

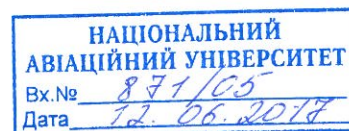
## ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Ауліна Віктора Васильовича, професора кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету на дисертаційну роботу Мікосянчик Оксани Олександрівни на тему "Структурно-енергетичні та реологічні показники мастильного шару в контакті тертя в умовах несталих режимів роботи", подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

**Актуальність теми.** На етапі проектування високонадійних машин і механізмів велике значення мають коректні розрахункові методи прогнозування довговічності деталей машин. В дисертаційній роботі автором запропоновані методи оцінки експлуатаційної пристосованості елементів трибоспряжень, що дозволяють вибирати оптимальне поєднання матеріалів пар тертя, фізико-хімічний склад базових олив та тип присадок і добавок для них з урахуванням умов експлуатації вузлів тертя.

При цьому безумовно актуальним науковим напрямом є аналіз чинників, які обумовлюють нерівномірність розподілу зносу по робочому профілю поверхні зуб'ів зубчастих передач із визначенням закономірностей руйнування контактних поверхонь, залежно від величини проковзування на ділянках контактної поверхні з неоднорідним напружено-деформованим станом тонкого поверхневого шару. В зв'язку з цим розв'язується важливе питання по визначенню триботехнічних факторів, які обумовлюють зміну дотичного напруження, що визначає небезпечний стан приповерхневих шарів матеріалу в широкому діапазоні режимів мащення. На увагу заслуговують запропоновані методика оцінки температурно-механічної стійкості граничних шарів в екстремальних умовах мащення та термо-кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів, які дають можливість надати обґрунтовані



рекомендації щодо вибору матеріалу контактних поверхонь деталей трибоспряжень та мастильних матеріалів і розширити діапазон оптимальної їх роботи за рахунок формування стійких граничних шарів в умовах підвищених температур та високих градієнтів швидкості зсуву.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Національного авіаційного університету та інших організацій, де здобувач був співвиконавцем п'яти держбюджетних тем (№ДЗ/499-2009 (0109U007638), ДБ№67 (0109U002144), ДБ№85 (0110U000124), №789-ДБ12 (0112U002057), №865-ДБ13(0113U000084)). В рамках зазначених робіт здобувачем створена технологія компаундування композицій товарних олив з поліфункціональними присадками та нанодисперсними добавками, розроблені методики оцінки ефективності мастильної дії олив в несталих умовах роботи трибосистеми, проведена оцінка кінетики формування та структури граничних адсорбційних шарів залежно від фізико-хімічних властивостей мастильного матеріалу та механо-фізико-хімічних змін поверхневих і приповерхневих шарів металу, розроблені програмно-апаратний комплекс та методики оцінки для дослідження триботехнічних характеристик трибоелементів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Розроблена термо-кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь деталей на основі структурно-енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи трибосистем, яка включає методику оцінки активаційних характеристик матеріалів їх елементів в областях багатоциклової і малоциклової втоми, його debris-шару. Запропоновано математичну модель оцінки локалізації вектору максимальних дотичних напружень при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного режиму мащення на підставі експериментально встановлених та оціненої методом скінчених елементів змін напружено-деформованого стану поверхонь в результаті появи зон локального підвищеного зносу,

градієнтного розподілу мікротвердості поверхневих шарів металу по глибині. Теоретично і експериментально обґрунтовано механізм прояву процесів схоплювання контактних поверхонь з позицій фазових переходів першого роду в граничних шарах мастильного матеріалу. Виявлено залежність зносостійкості контактних поверхонь від структурно-фазових перетворень у поверхневих шарах металів при терті в умовах кочення з різним ступенем проковзування. Запропонована методика розрахунку інтенсивності зношування елементів трибоспряжень, що працюють в умовах тертя кочення з проковзуванням, яка враховує кінетику зміни антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту та довговічність debris-шару. Встановлено механізми залежності інтенсивності зношування трибоелементів від зміни енергоємності контакту при структурній пристосованості вторинних структур на основі оцінки температурної і механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу і міцності матеріалу контактних поверхонь. Розроблено та апробовано модель оцінки триботехнічних характеристик трибоспряження "верхнє компресійне кільце-гільза циліндра" в залежності від параметрів конструкції двигуна, матеріалів пар тертя, умов роботи і властивостей мастильного матеріалу.

