 1-го роду, холодного заїдання та задиру.



Рис. 17. Динаміка формування товщини мастильного шару h від тривалості випробувань t впродовж прогрівання до $T = 363K$ ($\sigma_{max} = 68$ МПа) при швидкості зсуву $\gamma = 4 \cdot 10^6$ с⁻¹ для зразків: 1 – Ультрагаз; 2 – Ультрагаз + 1% СФС; 3 – Ультрагаз + 2% СФС; 4 – Ультрагаз + 3% СФС; 5 – Ультрагаз + 5% СФС.

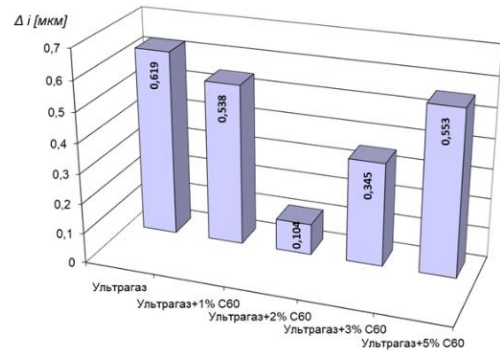


Рис. 18. Кінетика зміни лінійного зносу Δi від тривалості випробувань t впродовж прогрівання до $T = 363K$ ($\sigma_{max} = 68$ МПа) при швидкості зсуву $\gamma = 4 \cdot 10^6$ с⁻¹ для зразків: 1 – Ультрагаз; 2 – Ультрагаз + 1% СФС; 3 – Ультрагаз + 2% СФС; 4 – Ультрагаз + 3% СФС; 5 – Ультрагаз + 5% СФС.

Кореляція між температурою в зоні контакту і об'ємною температурою модифікованої оливи АРІАН Ультрагаз за початковий період напрацювання при $\sigma_{max} = 55$ МПа, склала від 6% до 34% по мірі підвищення температури в досліджуваному діапазоні. Причому, локальна температура лінійно збільшується досягаючи максимальної температури $T = 380K$ по закінченні напрацювання, при якій різниця температури оливи і локальної температури дорівнює в середньому - $\Delta T = 25K$. Кореляція між локальною температурою в зоні фрикційного контакту і об'ємної температури модифікованої оливи АРІАН Ультрагаз за початковий період напрацювання при $\sigma_{max} = 68$ МПа, склала від 4% до 58% по мірі підвищення температури в досліджуваному діапазоні. Причому, локальна температура лінійно збільшується досягаючи максимальної температури $T = 382,4K$ по закінченні напрацювання, при якій різниця температур дорівнюватиме вже, в середньому - $\Delta T = 40K$.

Таким чином, визначена кореляція між температурою в локальній зоні фрикційного контакту і об'ємною температурою модифікованої оливи АРІАН Ультрагаз при збільшенні максимального контактного напруження від 55 МПа до 68 МПа, призводить до підвищення рознесення кореляційних лінійних залежностей в бік високих температур, в середньому на $\Delta T = 15K$, тим самим, пояснюється важливість врахування збільшення локальної температури в зоні контакту відносно об'ємної температури оливи при збільшенні навантаження. Відповідне корегування температур потрібно у зв'язку з тим, що об'ємна температура оливи, яка вимірюється термопарою, не враховує швидкоплинні процеси щодо витрат частини роботи тертя в локальній зоні контакту. В умовах напрацювання до 15 циклів, встановлена збільшена термомеханічна стійкість модифікованої оливи АРІАН Ультрагаз в порівнянні зі штатною оливою МТ-8п, в середньому на $\Delta T = 23K$, що підтверджує кращу структурну пристосовуваність модифікованих шарів відповідної модифікованої оливи до екстремальних умов роботи.

У шостому розділі побудовано математичні моделі напружено-деформованого фрикційного контакту з урахуванням зміни фактичної форми контакту при збільшенні контактної навантаження та оцінки ефективності мащення і зносостійкості підшипникових вузлів тертя та вузлів ДВЗ, що працюють в екстремальних умовах роботи.

Побудовано математичну модель напружено-деформованого фрикційного контакту з урахуванням зміни фактичної форми контакту, що дозволяє розробити механізми зменшення

максимальних контактних напружень та деформацій, максимальних дотичних напружень та положення їх локалізації за глибиною та за напрямом кочення в підповерхневій зоні контакту.

При вирішенні однофакторної нелінійної задачі, був встановлений взаємозв'язок між параметром еліптичності та відношенням радіусів кривин (див. рівняння 2, таблиця 3).

При вирішенні багатофакторної нелінійної задачі використовувався метод нелінійної множинної регресії, який дозволив врахувати складні залежності між параметрами, швидкоплинність та неоднакову чутливість процесів до змін різних параметрів.

Загальні сигнатури рівнянь 3 – 7, що наведені в таблиці 3, показують результати математичного моделювання напружено-деформованого фрикційного контакту за зменшенням максимальних контактних напружень σ_{max} і деформацій δ та максимальних дотичних напружень τ_{max} і положення їх локалізації за глибиною Z та за напрямом кочення X в підповерхневій зоні контакту при збільшенні еліптичності контакту k з урахуванням контактного навантаження F .

Таблиця 3. Результати математичної моделі напружено-деформованого стану та її перевірка щодо ступеню відповідності та адекватності значень при зміні еліптичності контакту.

№ рівняння	Загальні сигнатури рівнянь згідно контактено-механічного моделювання	$F_{розр.}$	$F_{табл.}$	$e, \%$
(2)	$k = 1.0166 \cdot \beta^{0.64}$	-	-	0,3
(3)	$\sigma_{max} = 282.9272 \cdot \beta^{-0.9013} \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot k.$	128189,7	3,0984	3,16
(4)	$\delta = 0.1633 \cdot \beta^{-0.8597} \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot k.$	$4,07e^{+11}$	3,0984	3,22
(5)	$\tau_{max} = 61.5671 \cdot \beta^{-0.8528} \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot k.$	$2,56e^{+7}$	3,0984	0,27
(6)	$z = 21.7169 \cdot \beta^{-0.8646} \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot k.$	$2,11e^{+8}$	3,0984	0,41
(7)	$x = 33.6867 \cdot \beta^{-0.828827} \cdot F^{\frac{1}{3}} \cdot k.$	$7,41e^{+8}$	3,0984	0,73

В результаті побудови моделі було встановлено, що збільшення еліптичності k або відношення радіусів кривин β в межах зміни всього діапазону форми точкового контакту від колового ($k = 1$; $\beta = 1$) до майже лінійного контакту ($k = 8$; $\beta = 25$), призводить до зменшення максимальних контактних напружень σ_{max} - на 90% (рис. 19, а), до зменшення деформацій δ - на 86% (рис. 19, б), до зменшення максимальних дотичних напружень τ_{max} - на 85% (рис. 19, в), до зменшення положення локалізації максимальних дотичних напружень за глибиною Z - на 86% (рис. 19, г) та за напрямом кочення X - на 83% (рис. 19, д), що вказує на рівномірне розподілення тиску у новоутвореній більш витягнутій зоні вздовж великій вісі еліптичного контакту.

Крім того, було встановлено місцеположення зони локалізації концентратора дотичних напружень в підповерхневій зоні контакту, в якій збільшення еліптичності форми контакту сприяє перерозподілу контактеного напруження на 3% більшою в ортогональному напрямку кочення, ніж по глибині. Результати порівняльної оцінки моделювання (див. таблицю 3) за критерієм Фішера щодо розрахункових $F_{розр.}$ і табличних $F_{табл.}$ значень показали, виконання умови $F_{розр.} > F_{табл.}$, яка вказує на високу ступінь відповідності та адекватності значень.

Надалі, був проведений попередній порівняльний аналіз результатів експериментальних досліджень за плануванням експерименту і результатів розрахунків за Хемроком-Даусоном, які використали 34 комбінації впливу кожного параметру на мінімальну і центральну товщини мастильного шару. В результаті, було встановлено задовільну розбіжність впливу кожного безрозмірного параметру на мінімальну і центральну товщини мастильного шару відповідно: для безрозмірного параметру швидкості U - не вище 12% і 14% для усіх досліджуваних олив відповідної в'язкості η_0 ; для безрозмірного параметру навантаження W - не вище 11% і 13%; для безрозмірного параметру форми контакту β - не вище 13% і 18%; для безрозмірного параметру матеріалів G - не вище 20% і 24% для усіх груп досліджуваних матеріалів ($G1 - G4$).

Загальні сигнатури рівнянь згідно моделювання оцінки ефективності мащення підшипникових вузлів тертя, що описують вплив безрозмірних параметрів швидкості U і навантаження W з урахуванням зміни еліптичності контакту k та типу мастильного матеріалу відповідної в'язкості η_0 ,

безрозмірного параметру матеріалів G з урахуванням зміни контактного тиску P , приведенного модуля пружності E' та типу мастильного матеріалу відповідної в'язкості η_0 , п'єзокоефіцієнту в'язкості $\alpha_{сер}$ з урахуванням зміни контактного тиску P , в'язкісно-температурного коефіцієнту S_0 та типу мастильного матеріалу відповідної в'язкості η_0 , наведені в таблиці 4.

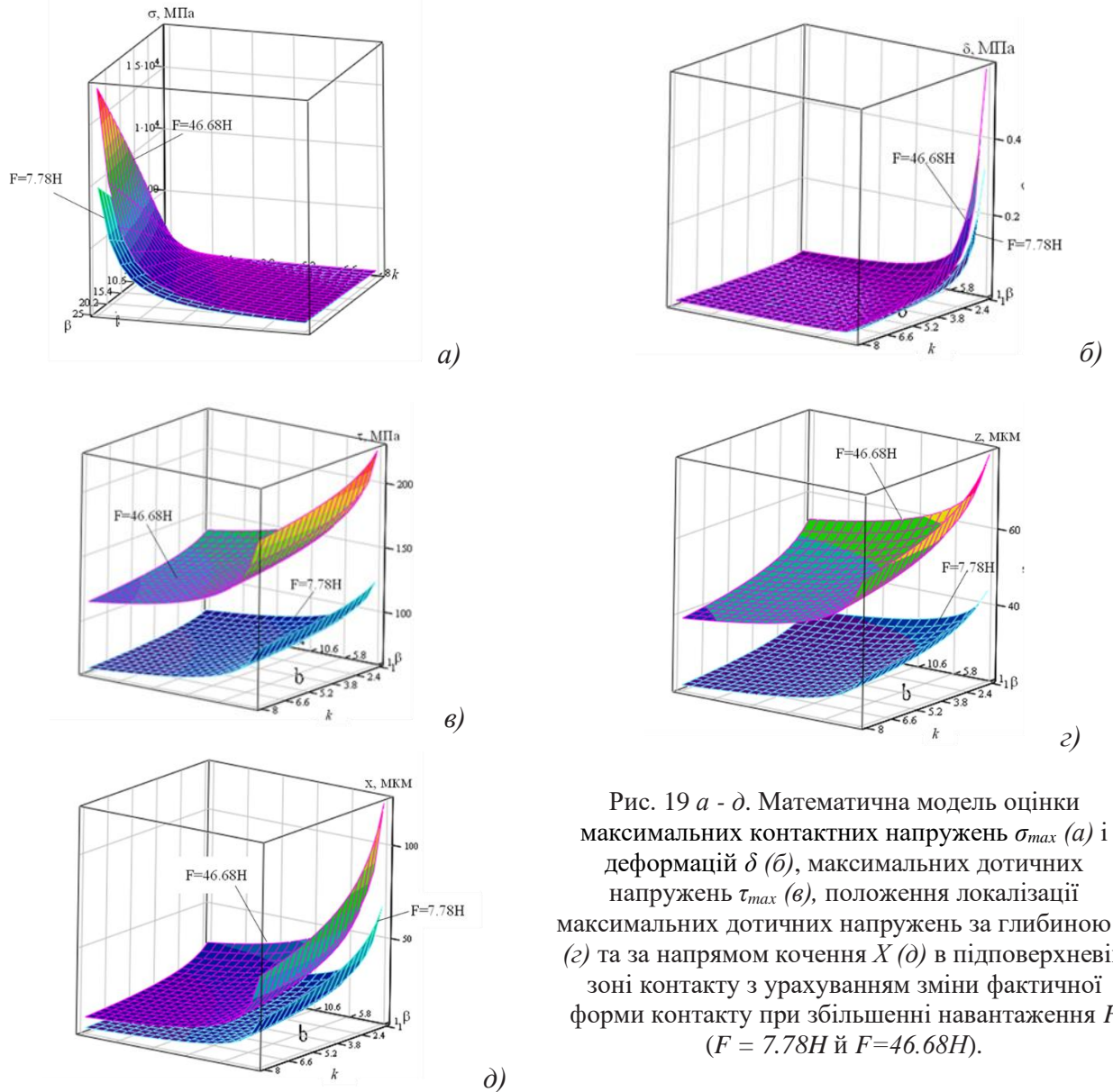


Рис. 19 а - д. Математична модель оцінки максимальних контактних напружень σ_{max} (а) і деформацій δ (б), максимальних дотичних напружень τ_{max} (в), положення локалізації максимальних дотичних напружень за глибиною Z (г) та за напрямом кочення X (д) в підповерхневій зоні контакту з урахуванням зміни фактичної форми контакту при збільшенні навантаження F ($F = 7.78H$ й $F=46.68H$).