**Загальна характеристика дисертаційної роботи.** Дисертація, яка представлена на розгляд, складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 416 сторінок. Обсяг анотації складає 27 сторінок. Дисертація містить 107 ілюстрацій, 23 таблиці. Список використаних джерел складається із 465 найменувань. Додаток містить 31 сторінку. Обсяг основної частини дисертації становить 298 сторінок.

**Вступ** містить основні дані щодо актуальності роботи, її наукової цінності і практичного значення. Визначено мету і задачі дисертаційної роботи, об'єкт та предмет дослідження, показано особистий внесок здобувача при виконанні роботи.

**У першому розділі** наведені результати аналізу вітчизняних і

закордонних літературних джерел з сучасного стану наукової проблеми, яку досліджує автор у дисертації. Розглянуто один з напрямків підвищення надійності сучасних машин і механізмів розробкою і створенням таких режимів їх експлуатації, при яких забезпечується домінуючий прояв умов зовнішнього тертя. Зазначається, що комплексний підхід до вирішення завдань в цьому напрямку повинен полягати в аналізі та врахуванні багатьох факторів, кінетика зміни яких зумовлює мінливість антифрикційних та протизношувальних властивостей контакту. Виявлено, що при оцінці працездатності зубчастої передачі важливо знати не тільки інтегральну величину зносу зуб'ів, але і встановити закономірності зміни таких параметрів, як питома швидкості ковзання і питома роботи тертя, оскільки вони здійснюють істотний вплив на зміну геометричної форми профілів зуб'ів в процесі експлуатації. В умовах переходу трибосистеми в критичні режими роботи, до яких відносяться підвищені навантаження, високі швидкості ковзання, нестационарні умови роботи (режим "пуск-зупинка"), виникає ймовірність порушення цілісності мастильного шару. При цьому в контакті можливий перехід від гідро- і еластогідродинамічних режимів до граничного режиму мащення. В таких умовах значно порушується тепловідведення із зони тертя, в контакті виникають локальні ділянки з різким підвищенням температури. Автором визначено, що підвищення довговічності і міжремонтного ресурсу деталей машин і механізмів може бути отримано шляхом застосування нових матеріалів, покриттів і обробок, що поліпшують триботехнічні характеристики контактних поверхонь і сприяють підвищенню їх зносостійкості.

**У другому розділі** розглянуті загальні аспекти вибору методів і методик трибологічних досліджень та моделювання процесів тертя. Для оцінки триботехнічних характеристик контакту автором створено програмно-апаратний комплекс, до складу якого входить установка тертя, електронний блок, програмне забезпечення "Тертя", встановлене на ПК типу IBM PC, що дозволяє проведення випробувань в умовах тертя кочення, ковзання та

реверсу. В процесі отримання достовірних результатів досліджень елементів трибоспряжень, автором запропоновано створення: комплексної методики моделювання трибологічних процесів на основі емпіричних залежностей та спеціального програмного забезпечення, що дозволяє розробляти адекватні заходи в управлінні процесами, які протікають в фрикційному контакті трибосистем; методика визначення питомої роботи тертя в контакті при нестационарних умовах навантаження; методика оцінки температурно-механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу в критичних режимах тертя; методика оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь при несталій роботі пар тертя; методика розрахунку товщини мастильного шару в трибоспряженні "верхнє компресійне кільце-гільза циліндра" двигуна внутрішнього згоряння. Проведено вибір трибологічних інваріантів, які характеризують особливості фізико-механічних процесів, що проявляються в умовах тертя. Побудована феноменологічна імовірнісна модель зношування поверхневого шару в несталих режимах, яка ґрунтується на прояві випадкового процесу Маркова з дискретним часом і станами.