За допомогою множинної регресії щодо моделювання оцінки триботехнічних параметрів для підшипникових вузлів тертя, встановлені рівняння 8 – 11 (див. таблицю 4) впливу безрозмірних параметрів швидкості U (рис. 20, а), навантаження W (рис. 20, б) та матеріалів G (рис. 20, в) на безрозмірну мінімальну товщину H_{min} на виході з контакту та товщину мастильного шару в центральній зоні мікро-ЕГД точкового контакту H_0 з урахуванням зміни еліптичності контакту та типу мастильного матеріалу. Проведений додатковий аналіз щодо впливу п'єзокоефіцієнту в'язкості $\alpha_{сер}$ (рис. 20, г) мастильних матеріалів, який має домінуючий вплив на товщину мастильного шару в мікро-ЕГД зоні контакту у виразі безрозмірного параметру матеріалів G , ніж приведені модуль пружності E' , який характеризує матеріал металевих поверхонь.

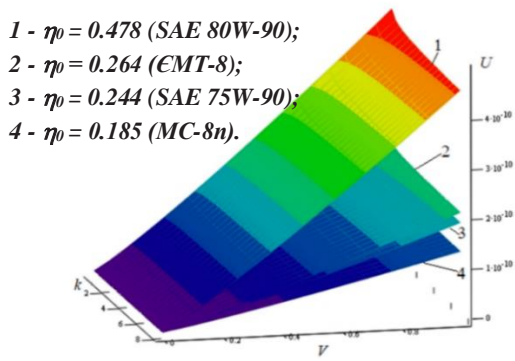
Результати порівняльної оцінки моделювання (див. таблицю 4) за критерієм Фішера щодо розрахункових $F_{розр.}$ і табличних $F_{табл.}$ значень показали, що виконується умова $F_{розр.} > F_{табл.}$, яка вказує на високу ступінь відповідності та адекватності значень, які розраховані за моделлю з мінімальним значенням середнього арифметичного відхилення σ для кожного параметру щодо оцінки впливу на товщину мастильного шару в зоні мікро-ЕГД контакту підшипникових вузлів

тертя з урахуванням зміни форми контакту, типу мастильного матеріалу, контактної тиску та матеріалів.

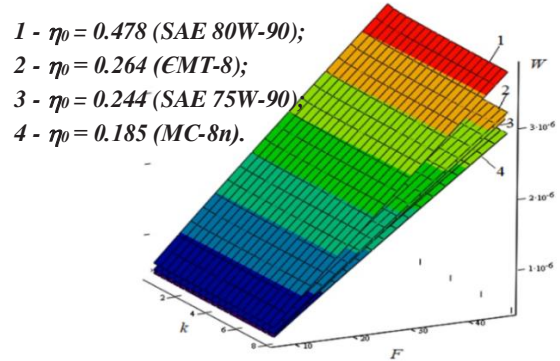
Вирішення такої багатофакторної задачі, як оцінка ефективності мащення в локальній зоні контакту, потребувало визначення товщини мастильного шару в залежності від одночасної зміни чотирьох безрозмірних параметрів швидкості, навантаження, матеріалів та форми контакту з метою встановлення оптимального режиму мащення за критерієм λ (див. таблицю 1), тобто, групового обліку аргументів та вибору оптимальної моделі товщини мастильного шару зростаючої складності.

Таблиця 4. Результати моделювання оцінки впливу безрозмірних параметрів на центральну товщину мастильного шару для підшипникових вузлів тертя та її перевірка щодо ступеню відповідності та адекватності значень при зміні параметрів форми контакту, типу мастильного матеріалу, контактної тиску та матеріалів.

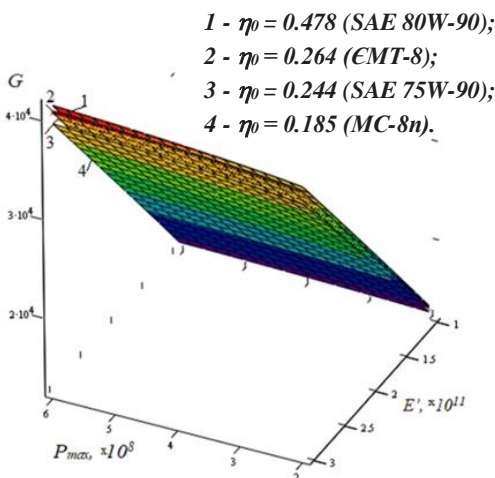
№ рівняння	Загальні сигнатури рівнянь згідно моделювання	$F_{розр.}$	$F_{табл.}$	σ
(8)	$U = 1,2408e^{-9} \cdot \eta_0^{1.297} \cdot V^{1.104} \cdot k^{-0.018}$	751	5,667	$5,155 \cdot 10^{-12}$
(9)	$W = 1,1502e^{-7} \cdot \eta_0^{0.2746} \cdot F^{0.9625} \cdot k^{-0.0036}$	201	5,667	$5,22 \cdot 10^{-8}$
(10)	$G = 1,2116e^{-8} \cdot \eta_0^{-0.0485} \cdot E'^{0.9778} \cdot P^{0.0396}$	$1,6047e^{+4}$	5,667	$5,6978 \cdot 10^{-11}$
(11)	$\alpha_{сер} = 7,1549e^{-9} \cdot \eta_0^{0.1439} \cdot S_0^{-0.4853} \cdot P^{0.033}$	319,46	5,667	$2,978 \cdot 10^{-11}$



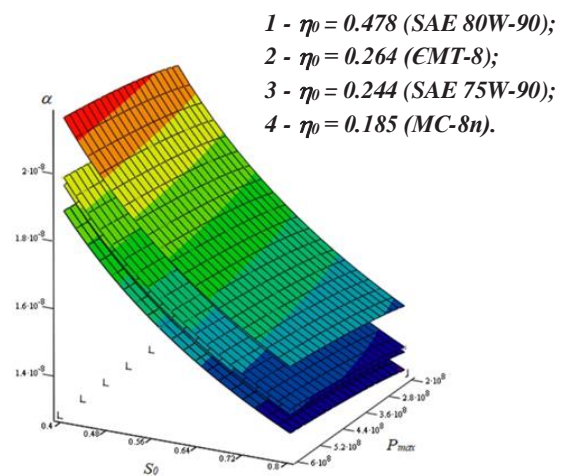
а)



б)



в)



г)

Рис. 20 а - г. Результати моделювання оцінки безрозмірних параметрів швидкості U (а), навантаження W (б), матеріалів G (в) та п'язокоефіцієнту в'язкості $\alpha_{сер}$ (г) з урахуванням зміни типу мастильного матеріалу відповідної в'язкості η_0 .

Використовуючи метод багаторядної селекції, було побудовано математичну модель оцінки мінімальної товщини і товщини мастильного шару в центральній зоні мікро-ЕГД точкового контакту з урахуванням зміни форми контакту та типу мастильного матеріалу, в результаті чого, були визначені оптимальні математичні описання відповідних товщин у вигляді емпіричних рівнянь для підшипникових вузлів тертя.

Метод багаторядної селекції є сучасним методом регресійного аналізу та групового обліку аргументів, заснованого на принципах теорії вивчення та самоорганізації, який полягав в послідовній генерації моделей зростаючої складності, оцінюванні їх параметрів і виборі (селективного відборі) кращих моделей за спеціальними критеріями. Метод реалізував завдання синтезу оптимальних моделей шляхом здійснення спрямованого підбору можливих функціональних приватних описань вихідних процесів.

Для спрямованого підбору оптимальної моделі, спочатку формувалась модель мінімальної довжини для заданої кількості відібраних координатних функцій, число яких може дорівнюватись нулю. Далі, до цієї моделі додавались одна за одною координатні функції із заданого набору функцій і здійснювалась їхня апроксимація за вихідним даними. За критерієм мінімуму середньоквадратичного відхилення з отриманого списку моделей, формувался вибір оптимальної моделі першого (і далі поточного) порядку. За вихідну модель мінімальної довжини приймалась отримана оптимальна модель і процес повторювався. Надалі, формувалися моделі другого (наступного) порядку тощо. У результаті цієї процедури визначались оптимальні математичні описання як функції n -змінних і моделі k -го порядку вихідних параметрів. Для програмної реалізації обчислення за методом багаторядної селекції використовувались модулі, розроблені із застосуванням мови $C++$ та $Python$ в якості інтерпретатору для доступу щодо низькорівневих можливостей операційної системи.

Таким чином, для підшипникових вузлів тертя були отримані емпіричні формули, що описують безрозмірні мінімальну товщину H_{min} на виході з контакту та товщину мастильного шару в центральній області H_0 мікро-ЕГД контакту відповідно, як функцію безрозмірних змінних параметрів: швидкості U , навантаження W , матеріалів G та параметру еліптичності k з урахуванням зміни форми контакту та типу мастильного матеріалу, що прийняли наступного вигляду:

$$H_{min} = 3.37 \cdot U^{0.67} \cdot W^{-0.076} \cdot G^{0.48} \cdot (1 - e^{-0.59k}). \quad (12)$$

$$H_0 = 2.43 \cdot U^{0.66} \cdot W^{-0.059} \cdot G^{0.55} \cdot (1 - 0.65 \cdot e^{-0.49k}). \quad (13)$$

Перевірка моделі для мінімальної товщини H_{min} в мікро-ЕГД зоні точкового контакту за критерієм Фішера показала, що $F_{розр.} = 1,2228e^4$; $F_{табл.} = 5,5639$. Отже, $F_{розр.} > F_{табл.}$. Похибка склала – не вище 9%. Щодо моделі для товщини мастильного шару в центральній H_0 мікро-ЕГД області точкового контакту за критерієм Фішера - $F_{розр.} = 4,631e^3$; $F_{табл.} = 5,5639$. Отже, $F_{розр.} > F_{табл.}$. Похибка склала – не вище 9%. Незначна похибка для моделей оцінки товщин вказує на високий ступінь відповідності та адекватності значень.

Таким чином, встановлено домінуючу роль впливу безрозмірного параметру швидкості на мінімальну товщину на виході з контакту для підшипникових вузлів тертя відповідно на 67%, безрозмірного параметру матеріалів - на 48%, безрозмірного параметру навантаження - на 7,6% згідно математичного моделювання оцінки ефективності мащення у вигляді оптимальних емпіричних рівнянь, що є важливими з точки зору реалізації умов стійкого мікро-ЕГД мащення для підшипникових вузлів тертя.

На рис. 21 *а, б*, представлена графічна інтерпретація результатів моделювання оцінки безрозмірних параметрів мінімальної товщини H_{min} (див. рис. 20, *а*) на виході з контакту та товщини мастильного шару в центральній H_0 мікро-ЕГД області точкового контакту (див. рис. 20, *б*) відповідно, як функцію безрозмірних змінних параметрів: швидкості U , навантаження W , матеріалів G та параметру еліптичності k з урахуванням зміни форми контакту та типу мастильного матеріалу.

За результатами математичного моделювання оцінки ефективності мащення, розроблено номограму підбору оптимального типу мастильного матеріалу за класом в'язкості до конкретного підшипнику кочення з відповідною формою контакту і з можливістю зворотного вибору кулькового

підшипнику з оптимальною формою контакту за типом штатного мастильного матеріалу згідно критерію режиму мащення, що характеризує умови стійкого мікро-ЕГД мащення, при $\lambda > 3$ (рис. 22). Тобто, за формою контакту конкретного кулькового підшипника кочення (відношенням радіусів кривин кільця і кульки β), можна підібрати оптимальний мастильний матеріал за класом в'язкості (динамічної в'язкості η_0) або за класом в'язкості штатного мастильного матеріалу дібрати кульковий підшипник кочення з оптимальною формою контакту β , яке буде відповідати стійкому мікро-ЕГД режиму мащення, що вище фіксованої межі при $\lambda > 3$ (червона смуга на рис. 22).

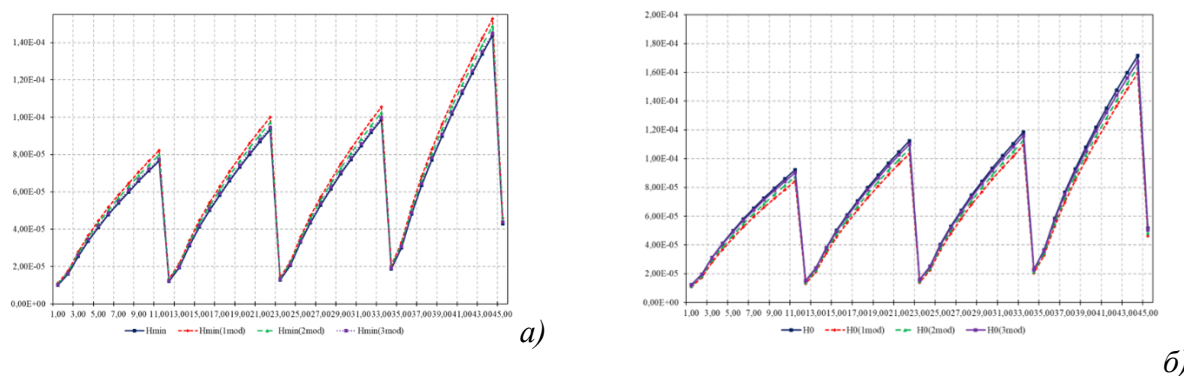


Рис. 21 а, б. Результати моделювання оцінки мінімальної товщини H_{min} (а) та товщини мастильного шару в центральній H_0 (б) мікро-ЕГД області контакту з урахуванням зміни форми контакту та типу мастильного матеріалу.

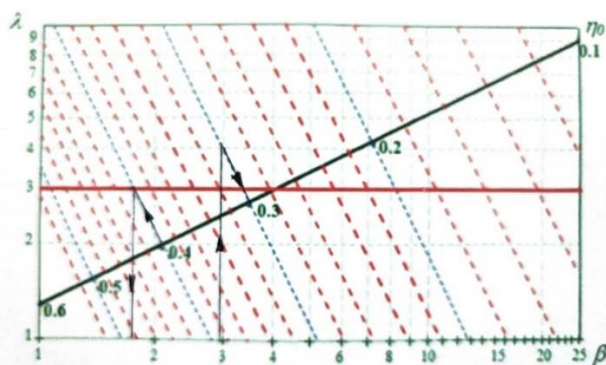


Рис. 22. Номограма підбору мастильного матеріалу та кулькового підшипника кочення за критерієм режиму мащення λ з урахуванням зміни форми контакту β та типу мастильного матеріалу η_0 .

За прикладом побудови моделі оцінки ефективності мащення для підшипникових вузлів тертя, були отримані багатофакторні нелінійні моделі для досліджуваних вихідних параметрів в зоні контакту між верхнім компресійним кільцем та гільзою циліндру вузлів ДВЗ з урахуванням зміни ходу поршня та типу мастильного матеріалу для двох досліджуваних мастильних матеріалів за різним класом в'язкості (η_0): моторних олів Ультрагаз (АРІАН Ультрагаз) та ПРОТЕК STATGAS 40. Вхідні робочі параметри були обрані для двигун-генератора ДВГ1А-500 КГУ (АТВТ «Первомайськдизельмаш»), де застосовується відповідна моторна олива Ультрагаз, та для газового двигун-генератора САТ 3520В («САТЕРПІЛЛАР»), де застосовується відповідна моторна олива ПРОТЕК STATGAS 40.

Використовуючи метод множинної регресії щодо моделювання оцінки параметрів, встановлені рівняння впливу безрозмірних параметрів швидкості U_i , навантаження W_i , матеріалів G_i та форми контакту Z_m на безрозмірну товщину H_i модифікованого шару в зоні фрикційного контакту між верхнім компресійним кільцем та гільзою циліндру ЦПГ ДВЗ з урахуванням зміни ходу поршня (i -го кута повороту коленвала) та типу мастильного матеріалу. Результати щодо встановлення рівнянь впливу кожного з параметрів на товщину модифікованого шару, показали високу ступінь відповідності і адекватності моделей за критерієм Фішера і середньоарифметичним відхиленням.

Таким чином, було побудовано математичну модель оцінки ефективності мащення в зоні фрикційного контакту між верхнім компресійним кільцем та гільзою циліндру вузлів ДВЗ з

урахуванням зміни ходу поршня та типу мастильного матеріалу, в результаті чого, були визначені оптимальні математичні описання товщини модифікованого шару у вигляді емпіричного рівняння для вузлів ДВЗ (рис. 23). Відповідно, була встановлена домінуюча роль впливу безрозмірного параметру швидкості U_i - на 50%, безрозмірного параметру матеріалів G_i - на 47,6% та безрозмірного параметру навантаження W_i - на 9% щодо товщини модифікованого шару в зоні фрикційного контакту між верхнім компресійним кільцем та гільзою циліндру ДВЗ з урахуванням зміни ходу поршня та типу мастильного матеріалу при усіх рівних умовах роботи, що є важливими з точки зору реалізації стійкого режиму мащення для вузлів ДВЗ в умовах змішаного тертя:

$$H_i = 4,73 \cdot U_i^{0,5} \cdot G_i^{0,476} \cdot W_i^{-0,09} \cdot Z_m. \quad (14)$$

Перевірка моделі за критерієм Фішера показало, що $F_{розр.} = 2,2578e^4$; $F_{табл.} = 5,56$. Отже, $F_{розр.} > F_{табл.}$, яка вказує на високий ступінь відповідності та адекватності значень. Похибка склала – не вище 8,2%.

Емпіричне рівняння, що описує товщину модифікованого шару в розмірних координатах (в мкм) h_i з урахуванням зміни ходу поршня (i -го кута повороту коленвалу) та типу мастильного матеріалу, як функцію безрозмірних змінних параметрів: швидкості U_i , навантаження W_i , матеріалів G_i та форми контакту Z_m , прийняло наступного вигляду:

$$h_i = 4,73 \cdot 10^6 \cdot U_i^{0,5} \cdot G_i^{0,476} \cdot W_i^{-0,09} \cdot Z_m \cdot R_{np}, \text{ [мкм]} \quad (15)$$

де $Z_m = 1 - \exp^{-0,68k}$ - параметр форми контакту внаслідок овальності контактних поверхонь при деякому зносі, в якому параметр еліптичності k можна знайти за рівнянням (2).

R_{np} – приведений радіус кривин контактних поверхонь.

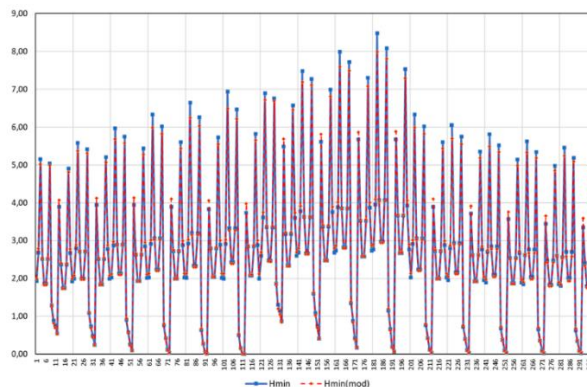


Рис. 23. Результати моделювання оцінки товщини модифікованого шару H_i з урахуванням зміни ходу поршня (i -го кута повороту коленвалу) та типу мастильного матеріалу.

За результатами моделювання оцінки ефективності мащення та зносостійкості в зоні контакту між верхнім компресійним кільцем та гільзою циліндру ДВЗ, були розроблені номограми оцінки ефективності мащення (рис. 24 а) та інтенсивності зношування (рис. 24 б) вузлів ДВЗ за класом в'язкості (динамічної в'язкості η_0) моторної оливи, кількості обертів n та ходу поршня (i -го кута повороту коленвалу), що дає можливість підібрати оптимальний тип моторної оливи щодо реалізації стійкого режиму мащення для умов змішаного тертя.

Згідно рис. 24 а, в зоні в.м.т. (коли значення i -го кута повороту коленвалу складають 364 – 370 градусів), обидві моторні оливи знаходяться в режимі змішаного тертя ($\lambda \approx 2$), причому, збільшення обертів двигуна в даній зоні призводить до суттєвого зменшення товщини мастильного шару, тобто, до інтенсифікації виникнення дискретних ділянок розриву мікро-ЕГД мастильного шару, що передбачено протіканням граничного тертя, коли $\lambda < 1$. Таким чином, встановлено суттєве погіршення ефективності мащення в зоні в.м.т. між верхнім компресійним кільцем і гільзою циліндру вузлів ДВЗ у випадку збільшення обертів двигуна, яке можна пояснити відсутністю рідинного тертя з характерними розривами мікро-ЕГД мастильного шару, коли $\lambda < 3$ (див. рис. 24 а).

Згідно рис. 24 б, в зоні н.м.т, при збільшенні кількості обертів коленвалу ДВЗ, інтенсивність зношування для обох олив мінімальне. Але, по мірі наближення до зони в.м.т. (з 270 градусів), починаються інтенсифікуватись зношувальні процеси, досягаючи максимальних значень при 364 – 370 градусів по ходу поршню. Причому, для оливи АРІАН Ультрагаз з низьким класом в'язкості інтенсивність зношування виглядає більш суттєвою в порівнянні з оливою ПРОТЕК STATGAS 40 за вищим класом в'язкості.