У третьому розділі автором розглядаються питання взаємозв'язку змащувальних, реологічних та антифрикційних характеристик мастильних матеріалів. Представлені результати експериментальних досліджень припрацювання контактних поверхонь в нестационарних умовах роботи для різних типів змащувальних матеріалів. Доведено, що основним критерієм ефективності антифрикційних властивостей є здатність оливи формувати хемосорбційні плівки з низьким опором зсуву на активованій поверхні металу. Виявлено, що із збільшенням температури до 70°C товщина шару полімерів тертя зменшується на 20%, проте напруження зсуву оливного шару залишається стабільною. Автором експериментально встановлено, що під час стрімкого зростання градієнту швидкості зсуву, за наявності проковзування в контакті, спостерігається частково дезорієнтація граничних адсорбованих шарів мастильного матеріалу зі зниженням ефективної в'язкості. Встановлено

чітку залежність ефективної в'язкості від градієнту швидкості зсуву та набуття мастильним матеріалом неньютонівських властивостей. Доведено, що збільшення ступеня проковзування з 10 до 40% обумовлює створення високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів та підвищення активації контактних поверхонь. Це дає можливість створити передумови для формування на поверхнях тертя хемосорбційних плівок з впорядкованими твердокристалічними ретикулярними структурами шаруватого типу.

**У четвертому розділі** розв'язуються завдання, пов'язані з визначенням механізму утворення вторинних структур при структурній пристосованості трибоелементів в процесі експлуатації трибосистем. Автором встановлено, що процеси самоорганізації дисипативних структур можуть відбуватися за різними напрямками. Зазначено, що визначення домінуючого з них представляє певні труднощі, особливо при несталих режимах роботи трибосистем. Визначено, що при мінімальному проковзуванні для граничних шарів з слабкими фізичними Ван-дер-Ваальсовими силами взаємодії, напруження зсуву аналогічні процесам у об'ємній фазі оливи і характерні для ньютонівських рідин, але при збільшенні проковзування до 10...40% сприяє формуванню граничних екрануючих хемосорбційних плівок з властивостями неньютонівських рідин. Експериментально доведено, що в період запуску циклічна зміна питомої роботи тертя обумовлена структурною пристосовуваністю граничних змащувальних шарів, найбільший ступінь руйнування яких встановлено при роботі в умовах стаціонарного режиму з проковзуванням 3 і 40%, що призводить до металевого контакту пар тертя під час зупинки. Встановлено незначний приріст питомої роботи тертя в період пуску при чистому коченні для сталей 40X та ШХ-15, в той час при наявності проковзування енергоємність контакту різко зростає. Визначено, що структурні відмінності сталей 40X і ШХ-15 після загартування і відпускання істотно впливають на зносостійкість металу.

**У п'ятому розділі** запропоновані критерії оцінки зносостійкості контактних поверхонь в динамічних умовах навантаження. Автором

представлено практичну реалізацію методики прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів, що утворюється в процесі експлуатації елементів трибосистем. Сутність методики полягає у визначенні усередненого значення мікротвердості приповерхневих шарів матеріалу в розглянутій локальній області деформованого при терті об'єму контактних поверхонь глибиною до 80 мкм. В роботі встановлено кореляційний взаємозв'язок між зносом елементів трибосистем і значеннями мікротвердості як матеріалу їх поверхневих шарів трибосистем, так і градієнтним розподілом. Це дозволило розробити практичні рекомендації по режимам технологічної та експлуатаційної модифікації елементів вузлів тертя. Автором показана доцільність вибору методик розрахунку підвищення температури в фрикційному контакті в умовах гідродинамічного, еластогідродинамічного та граничного режимів мащення. Наведені результати впливу різного ступеня проковзування на структурно-фазові перетворення в приповерхневих шарах матеріалу зразків і деталей при терті.