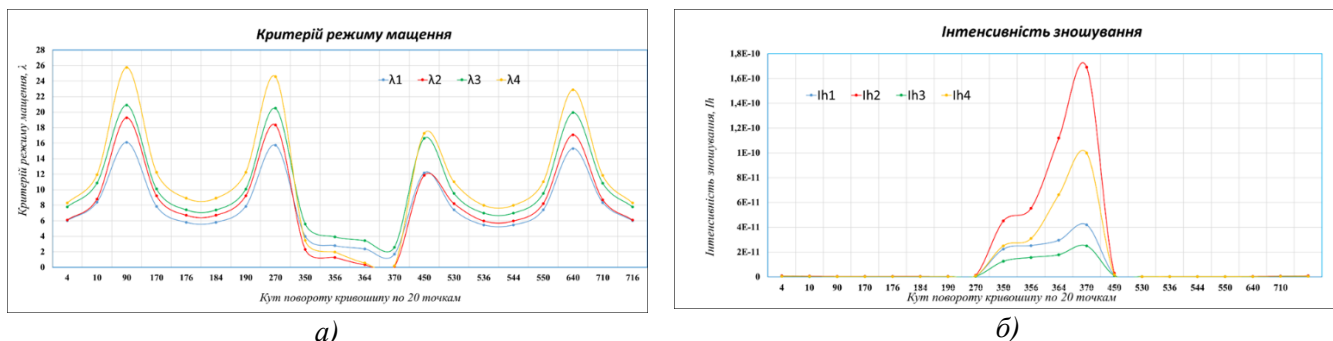


Рис. 24 а, б. Номограми ефективності мащення за критерієм режиму мащення λ (а) та інтенсивності зношування I_h (б) в зоні контакту між верхнім компресійним кільцем і гільзою циліндру ЦПГ ДВЗ в залежності від ходу поршня (i -го кута повороту коленвалу) при збільшенні кількості обертів n для двох досліджуваних моторних олив за різним класом в'язкості η_0 :

λ_{i1} – олива АРІАН Ультрагаз, $n = 2000$ об/хв.; λ_{i2} – олива АРІАН Ультрагаз, $n = 3500$ об/хв.; λ_{i3} – олива ПРОТЕК STATGAS 40, $n = 2000$ об/хв.; λ_{i4} – олива ПРОТЕК STATGAS 40, $n = 3500$ об/хв.

Збільшення обертів інтенсифікує зношувальні процеси для обох моторних олив. Таким чином, використання олив з більш високим класом в'язкості на стадії згорання у в.м.т., має суттєве зменшення інтенсивності зношування пар тертя (див. рис. 24 б), але при збільшенні обертів двигуна, спостерігається інтенсифікація зношувальних процесів для обох моторних олив, що характерно для граничних умов тертя.

Запропоновано комплексний підхід реалізації стійкого режиму мащення для умов змішаного тертя при застосуванні комбінованого модифікування мастильних середовищ модифікаторами тертя сульфідного типу та сумішей СФС та використання моторних олив за оптимальним класом в'язкості щодо забезпечення переходу від граничного до змішаного тертя (див. рис. 4).

У сьомому розділі представлені результати розробки і впровадження модифікованих олив згідно прискорених і довготривалих стендових та експлуатаційних випробувань, які були проведені за результатами запропонованої концепції методології підвищення ефективності мащення та зносостійкості підшипникових вузлів тертя та вузлів ДВЗ, що працюють в екстремальних умовах роботи.

Встановлено надійну роботу за всіма режимами при збільшенні мотогодин відносно штатного напрацювання (4000 м/годин) модифікованої авіаційної оливи АРІАН МС-8пн в порівнянні зі штатними оливами при довготривалих експлуатаційних випробуваннях впродовж 8000 м/годин напрацювання в системі мащення підшипникових вузлів тертя на авіаційному газотурбінному двигуні типу ДР-59л газоперекачувального агрегату, а саме: поліпшено термоокиснювальну стабільність за зміною в'язкості на 18%, зменшено кислотне число на 8%; знижено масову частку осаду після окиснення у 3,2 рази; підвищено протизношувальні показники за збільшенням критичного навантаження у 12% та зменшенням діаметру плями зношування у 67%; отримані необхідні норми за високотемпературними відкладенням у вигляді нагарів і лаків та мінімальні витрати оливи за зменшенням випаровування практично у 5 разів.

При застосуванні модифікованої авіаційної оливи АРІАН МС-8пн, збільшено на 25% довговічність кулькових підшипників кочення SKF в мільйонах обертів, що працюють в екстремальних умовах роботи. Тобто, якщо підшипник розрахований на 1 мільйон обертів в режимі нормальної експлуатації, то для забезпечення стійкого мікро-ЕГД мащення в екстремальних умовах роботи, можна на 250 000 обертів (на 25%) підвищити довговічність підшипників за рахунок оптимізації конструкції підшипнику та вибору оптимальної оливи за класом в'язкості. Підвищення на 25% довговічності підшипників кочення на модифікованій авіаційній оливі опосередковано дає

скорочення матеріальних та фінансових витрат на технічне обслуговування та експлуатацію підшипникових вузлів тертя.

Модифікована моторна олива АРІАН Ультрагаз показала збільшення у 2 рази мотогодин напрацювання відносно штатного напрацювання (2000 м/годин) при довготривалих експлуатаційних випробуваннях впродовж 4160 м/годин напрацювання в системі мащення вузлів тертя у газовому двигун-генераторі ДВГА-500 когенераційної установки в порівнянні зі штатними оливами, що дало можливість забезпечити високий рівень стабільності проти випаровування, яке підтверджується 9% зниженням витрати оливи, зменшити лінійний знос втулок циліндрів на 69% та компресійних кілець на 44%, отримати фізико-хімічні показники і диспергуючу здатність відпрацьованої оливи в межах норми, мати відсутність високотемпературних відкладень у вигляді нагарів та лаків і низькотемпературних відкладень у вигляді смолистих шламів та задовільний стан робочих поверхонь шатунних шийок коленвалу і вкладишів за результатами ревізії вузлів ШПГ двигуна.

За результатами наноструктурного хімічного (атомного і вагового) аналізу (таблиця 5), триботехнічних досліджень (рис. 25 а, б) та мікродифракційного дослідження (рис. 26) локальної зони фрикційного контакту внутрішньої стінки гільзи циліндру двигун-генератору, встановлено, що після 4160 мотогодин напрацювання (більше штатного напрацювання у 2,08 рази) на модифікованій оливі АРІАН Ультрагаз, нанокристали марганцю насичуються оксидами заліза $Fe-O$ при утворенні самогенеруючих органічних плівок в порівнянні з вихідною поверхнею до випробувань.

Утворення відповідної нової нанофази, що визваний накопиченням у модифікованих шарах легуючих елементів Mn і P в поєднанні з органічними сполуками фулеренів, збільшують концентрацію кисню O , модифікують поверхню і сприяють, тим самим, насиченням твердим і пружним розчином $Fe-O$, тобто, проявляють синергізм щодо структурної пристосовуваності модифікованих шарів до екстремальних умов роботи, де формуються відповідні комбіновані модифіковані шари з початку припрацювання (див. рис. 25, а) та суттєво зменшується коефіцієнт тертя (див. рис. 25 б).

Таблиця 5. Хімічний склад (атомний, % і ваговий, %) наноструктури в зоні фрикційного контакту внутрішньої стінки гільзи циліндру до (а) та після випробувань (б).

Хімічні елементи	Атомний склад шару, %	Ваговий склад шару, %	Графічне зображення та спектрограма хімічного складу поверхневого шару	
<i>Вихідна поверхня (а)</i>				
<i>P</i>	19,94	17,01		
<i>S</i>	0,20	0,17		
<i>Ca</i>	0,44	0,29		
<i>Mn</i>	19,52	9,39		
<i>Fe</i>	19,96	9,45		
<i>Cu</i>	1,83	0,76		
<i>O</i>	38,10	62,93		
<i>Всього</i>	100	100		
<i>Поверхня після напрацювання (б)</i>				
<i>O</i>	24,73	51,71		
<i>Si</i>	3,78	4,51		
<i>P</i>	0,49	0,53		
<i>S</i>	1,14	1,19		
<i>Ca</i>	1,18	0,99		
<i>Cr</i>	0,44	0,28		
<i>Mn</i>	0,96	0,59		
<i>Fe</i>	65,83	39,44		
<i>Cu</i>	1,44	0,76		
<i>Всього</i>	100	100		

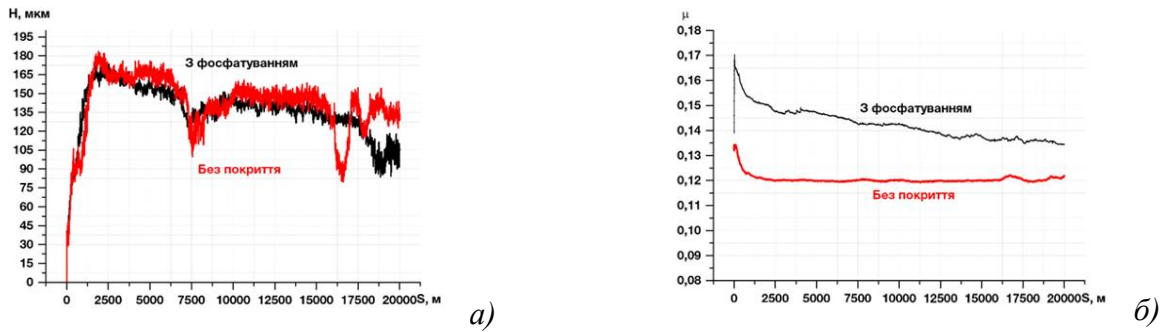


Рис. 25 а, б. Формування комбінованого модифікованого шару (а) і зміна коефіцієнту тертя (б) від пробігу для марганцево-фосфатної поверхні та поверхні без покриття в умовах припрацювання для спеціально виготовлених зразків з матеріалу гільзи двигун-генератору.

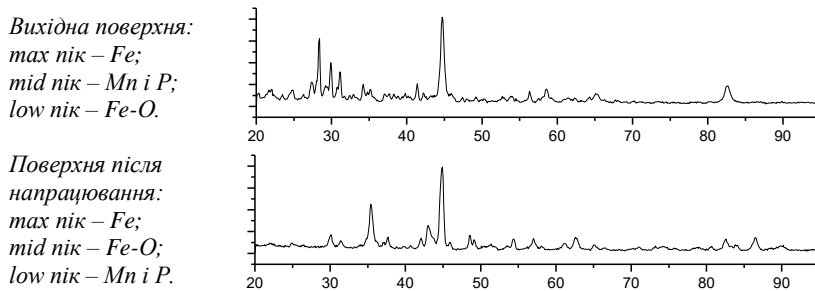


Рис. 26. Результати мікродифракційного аналізу наноструктури поверхонь в зоні фрикційного контакту внутрішньої стінки гільзи двигун-генератору до і після 4160 м/годин напрацювання.

Впровадження модифікованої моторної оливи ПРОТЕК STATGAS 40 на газовому двигун-генераторі ДВГ1А-630 високої потужності при проведенні довготривалих експлуатаційних випробувань впродовж 2000 м/годин напрацювання і модифікованої моторної оливи ПРОТЕК STATGAS 40 МА на газовому двигун-генераторі САТ 3520В (CATERPILLAR), впродовж 2300 м/годин напрацювання, показали поліпшені фізико-хімічні і триботехнічні властивості за 4-ма критеріями оцінки: за фізико-хімічними властивостями; за кількістю забруднюючих речовин; за станом функціональних присадок і модифікаторів тертя (ХАР і ПАР) та за кількістю надходження елементів зношування непрямим шляхом.

Встановлено надійну роботу за всіма режимами модифікованої універсальної моторно-трансмісійної оливи АРІАН ЄМТ-8 в порівнянні зі штатними оливами щодо універсальності відповідної оливи при роботі в умовах експлуатації у вузлів ДВЗ, трансмісії та гідравлічної системи, а саме: знижено нагароутворювальну здатність на 45%, фізико-хімічні показники відпрацьованої оливи і техніко-економічні характеристики двигуна витримані в межах норми в початковий період напрацювання, фізико-хімічні показники і диспергуюча здатність відпрацьованої оливи та техніко-економічні характеристики двигуна при напрацюванні витримані в межах норми, зменшено підсумкову величину лако-, нагаровідкладень на поршні і продуктів зношування, в середньому на 4%, при прискорених випробувань на одноциліндровому двигуні 1 ЧН 8×11; фізико-хімічні показники відпрацьованої оливи і техніко-економічні характеристики двигуна при напрацюванні витримані в межах норми, вміст продуктів зношування непрямим шляхом і лінійний знос основних деталей ЦПГ за мікрометричним вимірюваннями реалізовані в межах норми при тривалих стендових випробувань на вихоркамерному двигуні 2ДТХ№10 впродовж 200 м/годин напрацювання; реалізовані задовільні норми фізико-хімічних показників та вмісту продуктів зношування у відпрацьованої оливі, відібраної з картеру єдиного баку для двигуна, коробки перемикачів передач та гідравлічної системи, при довготривалих експлуатаційних випробувань на двигуні 2ДТХ№13, трансмісії і гідравлічної системи трактору ХТЗ-1410 впродовж 200 м/годин напрацювання. Відповідні результати дали можливість скоротити матеріальні витрати при використанні єдиної оливи замість трьох оливи.

У додатках наведені: протоколи випробувань сумішей та модифікованих олив; термограми особливих точок локальних температур; результати програмної реалізації моделювання; результати фрактографічних досліджень; протоколи, програми та акти завершення експлуатаційних випробувань; акти впровадження модифікованих олив, методик та технологій; рішення про допуск до виробництва та застосування.

ВИСНОВКИ

При виконанні дисертаційної роботи вирішувалась науково-технічна проблема реалізації стійкого мащення в умовах змішаного тертя та створення в зоні фрикційного контакту неконформних і конформних вузлів тертя модифікованих шарів з оптимальною мастильною здатністю та структурною пристосовуваністю до екстремальних умов роботи, спрямоване на підвищення ефективності мащення та зносостійкості пар тертя за контактено-механічними, реологічними і фізико-хімічними аспектами. На основі проведених досліджень зроблені наступні висновки:

1. Встановлені умови попередження розриву мікро-ЕГД мастильного шару, які досягаються комплексом заходів щодо поліпшення триботехнічних, реологічних і фізико-хімічних показників за багатофакторною критеріальною оцінкою: реалізації стійкого мащення в умовах змішаного тертя; підбору оптимальної форми контакту; збільшення долі гідродинамічного тиску мастильних шарів відносно контактного тиску на виступах мікронерівностей; врахування реологічних параметрів мастильних середовищ; оцінки появи пластично-деформованого стану; вибору якісного і кількісного хімічного складу активних компонентів в мастильному середовищі для створення міцних модифікованих шарів з оптимальною структурною пристосовуваністю та термомеханічною стійкістю до екстремальних умов роботи.

2. Збільшення долі гідродинамічного тиску відносно контактного тиску на виступах мікронерівностей мастильних шарів досягається збільшенням товщини мастильного шару для підшипникових вузлів тертя за рахунок підвищення швидкості кочення в залежності від класу в'язкості та кінематики тертя: для олив з низьким класом в'язкості - у 2,6 рази більшу, ніж для олив з високим класом в'язкості та у 2 рази більшу, ніж для олив з середнім класом в'язкості; при терті кочення з частковим проковзуванням 15% - на 60% більшу, ніж при чистому терті кочення.

3. Для зменшення западини мінімальної товщини мастильного шару на виході з мікро-ЕГД контакту в умовах мастильного голодування, запропоновано: застосовувати оливи високого класу в'язкості на рівні SAE 80W-90 з оптимальними реологічними властивостями, які формують мастильні шари високої несучої здатності на поверхнях тертя; збільшення відношення радіусів кривин до $\beta \leq 25$, яке реалізує підвищення у 2 рази мінімальної товщини мастильного шару на виході з контакту.

4. Встановлено оптимальний фізико-хімічний склад суміші з модифікатором тертя сульфідної групи EP у визначеній концентрації за протизношувальними, протизадирними та антифрикційними властивостями модифікованих шарів для підшипникових вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи, який забезпечує: формування оптимальної товщини модифікованого шару (до 150 нм) та найшвидше його адаптування (на 700 м) до екстремальних умов тертя з самого початку пробігу до стабілізації беззношувального процесу тертя (на 9000 м); стрімке падіння на 40% і подальше стабілізування сил тертя; збільшення критичного навантаження на 78Н, зменшення діаметру плями зношування на 10%, збільшення індексу задиру на 18%, в порівнянні з іншими зразками при всіх рівних умовах випробувань.

5. Встановлені закономірності зміни механічних, реологічних та триботехнічних властивостей модифікованих шарів при застосуванні суміші сульфідної групи EP до нестационарних умов тертя неконформних вузлів ДВЗ при низькотемпературному запуску, а саме за: кінетикою зміни механічних властивостей поверхонь тертя при зміцнюванні випереджаючої поверхні до 200 МПа, а при розміцнюванні відстаючої поверхні до 100 МПа впродовж 2400 циклів напрацювання; скороченням шляху тертя при мінімальній шорсткості; поліпшеними реологічними властивостями модифікованих шарів при найбільшій швидкості зсуву до $4,4 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$; зменшенням перевищення лінійного зносу випереджаючої поверхні при збільшенні контактних напружень до 680 МПа - від

15% до 9%, для відстаючої поверхні - від 49% до 16%, зменшенням сумарного лінійного зносу від 3,2 до 1,78 разів.

6. Для умов пластично-деформованого контакту, було визначено модифіковану моторно-трансмійну оливу ПРОТЕК ЄМТ-8, яка забезпечує створення в зоні фрикційного контакту неконформних вузлів ДВЗ модифікованих шарів з оптимальною структурною пристосовуваністю та мастильною здатністю до низькотемпературного запуску, що визначається: підвищенням градієнту швидкості зсуву на 11% та ефективної в'язкості на 10%; зменшенням сумарної величини коефіцієнту тертя на 60%; збільшенням негідродинамічної складової товщини модифікованого шару на 67%.

7. Встановлені закономірності адаптування процесів самоорганізації і самовідновлення модифікованих шарів до нестационарних умов тертя ковзання конформних вузлів ДВЗ в умовах низькотемпературного запуску при застосуванні суміші фулеренів (СФС) в оптимальній концентрації, які визначаються полегшуванням проходження зсувних процесів на 25% у модифікованому шарі при максимальній швидкості зсуву та зменшенням лінійного зносу на 25%.

8. Встановлено універсальність модифікованих олив АРІАН Ультрагаз і ПРОТЕК ЄМТ-8 при застосуванні фулеренів в поєднанні з модифікаторами тертя групи ЕР, які створюють в зоні фрикційного контакту комбіновані модифіковані шари з негідродинамічною складовою товщини у 2 рази більшу в порівнянні зі штатними оливами, зменшуючи коефіцієнт тертя у 2,4 рази, а лінійний знос у 2,2 рази, тим самим, вони забезпечують прискорену і вчасну синергетичну дію при полімеризації та модифікуванні відповідних шарів у конформних вузлів ДВЗ при низькотемпературному запуску впродовж прогрівання.

9. Встановлено кореляційний взаємозв'язок між температурою в локальній зоні контакту і об'ємною температурою модифікованої оливи при збільшенні максимального контактного напруження до 68 МПа в період припрацювання з відповідним рознесенням кореляційних лінійних залежностей в бік високих температур на 15К. В умовах напрацювання до 15 циклів, встановлена збільшена термомеханічна стійкість модифікованої оливи АРІАН Ультрагаз в порівнянні зі штатною оливою, в середньому на $\Delta T = 23K$, що підтверджує оптимальну структурну пристосовуваність модифікованих шарів до екстремальних умов роботи.

10. Визначено механізми зменшення напружено-деформованого стану в зоні фрикційного контакту при збільшенні еліптичності форми контакту, які полягають: у зниженні максимальних контактних напружень на 90%, дотичних напружень в підповерхневій області контакту - на 85%, деформацій - на 86%. Встановлено місцезположення зони локалізації концентратора дотичних напружень, в якому визначено, що збільшення еліптичності форми контакту сприяє перерозподілу контактного напруження на 3% більшою в ортогональному напрямку кочення, ніж по глибині.

11. Реалізація стійкого мікро-ЕГД мащення підшипникових вузлів тертя за результатами математичного моделювання досягається за рахунок зростання мінімальної товщини на виході з контакту при одночасному збільшенні швидкості кочення і динамічної в'язкості мастильного матеріалу на 67% з урахуванням зміни фактичної форми контакту та реологічних властивостей мастильного матеріалу. Для практичного застосування, розроблено номограму підбору оптимального типу мастильного матеріалу за класом в'язкості до конкретного підшипнику кочення з урахуванням оптимізації конструкції (форми контакту) підшипнику.

12. Реалізація стійкого мащення в умовах змішаного тертя вузлів ДВЗ за результатами математичного моделювання досягається за рахунок зростання товщини мастильного шару у фрикційній зоні контакту між верхнім компресійним кільцем та гільзою циліндру ДВЗ при одночасному збільшенні швидкості ковзання та динамічної в'язкості на 50% з урахуванням зміни ходу поршня двигуна та реологічних властивостей мастильного матеріалу. Для практичного застосування, розроблені номограми оцінки ефективності мащення та зносостійкості пар тертя за типом моторної оливи та кількості обертів і кута повороту коленвалу двигуна.

13. За результатами запропонованої концепції методології підвищення ефективності мащення та зносостійкості підшипникових вузлів тертя та вузлів ДВЗ, що працюють в екстремальних умовах роботи, розроблені і впроваджені у виробництво та пройшли прискорені і довготривалі випробування, нові модифіковані оливи, які показали: збільшення ресурсу напрацювання в мотогодинах (авіаційна олива АРІАН МС-8пн, моторна олива АРІАН Ультрагаз); скорочення

матеріально-технічних витрат на обслуговування за рахунок збільшення на 25% довговічності кулькових підшипників кочення в мільйонах обертів (авіаційна олива АРІАН МС-8пн); універсальність застосування єдиної оливи замість трьох оливи (моторно-трансмісійна олива АРІАН СМТ-8); поліпшені триботехнічні та фізико-хімічні властивості при застосуванні в потужних газових двигун-генераторах (моторні оливи ПРОТЕК STATGAS 40 і ПРОТЕК STATGAS 40МА).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях, що внесені до наукометричної бази SCOPUS:

1. Consideration of service life extension of lubricants / Dmitrichenko N.F., Bilyakovich O.N., Fedyna V.P., Milanenko A.A., Savchuk A.N. // Metallurgical and Mining Industry. - Volume 12. - 2015. - Pages 182-188(Q3;<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84959454508&partnerID=MN8TOARS>). *Здобувачем проаналізовано і проведено оцінку лінійного зносу методом штучних баз зразків зі сталі ШХ-15 й бронзи БрО 10010.*
2. Evaluation technique of oils tribotechnical characteristics on the basis of their rheological and antifriction properties determination under the conditions of rolling motion and rolling with slipping / Dmitrichenko N.F., Bilyakovich O.N., Savchuk A.M., Turytsia Yu.O., Milanenko O.A. // Metallurgical and Mining Industry. - Volume 12. - 2015. - Pages 230-234 (Q3; <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84959542016&partnerID=MN8TOARS>). *Здобувачем розроблено метод оцінки ефективності мащення за допомогою параметру режиму мащення та реологічних властивостей мастильних середовищ в умовах чистого кочення.*
3. Method of determination of transmission oils reasonable useful life / Dmitrichenko N.F., Bilyakovich O.N., Savchuk A.M., Milanenko O.A., Turytsia Yu.O. // Metallurgical and Mining Industry. – Volume 12. - 2015. - Pages 266-271 (Q3; <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84959542016&partnerID=MN8TOARS>). *Здобувачем проаналізовано результати товщини мастильного шару та антифрикційних властивостей зразків відпрацьованої трансмісійної оливи на машині тертя СМЦ-2.*
4. Method of determining the lubricating and antifriction characteristics of oils based on estimating their rheological characteristics under nonstationary conditions of lubrication / Dmitrichenko N.F., Savchuk A.M., Milanenko A.A., Turytsia Yu.O. // Journal of Friction and Wear. - Volume 37(2). - 2016. - Pages 146-150(Q2;<https://doi.org/10.3103/s1068366616020045>; <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84959541789&partnerID=MN8TOARS>). *Здобувачем проведено математичний аналіз впливу реологічних властивостей мастильних матеріалів в нестационарних умовах тертя.*
5. Improving the efficiency of lubricants by introducing friction modifiers for tracked vehicles under stationary conditions of friction / Dmitrichenko N.F., Milanenko A.A., Savchuk A.N., Bilyakovich O.N., Turitsa Y.A., Pavlovskiy M.V., Artemuk S.I. // Journal of Friction and Wear. - Volume 37(5). - 2016. – Pages 441-447(Q2;<https://doi.org/10.3103/s1068366616050044>; <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84992143374&partnerID=MN8TOARS>). *Здобувачем розроблено двоетапний метод оцінки якісного й кількісного хімічного складу компонентів мастильних середовищ для підшипникових вузлів тертя.*
6. A Technique for Forecasting the Durability of Rolling Bearings and the Optimum Choice of Lubricants under Flood-Lubrication and Oil-Starvation Conditions / Dmitrichenko N.F., Milanenko A.A., Hluchonets A.A., Minyaylo K.N. // Journal of Friction and Wear. - Volume 38(2). - 2017. - Pages 126-131. (Q2; <https://doi.org/10.3103/s1068366617020076>; <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85019659263&partnerID=MN8TOARS>). *Здобувачем розроблені критерії оцінки ефективності мащення та на їх основі побудовані номограми підбору оптимального мастильного матеріалу для підшипників кочення.*
7. The Effect of Rheological Parameters on the Tribotechnical Characteristics of Modified I-40A Oil / Dmitrichenko N.F., Bilyakovich O.N., Savchuk A.N., Milanenko A.A., Turitsya Y.A. // Journal of Friction and Wear. - Volume 39(2). - 2018. - Pages 164-168 (Q3; <https://doi.org/10.3103/s1068366618020034>; <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85046627089&partnerID=MN8TOARS>). *Здобувачем розроблено методику визначення оптимальної концентрації суміші з СФС на базовій*

оливі I-40A за реологічними та триботехнічними показниками при збільшенні максимального напруження зсуву.

У іноземних спеціалізованих виданнях:

8. Методика підвищення надійності трибосполучень при використанні наномодифікаторів в умовах тривалої експлуатації олив / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Савчук А.М., Міланенко О.А., Туриця Ю.О., Куш О.І. // *Systems and means of motor transport. Selected problems. Monografia.* – Politechnika Rzeszowska. - № 5 (Seria: Transport). – 2014. – Р. 239-246 (ISBN: 978-83-7199-950-X). *Здобувачем розроблено методику оцінки триботехнічних показників при модифікуванні мастильних середовищ наномодифікаторами у вигляді фулеренів з урахуванням їх концентрації.*

9. Моніторинг стану поверхневих шарів трибосполучень в умовах тривалої експлуатації олив / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Савчук А.М., Міланенко О.А., Туриця Ю.О., Глухонець А.О. // *Systems and means of motor transport. Selected problems. Monografia.* – Politechnika Rzeszowska. - № 6 (Seria: Transport). – 2015. – Р. 227-232 (ISBN: 978-83-7934-007-1). *Здобувачем проведено триботехнічні дослідження стану хімічно-модифікованих граничних шарів ХМГШ відпрацьованих мастильних середовищ.*

10. Вплив активної поверхні металу на полімеризацію вуглеводневих компонентів оливи та фулерену C60 / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Савчук А.М., Туриця Ю.О., Міланенко О.А. // *Systems and means of motor transport. Selected problems. Monografia.* - Politechnika Rzeszowska. - №14 (Seria: Transport). – 2018. - Р.47-52 (ISBN: 978-83-7934-230-3). *Здобувачем проаналізовано стан активованої поверхні при використанні хімічних компонентів мастильного середовища у вигляді фулеренів.*

За монографіями:

11. Мастильна дія олив в умовах еластогідродинамічного мащення / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А. // *Монографія.* – К.: Укривтордор, 2009. - 184с (ISBN: 978-966-2945-11-9). *Здобувачем проаналізовано та обґрунтовано методики стендових та експлуатаційних випробувань модифікованих олив - авіаційної МС-8п, моторної оливи Ультрагаз, моторно-трансмісійної оливи ЄМТ-8 (Розділ 5).*

12. Триботехнічні характеристики мастильних матеріалів в умовах експлуатації машин і механізмів / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Міланенко О.А., Савчук А.М., Туриця Ю.О. // *Монографія.* – К.: НТУ, 2016. -121с (ISBN: 978-966-632-259-6). *Здобувачем розроблено комплексну методику підвищення ефективності мащення та зносостійкості шляхом модифікування (легування) мастильних середовищ для неконформних вузлів тертя (Розділ 3) та конформних вузлів, що працюють в нестационарних умовах тертя (Розділ 4).*

13. Підвищення надійності транспортних засобів шляхом застосування модифікаторів тертя / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., Білякович О.М., Савчук А.М., Туриця Ю.О. // *Монографія.* – К.: НТУ, 2017. - 104с (ISBN: 978-966-632-281-7). *Здобувачем розроблено методику та проаналізовані результати фрактографічного та триботехнічного дослідження якісного і кількісного хімічного складу компонентів фулереноподібних структур для конформних вузлів, що працювали в нестационарних умовах тертя.*

У фахових спеціалізованих виданнях:

14. Підвищення довговічності трибоспряжень з урахуванням впливу на контактні поверхні сучасних наномодифікаторів / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., Савчук А.М., Білякович О.М., Лізанець В.І. // *Вісник Національного транспортного університету.* - К.: НТУ. - Випуск 26 (Ч.2). – 2012. – С. 17–22 (http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/26_2_2013/017-022.pdf). *Здобувачем проведено дослідження товщини мастильного шару та лінійного зносу роликів при модифікуванні оливи Ультрагаз - фулеренами (СФС) різної концентрації в нестационарних умовах тертя кочення з проковзуванням.*

15. Дослідження антифрикційних властивостей трансмісійної оливи в умовах динамічних навантажень / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., Білякович О.М., Савчук А.М., Туриця Ю.О., Куш О.І. // *Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник.* – К.: НТУ. – Випуск 29. - 2014. – С. 106-111 (http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/29_1_tech_2014/106-111.pdf). *Здобувачем встановлено закономірності зміни негідродинамічної складової мастильного*

шару на антифрикційні властивості модифікованих мастильних середовищ в нестационарних умовах тертя.

16. Реологічні складові товщини ЕГД мастильного шару / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., Білякович О.М., Савчук А.М., Туриця Ю.О., Лізанець В.І. // Управління проектами, системний аналіз і логістика. Науковий журнал. - К.: НТУ. - Випуск №13. – 2014. – С. 51-58 (http://publications.ntu.edu.ua/upravl_progekt/2014_13_tech/049.pdf). *Здобувачем розроблено методика оцінки реологічної складової товщини мастильного шару для неконформних вузлів тертя.*

17. Вплив навантаження на антифрикційні та реологічні властивості оливи у контакті / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Савчук А.М., Туриця Ю.О., Куш О.І., Міланенко О.А. // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник. – К.: НТУ. – Випуск 30. - 2014. – С. 103-110 (http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/30_1_tech_2014/103-110.pdf). *Здобувачем встановлено закономірності зміни негідродинамічної складової товщини мастильного шару при утворенні самогенеруючих органічних плівок СОП в нестационарних умовах тертя при збільшенні навантаження.*

18. Кінетика зміни товщини змащувального шару при напрацюванні / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Савчук А.М., Міланенко О.А., Туриця Ю.О., Куш О.І. // Проблеми трибології. Міжнародний науковий журнал. - Випуск №2. – 2015. – С. 90-94 (<https://tribology.khnu.km.ua/index.php/ProbTrib/article/view/435>). *Здобувачем встановлено закономірності зміни товщини мастильного шару модифікованих оливи в нестационарному режимі тертя.*

19. Вплив контактного навантаження на мікротвердість приповерхневих шарів досліджуваних матеріалів / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Савчук А.М., Міланенко О.А., Куш О.І., Туриця Ю.О. // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник. – К.: НТУ. – Випуск 2 (32). - 2015. – С. 116-123 (http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/32_2_econ_2015/116-123.pdf). *Здобувачем проаналізовано вплив максимальних контактних напружень на мікротвердість поверхонь тертя при збільшенні контактного навантаження в нестационарному режимі тертя.*

20. Методика оцінки зносостійкості трибосполучень в залежності від тривалості експлуатації оливи / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Савчук А.М., Міланенко О.А., Туриця Ю.О., Куш О.І. // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні, Львів. - № 822. – 2015. – С. 1 – 6 (<https://science.lpnu.ua/uk/sppo/vsi-vypusky/volume-822-2015/metodyka-ocinky-znosostiykosti-trybospoluchen-v-zalezhnosti-vid>). *Здобувачем проаналізовано лінійний знос контактних поверхонь, що змащувалися модифікованими олівами.*

21. Дослідження ефективності мащення та закономірностей формування гідродинамічної складової товщини мастильного шару в контакті / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Міланенко О.А., Савчук А.М., Туриця Ю.О., Руденко О.В. // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник. – К.: НТУ. – Випуск 1 (34). - 2016. – С. 165-170 (http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/34_2016/165-170.pdf). *Здобувачем проаналізована кінетика формування загальної товщини мастильного шару та негідродинамічної складової товщини для модифікованої й штатної оливи в нестационарних умовах тертя.*

22. Оцінка ефективності мащення оливи при дослідженні коефіцієнту тертя за умов частих пусків та зупинок / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Савчук А.М., Туриця Ю.О., Міланенко О.А. // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник. – К.: НТУ. – Випуск 2 (35). - 2016. – С. 58-62 (http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/35_2016/058-062.pdf). *Здобувачем проведено антифрикційні дослідження модифікованої й штатної оливи щодо встановлення їх відмінностей.*

23. Реологічні особливості моторних оливи в період прогрівання двигуна / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., Білякович О.М., Туриця Ю.О., Савчук А.М. // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник. – К.: НТУ. - Випуск №1 (43). – 2019. – С. 55-65 (<https://doi.org/10.33744/2308-6645-2019-1-43-055-065>). *Здобувачем розроблено методика оцінки реологічних властивостей модифікованих оливи в нестационарних умовах тертя в період прогрівання двигуна.*

24. Вплив температури навколишнього середовища на властивості моторних оливо / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., Білякович О.М., Савчук А.М., Туриця Ю.О. // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник. – К.: НТУ. - Випуск №1 (46). - 2020. – С. 102-112