**У шостому розділі** наведено результати моделювання процесів зношування пар тертя в несталіх умовах роботи. Автором розроблена термокінетична модель оцінки довговічності спряжених поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів фрикційного контакту. Дано оцінку активаційних параметрів області багатоциклової втоми і дебрис-шару. Розглянуто розроблену методику оцінки триботехнічних властивостей контакту "верхнє компресійне кільце-гільза циліндра" двигуна внутрішнього згоряння та методику оцінки величини максимальних дотичних напружень та глибини їх залягання в поверхневих шарах зразків і деталей залежно від триботехнічних характеристик контакту.

**У сьомому розділі** розглянуто розв'язання завдання підвищення довговічності контактних поверхонь деталей трибоспряжень шляхом застосування технологій поверхневого зміцнення та модифікування їх поверхневих шарів. Наведено результати аналізу триботехнічних характеристик самофлюсуючих покриттів в умовах тертя кочення з

ковзанням при нестационарному навантаженні трибоспряжень. Встановлено закономірності впливу товщини покриття самофлюсуючого порошку на триботехнічні властивості контакту і механізм структурної пристосованості з позиції активації поверхневих шарів деталей. Визначено триботехнічні характеристики чавуну з покриттям зі сталі в мастильному середовищі в умовах несталих режимів тертя. Наведена оцінка працездатності покриттів з позицій змащувальних, реологічних та антифрикційних властивостей контакту. Проаналізовано вплив кінетики зміни питомої роботи тертя на протизношувальні властивості покриття при структурній пристосованості в умовах динамічного навантаження. Апробована методика оцінки температурної і механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу на контактних поверхнях, зміцнених за методом термоциклічного іонного азотування.

**У висновках** викладені найбільш важливі наукові і практичні результати, одержані в дисертаційній роботі.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна**  
Достовірність отриманих результатів та висновків з них підтверджені порівнянням результатів теоретичних розрахунків з отриманими експериментальними даними. Висунуті у дисертації наукові положення та отримані висновки і рекомендації у достатній мірі обґрунтовані. Автором застосовані сучасні методи та методики досліджень і обробки даних. Лабораторні та стендові випробування виконувались на основі теорії моделювання та математичного планування експерименту. Теоретичні дослідження виконані на підставі фундаментальних положень трибології, термодинамічної теорії прогнозування та руйнування твердих тіл, концепції самоорганізації та зносостійкості трибосистем, структурно-енергетичної пристосованості матеріалів, нерівноважної кінетики фазових переходів першого роду, положень трибохімії і реології мастильного шару.



**До найвагоміших науково-практичних результатів, отриманих в роботі, слід віднести:**

– розроблено і впроваджено в практику експериментальних випробувань програмно-апаратний комплекс оцінки триботехнічних характеристик фрикційного контакту;

– розроблено термо-кінетичну модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи трибосистем;

– розроблено методика розрахунку інтенсивності зношування елементів трибоспряжень, що працюють в умовах тертя кочення з проковзуванням, яка враховує кінетику зміни антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту спряжених поверхонь деталей та довговічність debris-шару;

– розроблено математичну модель оцінки локалізації вектору максимальних дотичних напружень при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного режиму мащення, на підставі експериментально встановленої зміни та оцінок напружено-деформованого стану поверхневих шарів методом скінченних елементів, в результаті появи зон локального підвищеного зносу та градієнтного розподілу мікротвердості по їх глибині.

**Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи у опублікованих наукових роботах.**

За темою дисертаційної роботи надруковано 50 наукових праць, з них 27 у фахових виданнях переліку МОН України, 5 наукових праць в спеціалізованих іноземних виданнях, 13 матеріалів та тез конференцій, 4 патенти України на винахід та 1 свідоцтво на методика розрахунку триботехнічних параметрів. Всі вимоги положень ДАК МОН України щодо наукових публікацій витримано. Зміст автореферату достатньо повно відображує зміст і результати дисертаційної роботи та не містить в собі результати кандидатської дисертації автора.

## **Зауваження по дисертаційній роботі, автореферату та їх оформленню.**

1. Розробка методів оцінки ефективності триботехнічних характеристик контакту спряжених поверхонь зразків деталей в нестационарних умовах тертя є перспективним напрямком, особливо при визначенні діапазону працездатності їх матеріалів і мастильного середовища, але в дисертаційній роботі не уточнюється, які саме параметри визначають діапазон працездатності.