(<https://doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-102-112>, <http://publications.ntu.edu.ua/visnyk/46/102.pdf>). *Здобувачем проаналізовано взаємозв'язок між об'ємною температурою оливи та локальною температурою в зоні мікро-ЕГД контакту в нестационарних умовах тертя кочення з проковзуванням.*

25. Influence of filter elements on the operation of tribomechanical systems / Dmitrichenko M.F., Savchuk A.N., Turitsa A.A., Milanenko A.A. // Problems of Tribology. – Vol. 26. - №3(101). - 2021. – P. 56-62 (<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-101-3-56-62>). *Здобувачем встановлено механізм формування товщини мастильного шару та визначена динаміка зношування елементів трибоспряження залежно від матеріалу контактних поверхонь до і після фільтрації досліджених модифікованих оливо.*

26. Influence of temperature on the dynamics of formation of granic sleeps and connected elevation dynamics in sliding conditions / Dmitrichenko M.F., Savchuk A.N., Turitsa A.A., Milanenko A.A., Kosenko M. // Problems of Tribology. – Vol. 27. - №3(105). - 2022. – P. 76-81 (<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2022-105-3-76-81>). *Здобувачем розроблено методику оцінки температурного поля локальних температур на динаміку формування граничних шарів та зносостійкість контактних поверхонь в нестационарних умовах тертя ковзання.*

27. Особливості випробування моторних оливо класу LowSaps для потужних дизельних двигунів EURO 6 / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., Савчук А.М., Глухонець А.О., Туриця Ю.О., Куш О.І., Косенко М.І. // Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник. – К.: НТУ. - Випуск №3 (53). - 2022. – С. 138-145 (<https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-3-53-138-145>). *Здобувачем розроблено методику оцінки якісного й кількісного хімічного складу компонентів у вигляді хімічно-активних речовин (ХАР) на протизношувальні й антифрикційні властивості малозольних мастильних середовищ (LowSAPS), які застосовуються в двигунах EURO 6.*

28. Influence of microgeometry in the point contact zone of rest friction on fatigue life for friction bearing units / Milanenko A. // Problems of Tribology. – Vol. 28. - №1(107). - 2023. – P. 6-12 (<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-107-1-6-12>). *Здобувачем встановлено контактнo-механічні аспекти впливу мікрогеометрії на втомну довговічність підшипникових вузлів тертя.*

29. Influence of lubricant material in the point contact zone of rolling friction on fatigue life for friction bearing units / Milanenko A., Savchuk A., Turitsa Y. // Problems of Tribology. – Vol. 28. - №2(108). - 2023. – P. 15-19 (<https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-108-2-15-19>). *Здобувачем розроблено методику оцінки впливу реологічних властивостей на триботехнічні показники підшипникових вузлів тертя.*

За матеріалами і тезами конференцій:

30. Effect of Load on the Wear Mechanism Became / Dmitrichenko N., Bilyakovich O., Savchuk A., Turitsia Yu., Milanenko O. // International Scientific Conference: «Cluster-Casting-Future», (Жешув-Свильча, Польща, 09-12.09.2014). – Rzeszow: KOM-CAST, 2014 – P. 153-158 ([International Scientific Conference "Cluster - Casting - Future" \(gbv.de\)](https://www.gbv.de)). *Здобувачем зроблено оцінку мікротвердості та лінійного зносу випереджаючого та відстаючого роликів в нестационарних умовах тертя кочення з проковзуванням.*

31. Підвищення триботехнічних характеристик мастильних матеріалів за рахунок забезпечення контролю оптимального підбору й концентрації сучасних модифікаторів тертя для вітчизняних гусеничних машин / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., Савчук А.М., Туриця Ю.О. // LXXII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. – К.: НТУ. - 2016. - С. 5-6 ([72-a 2016 рік тези доповідей.pdf - Google Диск](https://www.google.com)). *Здобувачем розроблено методику оптимального вибору сучасних модифікаторів тертя для універсальних оливо, що використовуються у гібридній техніці.*

32. Визначення впливу трибологічних процесів на міцнісні характеристики приповерхневих шарів контактних поверхонь / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., Туриця Ю.О. // LXXII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. – К.: НТУ. - 2016. - С. 7 ([72-a 2016 рік тези доповідей.pdf - Google Диск](https://www.google.com)). *Здобувачем*

узагальнено основні принципи впливу параметрів міцності на триботехнічні властивості вузлів тертя.

33. До питання розробки технології збільшення ресурсу універсальної моторно-трансмісійної оливи / Дмитриченко М.Ф., Білякович О.М., Міланенко О.А., студент Кунинець А.С. // LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету. – К.: НТУ. - 2017. - С. 7 ([73-я 2017 рік тези доповідей.pdf - Google Диск](#)). *Здобувачем розроблено технологію збільшення ресурсу універсальних моторно-трансмісійних оливи шляхом модифікування мастильних середовищ.*

34. Вплив режиму мащення на триботехнічні характеристики пари сталь-бронза / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., аспірант Міняйло К.В., студент Фещенко І.В. // LXXIV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ. – 2018. - С. 5 ([74-а 2018 рік тези доповідей.pdf - Google Диск](#)). *Здобувачем проаналізовано вибіркове перенесення при застосуванні модифікованої оливи, а також досліджувано утворення СОП.*

35. Формування товщини мастильного шару універсальними моторно-трансмісійними оливами / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., студент Фещенко І.В. // LXXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ. – 2019. - С. 6 ([75-а 2019 рік тези доповідей.pdf - Google Диск](#)). *Здобувачем проаналізовано закономірності зміни товщини мастильного шару при модифікуванні поверхонь тертя універсальними моторно-трансмісійними оливами.*

36. Вплив терміну експлуатації оливи на ефективність мащення в контактi. / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., студент Петрекуци В.О. // LXXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ. – 2020. – С. 6 ([76-а 2020 рік тези.pdf - Google Диск](#)). *Здобувачем проаналізовано вплив терміну експлуатації модифікованих оливи на ефективність мащення в зоні мікро-ЕГД контакту.*

37. Формування товщини мастильного шару в стаціонарних умовах / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., студенти Целік М.С., Макаренко З.Р. // LXXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ. – 2021. – С. 5-6 ([77-а 2021 рік тези конференції.pdf - Google Диск](#)). *Здобувачем обґрунтовані умови формування оптимальної товщини мастильного шару в стаціонарних умовах тертя кочення с частковим проковзуванням.*

38. Особливості випробування моторних оливи класу LowSaps для потужних дизельних двигунів EURO 6 / Міланенко О.А., аспірант Глухонець А.О., студент Каракоша Б.О. // LXXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. - К.: НТУ. – 2021. - С. 13-14 ([77-а 2021 рік тези конференції.pdf - Google Диск](#)). *Здобувачем отримані результати триботехнічних випробувань при застосуванні розробленої двоетапної методики оцінки якісного та кількісного хімічного складу сучасних присадок та модифікаторів тертя в складі низькозольних (LowSaps) моторних оливи для потужних дизельних двигунів EURO 6.*

39. Оптимізація режиму мащення моторних оливи для дизелів прямого впорскування / Міланенко О.А., Бобро А.М. (Certificate of 12 hours; 0,4 ECTS credits) // Міжнародна конференція: «Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів і машин», (Київ, 16-17.11.2022). – С. 131-135 ([ЗБІРНИК ТЕЗ конференції 16-17 листопада_стор. 99-101.pdf \(chdtu.edu.ua\)](#)). *Здобувачем отримані результати триботехнічних випробувань при застосуванні розробленої двоетапної методики оцінки якісного та кількісного хімічного складу сучасних присадок та модифікаторів тертя в складі модифікованих моторних оливи для дизельних двигунів прямого впорскування, оснащених системою Common Rail.*

40. Механізм зношування контактних поверхонь / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., студенти Лавриненко С.О., Бенчук В.О. // LXXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. - К.: НТУ. – 2023. - С. 7-8 ([79-а конференція НТУ 2023 збірник тез доповідей.pdf - Google Диск](#)).

Здобувачем проаналізовано закономірності механізму зношування пар тертя в нестационарних умовах тертя з частковим проковзуванням та тертя ковзання вузлів ДВЗ.

41. Комплексна методика оцінки впливу мікрогеометрії та мастильного матеріалу в зоні точкового контакту на втомну довговічність в умовах тертя спокою та кочення для підшипникових вузлів тертя / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., аспірант Бобро А.М., студенти Пилипчук І.В., Медвідь О.О. // LXXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. - К.: НТУ. – 2023. - С. 8 ([79-а конференція НТУ 2023 збірник тез доповідей.pdf - Google Диск](#)). *Здобувачем проаналізовано закономірності впливу мікрогеометрії форми контакту та реологічних властивостей мастильних матеріалів в зоні мікро-ЕГД контакту підшипникових вузлів тертя.*

42. Контактно-механічна модель напружено-деформованого стану в локальній зоні ЕГД точкового контакту тертя / Міланенко О.А., Бобро А.М. (Certificate of 6 hours; 0,2 ECTS credits) // Всеукраїнська наукова конференція здобувачів освіти і молодих учених «ВІДБУДОВА ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ». – С. 69 (21 червня 2023р., Київ, [2023_Збірник тез доповідей конференції молодих вчених.pdf - Google Диск](#)). *Здобувачем встановлено місцезоположення локалізації концентратора дотичних напружень в зоні ЕГД точкового контакту тертя.*

43. The Conceptual Model for Increasing Wear Resistance and Lubrication Efficiency for Non-conformal and Conformal Friction Units from the Standpoint of Micro-EHD Theory / Dmitrichenko M., Milanenko O., Savchuk A., Turytsia Y., Pavlovskiy M., Kushch O., Bobro A. // Міжнародна конференція: TRANSBALTICA XIV: Transportation Science and Technology Proceedings of the 14th International Conference TRANSBALTICA, (Вересень 14-15, 2023, Вільнюс, Литва, https://doi.org/10.1007/978-3-031-52652-7_16). *Здобувачем запропоновано новий критеріальний підхід підвищення ефективності мащення та зносостійкості вузлів тертя, що працюють в екстремальних умовах роботи, на основі модифікування фізико-хімічного складу мастильних середовищ.*

44. Modeling of the assessment of the stress-strain state when the microgeometry of the actual area of the local contact zone changes under the conditions of EHL friction / Reznik N., Milanenko O., Bohdanov I. // Міжнародна конференція: The 4th International Conference on Business and Technology (ICBT'2023), (Листопад 1-2, 2023, Стамбул, Туреччина, <https://drive.google.com/file/d/1bVzbRUpeFIPYc94obr0bZy0shxqWNler/view?usp=sharing>).

Здобувачем побудовано математичну модель напружено-деформованого фрикційного контакту, яка розкриває механізми зниження контактних напружень і деформацій у підповерхневій зоні з урахуванням форми контакту.

За патентами та свідоцтвами:

45. Патент 71001, Україна, 7С10М159/16, 159/24, 163/00. Моторно-трансмісійна олива / Міланенко О.А., Рудик Е.Г. та інші; заявл. 12.11.2001; опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11. – 6с. *Здобувачем проаналізовано результати стендових й експлуатаційних випробувань модифікованої оливи ЄМТ-8 та розроблені рекомендації щодо виготовлення відповідної оливи згідно комплексної методики підвищення зносостійкості й ефективності мащення.*

46. Свідоцтво 108697. Методика оцінки ефективності мастильної дії модифікованих моторних олив в умовах примусового збільшення температури на пусковому етапі роботи двигунів внутрішнього згорання / Дмитриченко М.Ф., Савчук А.М., Міланенко О.А., Туриця Ю.О.; заявник та власник Національний транспортний університет. – № с202106840, заяв. 27.09.2021; зареєстровано 19.10.2021. – 2с. *Здобувачем розроблено методику оцінки ефективності мащення та зносостійкості в умовах низькотемпературного запуску (примусового збільшення температури на пусковому етапі) ДВЗ.*

47. Свідоцтво 115969. Вплив температури навколишнього середовища на властивості моторних олив / Дмитриченко М.Ф., Міланенко О.А., Білякович О.М., Савчук А.М., Туриця Ю.О., Косенко М.І.; заявник та власник Національний транспортний університет. – № с202204040, заяв. 08.09.2022; зареєстровано 19.01.2023. – 2с. *Здобувачем встановлено взаємозв'язок між об'ємною температурою оливи та локальною температурою в зоні мікро-ЕГД контакту в нестационарних умовах тертя ковзання.*

48. Свідоцтво 117431. Методика розрахунку реологічних і триботехнічних характеристик мастильних матеріалів з урахуванням зміни максимального тиску й температури в зоні точкового контакту для підшипникових вузлів тертя / Дмитриченко М.Ф, Міланенко О.А., Туриця Ю.О, Савчук А.М., Светазаров О.М.; заявник та власник Національний транспортний університет. – № заяв.: с202300915; зареєстровано 22.03.2023. *Здобувачем розроблено методику розрахунку реологічних і триботехнічних характеристик мастильних матеріалів з урахуванням зміни максимального тиску й температури в зоні точкового контакту для підшипникових вузлів тертя.*

49. Свідоцтво 117432. Методика розрахунку максимальних контактних напружень, деформацій, величини й ортогональне положення в підповерхневій зоні максимального дотичного напруження з урахуванням впливу мікрогеометрії в зоні точкового контакту для підшипникових вузлів тертя / Дмитриченко М.Ф, Міланенко О.А., Туриця Ю.О, Савчук А.М., Светазаров О.М.; заявник та власник Національний транспортний університет. – № заяв.: с202300917; зареєстровано 22.03.2023. *Здобувачем розроблено методику розрахунку максимальних контактних напружень, деформацій, положення локалізації максимального дотичного напруження в підповерхневій зоні мікро-ЕГД контакту з урахуванням впливу мікрогеометрії для підшипникових вузлів тертя.*

50. Свідоцтво 117433. Методика розрахунку основних триботехнічних характеристик в зоні лінійного контакту тертя між верхнім компресійним кільцем та внутрішньою стінкою гільзи циліндру двигуна внутрішнього згорання / Дмитриченко М.Ф, Міланенко О.А., Туриця Ю.О, Савчук А.М., Светазаров О.М.; заявник та власник Національний транспортний університет. – № заяв.: с202300919; зареєстровано 22.03.2023. *Здобувачем розроблено методику розрахунку основних триботехнічних характеристик в зоні лінійного контакту тертя між верхнім компресійним кільцем та внутрішньою стінкою гільзи циліндру двигуна внутрішнього згорання.*

АНОТАЦІЯ

Міланенко О.А. Науково-прикладні засади підвищення ефективності мащення і зносостійкості вузлів тертя в екстремальних умовах роботи. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

В дисертаційній роботі вирішується науково-технічна проблема реалізації стійкого мащення в умовах змішаного тертя та створення в зоні фрикційного контакту неконформних і конформних вузлів тертя модифікованих шарів з оптимальною мастильною здатністю та структурною пристосовуваністю до екстремальних умов роботи, спрямоване на підвищення ефективності мащення та зносостійкості пар тертя за контактнo-механічними, реологічними і фізико-хімічними аспектами.

Запропоновано концепцію методології підвищення зносостійкості і ефективності мащення для вузлів з позиції змішаного режиму тертя. Встановленні необхідні умови розриву мікро-ЕГД мастильного шару, що досягається комплексом заходів щодо поліпшення триботехнічних показників за наступними критеріями: реалізації стійкого мащення за критерієм режиму мащення, підбором оптимальної форми контакту за критерієм еліптичності; збільшенню долі гідродинамічного тиску мастильних шарів відносно контактного тиску на виступах мікронерівностей за критерієм тиску; врахуванню реологічних параметрів щодо зміни п'єзокоефіцієнту в'язкості при збільшенні тиску за реологічним критерієм; оцінки появи пластично-деформованого стану за критерієм пластичності; модифікуванню і корегуванню якісного та кількісного хімічного складу компонентів в мастильному середовищі за рахунок збільшення середньої локальної температури поверхонь тертя за температурним критерієм.

Розроблено двоетапну методику підвищення ефективності мащення і зносостійкості пар тертя для підшипникових вузлів та деталей ДВЗ щодо встановлення оптимального якісного та кількісного хімічного складу мастильних середовищ (сумішей та модифікованих олів) із досліджуваними хімічно-активними компонентами.

Визначені необхідні умови реалізації стійкого мікро-ЕГД мащення у підшипникових вузлах тертя в зоні мікро-ЕГД контакту для більшості моторних, трансмісійних і універсальних олиव.

Для забезпечення реалізації стійкого мащення в умовах змішаного тертя підшипникових вузлів та вузлів ДВЗ, що працюють в нестационарних умовах тертя при низькотемпературному запуску, визначена технологія модифікування щодо виявлених модифікованих сумішей та олив з оптимальним якісним та кількісним складом хімічних компонентів, що забезпечують структурну пристосовуваність до екстремальних умов роботи.

Встановлена кореляція між температурою в зоні локального контакту і об'ємною температурою модифікованої оливи при збільшенні максимального контактного напруження.

Побудовано математичну модель напружено-деформованого стану за фактичною формою контакту тертя при збільшенні контактної навантаженості та при зміні форми контакту.

Побудовано математичну модель оцінки мінімальної товщини і товщини мастильного шару в центральній зоні мікро-ЕГД контакту для підшипникових вузлів тертя з урахуванням зміни форми контакту та типу мастильного матеріалу, в результаті чого, визначені оптимальні математичні описання відповідних товщин у вигляді емпіричних рівнянь. На її основі, розроблена номограма підбору оптимального мастильного матеріалу за класом в'язкості (динамічної в'язкості) до конкретного підшипника кочення з відповідною формою контакту і з можливістю зворотного вибору кулькового підшипника з оптимальною формою контакту за класом в'язкості мастильного матеріалу.

Побудовано математичну модель оцінки товщини мастильного шару в зоні фрикційного контакту між верхнім компресійним кільцем та гільзою циліндру ДВЗ з урахуванням зміни ходу поршня та типу мастильного матеріалу, в результаті чого, визначені оптимальні математичні описання відповідної товщини у вигляді емпіричного рівняння для вузлів ДВЗ. Проведена оцінка інтенсивності зношування пар тертя в зоні контакту між верхнім компресійним кільцем і гільзою циліндру ДВЗ при зміні ходу поршня та типу мастильного матеріалу.

За результатами кваліфікаційних досліджень, розроблені і впроваджені у виробництво нові модифіковані оливи за позитивними результатами довготривалих стендових та експлуатаційних випробувань.

Ключові слова: еластогідродинамічний (ЕГД) режим мащення, мікро-ЕГД контакт тертя, поверхнево-активна речовина (ПАР), хімічно-активна речовина (ХАР), суміш фулереноподібних структур (СФС), сульфідна група ЕР (Extreme Pressure), присадка дитіофосфату цинку (ДФЦ), сульфідна група (СФ), самогенеруюча органічна плівка (СОП), хімічно-модифікований граничний шар (ХМГШ), циліндро-поршнева група (ЦПГ) двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ), шатунно-поршнева група (ШПГ) ДВЗ, верхня мертва точка (в.м.т.), нижня мертва точка (н.м.т.), електронно-обчислювальна машина (ЕОМ).

ABSTRACT

Milanenko O.A. Scientific and applied principles of increasing the efficiency of lubrication and wear resistance of friction units under extreme operating conditions. - Qualification scientific work on the rights of manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.02.04 "The friction and wear in machines" (13 - Mechanical engineering). - National Transport University, Kyiv, 2024.

The thesis solves the scientific and technical problem of implementing sustainable lubrication in mixed friction conditions and creating modified layers with optimal lubricity and structural adaptability to extreme operating conditions in the friction contact zone of non-conformal and conformal friction units, aimed at improving the lubrication efficiency and wear resistance of friction pairs in terms of contact-mechanical, rheological and physicochemical aspects.

The concept of a methodology for increasing wear resistance and lubrication efficiency for assemblies from the standpoint of a mixed friction mode is proposed. The necessary conditions for the rupture of the micro-EGD of the lubricating layer have been established, which is achieved by a set of measures to improve tribotechnical performance according to the following criteria: realization of stable lubrication according to the criterion of lubrication mode, selection of the optimal microgeometry of the contact shape

according to the actual microgeometry of the contact shape according to the microgeometry criterion; increase in the share of hydrodynamic pressure of lubricating layers relative to the contact pressure on the protrusions of micro-irregularities according to the pressure criterion; taking into account rheological parameters regarding changes in the piezoelectric viscosity coefficient with increasing pressure according to the rheological criterion; assessment of the appearance of a plastic-strain state according to the plasticity criterion; modification and correction of the qualitative and quantitative chemical composition of components in the lubricating medium by increasing the average local temperature of friction surfaces according to the temperature criterion

A two-stage methodology for improving the lubrication efficiency and wear resistance of friction pairs for bearing units and parts of internal combustion engines has been developed to establish the optimal qualitative and quantitative chemical composition of lubricating media (mixtures and modified oils) with the studied reactive components.

The necessary conditions for the realization of stable micro-EGD lubrication in bearing friction units in the micro-EGD contact zone for most motor, transmission and universal oils were determined.

To ensure the realization of stable lubrication in mixed friction conditions of bearing units and internal combustion engine units operating under unsteady friction conditions at low temperature start-up, the modification technology was determined with respect to the identified modified mixtures and oils with optimal qualitative and quantitative composition of chemical components that provide structural adaptability to extreme operating conditions.

The correlation between the temperature in the local contact zone and the volumetric temperature of the modified oil with an increase in the maximum contact stress was established.

A mathematical model of the stress-strain state was constructed based on the actual microgeometry of the friction contact shape with increasing contact load and changing the contact shape.

A mathematical model for estimating the minimum thickness and thickness of the lubricating layer in the micro-EGD point contact zone for friction bearing assemblies was constructed, considering changes in the contact shape and the type of lubricant, because of which the optimal mathematical descriptions of the corresponding thicknesses in the form of empirical equations were determined. On its basis, a nomogram for selecting the optimal lubricant by viscosity class (dynamic viscosity) for a particular rolling bearing with the appropriate microgeometry and with the possibility of reverse selection of a ball bearing with the optimal microgeometry by lubricant viscosity class was constructed.

A mathematical model for estimating the thickness of the lubricating layer in the local contact zone between the upper compression ring and the cylinder liner of an internal combustion engine was constructed, considering changes in the piston stroke and the type of lubricant, because of which the optimal mathematical descriptions of the corresponding thickness were determined in the form of an empirical equation for internal combustion engine components. The intensity of wear of friction pairs in the contact zone between the upper compression ring and the cylinder liner of an internal combustion engine was estimated when the piston stroke and type of lubricant change.

Based on the results of qualification studies, modified oils were developed and introduced into production based on the positive results of long-term bench and operational tests.

Key words: elastohydrodynamic (EHD) lubrication regime, micro-EHD friction contact, surface active agent (SA), chemical active agent (CA), mixture of fullerene-like structures (FFS), EP (Extreme Pressure) sulfide group, zinc dithiophosphate (ZDP) additive, sulfide group (SF), self-generating organic film (SGF), chemically modified boundary layer (CMBS), cylinder-piston group (CPG) of an internal combustion engine (ICE), connecting rod and piston group (CRPG) of an ICE, upper dead center (UDC), lower dead center (UDC), electronic computer (ECM).