2. Розглядаючи питання, пов'язані з оцінкою працездатності зубчастих передач, автор не уточнює про які передачі йде мова – з евольвентним зачепленням, передачі Новікова, гіпоїдні чи інші.

3. В підпункті 2.5.1 наведено розрахунок товщини мастильного шару між першим компресійним кільцем та гільзою циліндра, однак відсутнє пояснення на основі яких експериментальних або теоретичних результатах побудована ця методика.

4. Граничні шари фізичної природи, сформовані на контактних поверхнях зразків і деталей з проковзуванням 3%, характеризуються ідентичністю реологічних властивостей з об'ємною рідкою фазою мастильного матеріалу, але не зовсім зрозуміло на основі чого здійснюється це твердження, адже граничні структурні утворення відносяться до класу твердокристалічних.

5. В роботі використовуються різні мастильні матеріали за фізико-хімічними та фізико-механічними властивостями, однак не наводяться визначальні чинники, які могли б обґрунтувати вибір асортименту мастильних матеріалів.

6. Відсутня аргументація відносно вибору матеріалів контактних поверхонь зразків та деталей зі сталей ШХ-15 і 40Х, а також такої комбінації – підкладка модифікований чавун СЧ30 та покриття 30ХГСА, адже використання чавуну для зубчастих передач не має широкого застосування.

7. На стор. 222 стверджується, що "...висока мікротвердість приповерхневих шарів формує концентратор напружень [29], який знижує зносостійкість контактних поверхонь шляхом відшаровування крихких вторинних структур (рис. 5.8)". При цьому механізм формування концентратора напруження не розкрито, хоча і приводиться посилання на літературне джерело.

8. На стор. 231 автор стверджує «...ми вважаємо, що локальне підвищення зносу в центральній зоні контакту поверхонь є прямим наслідком одночасного впливу напружень і максимальних температур», але безпосереднього вимірювання температури по довжині контакту, виходячи з поданих матеріалів, не проводилось.

9. В параграфі 6.2, при розгляді питання про протизношувальні характеристики фрикційного контакту "компресійне кільце-гільза циліндра" зовсім не уточнюється який вид зносу розглядається.

10. Порядок деяких висновків наукових та практичних результатів роботи слід було узгодити з переліком сформульованих завдань, наприклад, перший висновок відповідає другому завданню.

11. Автореферат дисертаційної роботи дещо інформативно перевантажено, а ілюстративний матеріал потребує більш чіткого відображення для ефективного сприйняття сутності виявлених теоретично та експериментально закономірностей досліджуваних процесів.

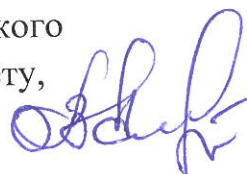
**Загальний висновок.** Дисертаційна робота Мікосянчик Оксани Олександрівни на тему "Структурно-енергетичні та реологічні показники мастильного шару в контакті тертя в умовах несталих режимів роботи" є закінченою науково-дослідною роботою, в якій отримані нові, науково-обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, які вносять вагомий внесок в розвиток науки про тертя та зношування та розкривають завдання вирішення важливої науково-прикладної проблеми вибору матеріалів триботехнічного призначення з урахуванням структурної пристосованості при терті на основі оцінки протизношувальних властивостей дисипативних

структур.

Напряом проведеного дослідження відповідає паспорту спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах. Викладене дозволяє стверджувати, що дисертаційна робота Мікосянчик О.О. за представленими теоретичними і практичними результатами є актуальною, відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій згідно з пп. 9,10,12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Мікосянчик Оксана Олександрівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри експлуатації та  
ремонту машин Центральноукраїнського  
національного технічного університету,  
м. Кропивницький



В.В. Аулін

Підпис офіційного опонента, проф. Ауліна В.В. засвідчую

проректор з наукової роботи

О.М. Левченко

